

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อ
ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

Preparation of CdTe Thin Films by Close-Spaced
Sublimation for Solar Cell Applications

โดย

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

นายณัฐพร พรหมรส

RCH
TA
418.4
.T45
ก 453

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....108249
วัน,เดือน,ปี.....18 ส.ย. 2553

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง



| | | |
|------------------|---|-----------|
| ชื่อโครงการวิจัย | การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระบะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็น เซลล์แสงอาทิตย์ | |
| โดย | นายฐิตินัย | แก้วแดง |
| | นางงามนิตย์ | วงษ์เจริญ |
| | นางทิพรรัตน์ | วงษ์เจริญ |
| | นายณัฐพร | พรหมรต |
| ปีงบประมาณ | 2551 | |

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ให้เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดในระบะประชิดภายในห้องสุญญากาศความดันต่ำระดับ 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์ที่อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกเท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์และมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) ซึ่งมีค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สูงสุด มีการศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความต้านทานแผ่น ความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และมีการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ ได้ทำการวัดลักษณะเฉพาะ กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น

| | | |
|----------------------|--|-------------|
| Project Title | Preparation of CdTe Thin Films by Close-Spaced Sublimation for Solar Cell Applications | |
| Name | Mrs. Ngamnit | Wongcharoen |
| | Mr. Thitinai | Gaewdang |
| | Mrs. Tiparatana | Wongchareon |
| | Mr. Nathaporn | Promros |
| Year | 2008 | |

ABSTRACT

In this research, CdTe thin films have been deposited by close-spaced sublimation (CSS) method on glass substrate in reaction chamber having a low pressure about 2.0×10^{-2} mbar. Source temperature was 550 °C and glass substrate temperatures were 375, 400, 425, 450 and 475 °C with source-substrate spacers 4, 6 and 8 mm. From XRD analysis, CdTe thin films are polycrystalline belonging to cubic structure with a preferential orientation of (111) plane and strongest peak intensity. The surface morphology have been studied by scanning electron microscope (SEM). The optical transmittance of CdTe thin films have been studied by UV-VIS spectrophotometer with the wavelength in the range 300-1100 nm. The electrical properties of the as-deposited films and the films treated in CdCl₂ atmosphere were also investigated. I-V characteristics of CdS/CdTe heterojunction were performed under different illumination intensity and some important parameters were evaluated from I-V curves.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปอดประจุมมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลต ไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu κ_1 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มหนา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อณุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้อิเล็กโตรมิเตอร์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และชุดวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์งบประมาณของภาควิชาฯ บางส่วนเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นายอดุลย์ หาญวังม่วง นายปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์ นายจิตติกร จรรยาธรรม นายประธาน ประจวบโชคและนางสาวจุฑามาศ วัฒนานูรักษ์ นักศึกษาระดับปริญญาโทของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนประเภทงบประมาณแผ่นดิน จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2551 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญรูป..... | VII |
| สารบัญตาราง..... | XXI |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1. วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย..... | 2 |
| 2. ขอบเขตของ โครงการวิจัย..... | 2 |
| 3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ..... | 4 |
| 2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI | 4 |
| 2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure)..... | 5 |
| 2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure)..... | 6 |
| 2.3 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 7 |
| 2.4 การระเหิดในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS)..... | 7 |
| 2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์..... | 9 |
| 2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 12 |
| 2.7 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ..... | 13 |
| 2.7.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน..... | 14 |
| 2.7.2 การส่งผ่านแสง..... | 17 |
| 2.7.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ..... | 18 |
| 2.7.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง..... | 19 |
| 2.8 สภาพนำไฟฟ้า..... | 22 |
| 2.8.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า..... | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.8.1.1 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว (two point probes)..... | 23 |
| 2.8.1.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)..... | 24 |
| 2.8.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ..... | 25 |
| 2.9 ระดับพลังงานแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในผลึก CdTe และ CdZnTe..... | 26 |
| 2.10 ส่วนหางของแถบพลังงาน..... | 28 |
| บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย..... | 32 |
| 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด..... | 32 |
| 3.1.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ..... | 32 |
| 3.1.2 การเตรียมและการทำความสะอาดระบบระเหิดสารในระยะประชิด..... | 32 |
| 3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด..... | 33 |
| 3.1.4 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบสุญญากาศ..... | 34 |
| 3.1.5 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน..... | 35 |
| 3.1.6 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ..... | 36 |
| 3.1.7 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิด สารในระยะประชิด..... | 36 |
| 3.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด..... | 37 |
| 3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค..... | 37 |
| 3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค..... | 37 |
| 3.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสง..... | 37 |
| 3.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า..... | 37 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.3 ขั้นตอนการการสร้งรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe..... | 38 |
| 3.3.1 การเตรียมชั้นแคดเมียมซัลไฟด์..... | 38 |
| 3.3.2 การเตรียมชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 39 |
| 3.3.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า..... | 39 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล..... | 40 |
| 4.1 พิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยให้ อุณหภูมิกับฐานรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... | 40 |
| 4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด..... | 42 |
| 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลู ไรด์..... | 42 |
| 4.2.2 ผลการศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 53 |
| 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 68 |
| 4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 81 |
| 4.3 รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe..... | 109 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 112 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 119 |
| ภาคผนวก..... | 122 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 123 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ..... | 4 |
| 2.2 | แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรอน..... | 5 |
| 2.3 | แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์..... | 6 |
| 2.4 | แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์..... | 6 |
| 2.5 | แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 7 |
| 2.6 | แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก..... | 10 |
| 2.7 | แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์..... | 12 |
| 2.8 | อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง..... | 12 |
| 2.9 | แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 13 |
| 2.10 | แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ | 14 |
| | ก. ฉนวน..... | |
| | ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์..... | |
| | ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... | |
| | ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี..... | |
| | จ. โลหะ..... | |
| | ฉ. สารกึ่งโลหะ..... | |
| 2.11 | แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) | 16 |
| | ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง..... | |
| | ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง..... | |
| 2.12 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟ ตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) | 16 |
| | ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง..... | |
| | ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้าง โฟนอน..... | |
| 2.13 | แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง..... | 17 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.14 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน..... | 19 |
| 2.15 | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำ..... | 21 |
| 2.16 | แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์..... | 21 |
| 2.17 | การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว..... | 23 |
| 2.18 | แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้ว | 24 |
| | ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง..... | |
| | ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า..... | |
| 2.19 | แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น..... | 24 |
| 2.20 | แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของ CdTe และ CdZnTe..... | 28 |
| 2.21 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ..... | 29 |
| 2.22 | แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีจุดคู่รวมที่ (E_0, α_0) ของผลึก InSe : Ho..... | 30 |
| 3.1 | แสดงระบบระเหิดสารในระยะประชิด..... | 34 |
| 3.2 | แสดงการตั้ง โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.. | 34 |
| 3.3 | แสดงระบบเตาแอนนัล..... | 38 |
| 4.1 | แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 41 |
| 4.2 | แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 41 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.3 | แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 41 |
| 4.4 | แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 42 |
| 4.5 | แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 42 |
| 4.6 | แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.... | 43 |
| 4.7 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 44 |
| 4.8 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 44 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.9 | แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.... | 45 |
| 4.10 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 45 |
| 4.11 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 46 |
| 4.12 | แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.... | 46 |
| 4.13 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 47 |
| 4.14 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 47 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.15 | แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 48 |
| 4.16 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจذبรังสี (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 48 |
| 4.17 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 49 |
| 4.18 | แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 49 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.19 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 50 |
| 4.20 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 50 |
| 4.21 | แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 51 |
| 4.22 | กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 51 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.23 | แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที่..... | 52 |
| 4.24 | แสดงค่าคงตัวของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375 - 475 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที | 52 |
| 4.25 | แสดงค่าคงตัวของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 53 |
| 4.26 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 375 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 54 |
| 4.27 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 55 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.28 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 56 |
| 4.29 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 57 |
| 4.30 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 58 |
| 4.31 | แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 59 |
| 4.32 | แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 59 |
| 4.33 | แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 60 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.34 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาที.... | 61 |
| 4.35 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.... | 62 |
| 4.36 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... | 64 |
| 4.37 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... | 65 |
| 4.38 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในอากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... | 66 |
| 4.39 | แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... | 67 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.40 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 68 |
| 4.41 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 69 |
| 4.42 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 70 |
| 4.43 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 71 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.44 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 72 |
| 4.45 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที | 73 |
| 4.46 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 74 |
| 4.47 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 75 |
| 4.48 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 76 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.49 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 77 |
| 4.50 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 78 |
| 4.51 | แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที... | 79 |
| 4.52 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงกับอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 82 |
| 4.53 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นทั้งฉายแสงและไม่ฉายแสงกับการแอนนีกัลในบรรยากาศต่างๆที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 83 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.54 | <p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....</p> | 84 |
| 4.55 | <p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....</p> | 85 |
| 4.56 | <p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....</p> | 86 |
| 4.57 | <p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....</p> | 87 |
| 4.58 | <p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....</p> | 88 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.59 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 89 |
| 4.60 | แสดงการหาส่วนหางของแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 108 |
| 4.61 | แสดงฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe มีชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS โดยวิธีอบ สารละลายเคมี (CBD) ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (อินเดียมทินออกไซด์) จากนั้นเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด(CSS) โดยใช้อุณหภูมิแก่สาร ตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450 °C โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 mm โดย (ก) รูปฟิล์มบางด้านหลัง (ข) รูปฟิล์มบางด้านหน้า..... | 109 |
| 4.62 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe โดยฉายแสงต่างความเข้ม..... | 110 |
| 4.63 | แสดงค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุ - แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe..... | 110 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 4.1 | แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดในระยะประชิด..... | 80 |
| 4.2 | แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ..... | 80 |
| 4.3 | แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด..... | 80 |
| 4.4 | แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ..... | 81 |
| 4.5 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 90 |
| 4.6 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 92 |
| 4.7 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 94 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 4.8 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 96 |
| 4.9 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 98 |
| 4.10 | แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 100 |
| 4.11 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 102 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 4.12 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 102 |
| 4.13 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 103 |
| 4.14 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 103 |
| 4.15 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 104 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 4.16 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 104 |
| 4.17 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 105 |
| 4.18 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 105 |
| 4.19 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 106 |
| 4.20 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 106 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 4.21 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 107 |
| 4.22 | แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... | 107 |
| 4.23 | แสดงค่าพารามิเตอร์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ..... | 111 |

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันน้ำมันมีราคาสูงมาก จนกระทั่งรัฐบาลต้องเร่งหามาตรการลดการใช้ น้ำมัน และส่งเสริมการหาแหล่งพลังงานอื่นๆ มาทดแทนน้ำมัน แหล่งพลังงานที่สำคัญที่มีปริมาณมหาศาลและใช้ได้ยาวนาน คือ พลังงานจากดวงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และเป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของหัวต่อ CdS/CdTe กำลังได้รับการพัฒนากันอย่างแพร่หลายทั้งในยุโรป อเมริกา และในประเทศญี่ปุ่น โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe นี้ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ปี 2520 และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาเป็นลำดับจนกระทั่งปัจจุบัน ซึ่งสถาบันค้นคว้าพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy laboratory, NREL) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมกับมหาวิทยาลัยที่มีชื่อเสียงหลายแห่ง ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 16.5% [1,2] ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe นี้ ปัจจุบันบริษัทยักษ์ใหญ่ของโลกที่ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ได้แก่บริษัท Antec Solar แห่งประเทศเยอรมันนี้ บริษัท First Solar แห่งสหรัฐอเมริกา และบริษัท Mitsushita Battery แห่งประเทศญี่ปุ่น [3] โดยเฉพาะบริษัท First Solar มีโรงงานขนาดใหญ่พื้นที่ 75,000 ตารางฟุต ตั้งอยู่ที่เมือง Perrysburg ในรัฐโอไฮโอ [4] บริษัท Tuscon Electronic Power ได้ทำการติดตั้งโรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นที่ Springerville รัฐอริโซนา มีกำลังการผลิต 480 kW โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตจากบริษัท First Solar

สำหรับ CdTe ก็เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาด 1.45 eV ซึ่งเหมาะสำหรับประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับช่วงพลังงานของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงสุด [5-7] สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูง $\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ดังนั้นความต้องการให้ CdTe เป็นชั้นบาง ๆ ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า $5 \mu\text{m}$ ก็เป็นการเพียงพอเพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงที่ดี เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิพพันธุ์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง จะประดิษฐ์ได้จากการระเหิดสารตั้งต้นในระบบสุญญากาศ โดยให้ภาชนะระเหิดสารตั้งต้นอยู่ใกล้กับแผ่นรองรับโดยไม่เกิน 2 ซม. ซึ่งเรียกวินี้ว่าวิธีระเหิดในระยะประชิด (closed space sublimation, CSS) อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 500°C และอุณหภูมิของแผ่นรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 50°C และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เหมาะสำหรับเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdS/CdTe และ CdS/CuInGaSe₂ เนื่องจาก CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดกว้างถึง 2.42 eV และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงในระดับ 10^5 cm^{-1} การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีสารละลายเคมี พบว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีราคาถูกลงและทางคณะผู้วิจัยก็ประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบาง CdS และ $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีออบสารละลายเคมี เคลือบบนกระจกสไลด์มาก่อนหน้านี้แล้ว [8-11]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe ยังสามารถที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้อีก เช่นการใช้ Cd_2SnO_4 และ Zn_2SnO_4 แทนที่ตัวนำโปร่งแสง SnO_2 ที่ใช้มาแต่เดิม [12] ในปี พ.ศ. 2546 ที่ผ่านมารบริษัท Mitsushita Battery ได้รายงานว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีพื้นที่ขนาด $5,327 \text{ cm}^2$ ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 1.75 A และแรงดัน 52 V และประสิทธิภาพสูงถึง 11% [13] จากการพัฒนาเทคโนโลยี Mitsushita นี้แสดงให้เห็นว่าการประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะเวลาที่ความดันปกติ สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ในราคาต้นทุนที่ต่ำลงโดยที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงอยู่ในระดับสูง ดังนั้นในอนาคตอันใกล้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อ CdS/CdTe จะเข้ามามีส่วนแบ่งตลาดของเซลล์อาทิตย์ได้ ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

1. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.1 ปลูกฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิดให้เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ และที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.2 ตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางด้วยเครื่องมือมาตรฐาน เช่น การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วัดการส่องผ่านแสงด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า
- 1.3 สร้างรอยต่อโอห์มมิกบนฟิล์ม CdTe แล้วต่อขั้วไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิธีพันธุของฟิล์มบาง CdS/CdTe
- 1.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การวัดกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ

2. ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 2.1 เคลือบฟิล์มบาง CdTe ลงบนกระจกฐานรองและบนฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิด ซึ่งฟิล์มบาง CdS จะเตรียมบนกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย ITO เพื่อให้เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 2.3 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โดยการวัดกระแส-แรงดัน เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 3.1 คณะผู้วิจัยจะได้รับความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีของระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดใน
ระยะประชิดที่อยู่ในห้องสุญญากาศความดันต่ำ
- 3.2 ได้ชิ้นงานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต้นแบบของฟิล์มบาง CdS/CdTe โดยการเคลือบ CdTe
ลงบนฟิล์มบาง CdS ที่ได้เตรียมขึ้น
- 3.3 ได้ความร่วมมือกับภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งกำลัง
ดำเนินงานสร้างรอยต่อ Cd/CdTe โดยใช้ CdTe ที่เป็นผลึกเดี่ยว
- 3.4 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถส่งตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติได้
- 3.5 ได้พัฒนาการวิจัยของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่ร่วมในโครงการ



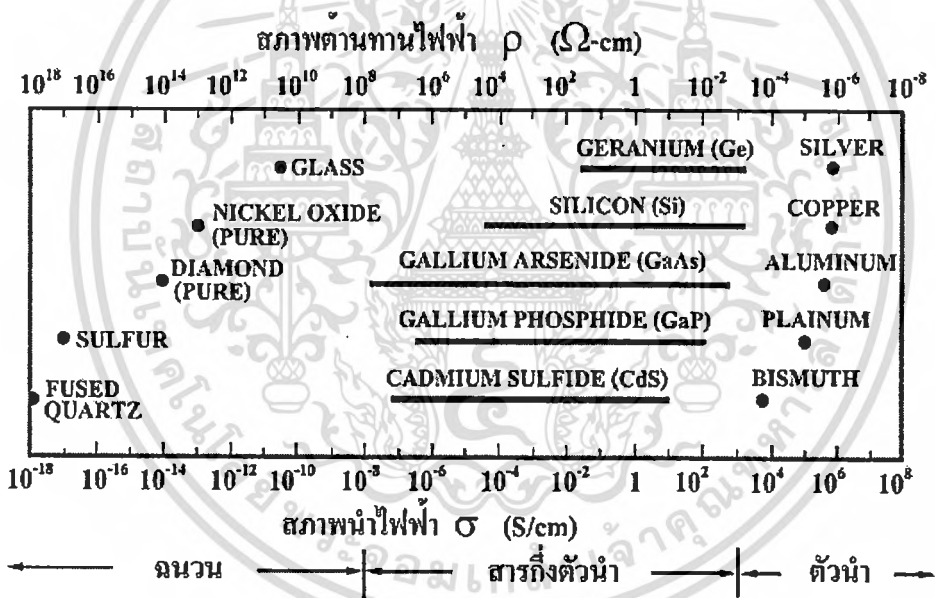
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [14]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น พลิกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (glass slide) ที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} S/cm และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^8 S/cm. ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



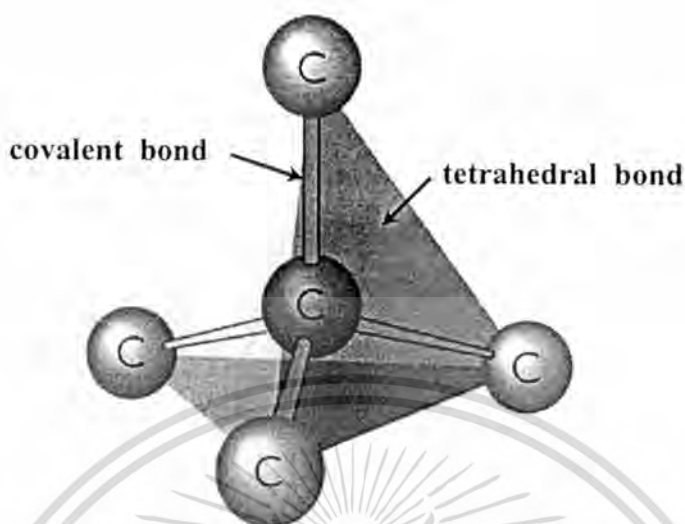
รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [15-22]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

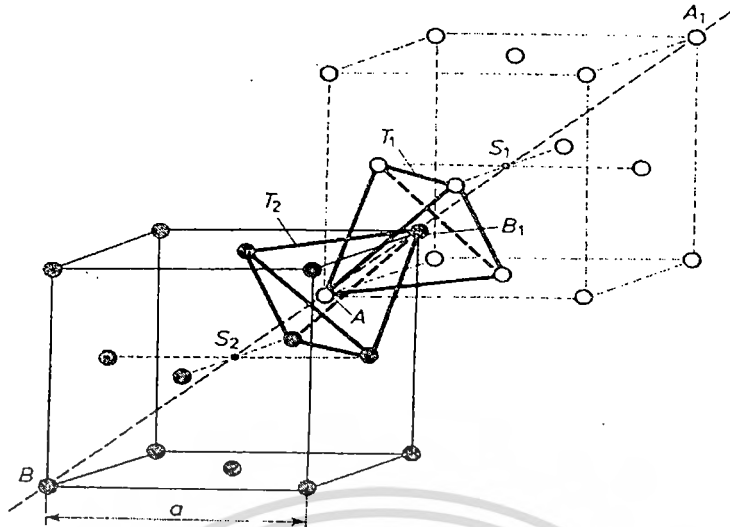


รูปที่ 2.2 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure)

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และหน่วยเซลล์จัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$ ฐานของพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60° ออกรอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แสดงในรูปที่ 2.3

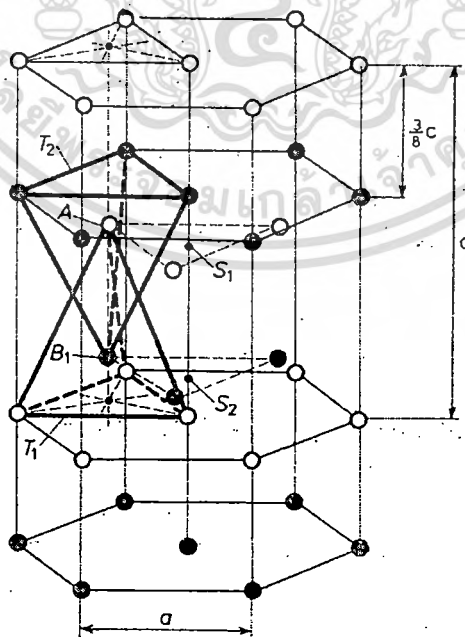
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ที่เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 หน่วยเซลล์จัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพื้นระลีสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c ซึ่งลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.4

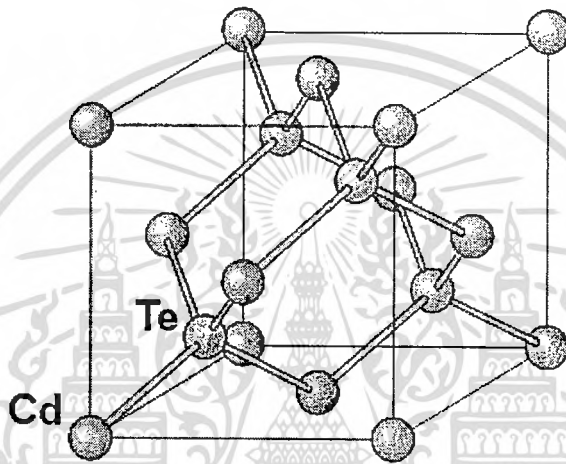


รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์มีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอมและมีความหนาแน่น 6.2 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 eV มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90% สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.50 eV ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.4 การระเหิดในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS) [23,24]

การระเหิดในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก(bulk)หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้นที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right) = K_p(T) \quad (2.2)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$ คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.3)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ $\Delta G_{\text{CdTe}} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ (T_{so}) และฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ (T_{sub}) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{\text{so}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{so}}}\right] \quad (2.4)$$

$$K_p(T_{\text{sub}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{sub}}}\right] \quad (2.5)$$

ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd และโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของ Fick (Fick's first law)

$$J_{\text{Cd},j} = \frac{D_{\text{Cd},j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv J \quad (2.6)$$

$$J_{\text{Te}_2,j} = \frac{D_{\text{Te}_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.7)$$

เมื่อ $J_{\text{Cd},j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j

$J_{\text{Te}_2,j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j

J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

$D_{i,j}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

ซึ่งในกรณีนี้น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{\text{Cd},j} = 1.85 D_{\text{Te}_2,j}$ (ในบรรยากาศของแก๊ส H_2 , He หรือ Ar) จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{so}) และฐานรองรับ (T_{sub}) มีค่าต่างกัน $T_{\text{so}} - T_{\text{sub}} = 70^\circ\text{C}$ จะได้ $P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})$ และ $P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})} = \frac{2D_{\text{Te}_2,j}}{D_{\text{Cd},j}} = 1.1 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการ (2.11), (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR\left(\frac{\mu}{\text{in}}\right) = \frac{J \times M \times 60 \times 10^4}{\rho} \quad (2.9)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [15, 20-22]

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) คับเบิลยู เอช แบรกก์ และ คับเบิลยู แอล แบรกก์ (W.H. Bragg and W.L. Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ(2.10) ระนาบต่างๆของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.6

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.10)$$

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน

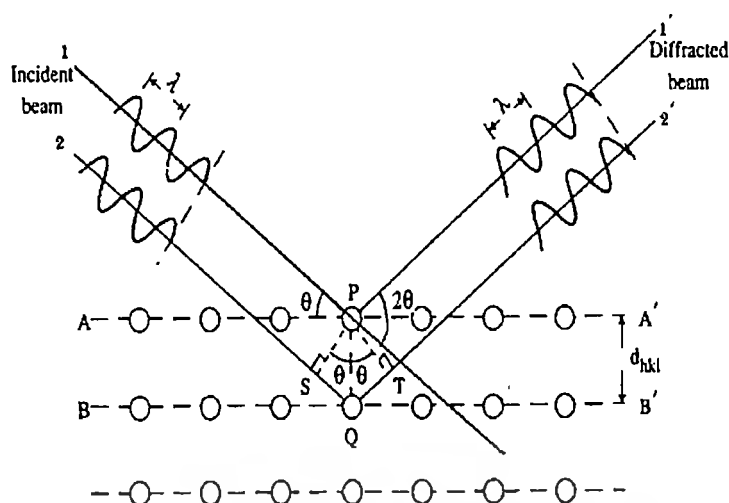
θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก

2θ คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน

n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงตัวของโครงผลึกได้ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.11) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงตัวของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.12)$$

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.13)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.10) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a , c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ ($h k l$) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.14)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดพลาด (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.15)$$

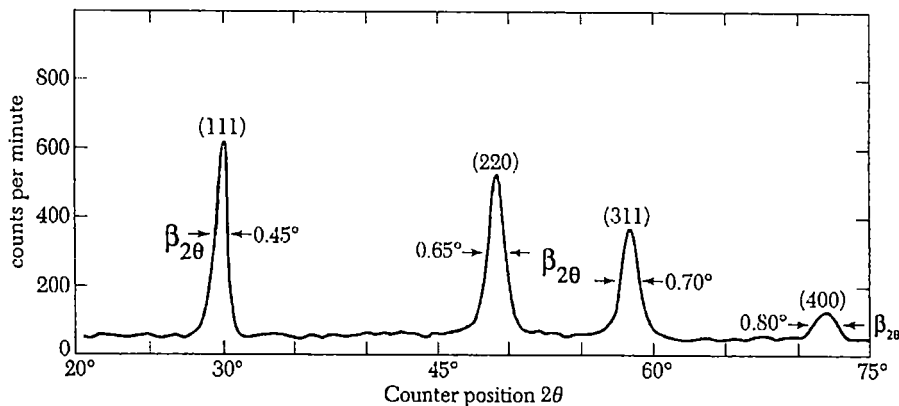
เมื่อ TC(hkl) คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl)
 I(hkl) คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ
 I₀(hkl) คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
 N คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ
 ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ε_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.16)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.17)$$

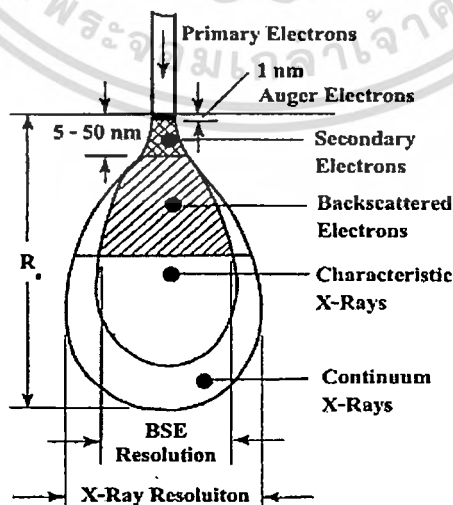
เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 β คือ ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum :FWHM)
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
 ε_s คือ ความเครียด



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

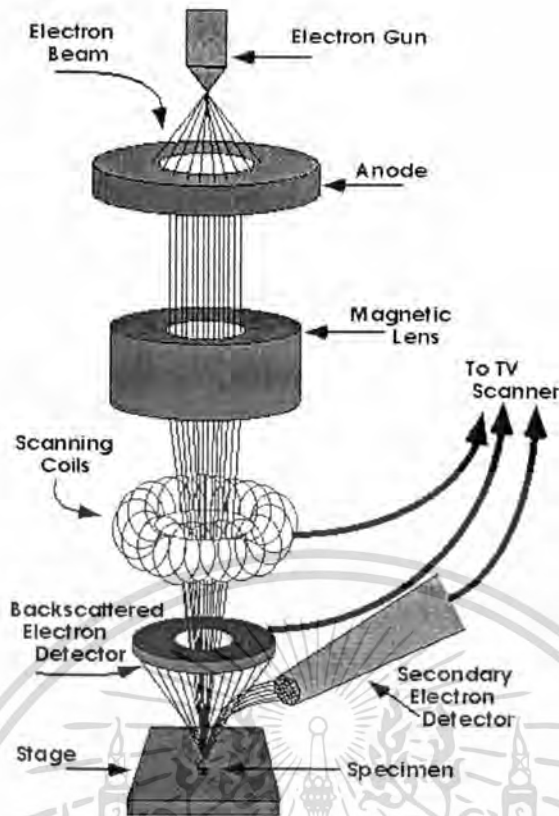
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20-22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทํางาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจงรายละเอียดต่ำ (low resolution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพรมัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.8 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1-40 kV ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำ ใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสลำอิเล็กตรอนจะกระดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอคาโทด (cathode ray tube : CRT)

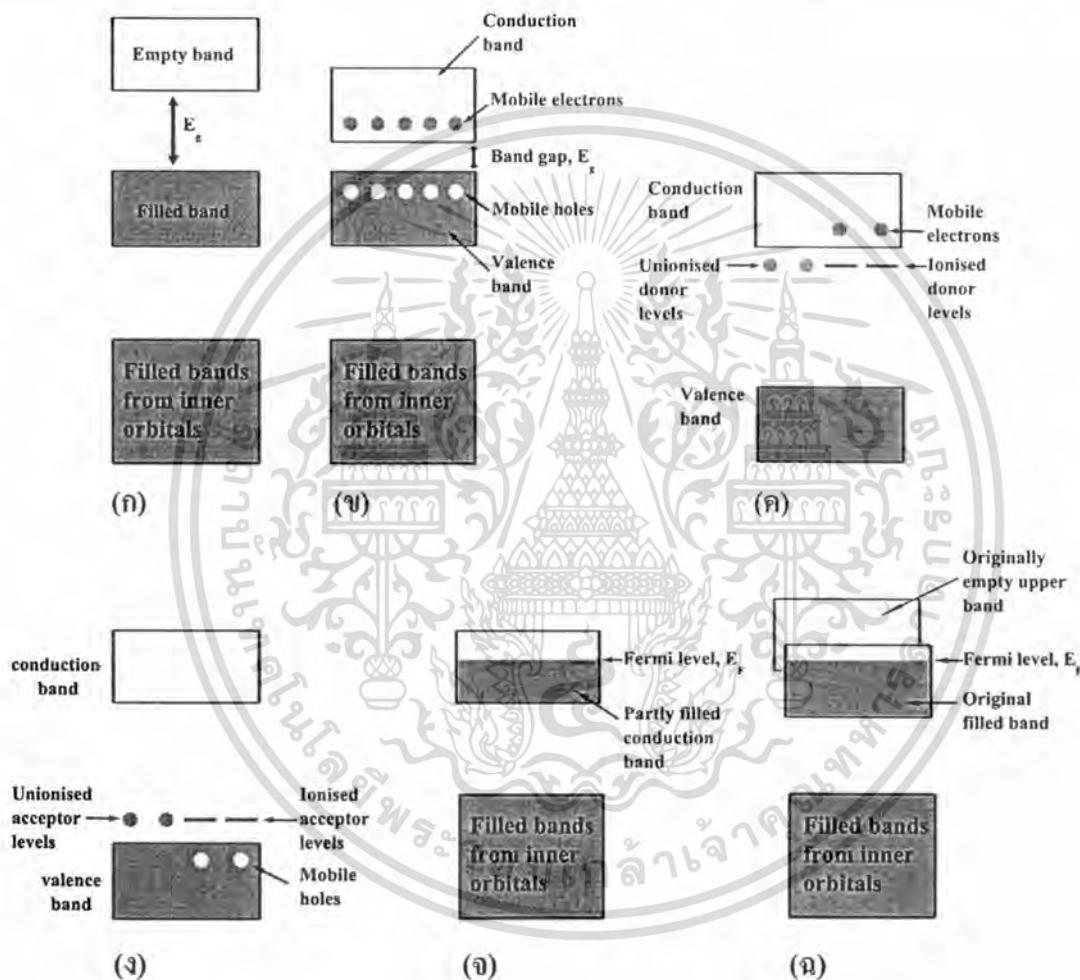
2.7 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [15, 20-22]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสง และการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อัน 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็น ฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

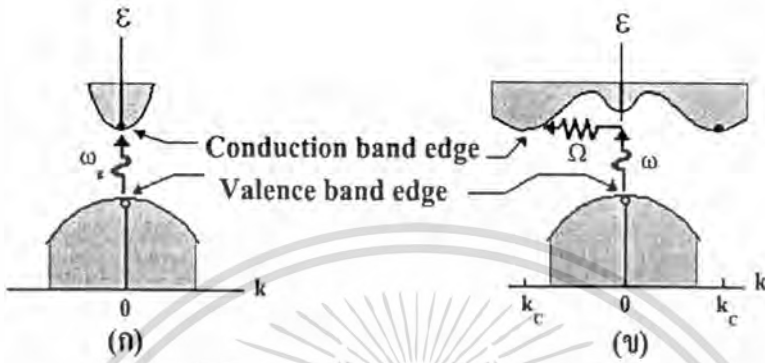
- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

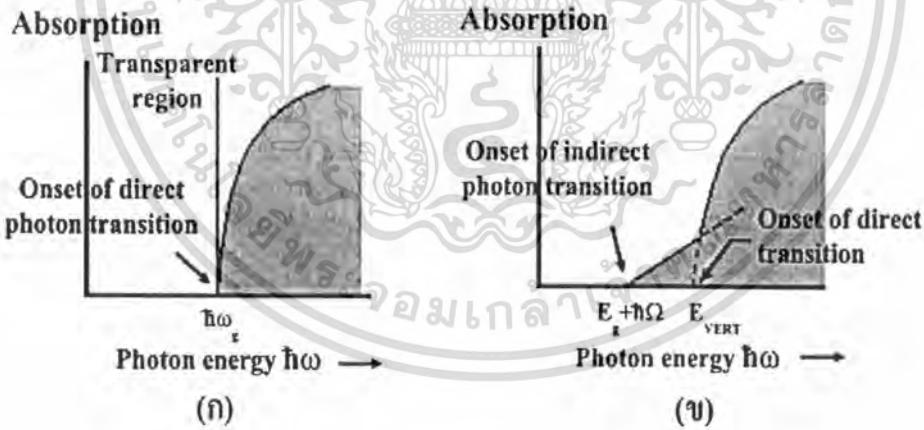
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 eV ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) การที่จะทำให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าได้เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.10 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.10 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกลักษณะที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานแทนที่ขึ้นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีการบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแถบเวเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_\gamma = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

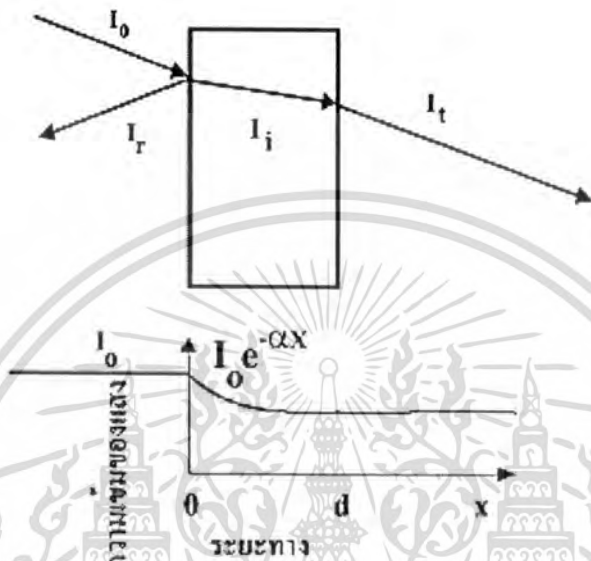


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.18}$$

- เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
- I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
- I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
- I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
- R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
- T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
- α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.19)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.20)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.21)$$

2.7.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.22)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.23)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.24)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียชีวิต (extinction coefficient) โดย
ทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [25]

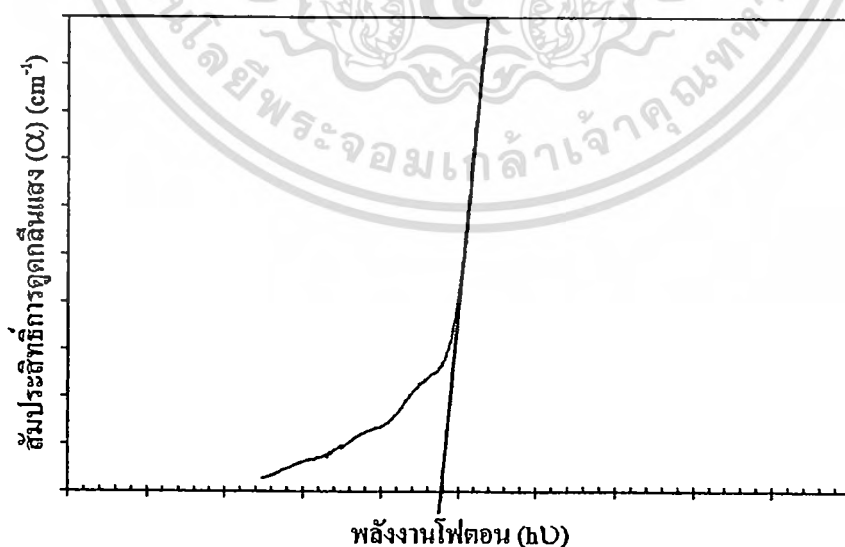
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอน ได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงาน โฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่ แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.23 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.25)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{T}\right) \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.28)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.29)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงตัว

2.8 สภาพนำไฟฟ้า [25-27]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.30)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.31)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.32)$$

และ

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.33)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.30) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.34)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.35)$$

สมการที่ (2.35) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

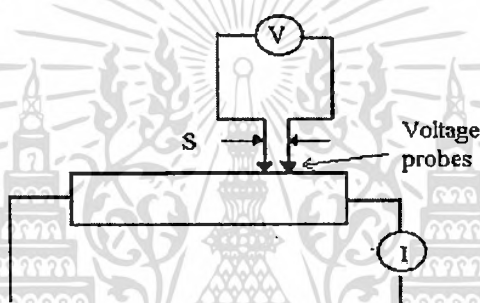
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.8.1.1 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว (two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

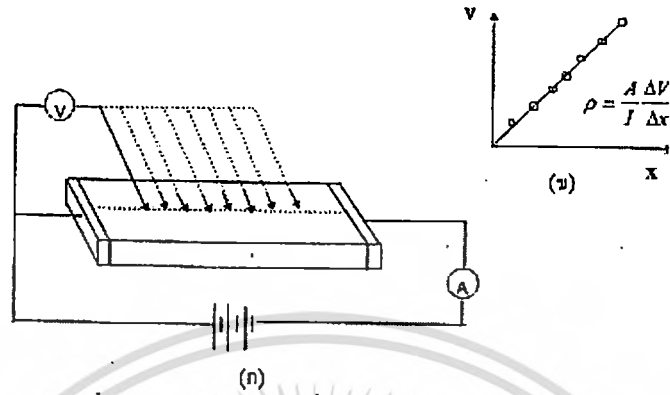


รูปที่ 2.17 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมรูปร่างเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equipotential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้ว

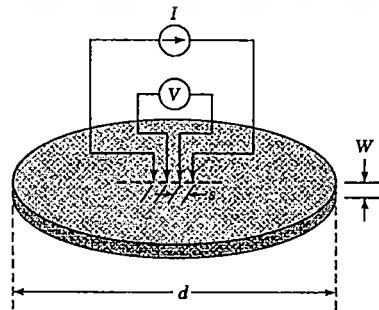
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.8.1.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.19 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่มักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น(sheet resistance : R_{sh}) ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω / sq



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.19 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใดๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi \frac{V}{I}}{\left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right]} \quad (2.36)$$

โดยที่ S คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่ $S_1 = S_2 = S_3$ สมการที่ (2.36) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.37)$$

2.8.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [27]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรน ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัปดักประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอมิสชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-2} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.38)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|---|
| เมื่อ | Φ_b | คือ | ค่าค่าแกงศักย์ |
| | A | คือ | ค่าคงตัว |
| | T | คือ | อุณหภูมิเป็นเคลวิน |
| | k | คือ | ค่าคงตัวของ โบลตซ์ทมันน์ (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} J/K |

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธุนั้นที่อุณหภูมิต่ำ พหุอะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{-1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.39)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิห้อง (300 K)

2.9 ระดับพลังงานแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในผลึก CdTe และ CdZnTe [28-30]

แคสตัลดีน (Castaldini) และผู้ร่วมงาน [28] ได้ทำการศึกษาระดับพลังงานต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในผลึกเดี่ยวของ CdTe และ CdZnTe ด้วยวิธี สเปกโตรสโคปีช่วงชะงะของระดับพลังงานลึก (DLTS) และวิธี สเปกโตรสโคปีของกระแสช่วงชะงะที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง (PICTS) และไว้ทำการจัด ระดับพลังงานออกเป็นหมวดหมู่ดังนี้คือ

1. ระดับพลังงาน A_0 เป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.12 eV หรือ $E_v + 0.12$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน (complex defects) $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่า ศูนย์กลาง A (A-center) และแมททิว (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV

2. ระดับพลังงาน A และ A_1 ระดับพลังงาน A จะปรากฏอยู่ที่ $E_v + 0.14$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ส่วนระดับพลังงาน A_1 จะอยู่ที่ $E_v + 0.15$ eV ซึ่งจะพบอยู่ในผลึก CdTe:Cl และในผลึก CdZnTe แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A และ A_1 นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไรแต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A และ A_1 จะเกี่ยวข้องกับ ข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A และ A_1 นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

3. ระดับพลังงาน B เป็นกัปดักโฮลที่มีพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.2$ eV โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือ (impurity content) และเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

4. ระดับพลังงาน C มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.25$ eV ซึ่งจะพบในผลึกของสารประกอบ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนผลึก $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ จะมีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.31$ eV ซึ่งระดับพลังงานเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับ V_{Zn}

5. ระดับพลังงาน D เป็นกัปดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

6. ระดับพลังงาน E มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.40$ eV ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยว (isolated V_{Cd}) แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะกัปปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd} จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

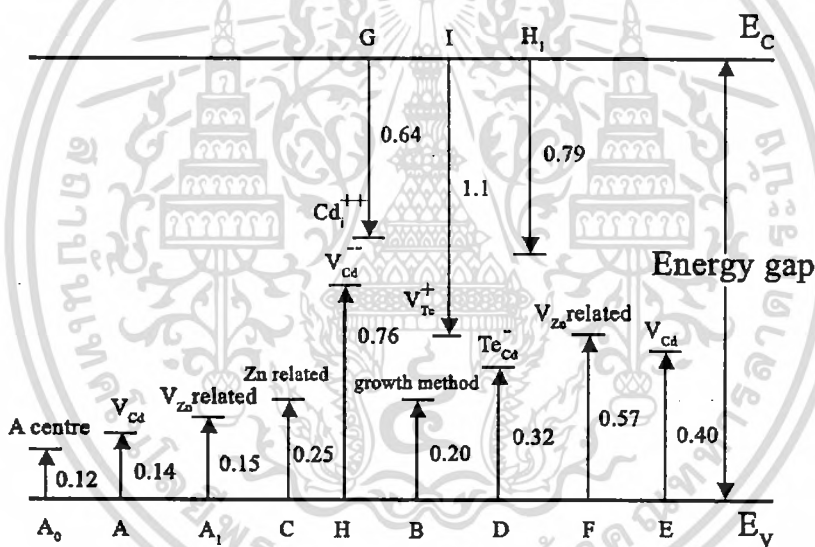
7. ระดับพลังงาน F เป็นระดับพลังงานลึก อยู่ที่ $E_v+0.57$ eV และปรากฏอยู่ในผลึก $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ แต่ไม่พบในผลึก CdTe และเชื่อว่าระดับพลังงานลึกนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.65 eV และเกี่ยวข้องกับ V_{Zn}

8. ระดับพลังงาน G เป็นกัปดักอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-0.64$ eV และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

9. ระดับพลังงาน H เป็นระดับพลังงานผลึกอยู่ที่ $E_v+0.76$ eV ได้มีการศึกษาระดับพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มิมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ

10. ระดับพลังงาน H_1 เป็นกับดักอิเล็กตรอนระดับลึกอยู่ที่ $E_C - 0.79$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน สารเจือ Cl จะเหนี่ยวนำให้เกิด $(V_{Cd}^{2-} - 2Cl_{Te}^+)^0$ ซึ่งก็ถือว่าเป็นศูนย์กลาง A ซึ่งจะมีพฤติกรรมหักล้างกับระดับผู้รับ V_{Cd}^{2-} ถึงแม้ว่า V_{Cd}^{2-} จะเป็นระดับพลังงานตื้นเกินไปที่จะก่อให้เกิดกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มีที่ตรงบริเวณกึ่งกลางช่องว่างแถบพลังงานจากการเปรียบเทียบระดับพลังงาน H_1 กับระดับพลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในผลึกสารตัวอย่างทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษา พบว่าระดับพลังงาน H_1 จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานและจะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ซึ่งจะหักล้างกับระดับพลังงานผู้รับในสารกึ่งฉนวน CdTe:Cl นอกจากนี้ระดับพลังงาน H_1 ยังมีปริมาณที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของระดับพลังงาน H ดังนั้นระดับพลังงาน H_1 จะประพุดิตัวเป็นคู่แข่งกับระดับ H

11. ระดับพลังงาน I เป็นระดับพลังงานอยู่ที่ $E_C - 1.10$ eV ซึ่งตรวจวัดได้จากเทคนิค PICTS และ CL ระดับพลังงานของกับดักใน CdTe และ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นี้มีค่าเท่ากับ 1.1 eV มีจุดกำเนิดมาจาก V_{Te}^+ ซึ่งจะประพุดิตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอนระดับพลังงานทั้งหมดเหล่านี้จะแสดงในรูปที่ 2.33

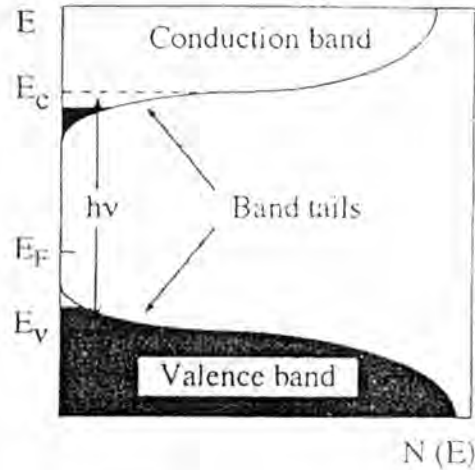


รูปที่ 2.20 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CdZnTe [28]

2.10 ส่วนหางของแถบพลังงาน [31]

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมาก ระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่ใช่ระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูปที่ 2.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

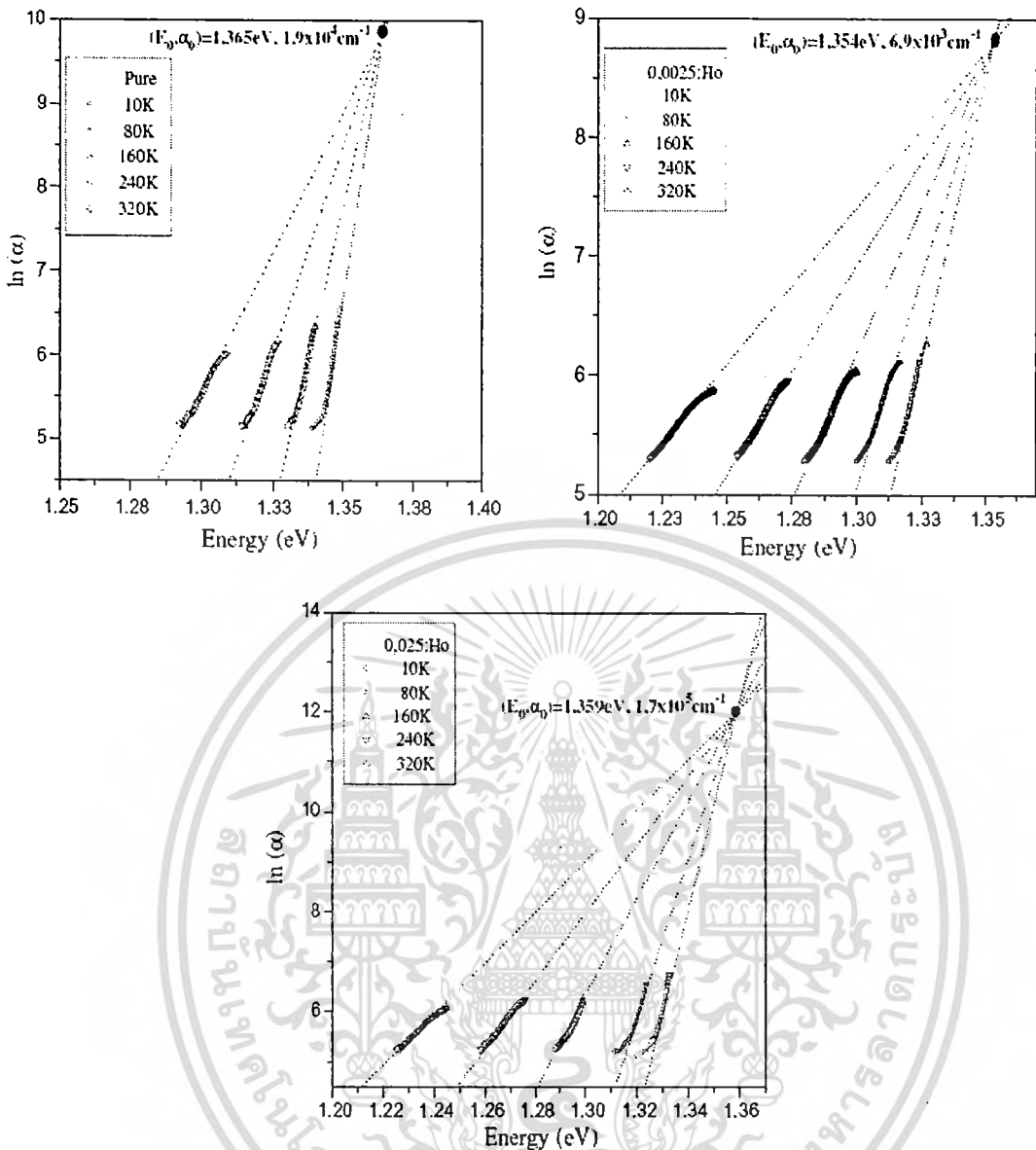


รูปที่ 2.21 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออเบิร์ก (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่เชื่อมถึงความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T} \right] \quad (2.40)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ 2.40 นี้บอกเป็นนัย ๆ ว่า กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่าจุดลู่รวม (converging point) ดังปรากฏในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีจุดคู่รวมที่ (E_0, α_0) ของผลึก InSe : Ho

บิลกิน (Bilgin) และผู้ร่วมงาน [32] เสนอว่าที่อุณหภูมิห้องและในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า E_g สมการที่ 2.40 จะลดรูปลงเป็นสมการที่ (2.41) ดังนี้

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right) \quad (2.41)$$

เมื่อ α_0 เป็นค่าคงตัว ส่วน E_0 เป็นความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้น ค่า E_0 จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ในช่วงพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อริบารเรน (Iribarren) และผู้ร่วมงาน [33] ได้เสนอว่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้องจะสัมพันธ์กับขนาดของเกรน (R) ดังสมการ

$$E_0 = 21.18 + \frac{121.84}{R} \quad (2.42)$$

เมื่อ R คือ ขนาดของเกรนมีหน่วยเป็น μm และ E_0 มีหน่วยเป็น meV อย่างไรก็ตามการเกิด E_0 ในฟิล์มบางยังขึ้นกับปัจจัยต่างๆอีกอย่างน้อย 4 ชนิดคือขอบของเกรน อันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน ข้อบกพร่องของเนื้อผลึก (bulk defects) และการจัดเรียงตัวในโครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น E_0 จะเป็นผลรวมของส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากปัจจัยอย่างน้อย 4 ชนิดจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$E_0 = E_{0f} + E_{0,GB} + E_{0,def} + E_{0Y} \quad (2.43)$$

| | | | |
|-------|-------------|-----|--|
| เมื่อ | E_{0f} | คือ | ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน |
| | $E_{0,GB}$ | คือ | ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของขอบของเกรนในฟิล์มบาง |
| | $E_{0,def}$ | คือ | ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของข้อบกพร่องในเนื้อผลึก |
| | E_{0Y} | คือ | ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ |

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

3.1.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ [9]

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 25x50 มม.² แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้ว ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.1.2 การเตรียมและการทำความสะอาดระบบระเหิดสารในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยเมทานอล
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนิลทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดเอาแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วบอโรซิลิเกตปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจานเขย่าทำความสะอาดด้วยน้ำจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเขย่าทำความสะอาดด้วยเอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดปากท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก
7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ชัดให้เรียบร้อยด้วยกระดาษทรายละเอียดทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

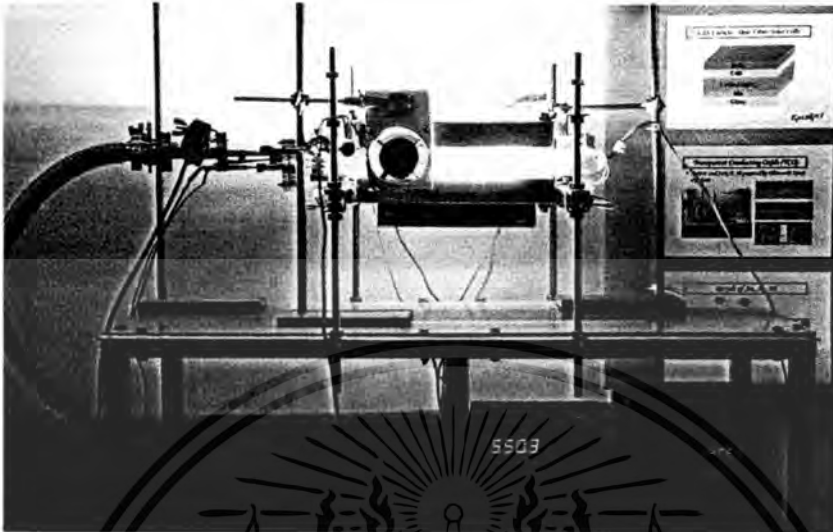
3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดซึ่งประกอบด้วย วิธีและขั้นตอนดังนี้

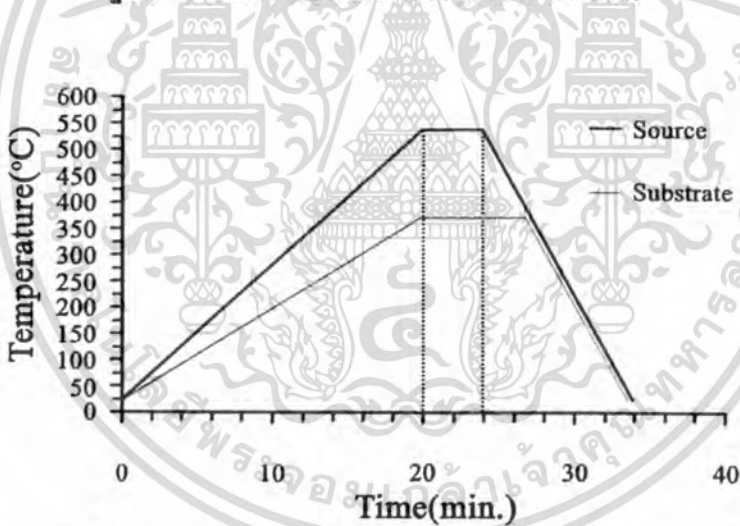
1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0600 กรัมแล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 °C ใช้เวลา 20 นาทีที่คงตัวที่ 550 °C เป็นเวลา 4 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
5. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 375 °C ใช้เวลา 20 นาทีที่คงตัวที่ 375 °C เป็นเวลา 7 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี จากนั้นเปิดวาล์วสูบลมอากาศออกจนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. ในช่วงเวลาระหว่างการเคลือบฟิล์ม(deposition time) ต้องควบคุมอุณหภูมิของระบบ ให้คงตัวโดยการปรับความต่างศักย์ให้เหมาะสม
8. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้วรออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงมาที่ 400 °C ปิดวาล์วปิดปั๊มฟลักโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
9. เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงเหลือประมาณ 200 °C ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในระบบเท่ากับความดันภายนอก
10. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี เปิดระบบเพื่อเอาฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
11. นำกระจกสไลด์ที่เป็นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์คือผิวหน้าสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุนก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการติดตั้งระบบเพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางในเงื่อนไขต่อไป ซึ่งถ้าดำเนินการอย่างต่อเนื่องจะประหยัดเวลาในการสูบลมอากาศออกจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ในการเตรียมฟิล์มบางครั้งต่อไป สารตั้งต้นสามารถใช้ซ้ำได้โดยสังเกตจากผิวหน้าของสารตั้งต้นที่อยู่ในกล่องแกรไฟต์ว่าสมบูรณ์ดีหรือไม่ ถ้าผิวหน้าของสารตั้งต้นหลอมรวมกันเป็นเม็ด ๆ จำนวนมากก็ให้เปลี่ยนสารตั้งต้นใหม่



รูปที่ 3.1 แสดงระบบระเหิดสาร ในระยะประชิด



รูปที่ 3.2 แสดงการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

3.1.4 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม (deposition time) เท่ากับ 4 นาทีมาแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ ในเงื่อนไขต่างๆ สำหรับเงื่อนไขในระบบสุญญากาศมีวิธีและขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัมแล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 400 °C ใช้เวลา 20 นาที คงตัวที่ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
5. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 400 °C ใช้เวลา 20 นาทีคงตัวที่ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
6. เปิดปั๊มพัลโครตารี จากนั้นเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. ในช่วงเวลาที่แอนนิลฟิล์มบางต้องควบคุมอุณหภูมิของระบบให้คงตัวโดยการปรับความต่างศักย์ให้เหมาะสม
8. เมื่อแอนนิลฟิล์มบางเสร็จแล้วรออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงมาที่ 200 °C ปิดวาล์วปิดปั๊มพัลโครตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
9. เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงเหลือประมาณ 100 °C ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในระบบเท่ากับความดันภายนอก
10. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี เปิดระบบเพื่อเอาฟิล์มบางออกจากกล่องแกรไฟต์
11. นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ได้ไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.1.5 การแอนนิลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัมแล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์

3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนิลทำการอีแวค-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไป จนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดเอาแก๊สไนโตรเจน ออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่ แล้วปิดปั๊มที่ดูดอากาศเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบด้วยความดันที่เหมาะสม จากนั้นปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบอย่างช้า ๆ
4. ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.1.6 การแอนนิลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในระบบเตา โดย การเปิดปากท่อทั้งสอง
2. ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที
3. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมিরอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.1.7 การแอนนิลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบ ระเหิด สารในระยะประชิด

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัมแล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์สำหรับแอนนิลในระบบระเหิดในระยะ ประชิดเขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่ง แก้วค่อยๆ กดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนิลทำการอีแวค-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไป จนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการปั๊มเอาแก๊สไนโตรเจน ออกจากท่อแก้วทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่แล้ว ปิดปั๊มดูดอากาศเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบด้วยความดันที่เหมาะสม จากนั้นปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบอย่างช้า ๆ
4. ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-60 องศา

3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

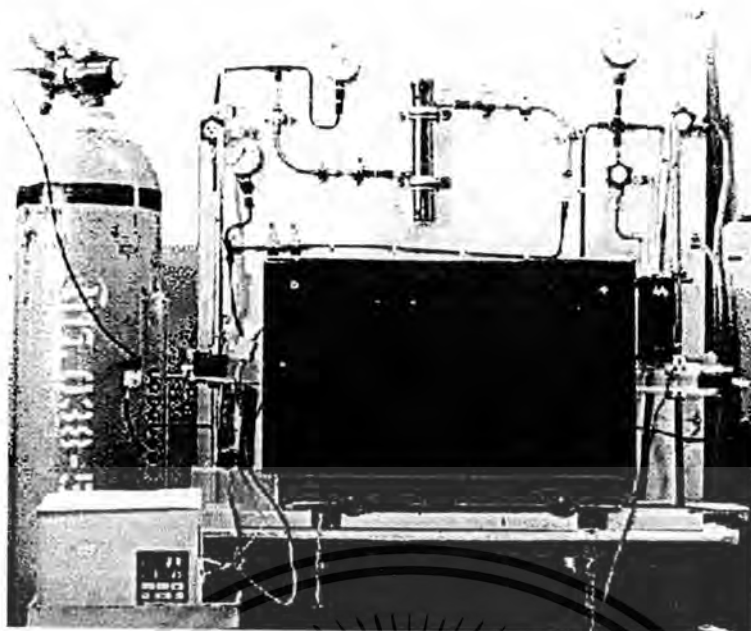
นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

3.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(UV-VIS spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นและวัดค่าพลังงานกระตุ้น โดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงระบบเตาแอนนูล

3.3 ขั้นตอนการการสร้งรอยต่อวิธีพ่นธูของ CdS/CdTe

3.3.1 การเตรียมชั้นแคดเมียมซัลไฟด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นอินเดียมทินออกไซด์ตัดออกให้ได้ขนาดพื้นที่ $12 \times 26 \text{ mm}^2$
2. นำหน้ากามาปิดปลายด้านใดด้านหนึ่งให้มีความกว้างประมาณ 2 mm
3. นำไปเสียบภาชนะเทปลอน โดยมีแท่งแก้วยึดเทปลอน
4. ติดตั้งเตาให้ความร้อน โดยวางอ่างบรรจุน้ำและให้ความร้อนคงที่ประมาณ 85 องศาเซลเซียส
5. นำบีกเกอร์ขนาด 200 ml ที่มีน้ำปอดประจุบรรจุอยู่ 100 ml และแท่งแมกเนติกบาร์
6. ปรับความเร็วในการหมุนของแท่งแมกเนติกบาร์ให้ได้ความเร็วช้าที่สุด
7. เมื่ออุณหภูมิของน้ำปอดประจุที่มีอุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส นำแผ่นรองรับไปจุ่มลงในบีกเกอร์ โดยมีสแตนชีดเอาไว้และไม่ให้แท่งแก้วสัมผัสกับแมกเนติกบาร์
8. ชั่งสารแคดเมียมซัลไฟด์จำนวน 0.3847 กรัม แล้วละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร และชั่งสารไทโอยูเรียจำนวน 0.5709 กรัม แล้วละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
9. วัดค่า pH เดิมน้ำปอดประจุที่ต้มเอาไว้เพื่อรักษาระดับของสารละลายและวัด pH เท่ากับ 11.5
10. ใช้เวลาอบสารละลายเคมี 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. นำแผ่นรองรับไปแช่ในน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องอุตสาหกรรม 30 นาที 3 รอบ โดยเปลี่ยนน้ำปลอดประจุทุกรอบ
12. อาบสารละลายเคมีรอบที่ 2 โดยทำตามขั้นตอน 5-11
13. อาบสารละลายเคมีรอบที่ 2 โดยทำตามขั้นตอน 5-11
14. นำตัวอย่างถอดหน้ากากออกทำให้แห้งด้วยไคโรเปาลมร้อนเมื่อตัวอย่างแห้งดีแล้ว บรรจุในถุงซิปล็อกไว้ในโถดักความชื้นเตรียมเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ต่อไป

3.3.2 การเตรียมชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์

1. นำกล่องแกรไฟต์ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนแล้วไปแอลนีลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
3. ชั่งสารแคดเมียมเทลลูไรด์ 0.05 กรัม บรรจุลงในกล่องแกรไฟต์
4. นำตัวอย่างที่ผ่านการอาบสารละลายเคมีแล้วมาปิดตรงช่องใส่สารแคดเมียมเทลลูไรด์
5. นำฝากล่องแกรไฟต์ประกบกันให้แน่น
6. นำกล่องแกรไฟต์เข้าสู่กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิด
7. ทำการลดความดันโดยใช้เครื่อง โรตารีปั๊มให้ได้ความดันที่ประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์
8. ทำการระเหิดสารแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที ปล่อยให้เย็นแล้วนำตัวอย่างรอยต่อวิวิธพันธุ์ไปสร้างขั้วไฟฟ้า

3.3.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า

1. นำผงคาร์บอนละลายด้วยทินเนอร์ที่ใช้ละลายผงคาร์บอน โดยเฉพาะให้ได้ความหนืดตามที่ต้องการ
2. นำตัวอย่างรอยต่อวิวิธพันธุ์สร้างขั้วไฟฟ้าโดยป้ายคาร์บอนตรงบริเวณชั้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยให้ห่างจากขอบของฟิล์มแคดเมียมเทลลูไรด์ประมาณ 2 มิลลิเมตร ปล่อยให้แห้งเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง
3. ต่อสายไฟโดยใช้กาวเงินเชื่อมที่ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง
4. ปล่อยให้แห้ง แล้วเข้าสู่กระบวนการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4

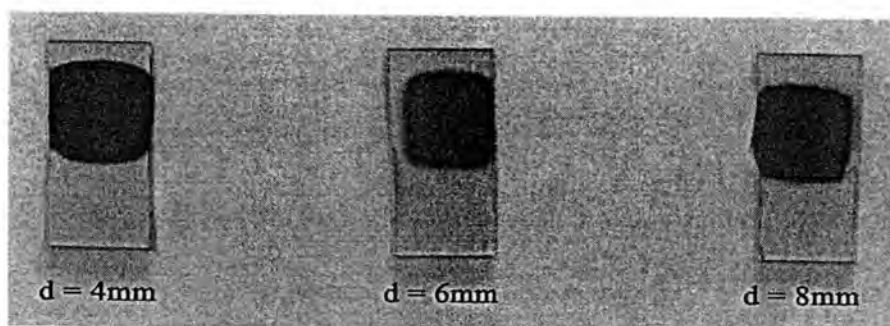
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดภายในห้องสุญญากาศความดันต่ำระดับ 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และนำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสมาแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนและภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศ จากนั้นนำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ทั้งหมด ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางทั้งความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ จากผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

4.1 ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยให้

อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

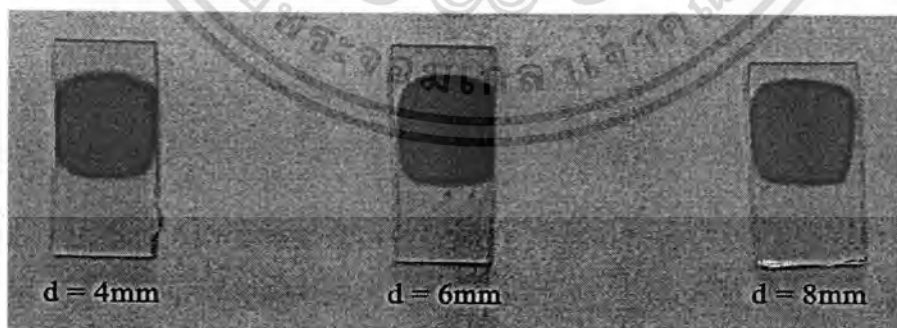
ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด มีลักษณะเป็นสีเทาดำมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนงาและไม่มีรูพรุน ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1- 4.5



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

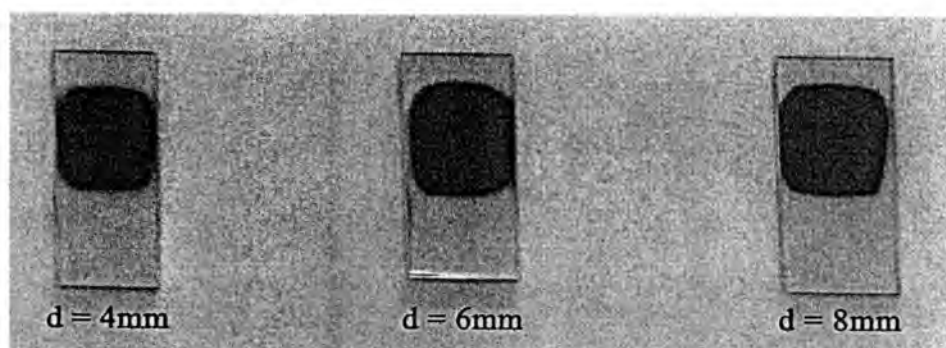


รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

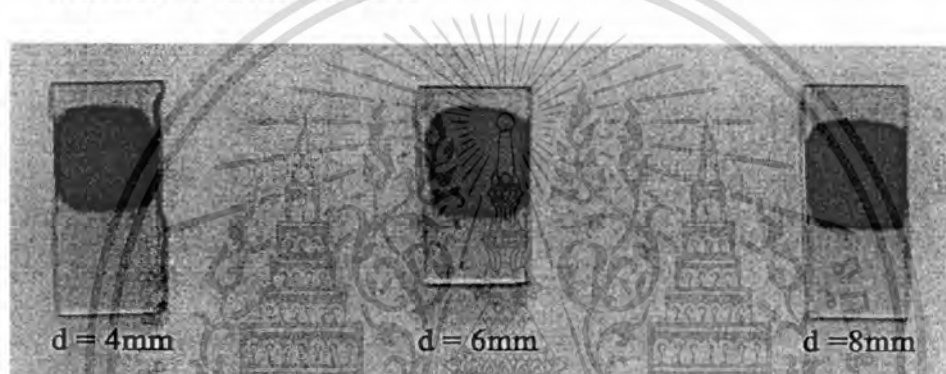


รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

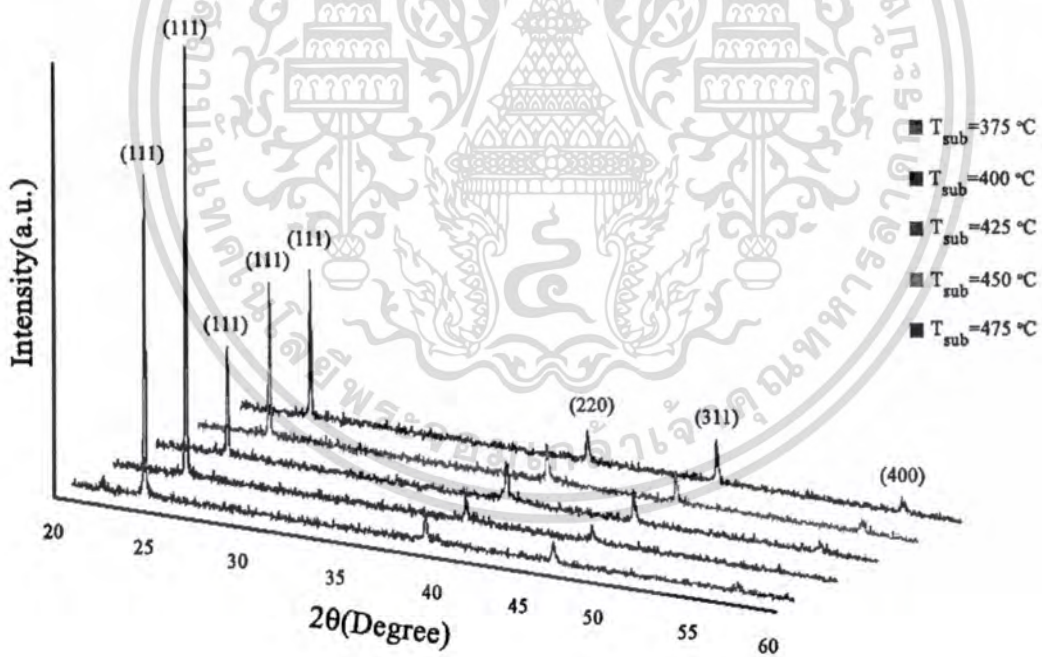
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

การศึกษการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิ

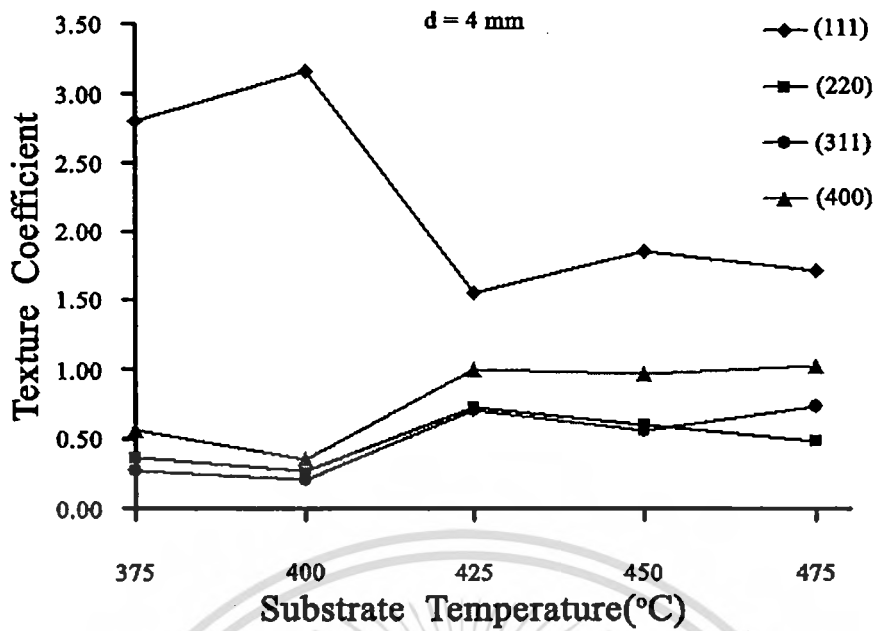
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนีสในอากาศมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^\circ$ (220) ที่มุม $2\theta \approx 39^\circ$ (311) ที่มุม $2\theta \approx 46^\circ$ และ (400) ที่มุม $2\theta \approx 56^\circ$ เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับผงผลึกมาตรฐาน เราพบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับผลึกสมบูรณ์ และพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบน(111)จะปรากฏเด่นชัดที่สุดจากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe พบว่ามีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) เด่นชัดและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้น และเด่นชัดมากที่สุดที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm จากผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถนำข้อมูลที่ได้อธิบายคำนวณหาค่าคงตัวของโครงผลึก ขนาดของเกรน สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.6 – 4.25

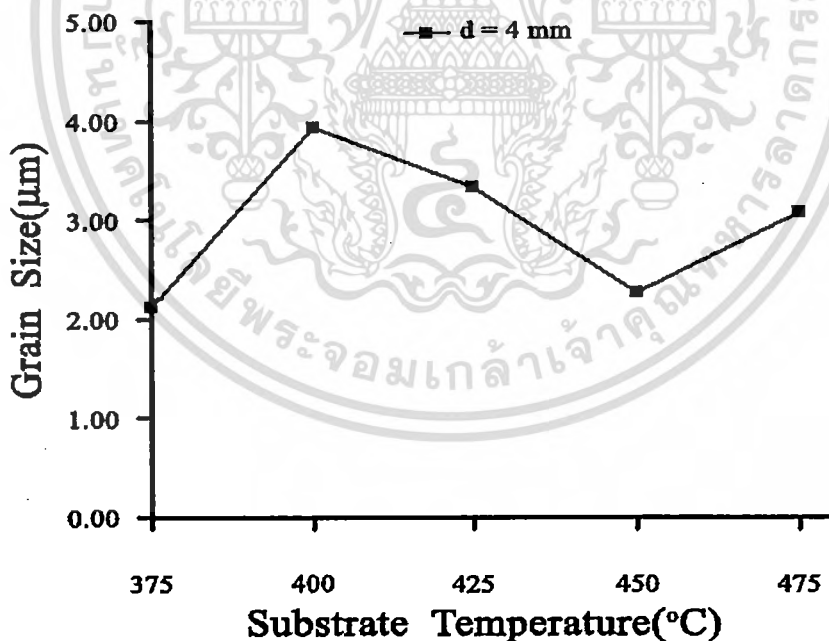


รูปที่ 4.6 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

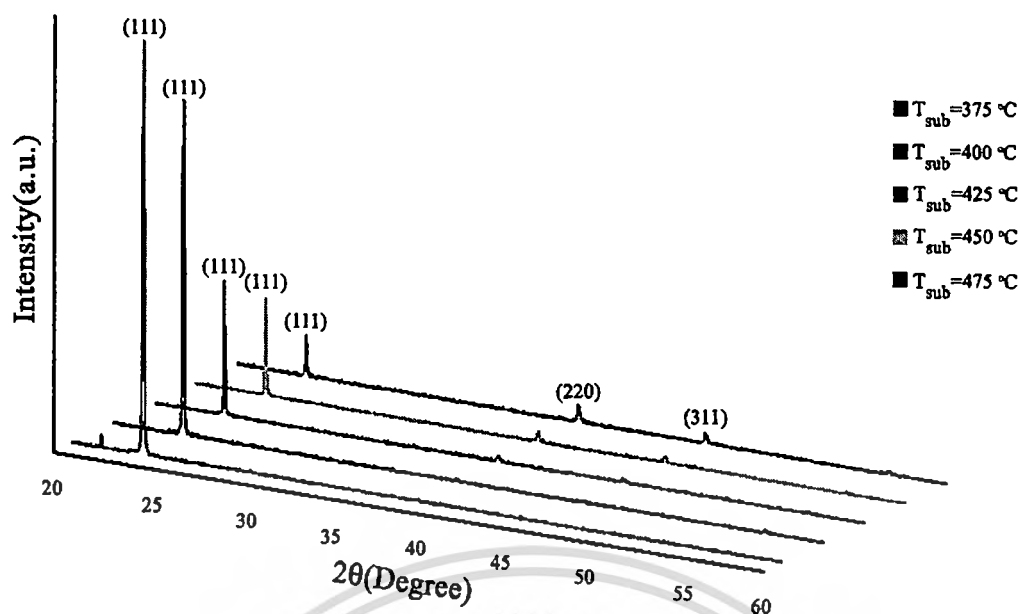


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

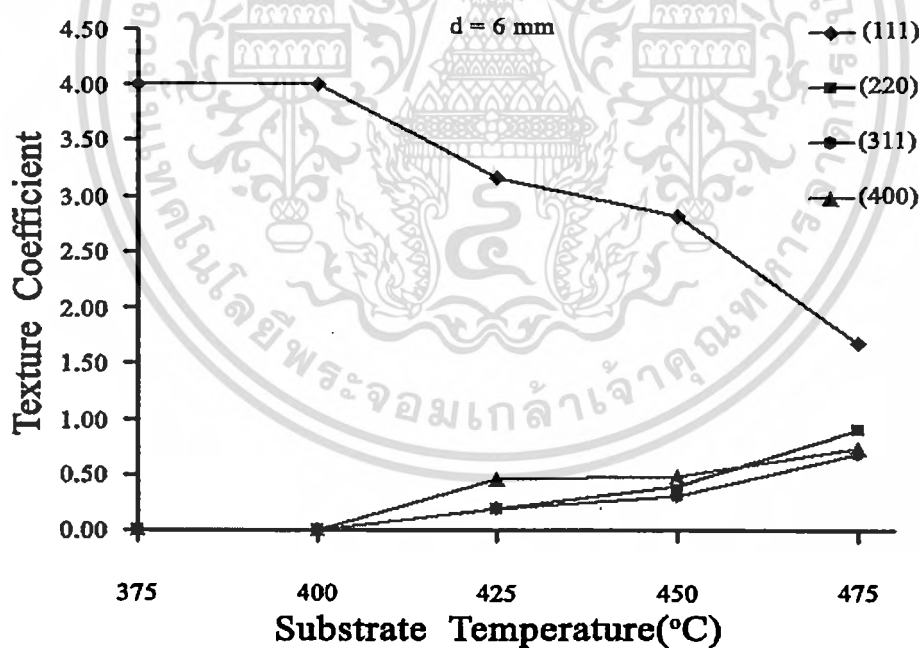


รูปที่ 4.8 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

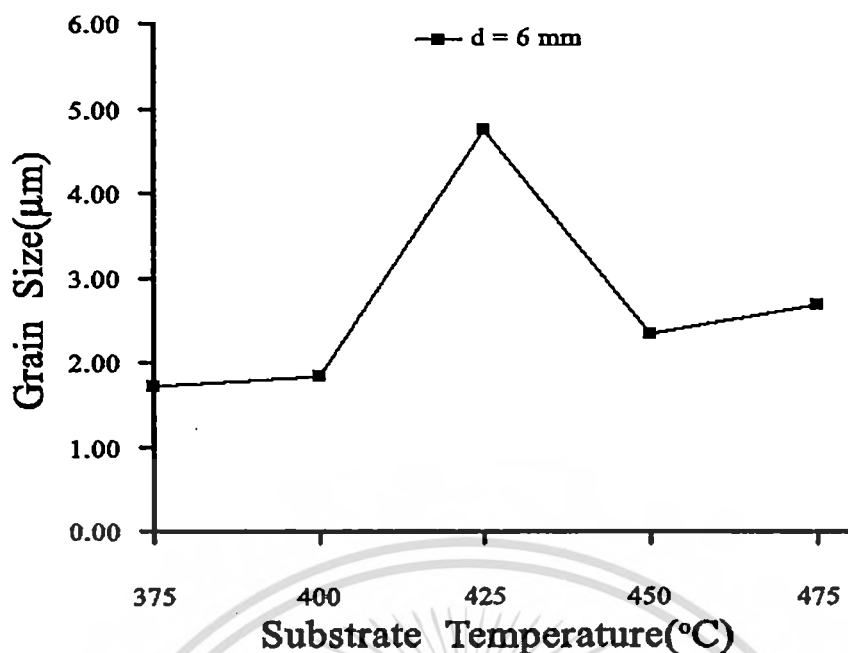
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



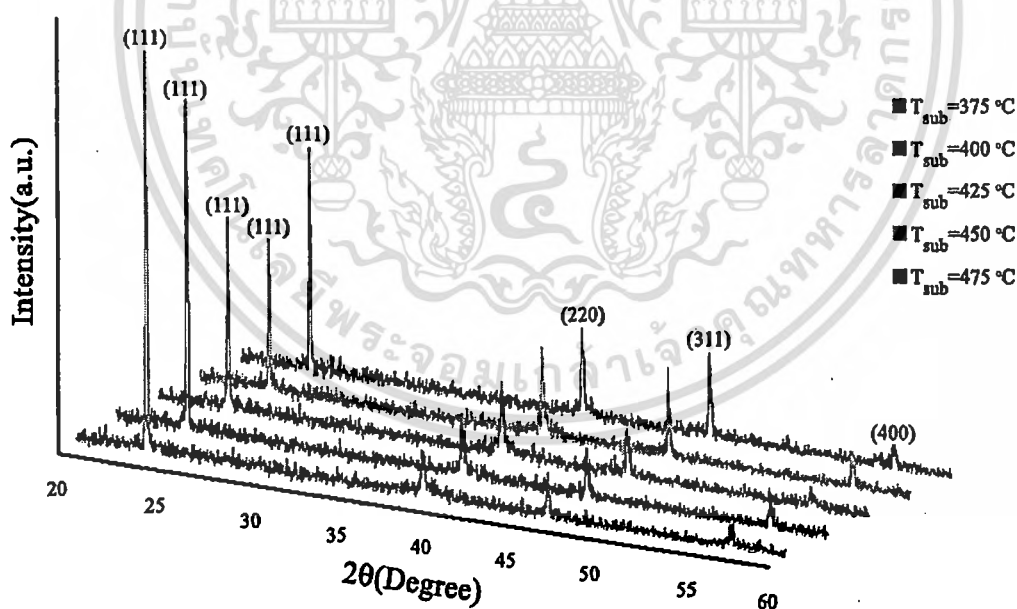
รูปที่ 4.9 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

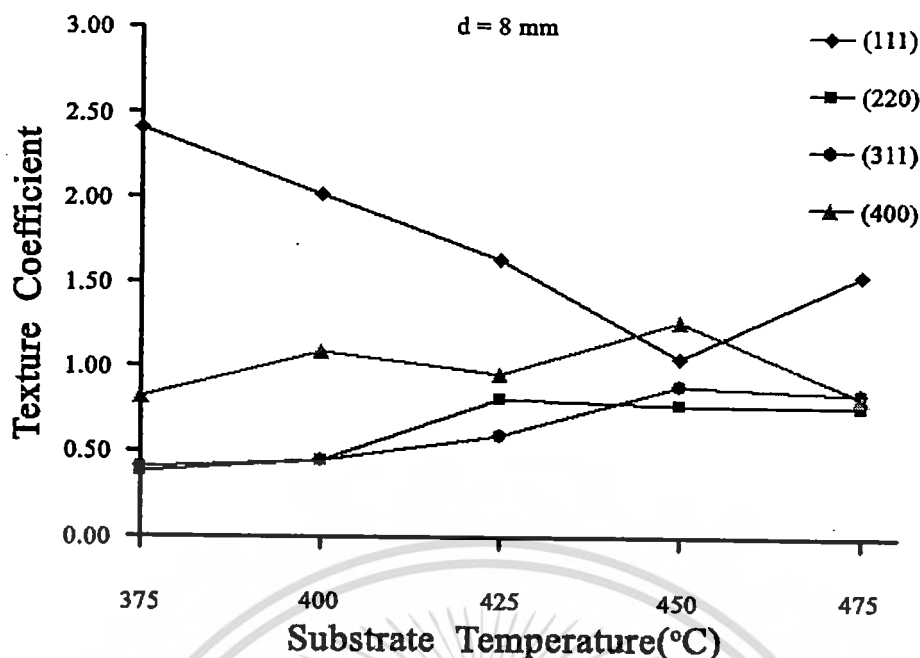


รูปที่ 4.11 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

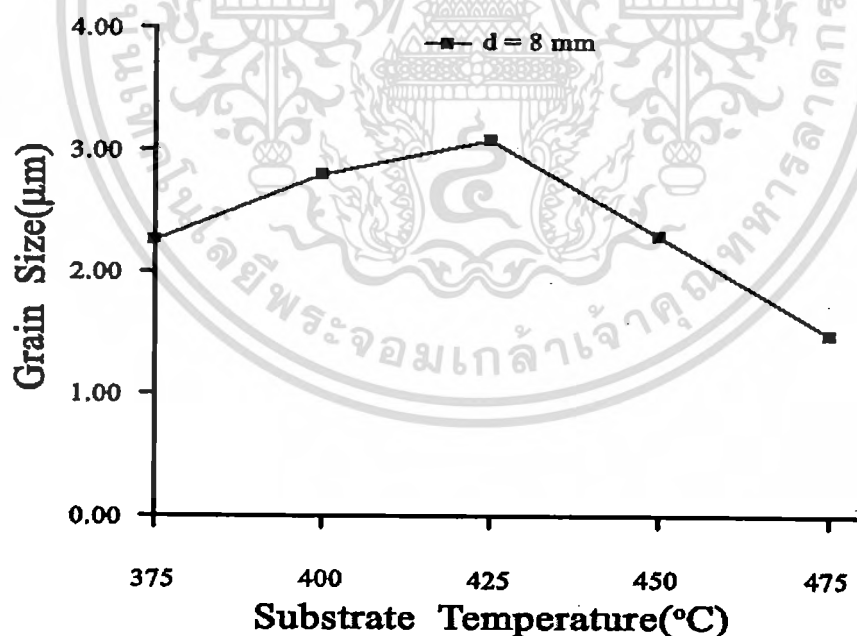


รูปที่ 4.12 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

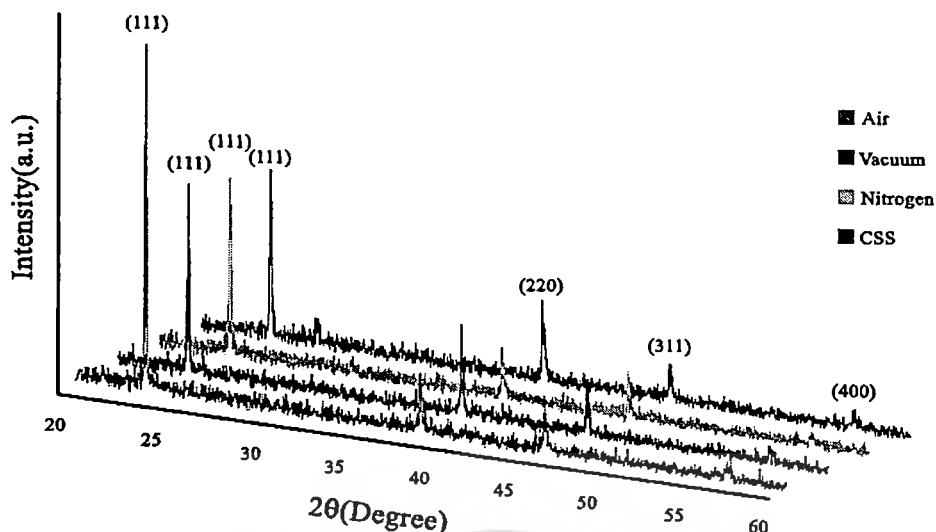


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

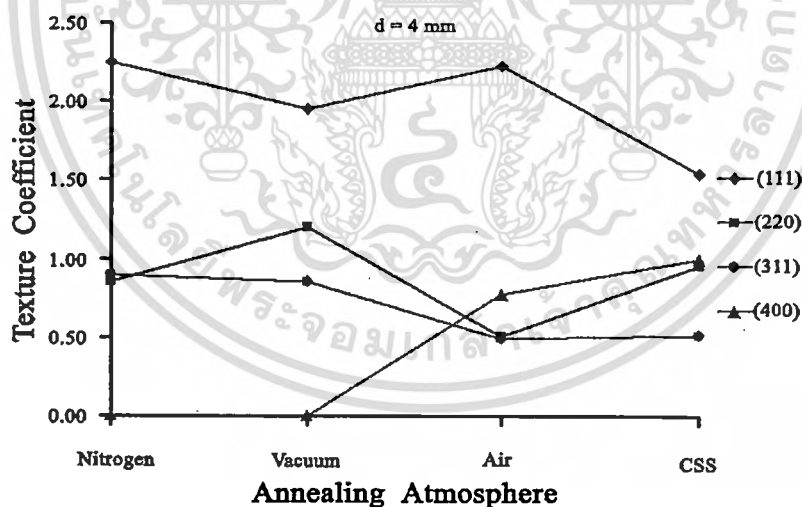


รูปที่ 4.14 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

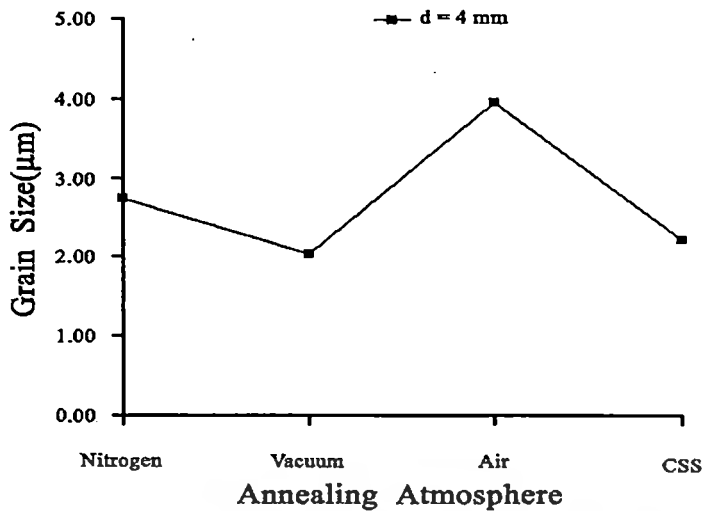
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



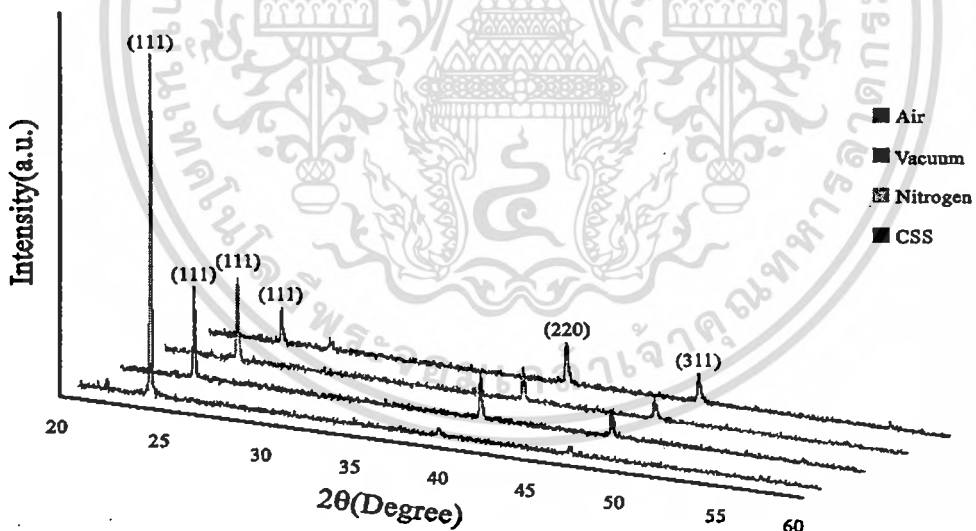
รูปที่ 4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด สารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

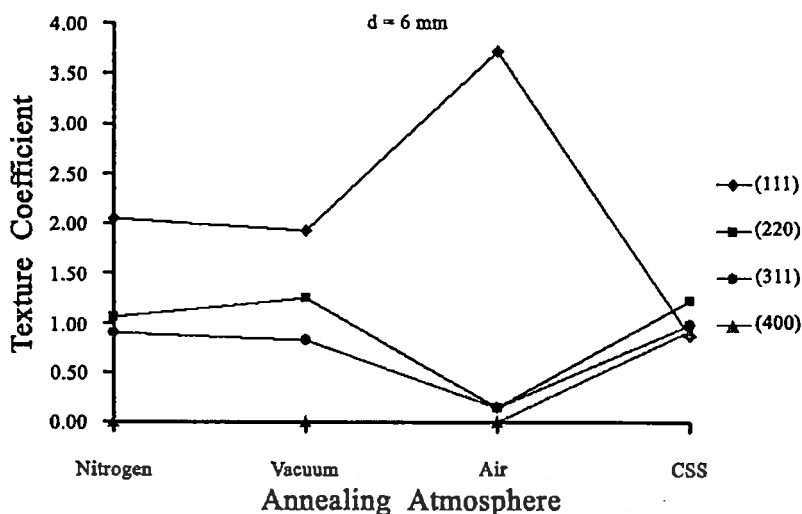


รูปที่ 4.17 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

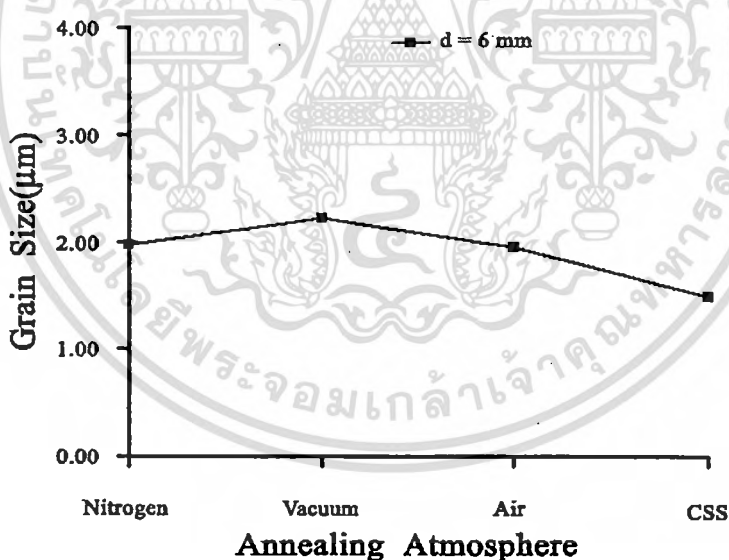


รูปที่ 4.18 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

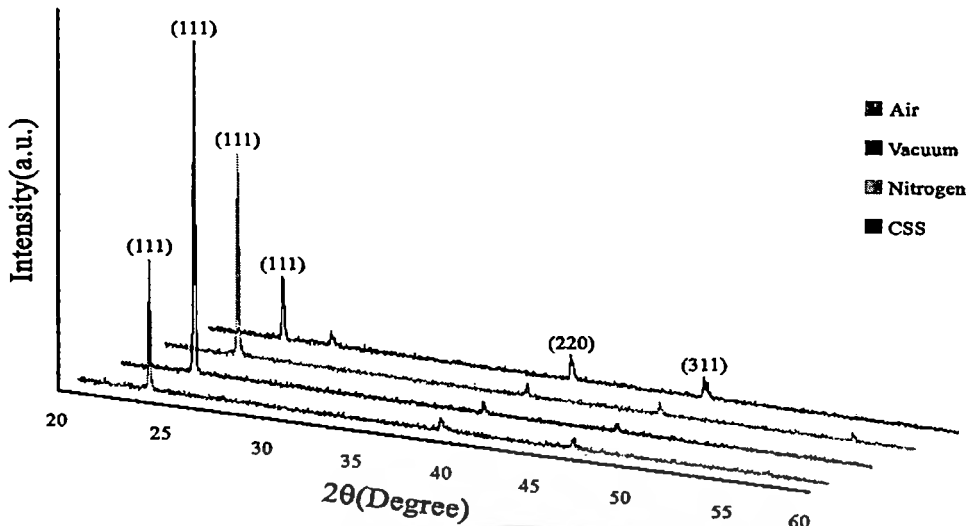


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

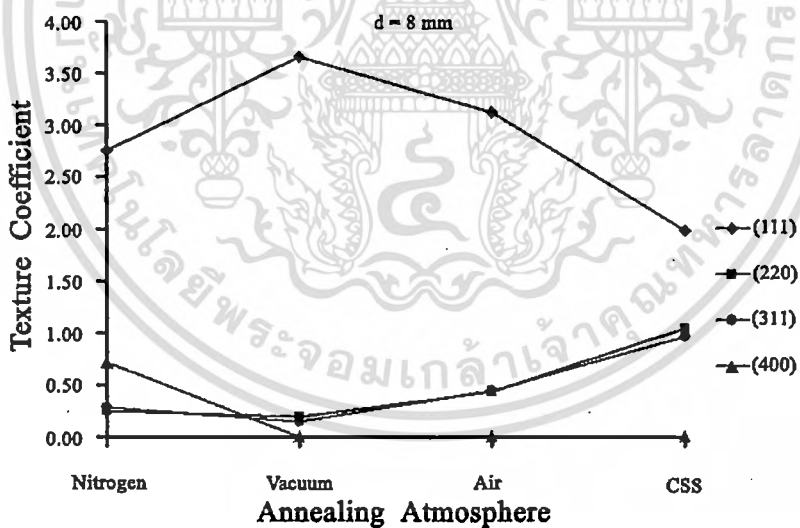


รูปที่ 4.20 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

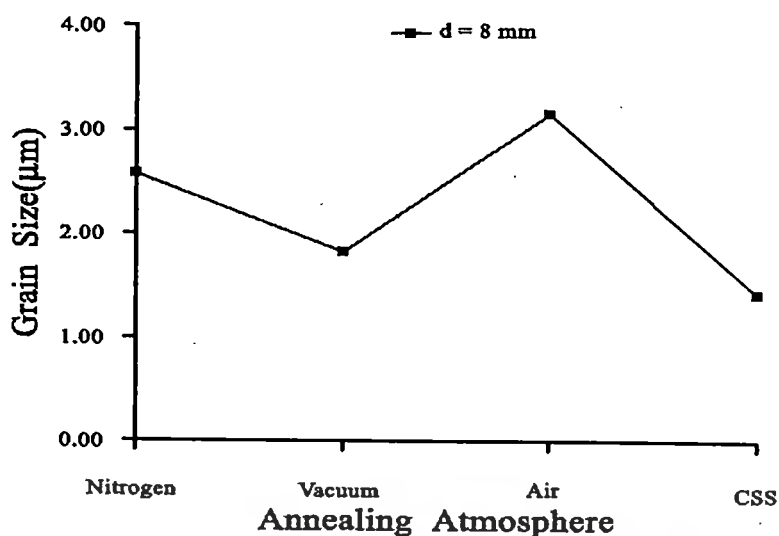


รูปที่ 4.21 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

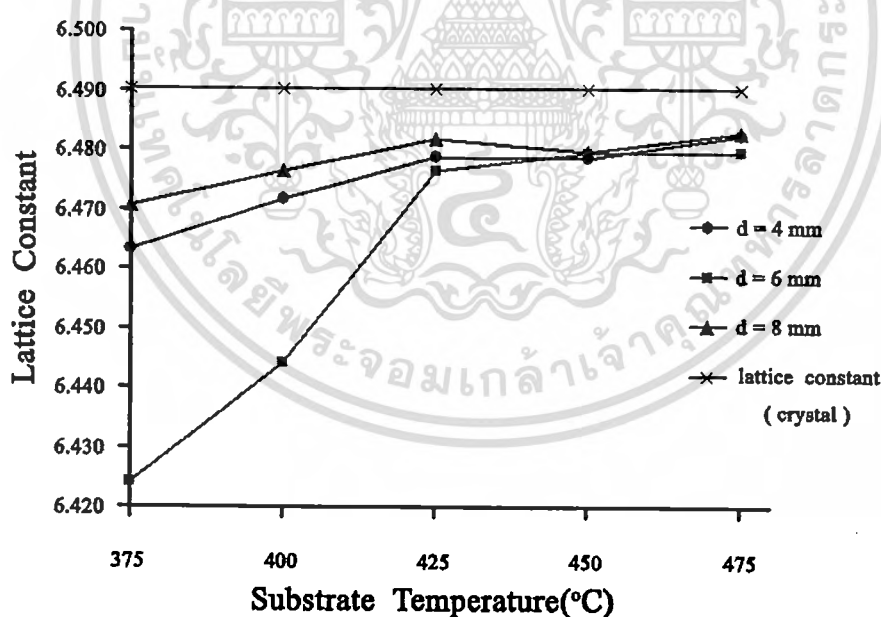


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

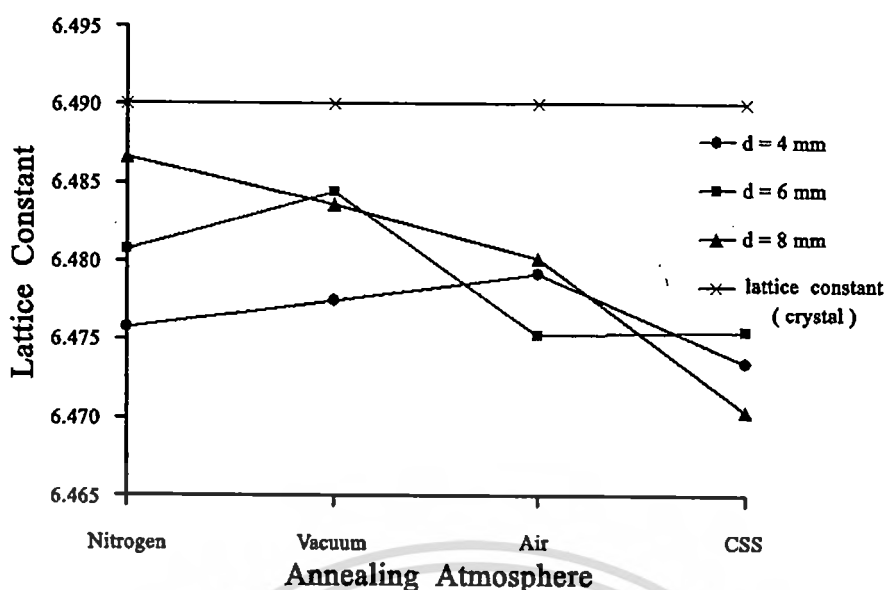


รูปที่ 4.23 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.24 แสดงค่าคงตัวของโครงผลึกของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375 - 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

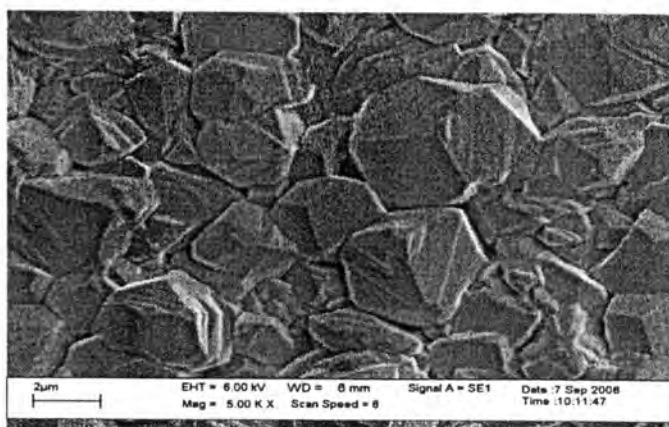
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



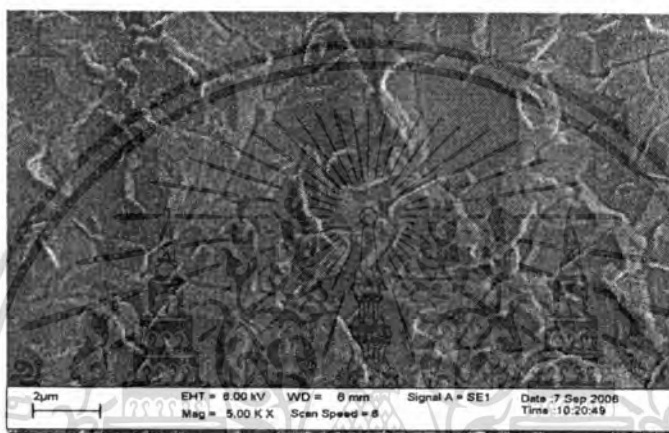
รูปที่ 4.25 แสดงค่าคงตัวของโครงผลึกของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

4.2.2 ผลการศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

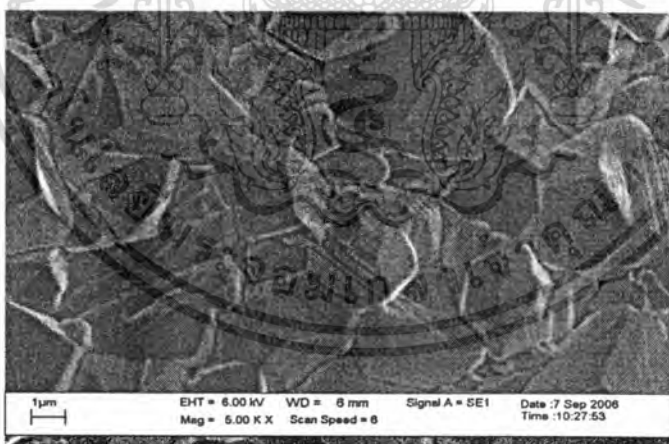
การศึกษาโครงผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางได้ ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 °C เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 mm มีขนาดของเกรนประมาณ 3.14-5.29 μm สำหรับระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 3.98 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.34 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.74 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.33



$d = 4 \text{ mm}$



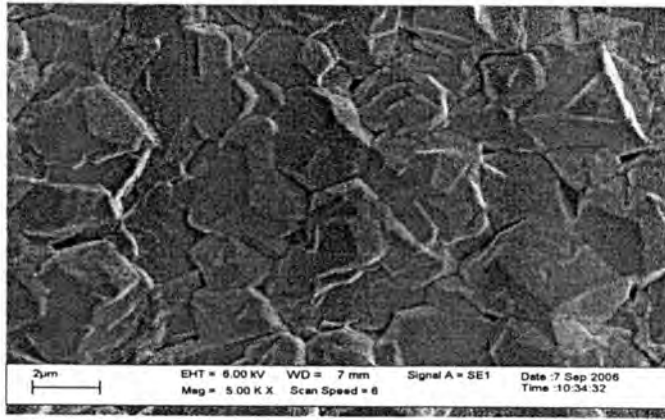
$d = 6 \text{ mm}$



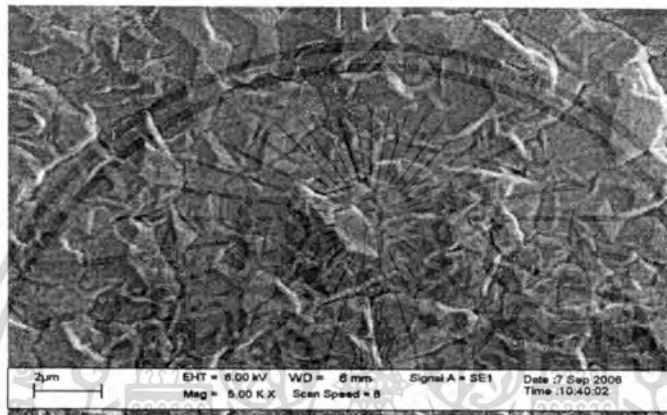
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 375°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

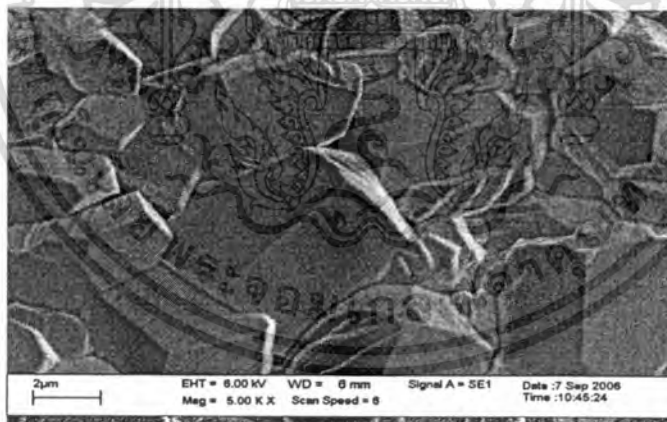
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 4 \text{ mm}$



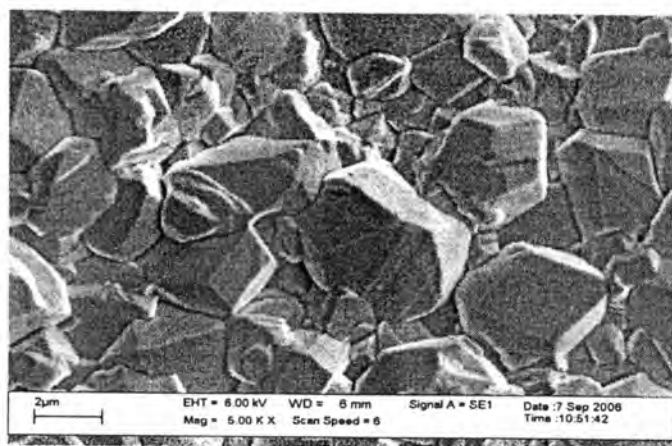
$d = 6 \text{ mm}$



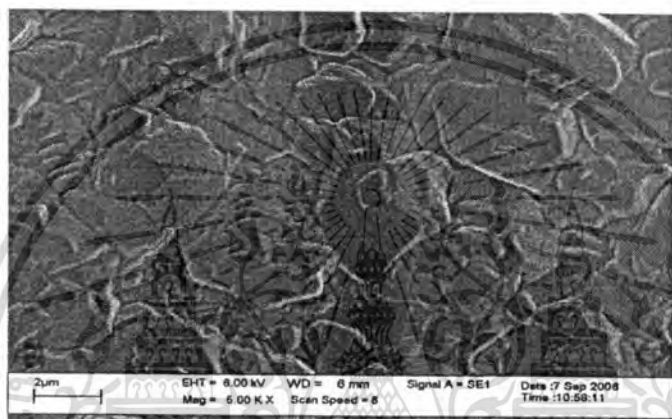
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

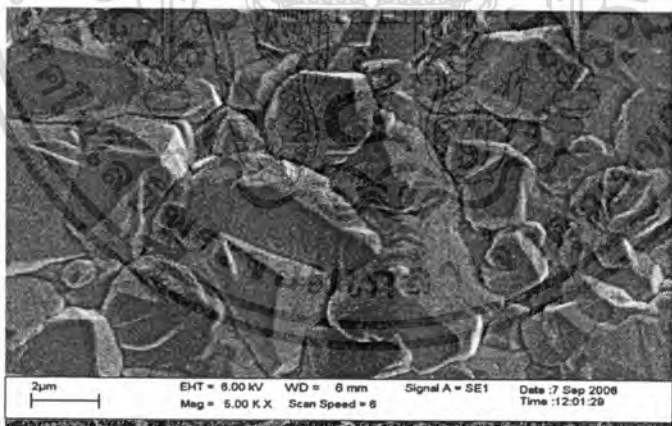
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



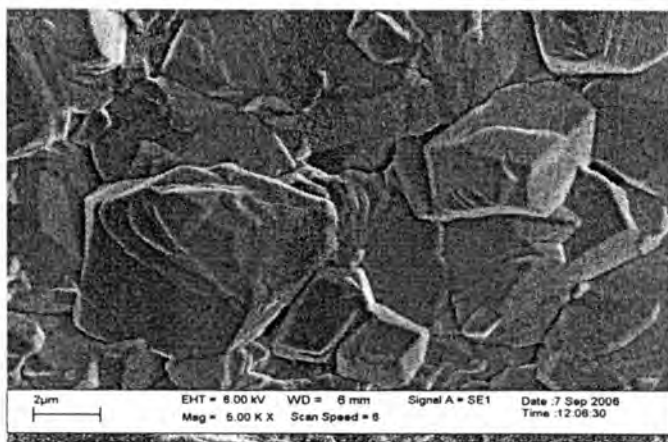
d = 6 mm



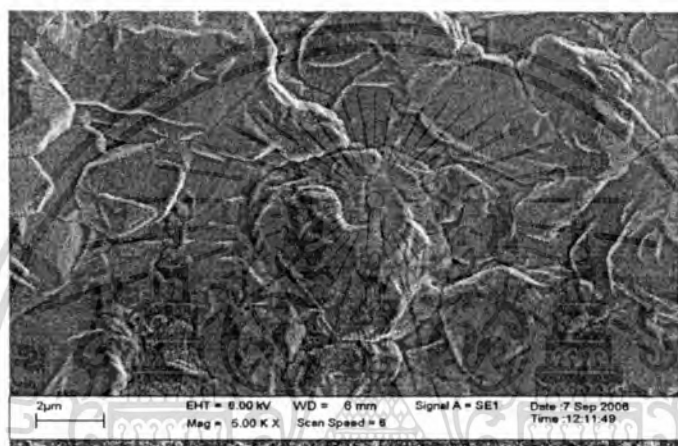
d = 8 mm

รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับ เท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

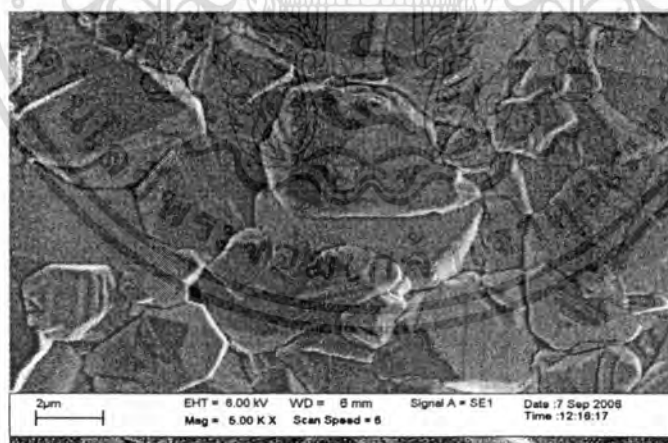
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



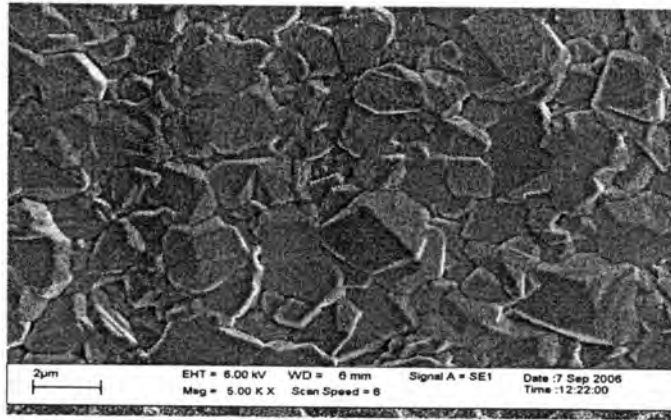
d = 6 mm



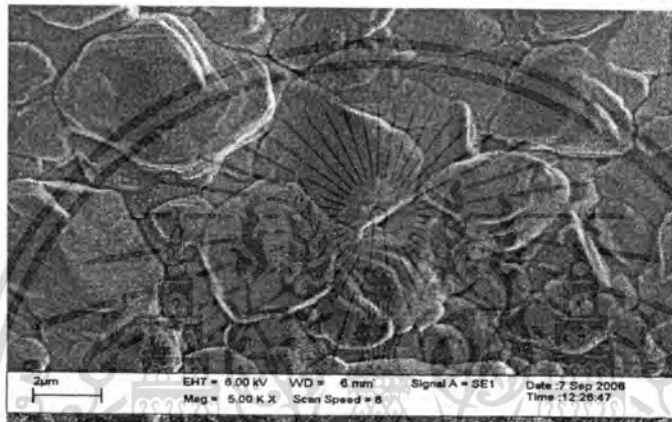
d = 8 mm

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 4 \text{ mm}$



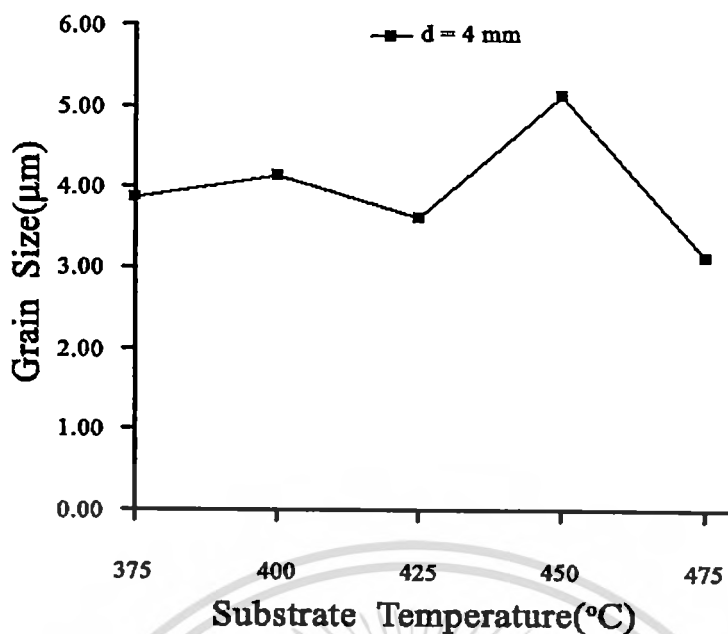
$d = 6 \text{ mm}$



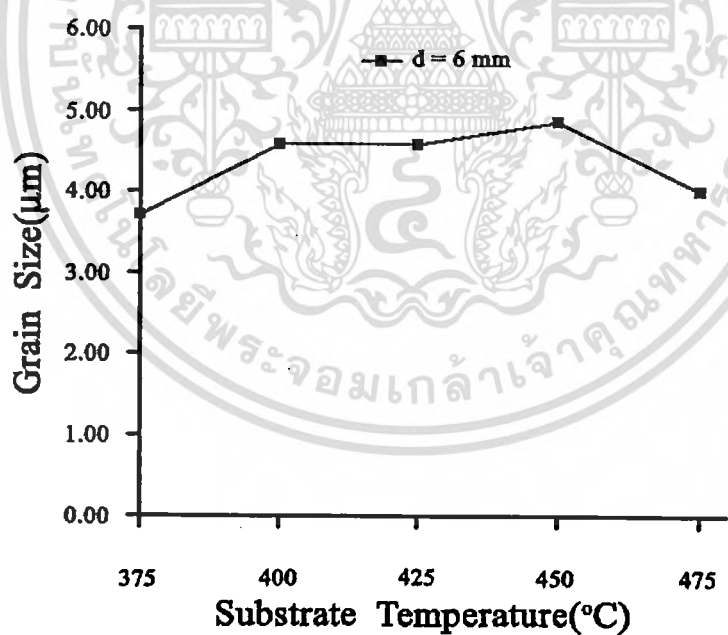
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แตกต่างกันโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับ เท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

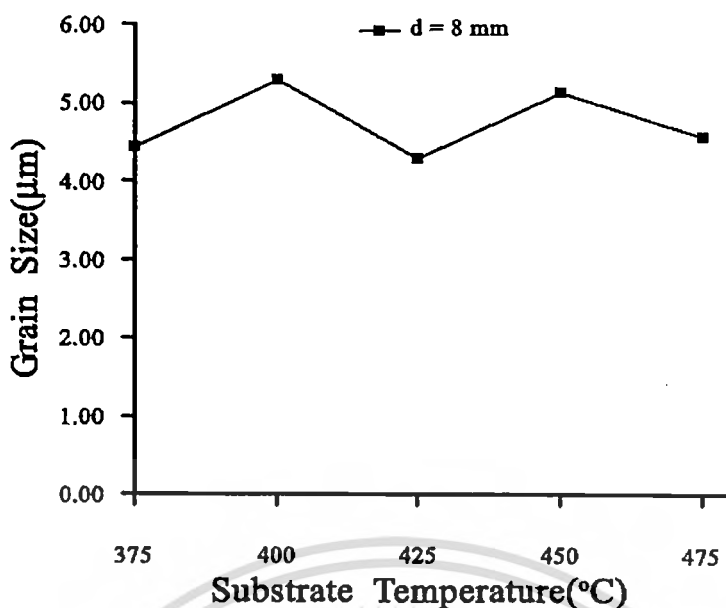
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

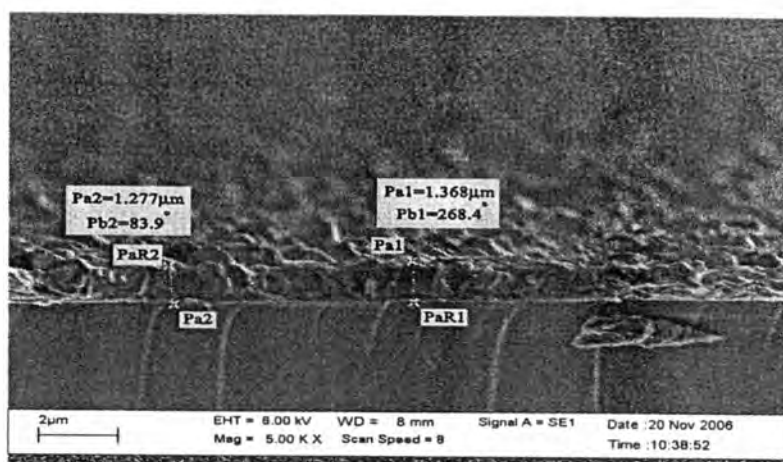


รูปที่ 4.32 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 m และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

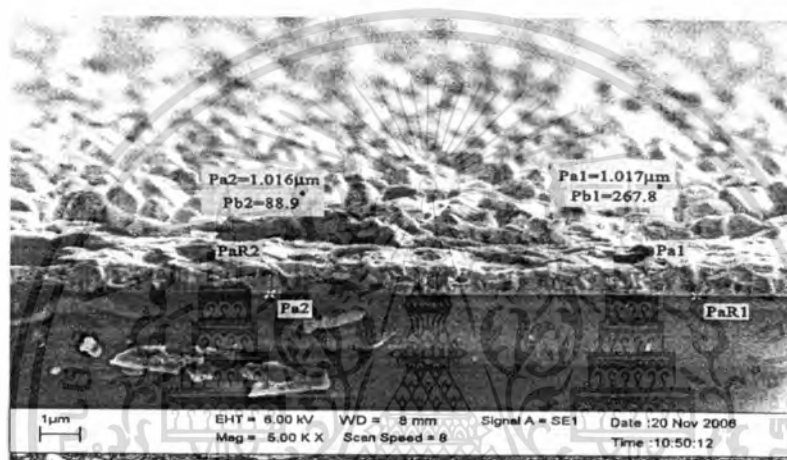


รูปที่ 4.33 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

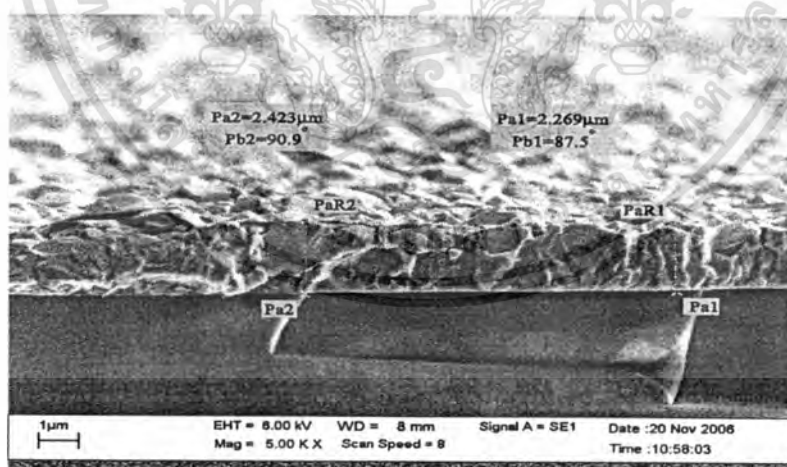
สำหรับภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 และ 4 นาทีเพื่อศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งจากการภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ $1.323\ \mu\text{m}$ ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ $1.017\ \mu\text{m}$ และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ $2.346\ \mu\text{m}$ และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ $2.511\ \mu\text{m}$ ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ $3.986\ \mu\text{m}$ และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ $2.990\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.34-4.35



d = 4 mm



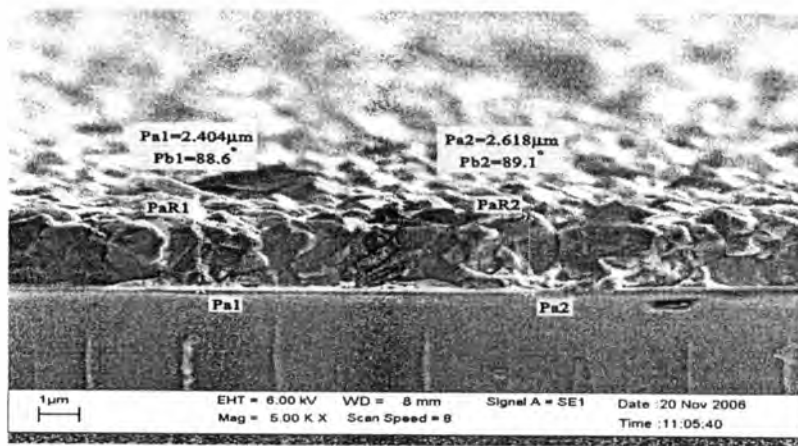
d = 6 mm



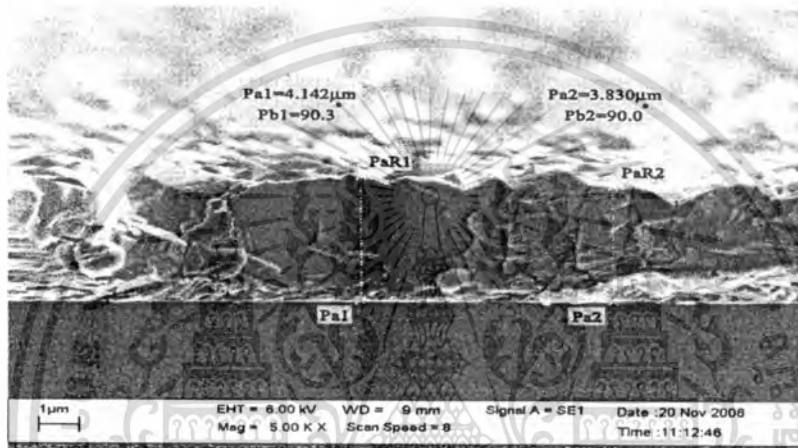
d = 8 mm

รูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาที

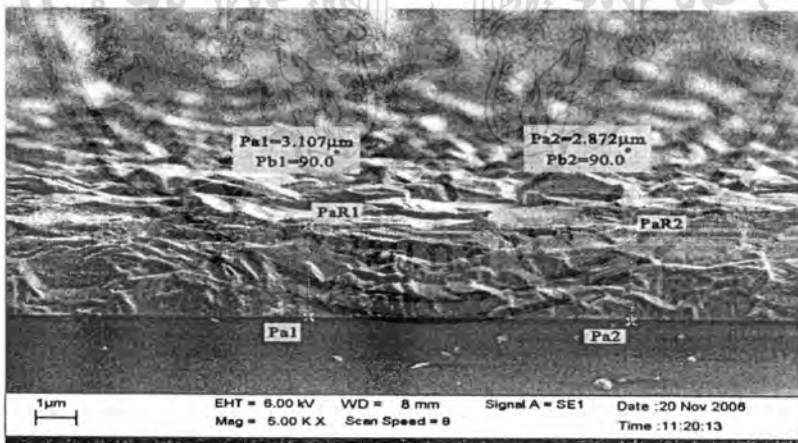
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



d = 6 mm

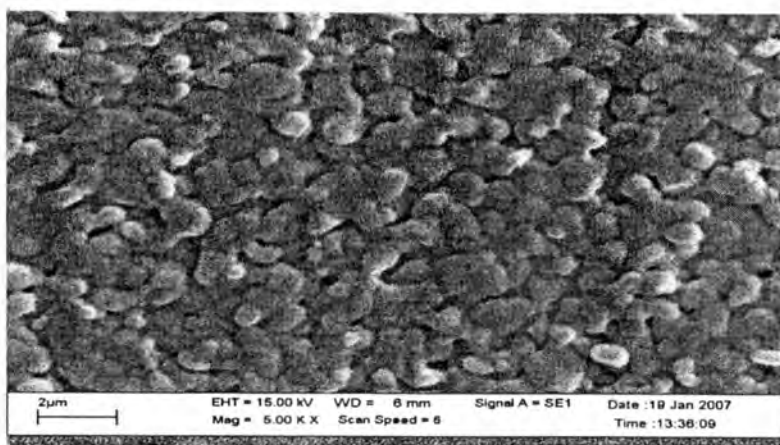


d = 8 mm

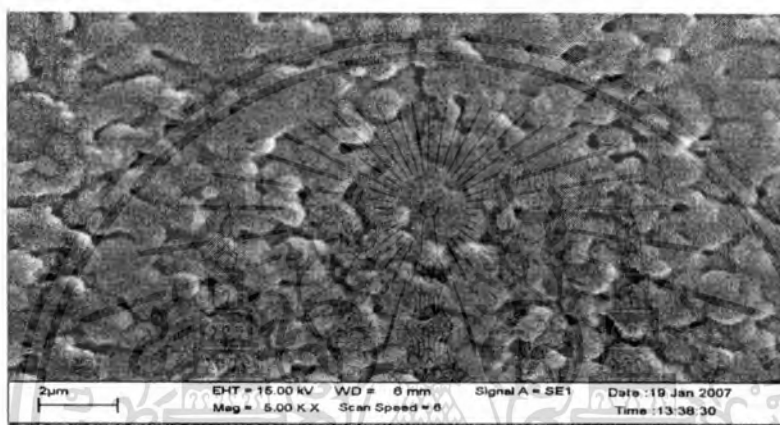
รูปที่ 4.35 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

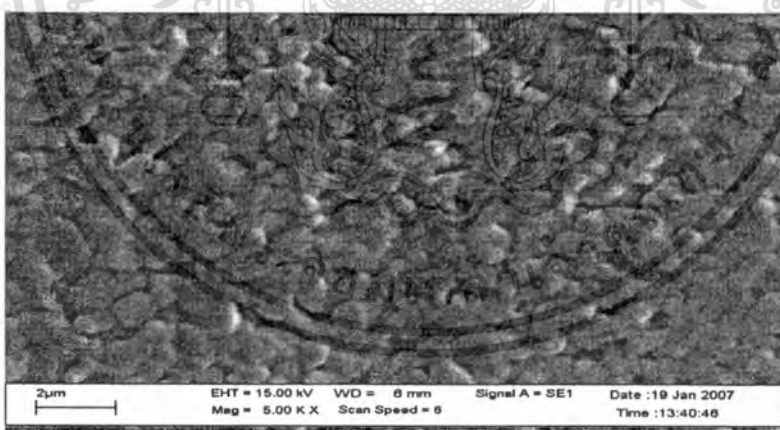
จากการศึกษาภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm 6 mm และ 8 mm โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เท่ากับ 400 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที จากนั้นนำฟิล์มบาง CdTe มาแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนีสในอากาศ ซึ่งจากภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางพบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศและภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีลักษณะผิวหน้าที่คล้ายคลึงกัน คือมีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะที่เชื่อมติดต่อกัน ส่วนกรณีที่แอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะเป็นเกรนเดียวกันและมีและมีเม็ดขาวเล็กๆติดที่บริเวณผิวหน้าซึ่งน่าจะเป็นสารแคดเมียมคลอไรด์บางส่วนที่ยังไม่เข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของฟิล์มบาง และกรณีที่แอนนีสในอากาศมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ยังไม่ผ่านการแอนนีส ซึ่งจากภาพถ่ายผิวหน้าเราสันนิษฐานว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นอาจจะยังไม่สมบูรณ์เพราะสังเกตจากลักษณะของขอบเขตของเกรนมีลักษณะที่สามารถรวมเป็นเกรนเดียวกันได้มากกว่านี้ ขนาดของเกรนเฉลี่ยของฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดไม่สามารถคำนวณหาได้เนื่องจากขอบเขตของแต่ละเกรนไม่ชัดเจน ส่วนกรณีแอนนีสในอากาศขนาดของเกรนเฉลี่ยนั้นสามารถคำนวณหาได้คือที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 3.20 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 2.20 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 2.37 μm ภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันซึ่งผ่านการแอนนีสในบรรยากาศต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.36-4.39



d = 4 mm



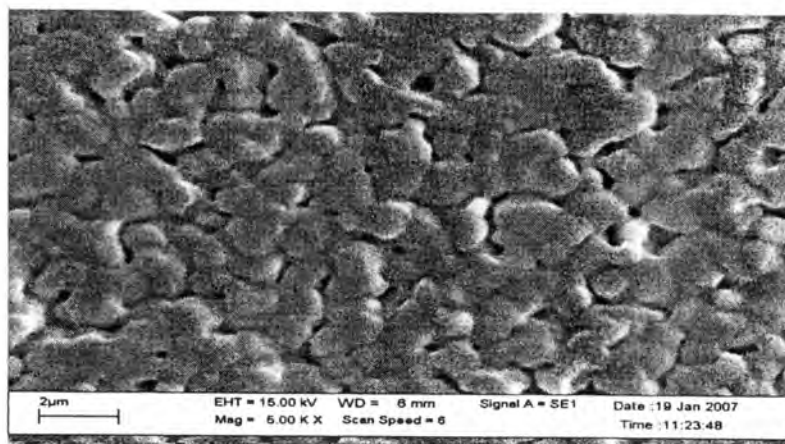
d = 6 mm



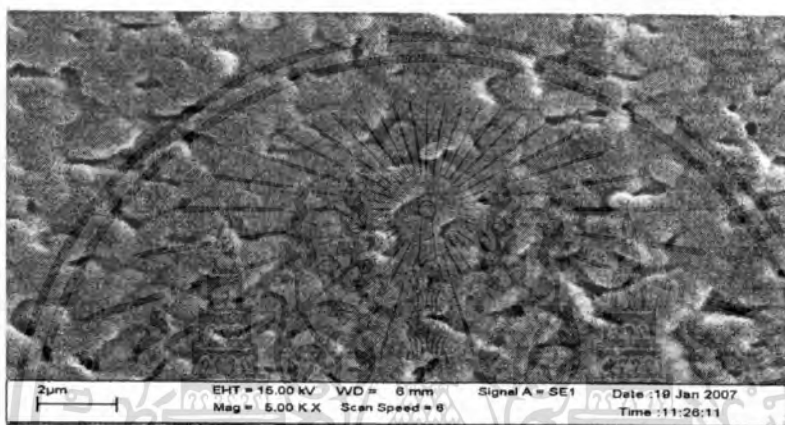
d = 8 mm

รูปที่ 4.36 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของ แคลเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

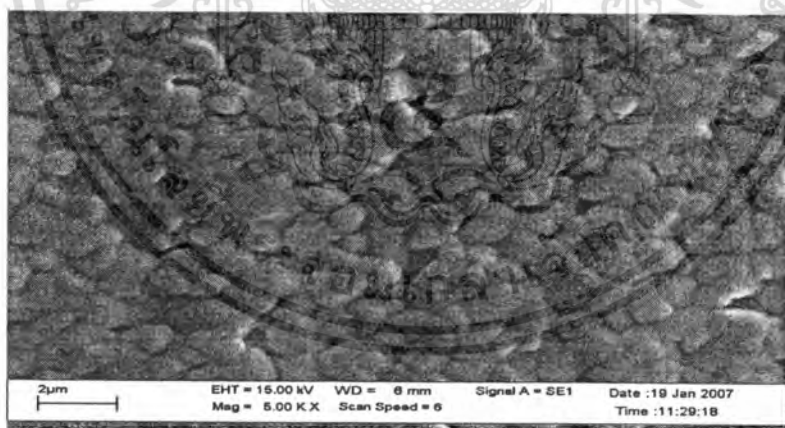
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



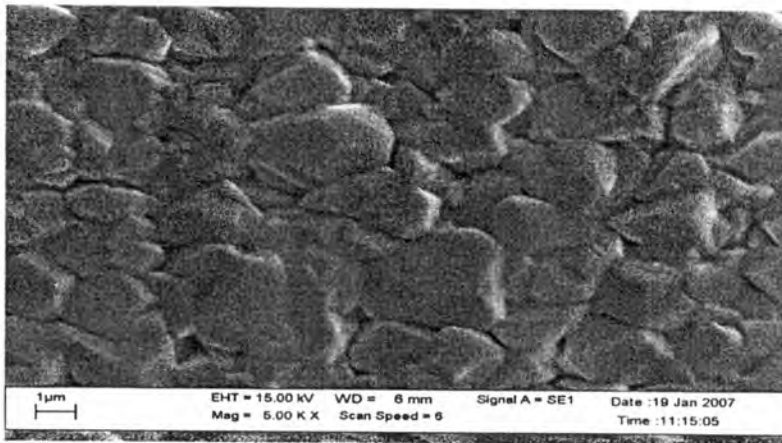
d = 6 mm



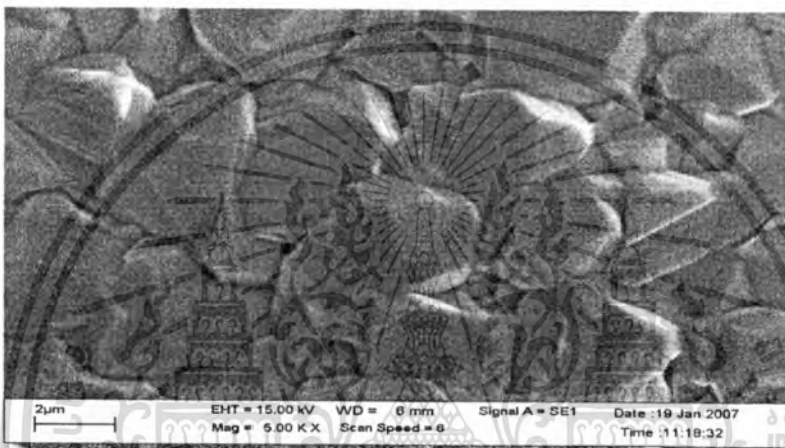
d = 8 mm

รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของ แคลเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีภายใน ระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์แตกต่างกัน

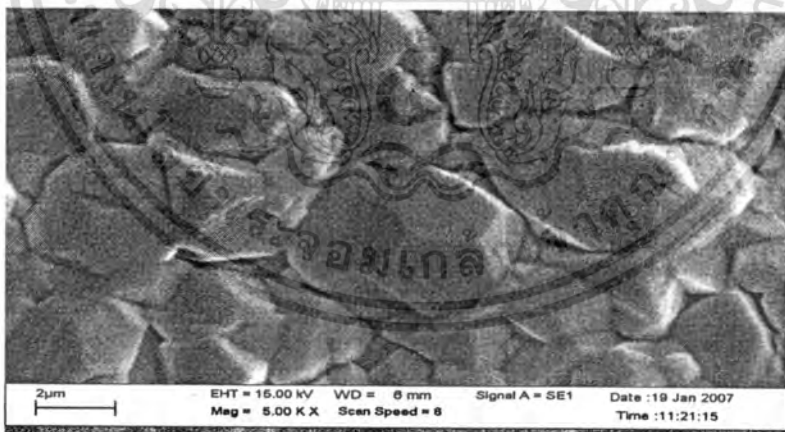
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



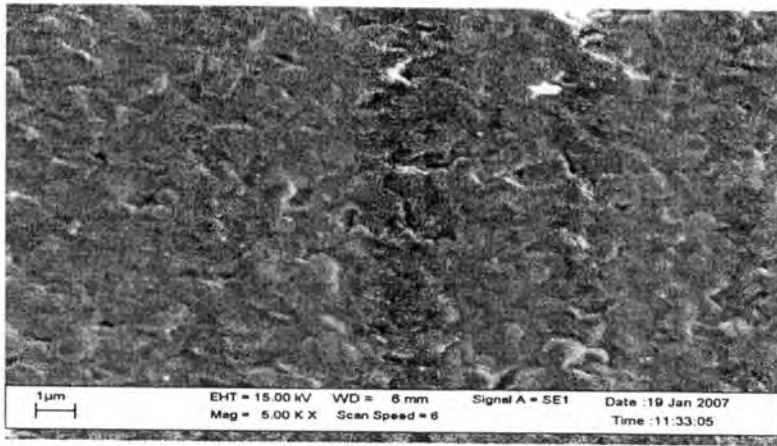
d = 6 mm



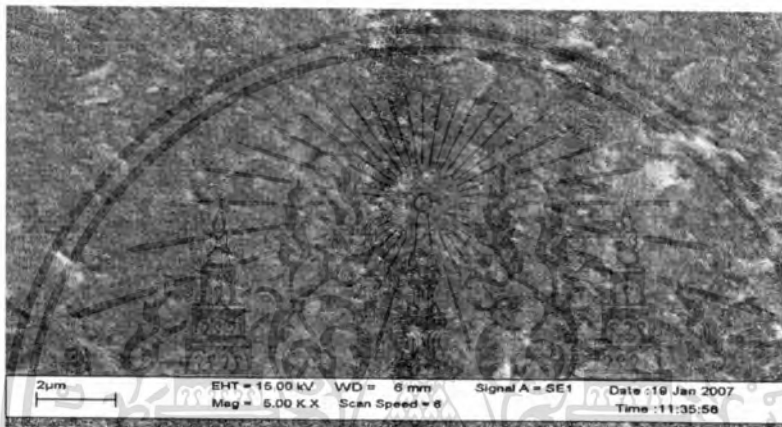
d = 8 mm

รูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

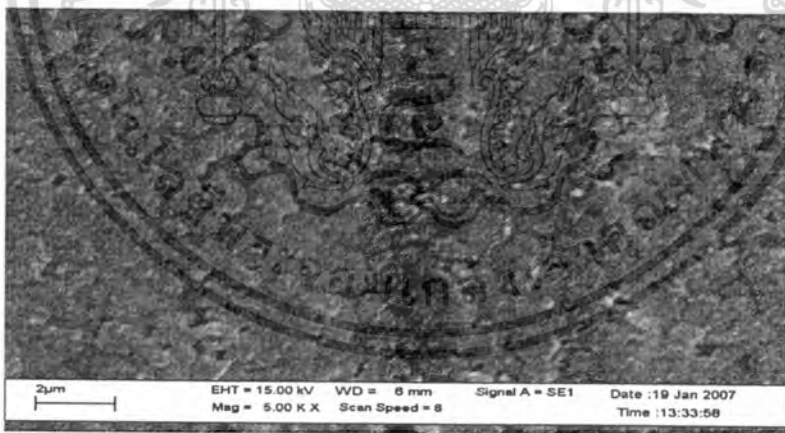
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



d = 6 mm

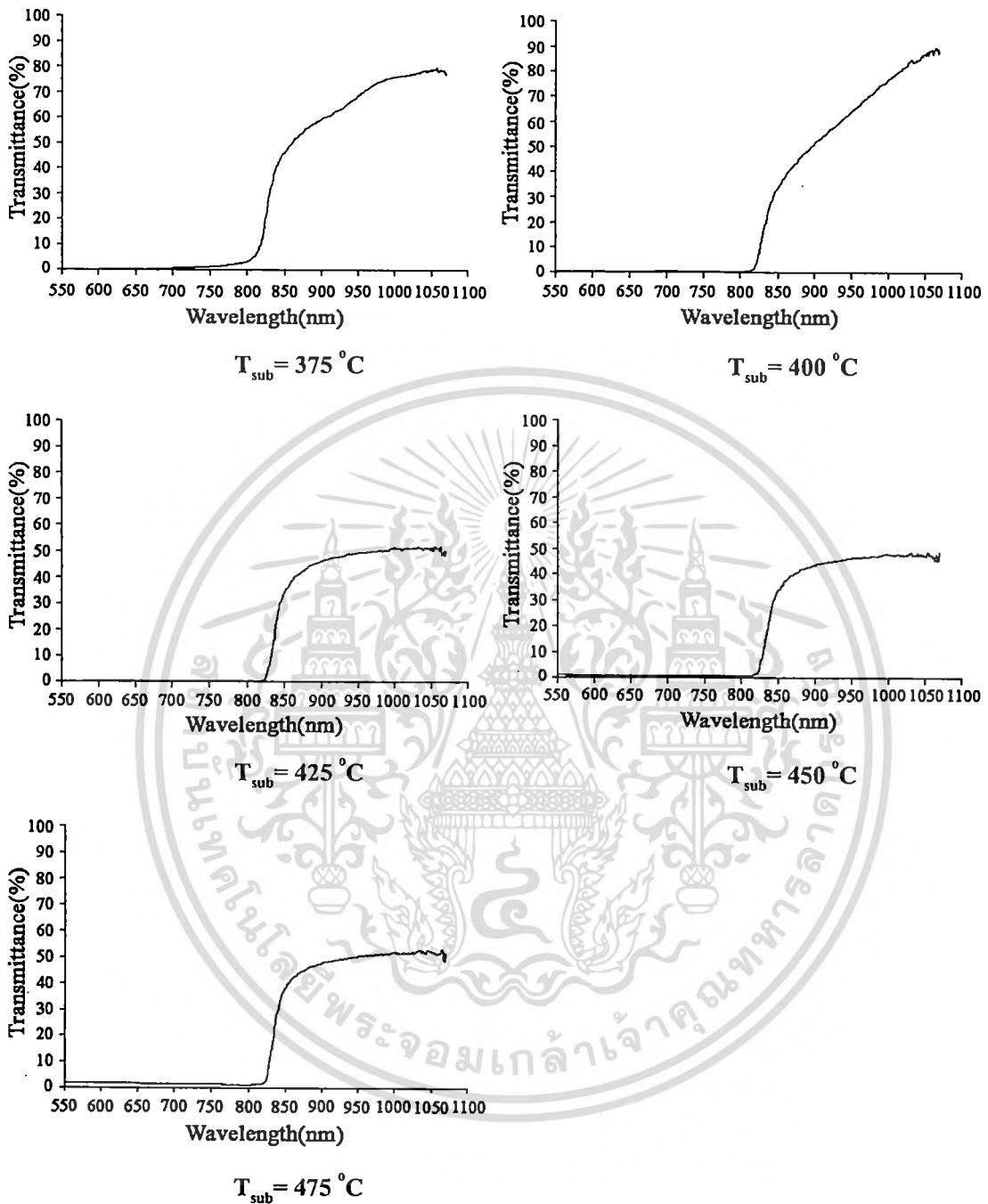


d = 8 mm

รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของ แกลเมียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะ ประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

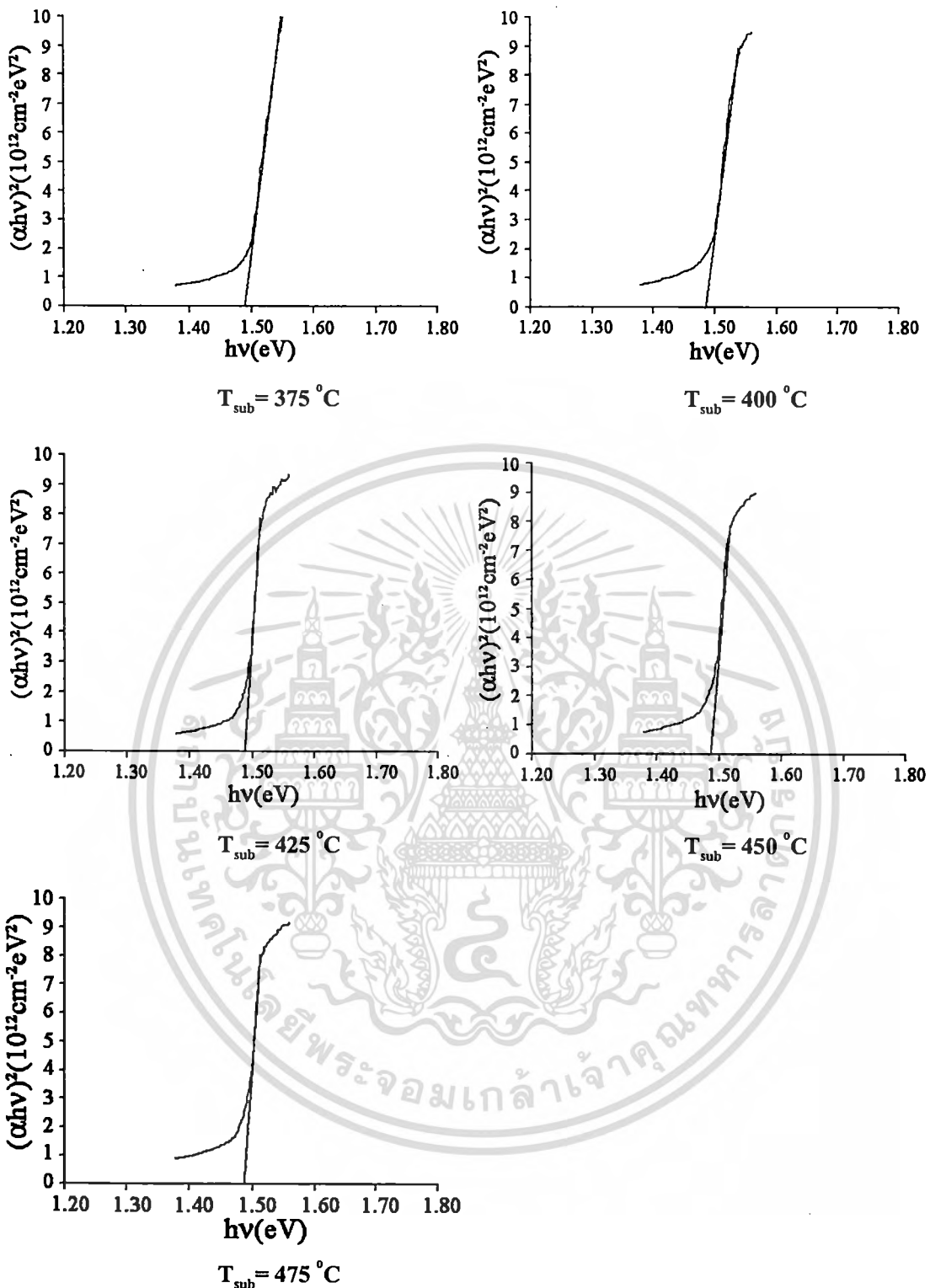
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์



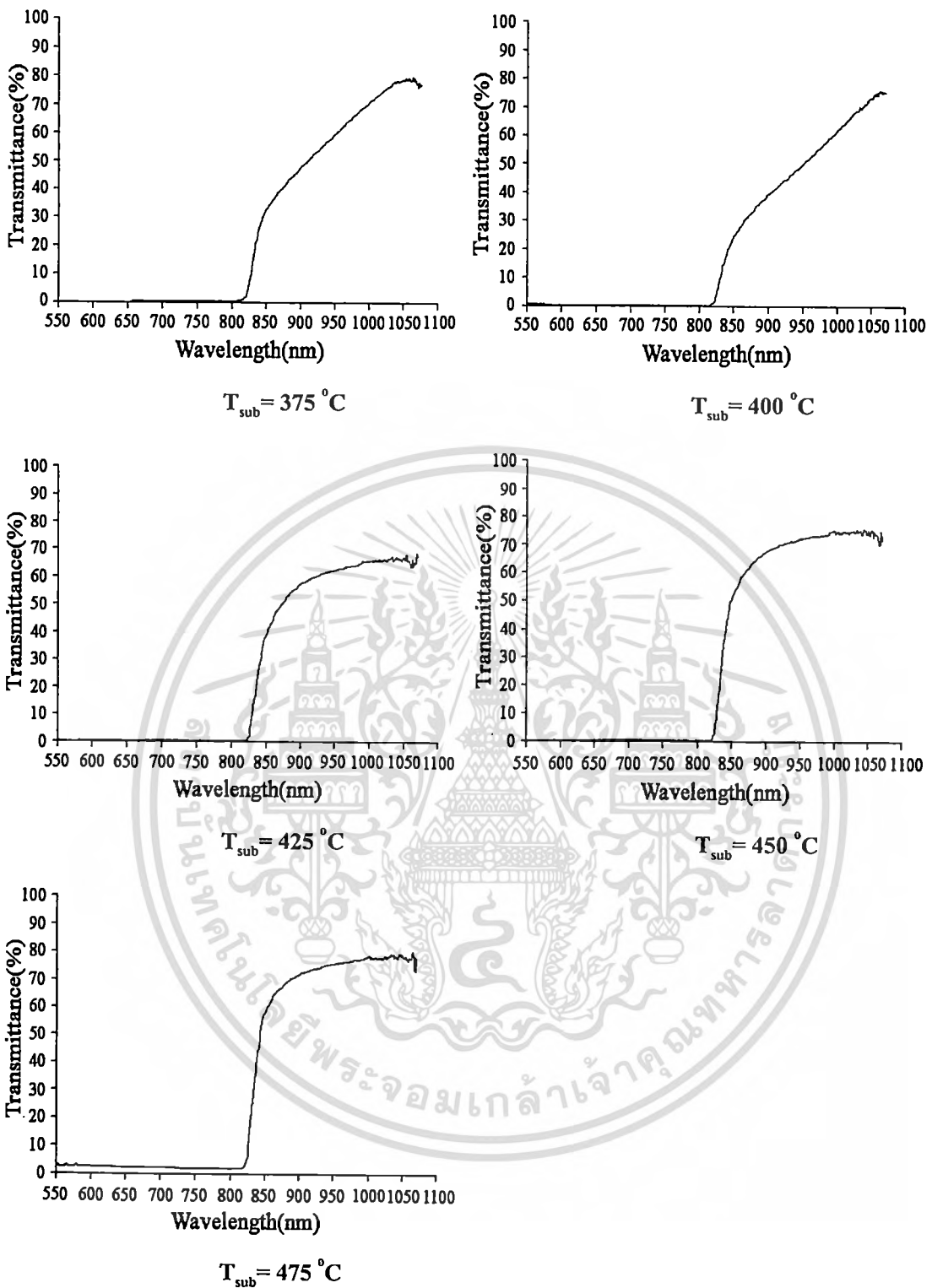
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



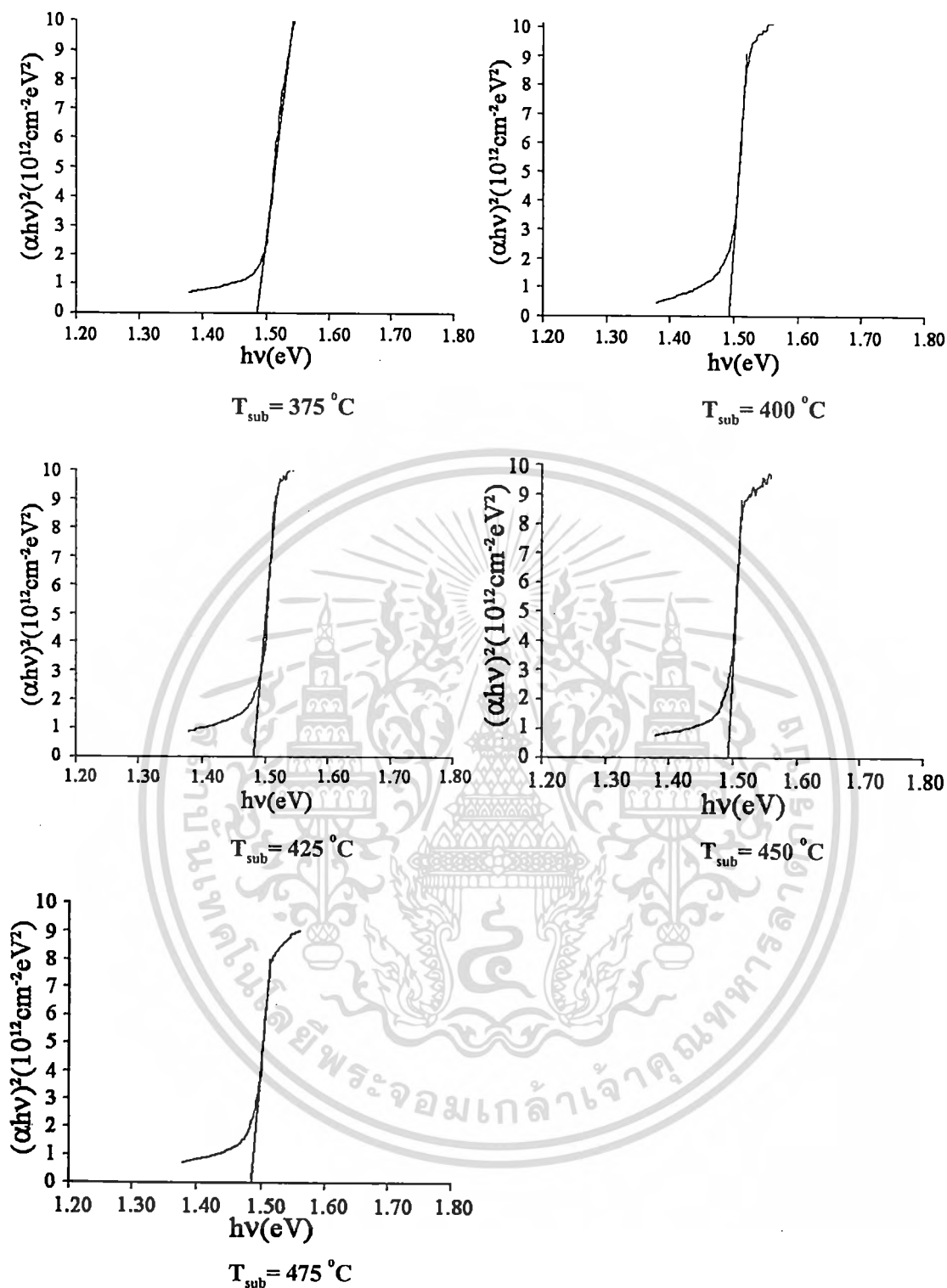
รูปที่ 4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ फिल्मบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



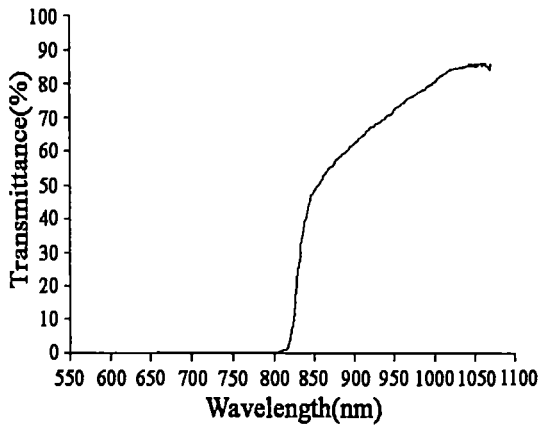
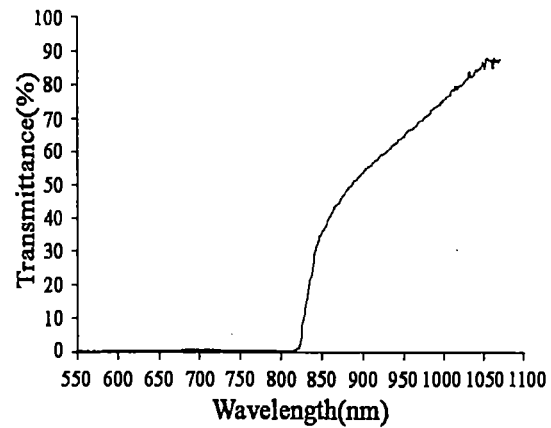
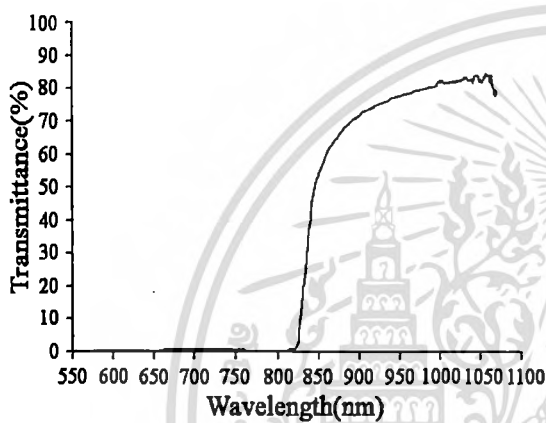
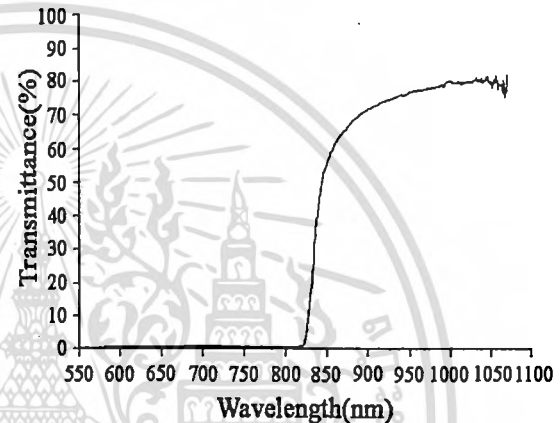
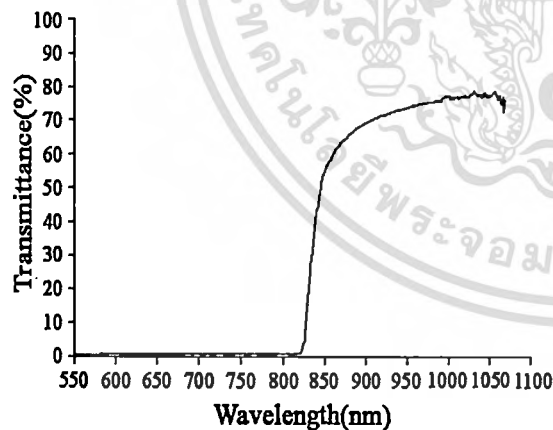
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



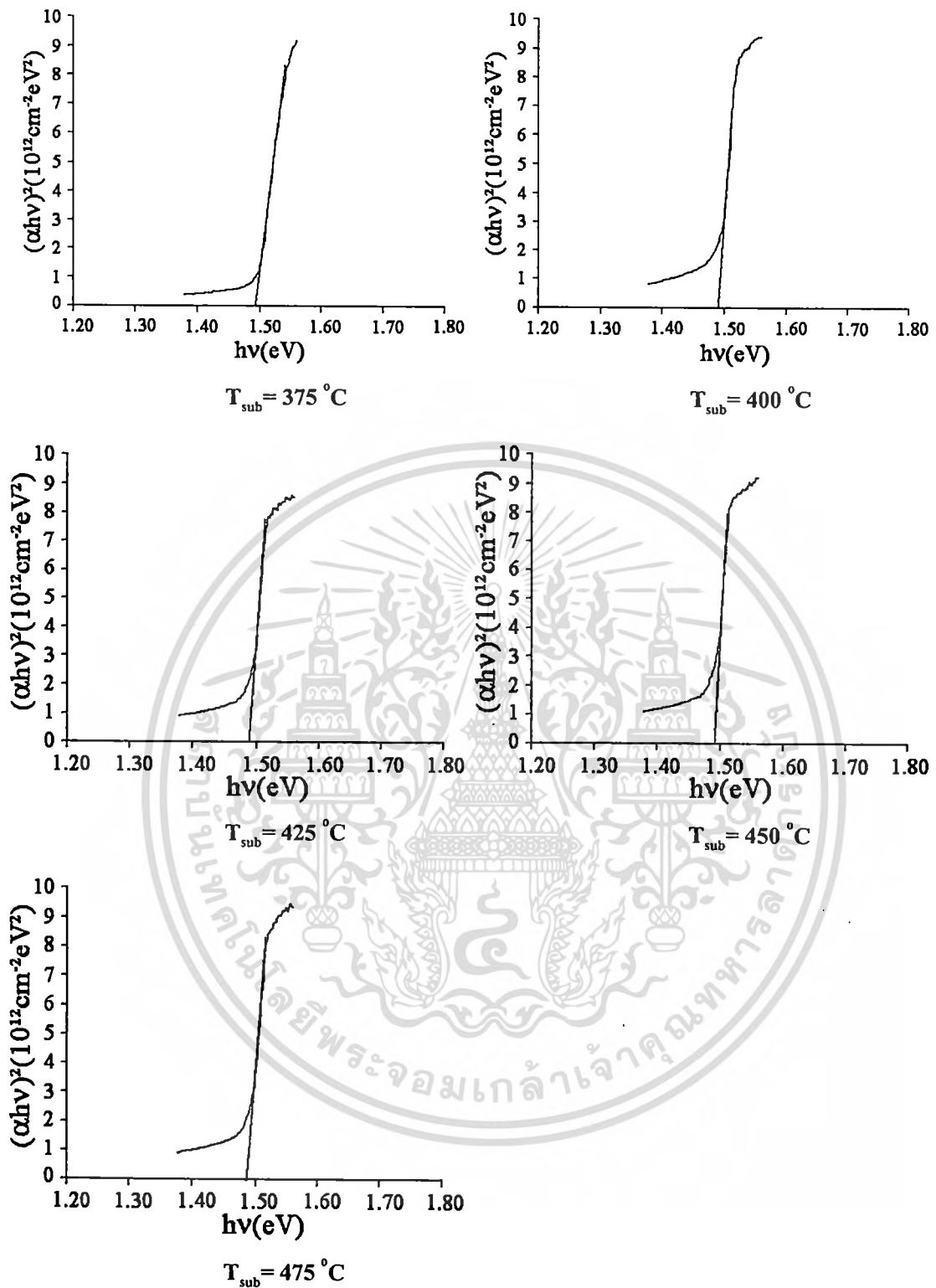
รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^\circ\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 $T_{\text{sub}} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

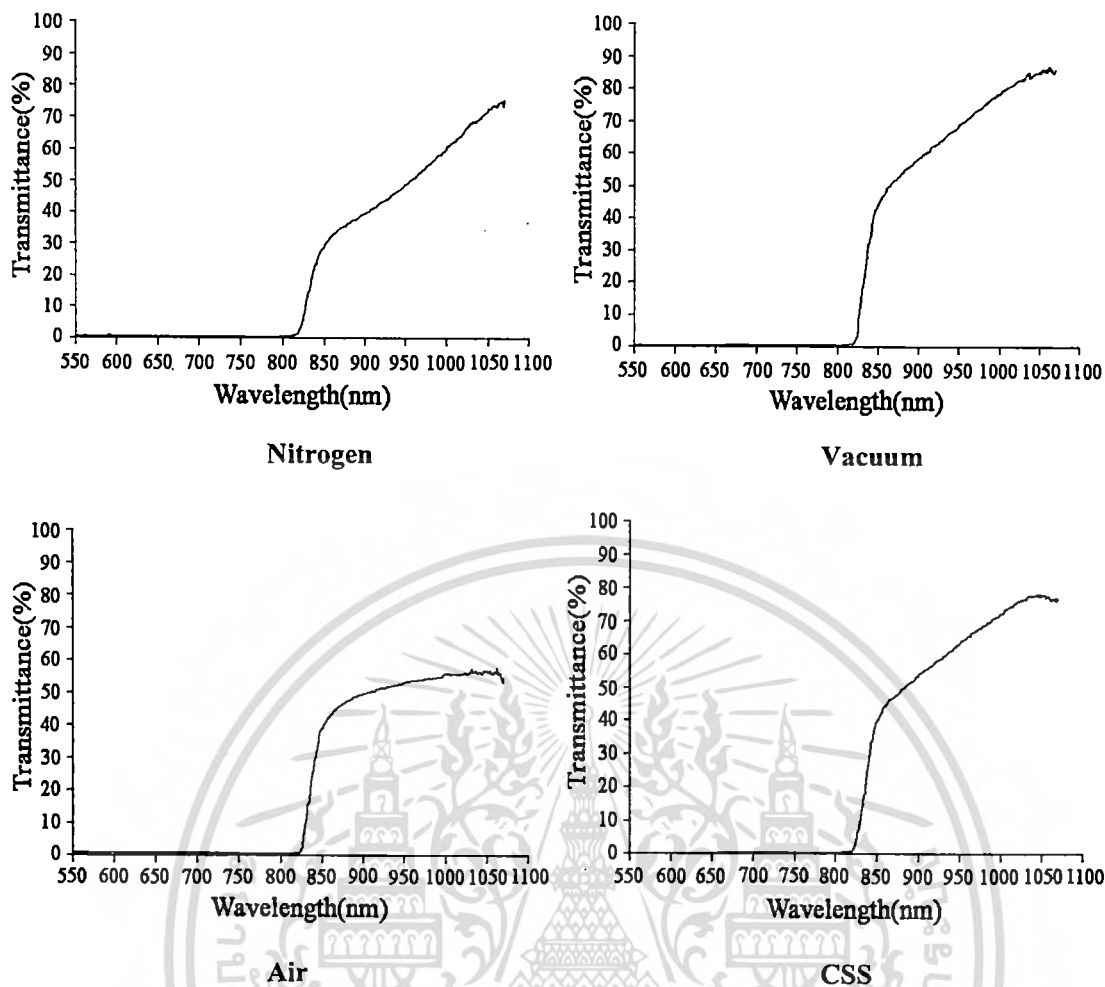
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

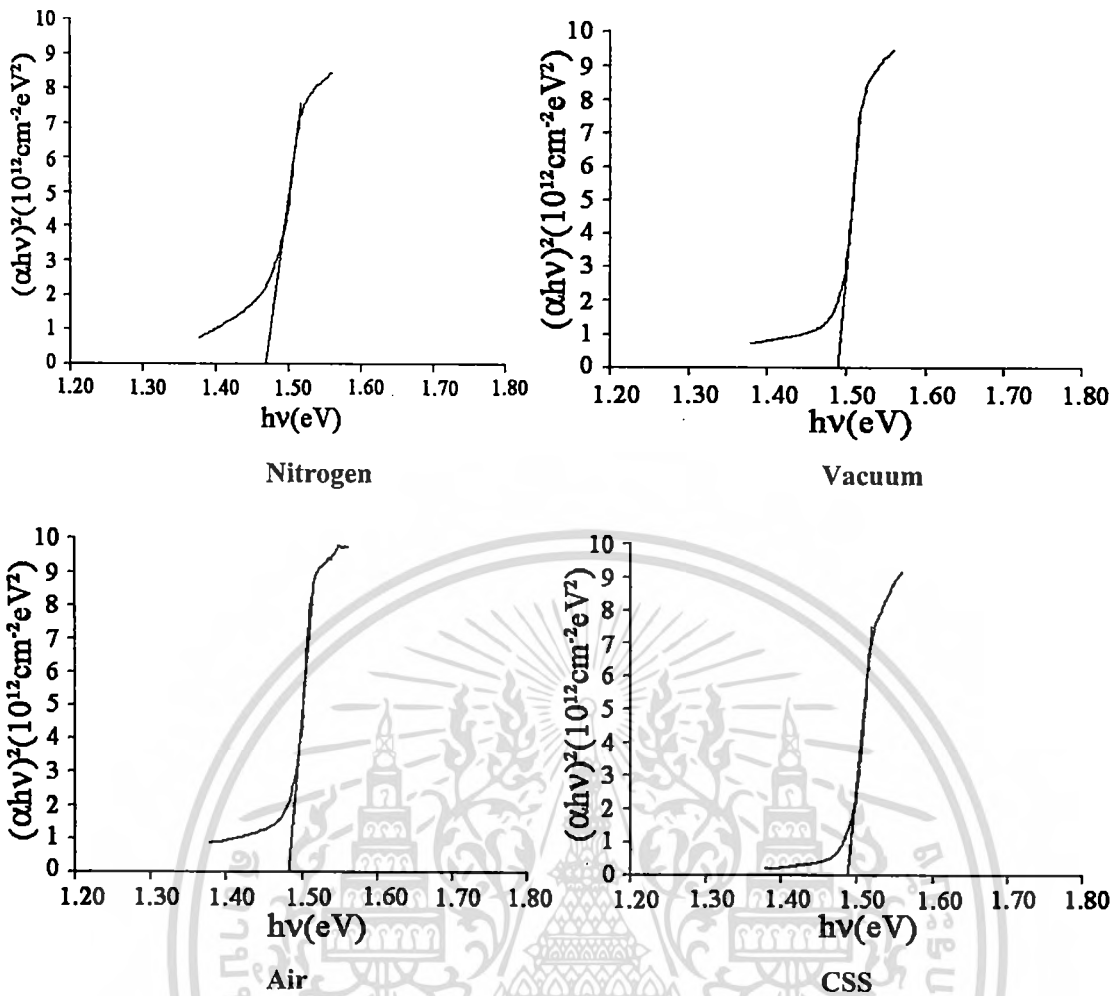


รูปที่ 4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ฟิล์มบาง CdTe. ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

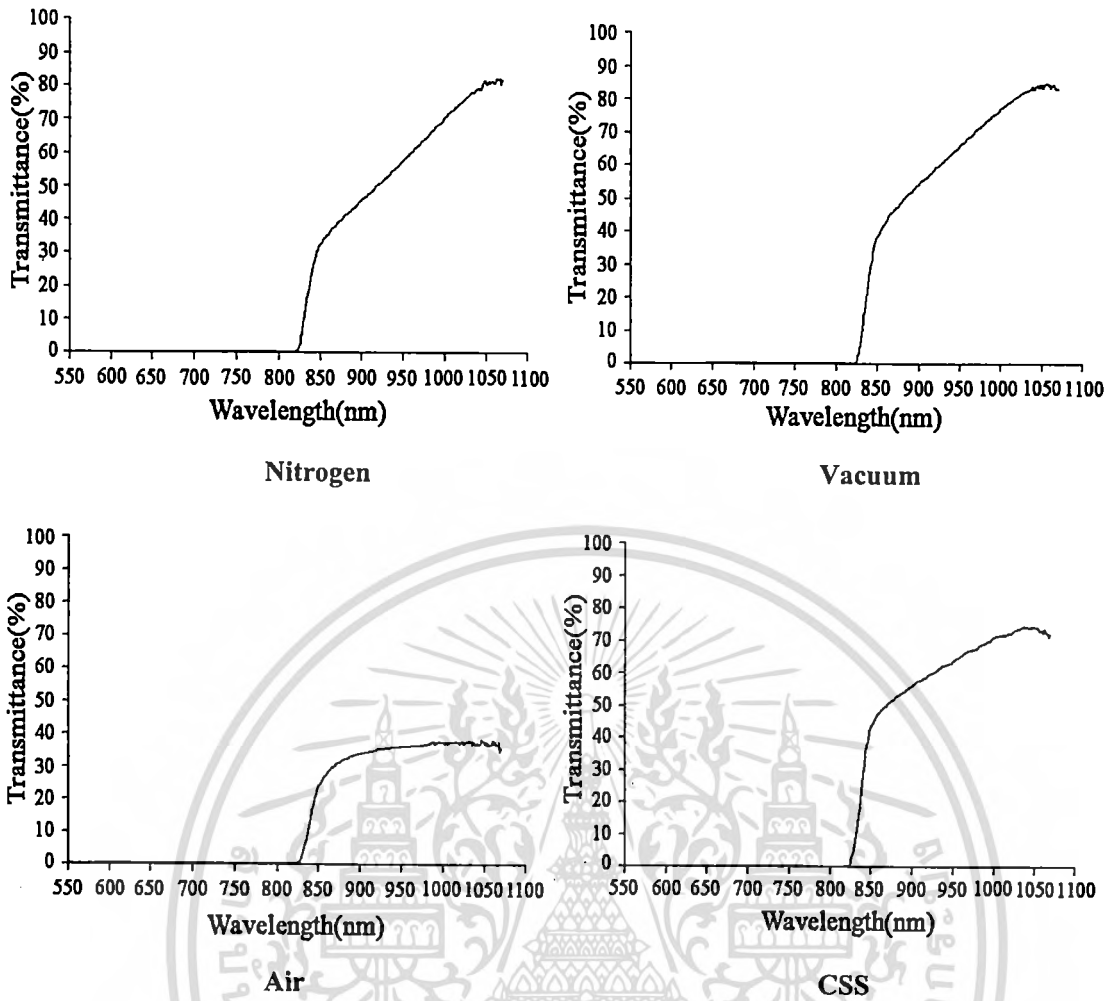
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



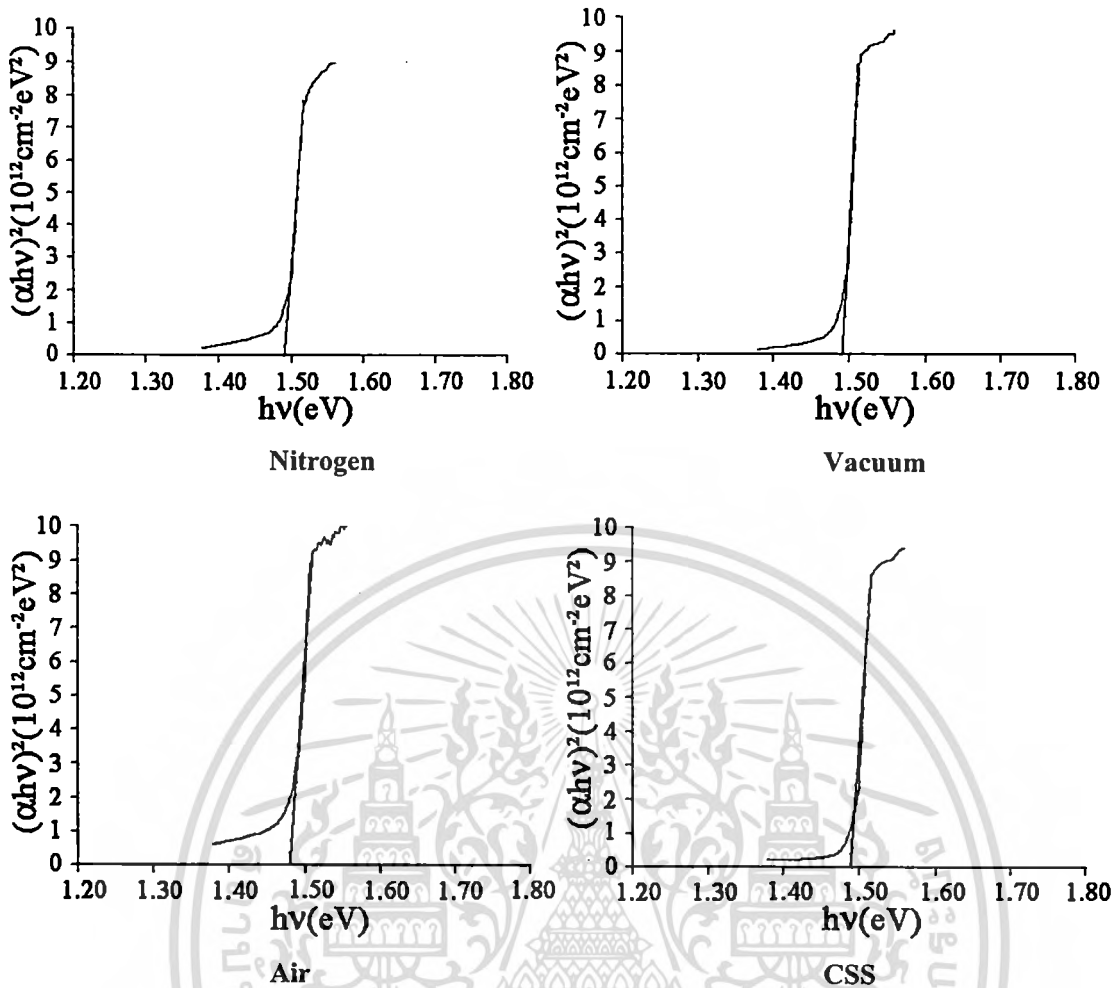
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



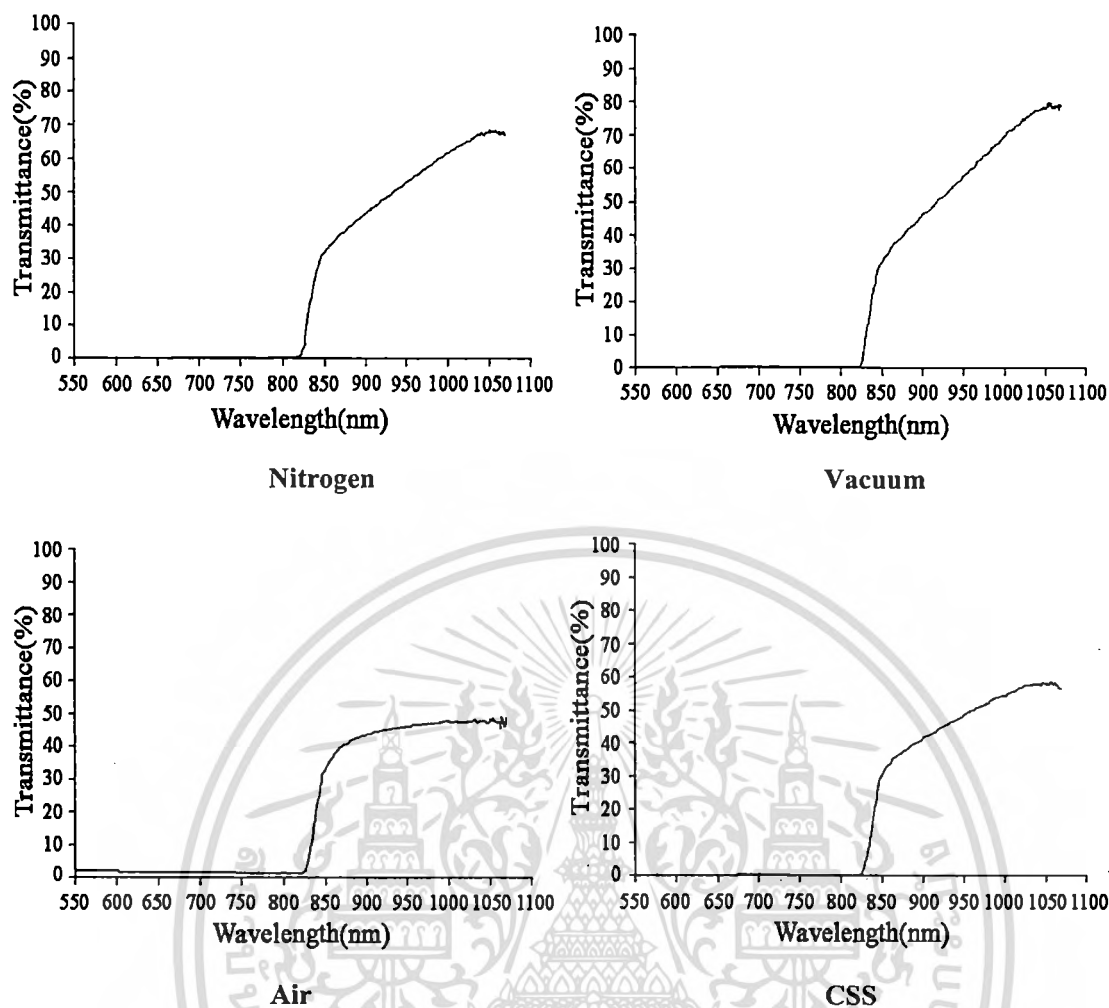
รูปที่ 4.47 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



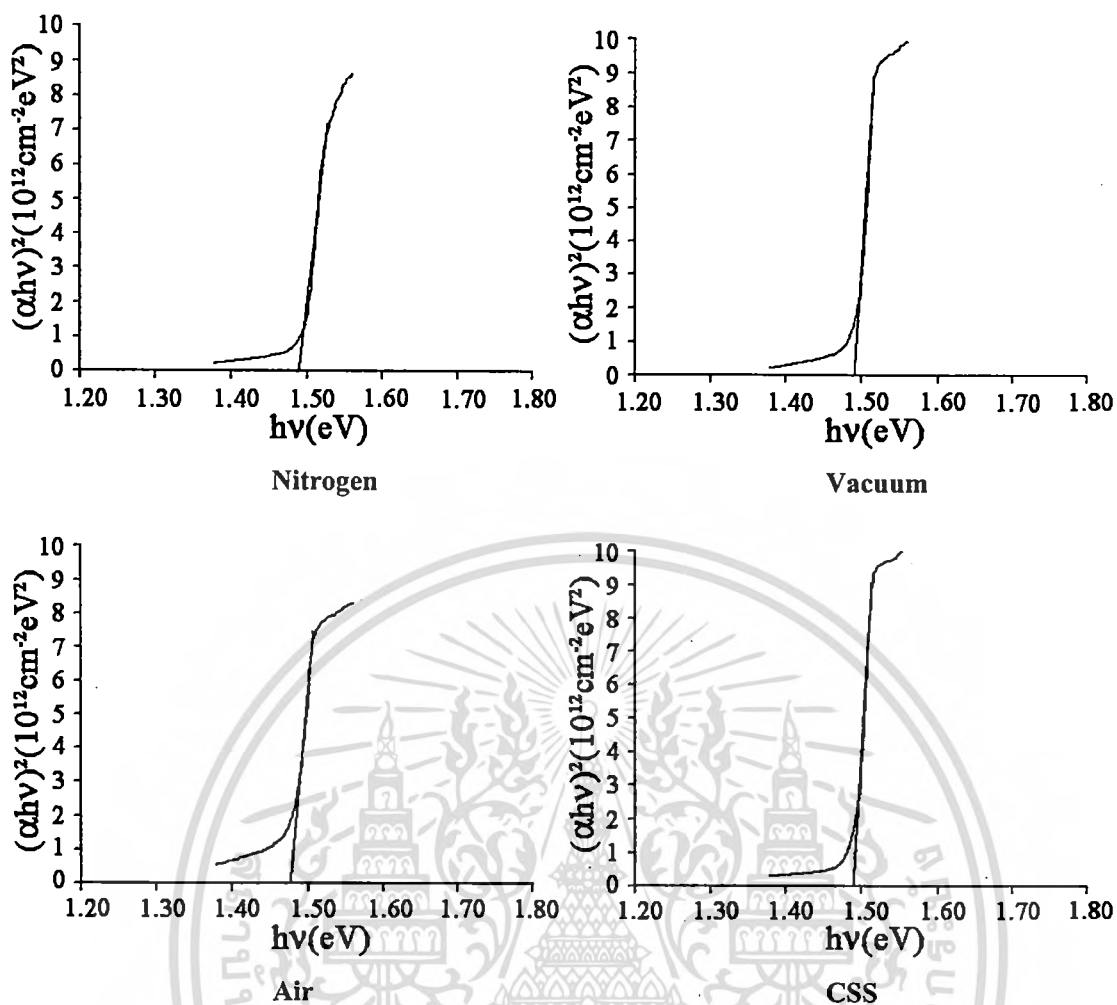
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.49 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.51 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดใน ระยะประชิดที่อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับ กระจกสไลด์เท่ากับ 375 ,400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับกระจกสไลด์เท่ากับ 4 ,6 และ 8 มิลลิเมตรและกรณีที่แอนนีกัลในบรรยากาศแคดเมียม คลอไรด์ในบรรยากาศไนโตรเจน ในระบบสุญญากาศ ในระบบระเหิดในระยะประชิด และแอนนีกัล ในอากาศพบว่ามีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตรและมีการส่งผ่าน แสงประมาณ 30-80เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่า ช่องว่างแถบพลังงานโดยนำข้อมูลที่ได้ออกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน hv แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย(extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับ แกนพลังงานโฟตอนจุดที่ตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1-4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปเซประยะชันด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดในระยะประชิด

| Substrate Temperature($^{\circ}$ C) | Energy Gap With Different Source-Substrate Spacers (eV) | | |
|--------------------------------------|---|----------|----------|
| | d = 4 mm | d = 6 mm | d = 8 mm |
| 375 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |
| 400 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |
| 425 | 1.49 | 1.48 | 1.49 |
| 450 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |
| 475 | 1.49 | 1.49 | 1.49 |

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ

| Annealing Atmosphere | Energy Gap With Different Source-Substrate Spacers (eV) | | |
|---------------------------|---|----------|----------|
| | d = 4 mm | d = 6 mm | d = 8 mm |
| แก๊สไนโตรเจน | 1.47 | 1.49 | 1.49 |
| ระบบสุญญากาศ | 1.49 | 1.49 | 1.49 |
| อากาศ | 1.48 | 1.49 | 1.48 |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | 1.49 | 1.49 | 1.49 |

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

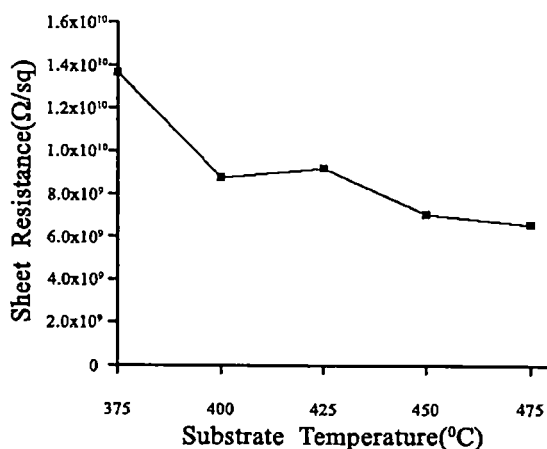
| Substrate Temperature($^{\circ}$ C) | Sharpness With Different Source-Substrate Spacers ($\times 10^{14} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}$) | | |
|--------------------------------------|---|----------|----------|
| | d = 4 mm | d = 6 mm | d = 8 mm |
| 375 | 1.48 | 5.41 | 5.83 |
| 400 | 7.30 | 10.51 | 12.93 |
| 425 | 1.43 | 14.93 | 15.61 |
| 450 | 9.04 | 14.35 | 13.86 |
| 475 | 8.89 | 8.59 | 13.19 |

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ

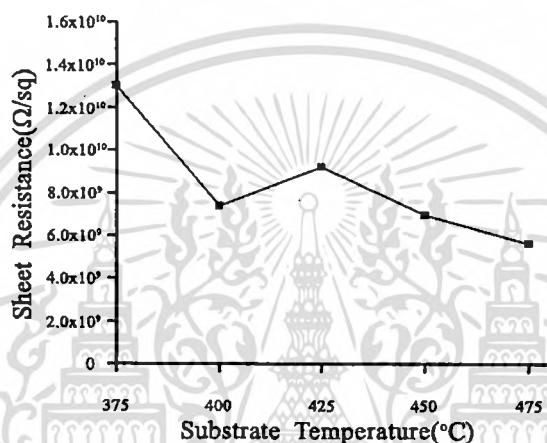
| Annealing Atmosphere | Sharpness With Different Source-Substrate Spacers ($\times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}$) | | |
|---------------------------|---|----------|----------|
| | d = 4 mm | d = 6 mm | d = 8 mm |
| แก๊สไนโตรเจน | 2.40 | 12.66 | 8.55 |
| ระบบสุญญากาศ | 10.29 | 14.88 | 14.09 |
| อากาศ | 10.84 | 15.66 | 7.91 |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | 7.09 | 12.27 | 12.86 |

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

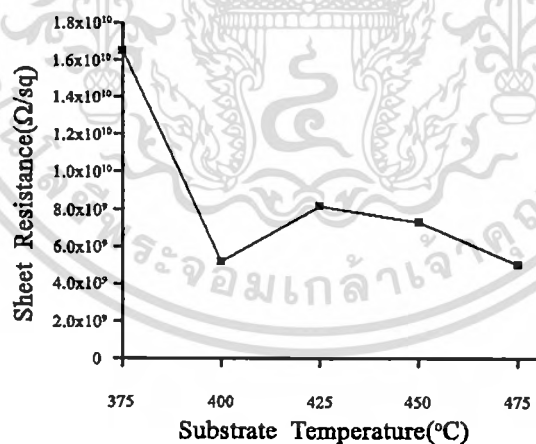
ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความต้านทานสูง จึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้ว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์สูงขึ้นความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.52 และในส่วนของฟิล์มบางที่แอนนัลในบรรยากาศต่างๆพบว่า ค่าความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงมีค่าต่ำในกรณีที่แอนนัลในอากาศและแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิดในระยะประชิด ส่วนความต้านทานแผ่นในกรณีฉายแสงฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลและไม่ผ่านการแอนนัลมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.53



d = 4 mm



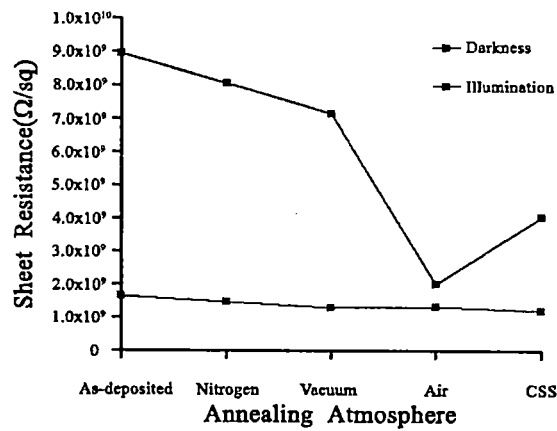
d = 6 mm



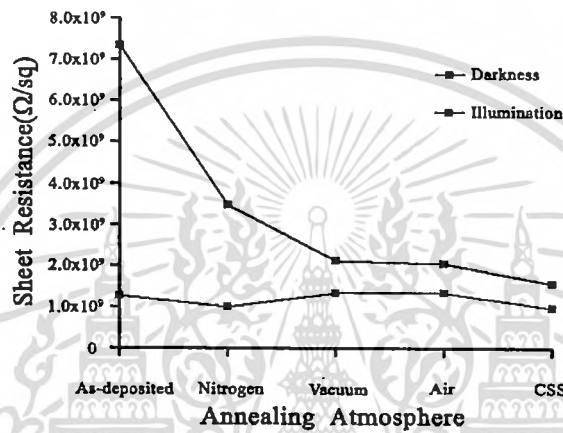
d = 8 mm

รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงกับอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

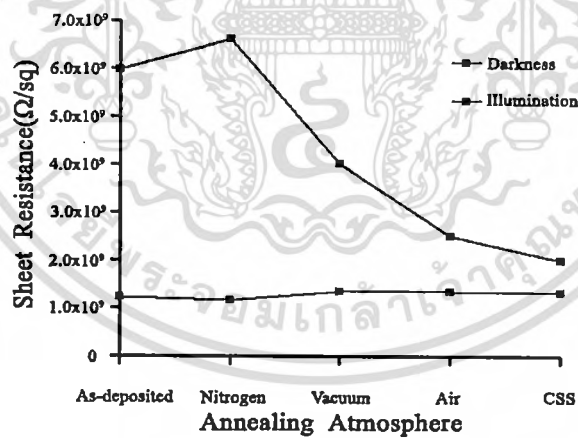
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 4 mm



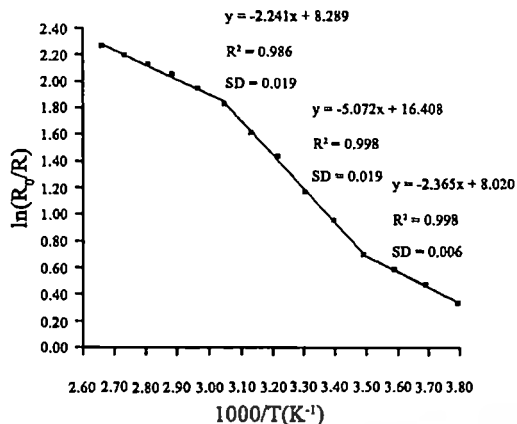
d = 6 mm



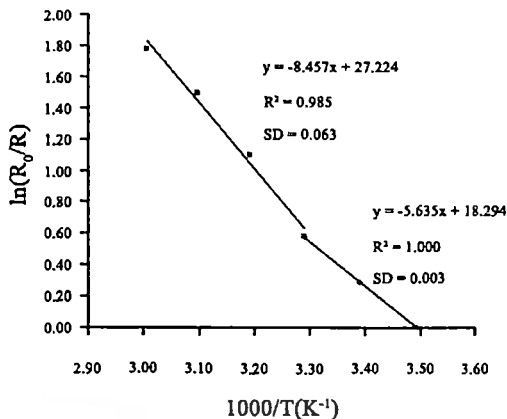
d = 8 mm

รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นทั้งฉายแสงและไม่ฉายแสงกับการแอนนัลในบรรยากาศต่างๆที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้ เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

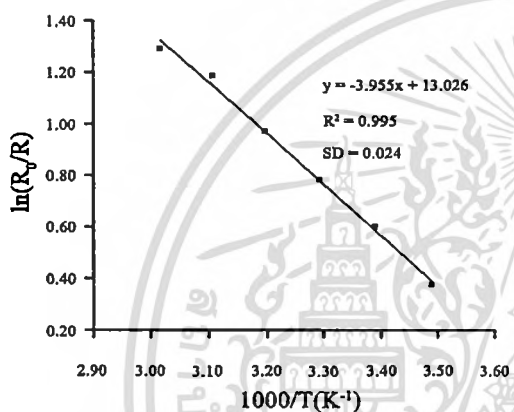
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



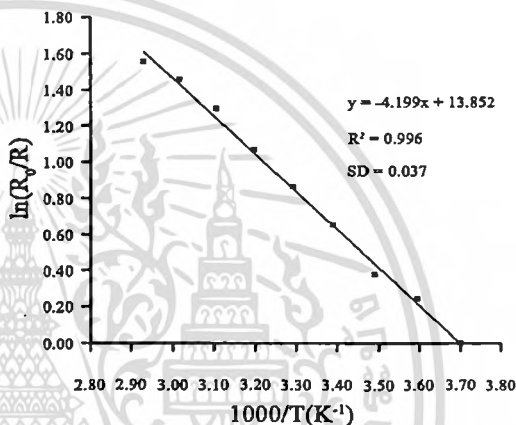
$T_{sub} = 375 \text{ }^\circ\text{C}$



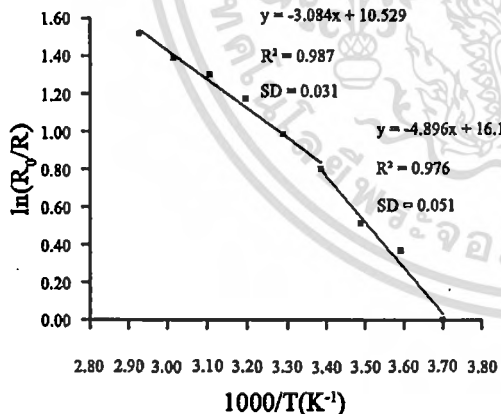
$T_{sub} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$



$T_{sub} = 425 \text{ }^\circ\text{C}$



$T_{sub} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$

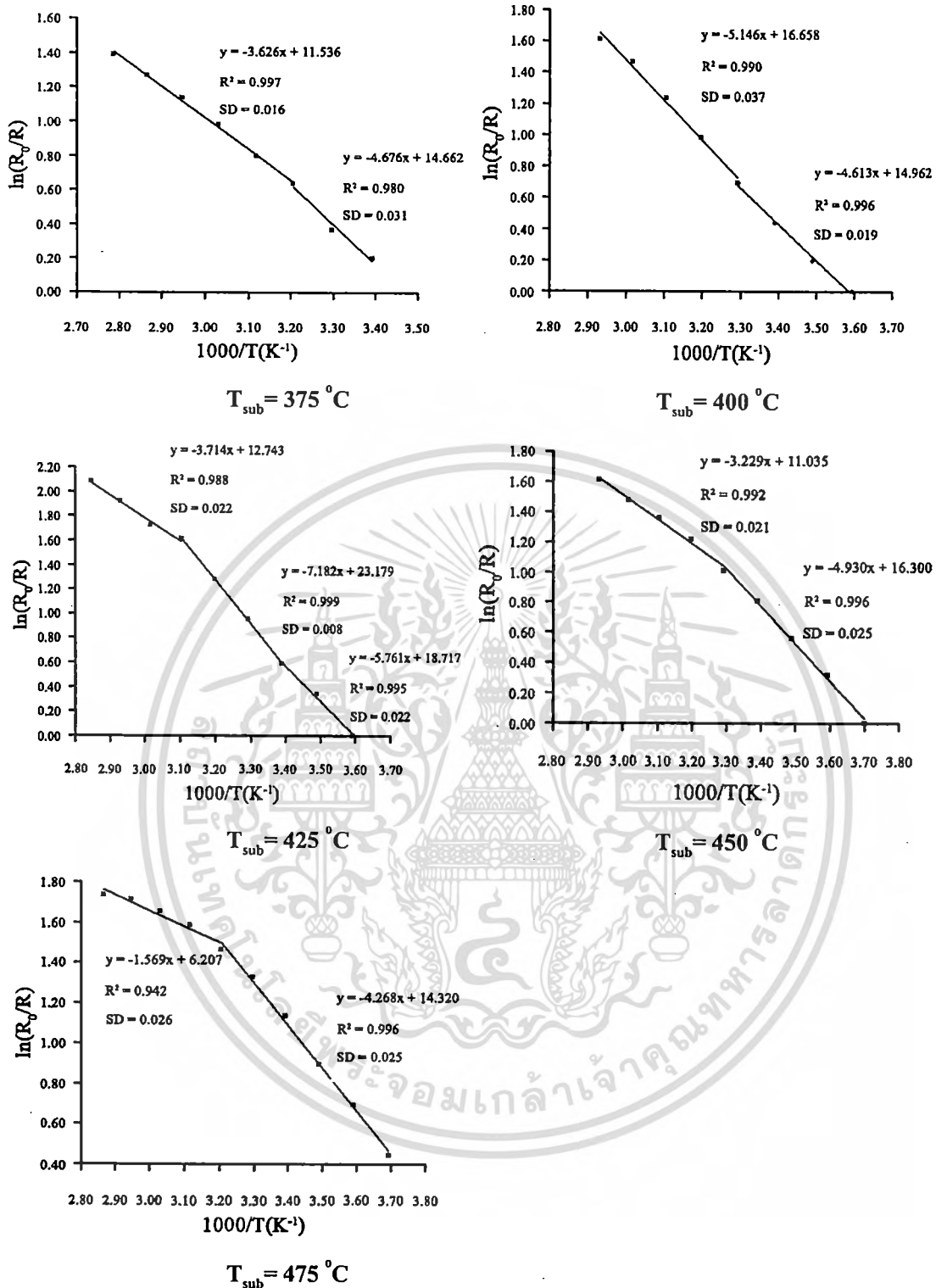


$T_{sub} = 475 \text{ }^\circ\text{C}$

รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธี

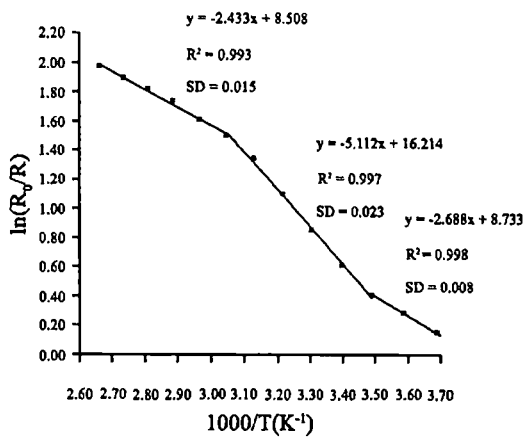
ระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

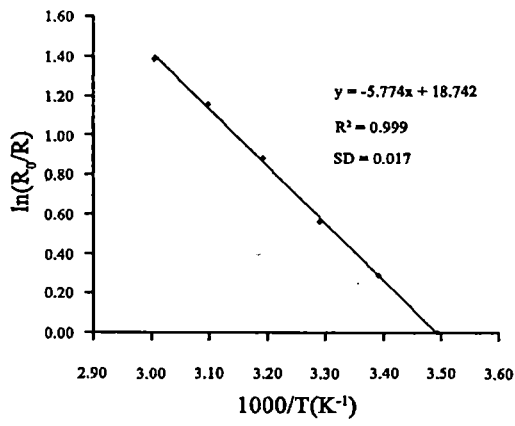


รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550^\circ C$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

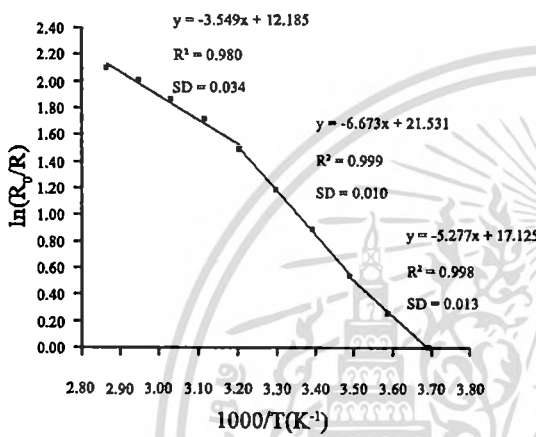
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



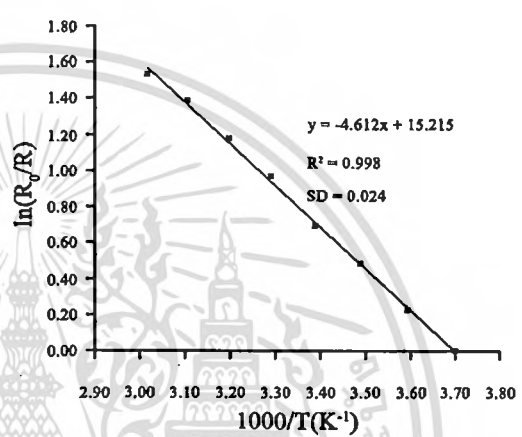
$T_{sub} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$



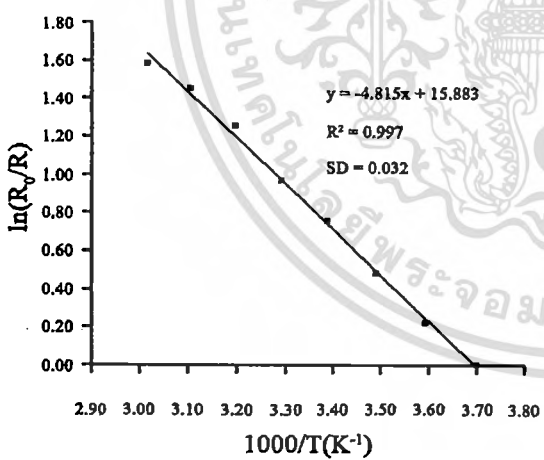
$T_{sub} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{sub} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{sub} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

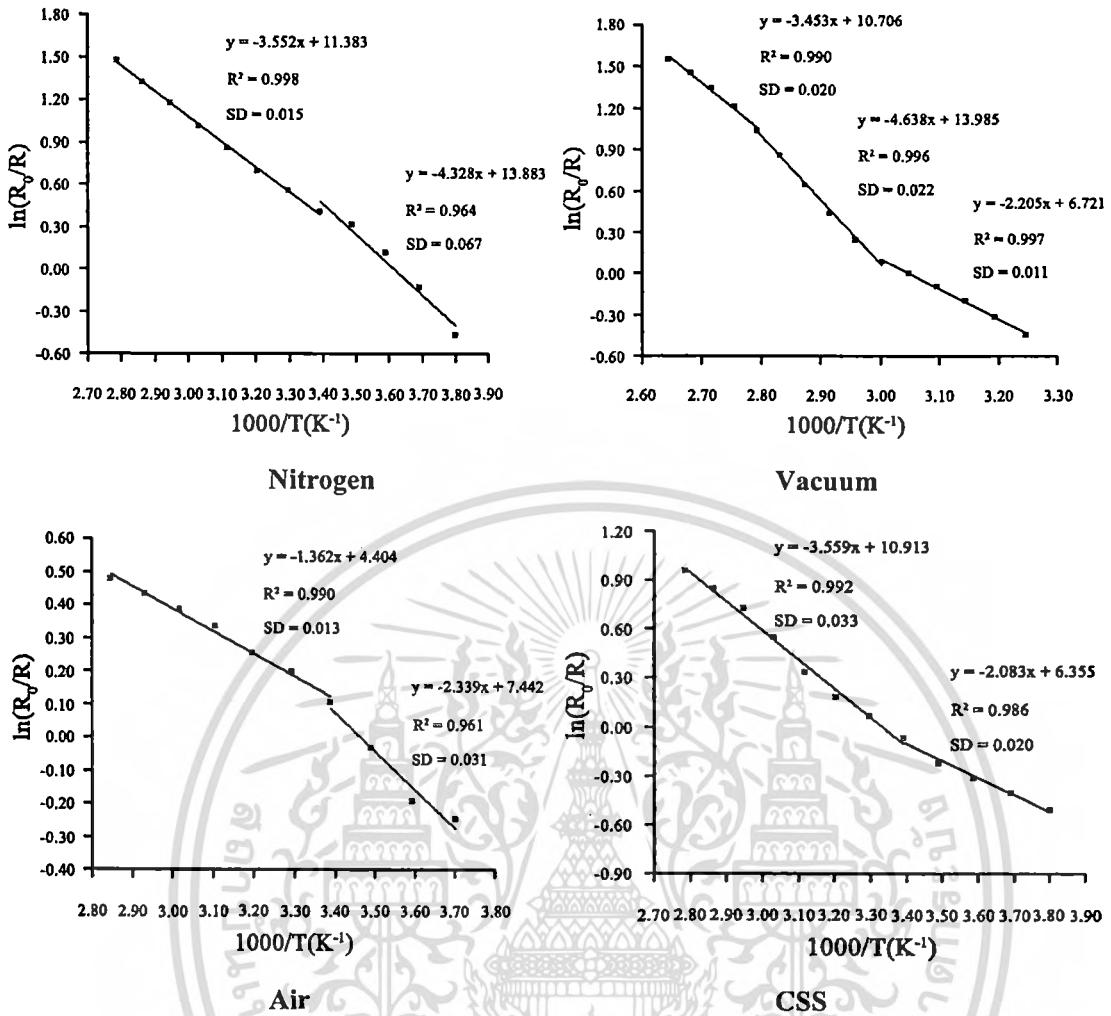


$T_{sub} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

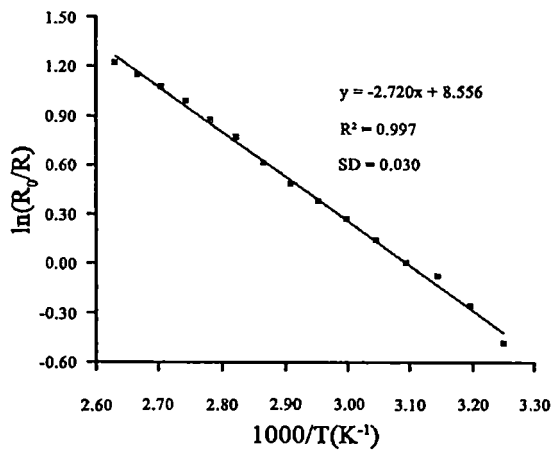
รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธี

ระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐาน รองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐาน รองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

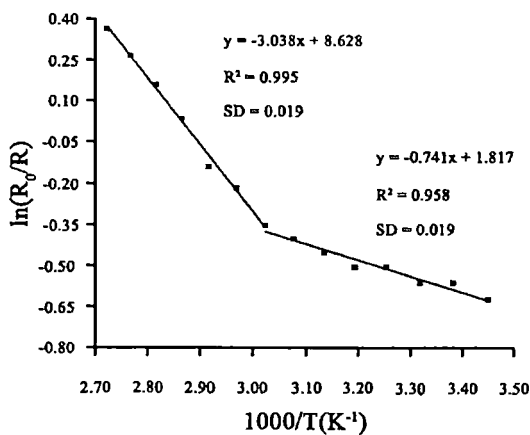
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



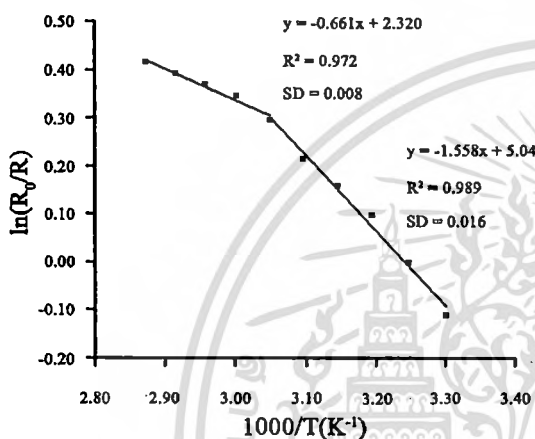
รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



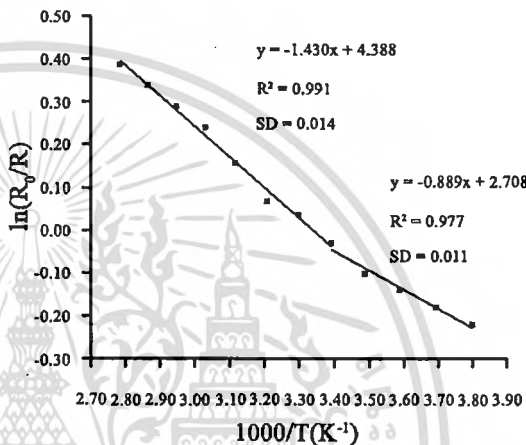
Nitrogen



Vacuum

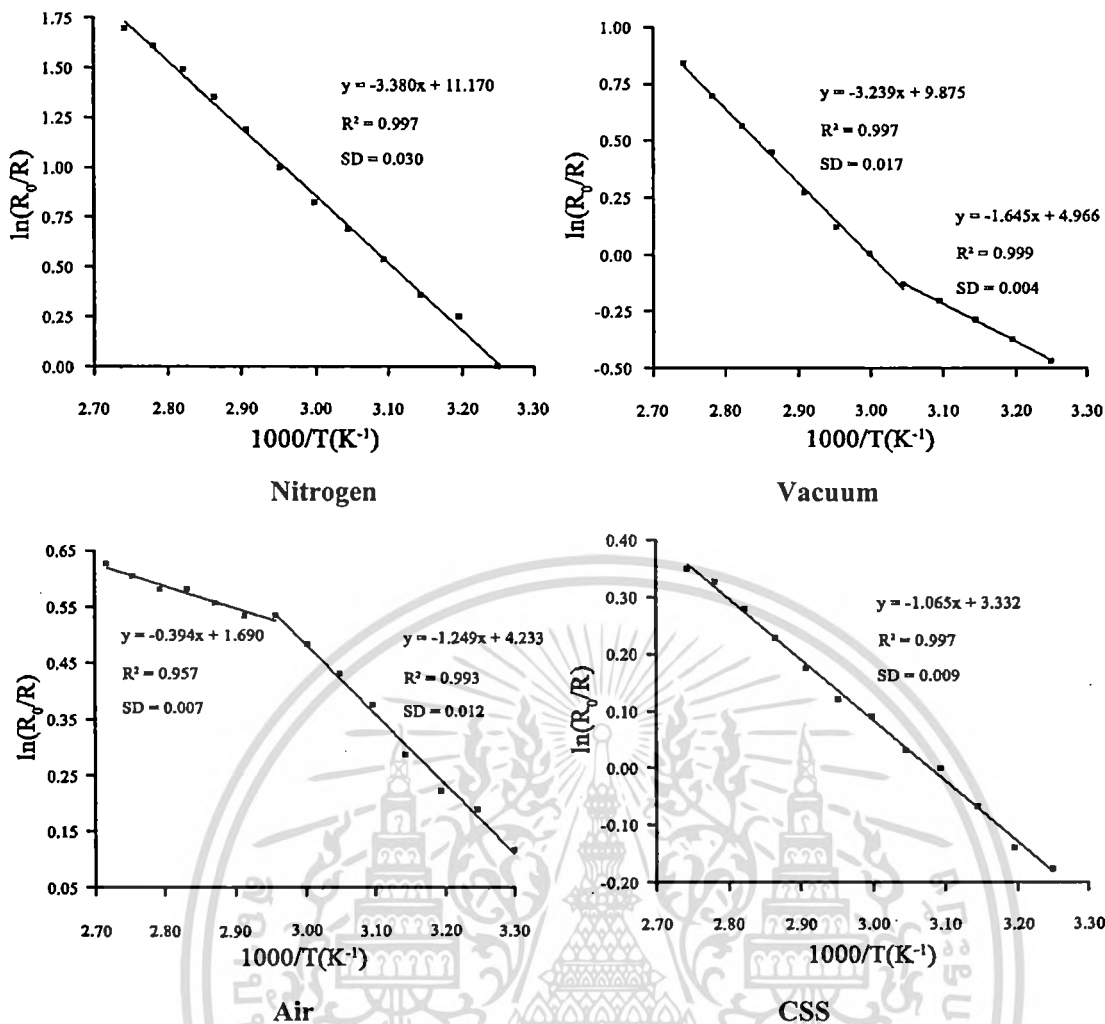


Air



CSS

รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีย์ลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัล

ในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

การศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิในช่วง 30-160 °C โดยทำการเก็บข้อมูลในทุกๆ 5 °C จากข้อมูลที่ได้นำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\left(\frac{1000}{T}\right)$ ซึ่งความชันของกราฟ สามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.10

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature(°C) | Activation Energy (meV) | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|
| | Level B | Level D | Level E | Level H |
| 375 | 193,204 | - | 437 | - |
| 400 | - | - | 486 | 729 |
| 425 | - | 341 | - | - |
| 450 | - | 362 | - | - |
| 475 | 266 | - | 422 | - |

จากตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 375 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 193 meV และ 204 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นกับดักโฮลโดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 437 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเต็ยวแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd} จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_{Te} ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 400°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 486 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเต็วแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่งอีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 729 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน H ซึ่งได้มีการศึกษาในระดับพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มิมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425°C และ 450°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 341 meV และ 362 meV ตามลำดับ จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32\text{ eV}$ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 266 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 422 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเต็วแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature ($^\circ\text{C}$) | Activation Energy (meV) | | | | |
|---|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Level A | Level B | Level D | Level E | Level G |
| 375 | - | - | 313 | 403 | - |
| 400 | - | - | 398 | 444 | - |
| 425 | - | - | 320 | 497 | 619 |
| 450 | - | 279 | - | 425 | - |
| 475 | 135 | - | 368 | - | - |

จากตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 375°C และ 400°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 313 meV และ 398 meV ตามลำดับจะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 403 meV และ 444 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดคเต็ยแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปดกับ Cl_i กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd} จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 320 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ที่พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 497 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดคเต็ยแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่

ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก $CdTe:Cl$ ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก $CdTe:Cl$ นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง ส่วนพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 619 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน G ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอนและจะพบเฉพาะในผลึก $CdTe:Cl$ ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd^{2+}

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $CdTe$ ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 279 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก $CdTe$ เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 425 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก $CdTe$ ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยวแต่สำหรับในผลึก $CdTe:Cl$ ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก $CdTe:Cl$ ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก $CdTe:Cl$ นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $CdTe$ ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 135 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก $CdTe$ และผลึก $CdTe:Cl$ ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ $CdZnTe$ ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 368 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก $CdTe:Cl$ ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะเวลาประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง เท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature($^{\circ}\text{C}$) | Activation Energy (meV) | | | |
|--|-------------------------|---------|---------|---------|
| | Level B | Level D | Level E | Level G |
| 375 | 210,232 | - | 441 | - |
| 400 | - | - | 498 | - |
| 425 | - | 306 | 455 | 576 |
| 450 | - | - | 398 | - |
| 475 | - | - | 415 | - |

จากตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงาน B โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 210 meV และ 232 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่ แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 441 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏ อยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็น ศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่อง ชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง ผลึกชนิด Te_{Cd} จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_{c} ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏ โดด เด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าพลังงาน กระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงาน B โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 498 meV จะอยู่ในระดับ พลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดด เดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะ ดับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วย

ความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 306 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 455 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดคเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะค้ำปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่งอีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 576 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน G ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 398 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดคเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะค้ำปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 415 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดคเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะค้ำปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Activation Energy (meV) | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|
| | Level A | Level B | Level D | Level E |
| แก๊สไนโตรเจน | - | - | 306,373 | - |
| ระบบสุญญากาศ | - | 190 | 298 | 400 |
| อากาศ | 117 | 202 | - | - |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | - | 180 | 307 | - |

จากตารางที่ 4.8 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 306 meV และ 373 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนีสด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 190 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 298 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนีสด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 400 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนีสด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd} ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแอนนihilด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd} จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนihilในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 117 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนihilด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(\text{V}_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cu}_i^+)^-$, $(2\text{Cu}_{\text{Cd}}^- - \text{V}_{\text{Te}}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 202 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนihilในบรรยากาศของแควมเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบประเหิดสารในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 180 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 307 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd} โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนihilด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Activation Energy (meV) | | |
|---------------------------|-------------------------|---------|---------|
| | Level A ₀ | Level A | Level B |
| แก๊สไนโตรเจน | - | - | 235 |
| ระบบสุญญากาศ | 64 | - | 262 |
| อากาศ | 57 | 134 | - |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | 77 | 123 | - |

จากตารางที่ 4.9 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแควดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 235 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแควดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 64 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A₀ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการทับลึงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ข้อบกพร่องเชิงซ้อน $V_{\text{Cd}}-\text{Cl}_{\text{Te}}$ เช่น $(V_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cl}_{\text{Te}}^{+})^{-}$ [29] และระดับ DX₂ ของ $(V_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cl}_{\text{Te}}^{+})$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง $0.12 - 0.16\text{ eV}$ และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 262 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือ และเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 57 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ขัอบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 134 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือ ขัอบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวข้องกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแควมเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบประเหตสารในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 77 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ขัอบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และ โดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 123 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือขัอบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวข้องกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Activation Energy (meV) | | |
|---------------------------|---------------------------|---------|---------|
| | Level A ₀ | Level A | Level B |
| แก๊สไนโตรเจน | - | - | 239 |
| ระบบสุญญากาศ | - | 142 | 279 |
| อากาศ | 34 | 108 | - |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | 92 | - | - |

จากตารางที่ 4.10 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 239 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 142 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนีสลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขั้วบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขั้วบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือขั้วบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^- หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน และพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 279 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 34 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการจับปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ข้อบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 108 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนีกัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือ ข้อบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวข้องกับ V_{Te}^+ [29]ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบประเห็ดสาร ในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 92 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการจับปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ข้อบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และ โดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและขนาดของเกรนซึ่งจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ซึ่งความชันของกราฟสามารถนำมาคำนวณหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ได้ [32] ส่วนขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่คำนวณได้จากภาพถ่ายผิวหน้า (SEM) และคำนวณจาก FWHM ที่ได้จากพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นสามารถนำขนาดของเกรนของฟิล์มบางมาคำนวณหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ได้จากความสัมพันธ์ $E_0 = 21.1 + \frac{121.4}{R}$ [33] ซึ่งส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe แสดงใน ตารางที่ 4.11-4.22

ตารางที่ 4.11 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature(°C) | Band Tail (meV) |
|-----------------------------|-------------------|
| 375 | 54 |
| 400 | 62 |
| 425 | 38 |
| 450 | 50 |
| 475 | 47 |

ตารางที่ 4.12 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature (°C) | Band Tail (meV) |
|------------------------------|-------------------|
| 375 | 38 |
| 400 | 51 |
| 425 | 40 |
| 450 | 36 |
| 475 | 47 |

ตารางที่ 4.13 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Band Tail (meV) |
|--|-----------------|
| 375 | 33 |
| 400 | 47 |
| 425 | 36 |
| 450 | 35 |
| 475 | 40 |

ตารางที่ 4.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Band Tail (meV) |
|---------------------------|-----------------|
| แก๊สไนโตรเจน | 104 |
| ระบบสุญญากาศ | 40 |
| อากาศ | 40 |
| ระบบระเหิดสารในระยะประชิด | 34 |

ตารางที่ 4.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Band Tail (meV) |
|---------------------------|-----------------|
| แก๊สไนโตรเจน | 31 |
| ระบบสุญญากาศ | 24 |
| อากาศ | 35 |
| ระบบระเหิดสารในระบะประชิด | 21 |

ตารางที่ 4.16 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Band Tail (meV) |
|---------------------------|-----------------|
| แก๊สไนโตรเจน | 29 |
| ระบบสุญญากาศ | 27 |
| อากาศ | 54 |
| ระบบระเหิดสารในระบะประชิด | 23 |

ตารางที่ 4.17 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะเวลาประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature(°C) | Band Tail From Grain Size (meV) | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----|
| | SEM | XRD |
| 375 | 53 | 79 |
| 400 | 51 | 52 |
| 425 | 55 | 58 |
| 450 | 45 | 75 |
| 475 | 60 | 61 |

ตารางที่ 4.18 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะเวลาประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature(°C) | Band Tail From Grain Size (meV) | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----|
| | SEM | XRD |
| 375 | 54 | 92 |
| 400 | 48 | 88 |
| 425 | 48 | 47 |
| 450 | 46 | 73 |
| 475 | 52 | 66 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Substrate Temperature(°C) | Band Tail From Grain Size (meV) | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----|
| | SEM | XRD |
| 375 | 49 | 75 |
| 400 | 44 | 65 |
| 425 | 50 | 61 |
| 450 | 45 | 74 |
| 475 | 48 | 103 |

ตารางที่ 4.20 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

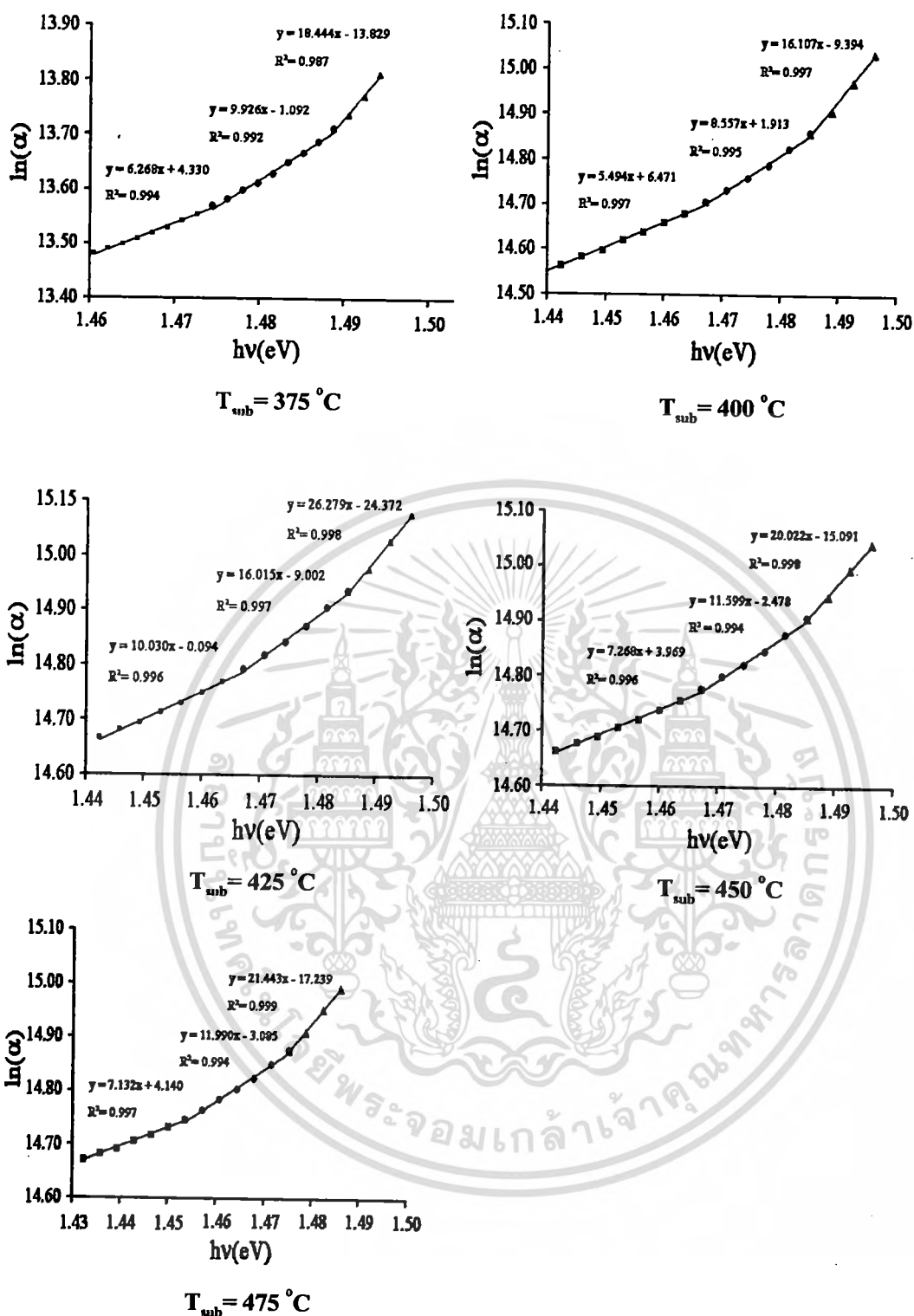
| Annealing Atmosphere | Band Tail From Grain Size (meV) | |
|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | XRD | |
| แก๊สไนโตรเจน | 66 | |
| ระบบสุญญากาศ | 81 | |
| อากาศ | 52 | |
| ระบบระเหิดสารในระบะประชิด | 76 | |

ตารางที่ 4.21 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Band Tail From Grain Size (meV) |
|---------------------------|---------------------------------|
| | XRD |
| แก๊สไนโตรเจน | 83 |
| ระบบสุญญากาศ | 76 |
| อากาศ | 84 |
| ระบบระเหิดสารในระบะประชิด | 103 |

ตารางที่ 4.22 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

| Annealing Atmosphere | Band Tail From Grain Size (meV) |
|---------------------------|---------------------------------|
| | XRD |
| แก๊สไนโตรเจน | 69 |
| ระบบสุญญากาศ | 88 |
| อากาศ | 60 |
| ระบบระเหิดสารในระบะประชิด | 107 |



รูปที่ 4.60 แสดงการหาส่วนหางของแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 รอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

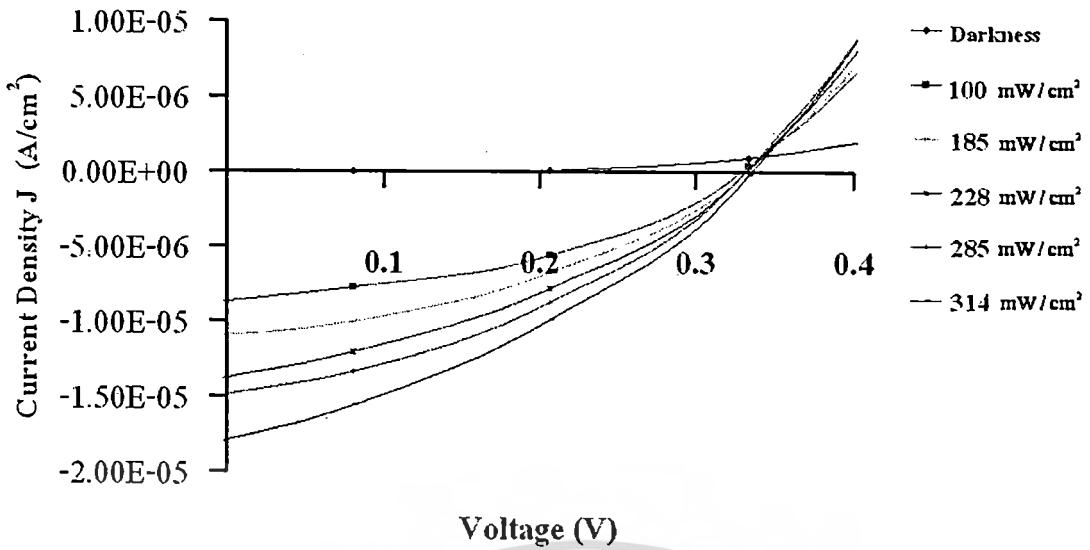
ได้มีการเตรียมรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง(อินเดียมทินออกไซด์) โดยเคลือบชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS ก่อนโดยวิธีอาบสารละลายเคมี (CBD) จากนั้นเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด (CSS) ซึ่งมีลักษณะสีเทา ค่ำผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนฐานรองรับได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายโดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งตัวเท่ากับ 550°C อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450°C โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 mm ดังรูปที่ 4.61



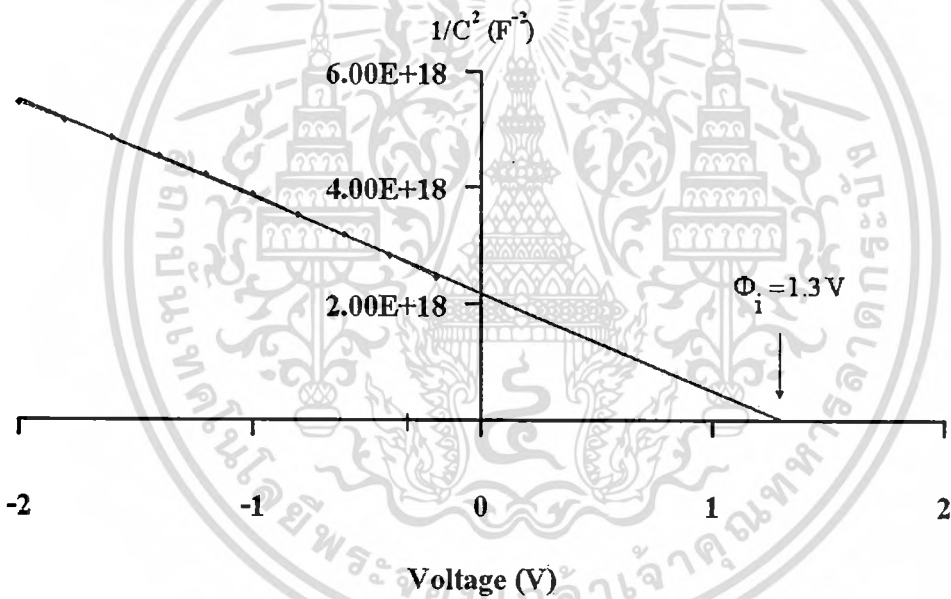
รูปที่ 4.61 แสดงฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe มีชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS โดยวิธีอาบสารละลายเคมี (CBD) ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (อินเดียมทินออกไซด์) จากนั้นเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด (CSS) โดยใช้ อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450°C โดยเลือก ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 mm โดย (ก) รูปฟิล์มบางด้านหลัง (ข) รูปฟิล์มบาง ด้านหน้า

ได้ทำการวัดกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม $100\text{--}314\text{ mW/cm}^2$ พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด (J_{sc}) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) และค่าประสิทธิภาพ (η) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง แต่ความต้านทานอนุกรมมีแนวโน้มลดลงดังตารางที่ 4.23 และทำการวัดค่าความจุขณะไม่มีการฉายแสงที่อุณหภูมิห้อง ไบอัสด้วยแรงดัน -2 ถึง $+2\text{ V}$ เพื่อหาค่าศักย์ต่อกรรรอยต่อ (ϕ) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.3 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe โดยฉายแสงต่างความเข้ม



รูปที่ 4.63 แสดงค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุ-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อที่อุณหภูมิห้องของ รอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 แสดงค่าพารามิเตอร์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ

| Illumination Intensity (mW/cm^2) | J_{sc} ($\times 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$) | V_{oc} (V) | F.F. | η (%) | R_s ($\times 10^4 \Omega$) | R_{sh} ($\times 10^4 \Omega$) |
|--|---|--------------|-------|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 100 | 9.50 | 0.330 | 0.205 | 2.57 | 1.20 | 8.77 |
| 185 | 11.00 | 0.334 | 0.248 | 2.63 | 1.00 | 1.06 |
| 228 | 14.00 | 0.334 | 0.258 | 3.05 | 0.89 | 5.30 |
| 285 | 15.00 | 0.334 | 0.347 | 3.63 | 0.81 | 5.78 |
| 314 | 18.00 | 0.336 | 0.362 | 4.43 | 0.78 | 3.62 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบาง การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

สรุปผลการศึกษาฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดนี้เราใช้สารตั้งต้นเป็นแบบผงบริสุทธิ์ 99.99 % โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $375, 400, 425, 450,$ และ 475°C โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 4 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็นสีเทาเนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าในช่วง $1.45-1.50\text{ eV}$ นั่นคือฟิล์มบางดูคลิ่นแสงในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นจนหมดและส่งผ่านแสงที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 800 nm เป็นต้น

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $375, 400, 425, 450$ และ 475°C ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C องศาเซลเซียสที่ผ่านการแอนนีกัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนีกัลในอากาศมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^{\circ}$ (220) ที่มุม $2\theta \approx 39^{\circ}$ (311) ที่มุม $2\theta \approx 46^{\circ}$ และ (400) ที่มุม $2\theta \approx 56^{\circ}$ เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 10-207 เราพบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับผลึกสมบูรณ์ และพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (111) จะปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe พบว่ามีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) เด่นชัดและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้นและเด่นชัดมากที่สุดที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm จากผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมเทลลูไรด์มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ หน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก ค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกมีแนวโน้มเป็นผลึกที่สมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์สูงขึ้น

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบาง จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดมีขนาดของเกรนประมาณ 3.14-5.29 μm สำหรับที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 3.98 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เท่ากับ 6mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.34 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.74 μm

สำหรับภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 และ 4 นาทีเพื่อศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งจากการภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 1.323 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 1.017 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.346 μm และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 2.511 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 3.986 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.990 μm

จากการศึกษาภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศ ซึ่งจากภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางพบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศและภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีลักษณะผิวหน้าที่คล้ายคลึงกันคือมีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะที่เชื่อมติดต่อกัน ส่วนกรณีที่แอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะเป็น

เกรนเดียวกันและมีเม็ดขนาดเล็กๆติดที่บริเวณผิวหน้า และกรณีที่แอนนihil ในอากาศมีลักษณะผิวหน้า
ที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ยังไม่ผ่านการแอนนihil

การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด
พบว่ามีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตรและมีการส่งผ่านแสง
ประมาณ 30-80 เปอร์เซ็นต์ จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้
ประมาณ 1.47-1.49 eV

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดซึ่ง
ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความต้านทานสูง จึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นซึ่งจากผลการ
ทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์สูงขึ้นความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงมี
แนวโน้มลดลง และในส่วนของฟิล์มบางที่แอนนihil ในบรรยากาศต่างๆพบว่า ค่าความต้านทาน
แผ่น โดยไม่ฉายแสงมีค่าต่ำในกรณีที่แอนนihil ในอากาศและแอนนihil ในบรรยากาศแคดเมียมเทลลูไรด์
ในระบบระเหิดในระยะประชิด ส่วนความต้านทานแผ่นในกรณีฉายแสงฟิล์มบางที่ผ่านการ
แอนนihil และไม่ผ่านการแอนนihil มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่
อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งพบระดับพลังงานต่างๆดังนี้

1. ระดับพลังงาน A_0 ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 เป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือขอบ
บนสุดของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.12 eV หรือ $E_v + 0.12$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก
CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการ
คัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และ
ระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A-center) และ
โดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง
0.12 – 0.16 eV

2. ระดับพลังงาน A และ A_1 ดังตารางที่ 4.6, 4.8, 4.9 และ 4.10 ระดับพลังงาน A จะ
ปรากฏอยู่ที่ $E_v + 0.14$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนihil ด้วยความ
ร้อนส่วนระดับพลังงาน A_1 จะอยู่ที่ $E_v + 0.15$ eV ซึ่งจะพบอยู่ในผลึก CdTe:Cl และในผลึก CdZnTe
แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A และ A_1 นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไรแต่จากการศึกษาโฟโตลู
มิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A และ A_1 จะเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึก
เชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่นๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับ
ข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่างๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$
หรือข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A และ A_1 นี้
จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระดับพลังงาน B ดังตารางที่ 4.5-4.10 เป็นกับดักโฮลที่มีพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.2$ eV โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

4. ระดับพลังงาน D ดังตารางที่ 4.5-4.8 เป็นกับดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

5. ระดับพลังงาน E ดังตารางที่ 4.5-4.8 มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.40$ eV ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

6. ระดับพลังงาน G ดังตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7 เป็นกับดักอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-0.64$ eV และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

7. ระดับพลังงาน H ดังตารางที่ 4.5 เป็นระดับพลังงานผลึกอยู่ที่ $E_v+0.76$ eV ได้มีการศึกษาระดับพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มิมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงมีค่าอยู่ในช่วง 21-104 meV และที่คำนวณจากขนาดของเกรนส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe มีค่าอยู่ในช่วง 44-107 meV ซึ่งจากการคำนวณทั้งสองกรณีได้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกัน

ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับเท่ากับ 8 mm และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $400^\circ C$ จะได้ฟิล์มบางที่มีความเป็นผลึกสมบูรณ์ที่สุดซึ่งจะสังเกตพบว่าจะ

ได้เกรนที่มีขนาดโตสุด ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และค่าพลังงานโฟตอนมากขึ้นหรือส่วนหางของแถบพลังงานมีค่าลดลง

ทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100- 314 mW/cm² พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสแสงสูงสุด (J_{sc}) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) และค่าประสิทธิภาพ (η) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง แต่ความต้านทานอนุกรมมีแนวโน้มลดลง และทำการวัดค่าความจุขณะไม่มีการฉายแสงที่อุณหภูมิห้อง ไบอัสด้วยแรงดัน -2 ถึง +2 V เพื่อหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (ϕ_j) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.3 V

ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์ในหลายด้านๆ คือ ความพยายามและอดทนในการศึกษาค้นคว้ากับผลงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ห้องวิจัย PMRL สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงซึ่งเรามีข้อจำกัดในด้านระบบคือ ความดันต่ำระบบสามารถทำได้ในระดับ 2×10^{-2} มิลลิบาร์และอุณหภูมิของระบบสามารถรองรับได้ไม่เกิน 570 องศาเซลเซียสซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบที่ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด ทำการเตรียมที่ความดันที่ต่ำกว่าและอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามหาข้อมูลจนได้สมมติฐานว่าระบบของเราน่าจะสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 500-550 องศาเซลเซียสผู้วิจัยจึงทดลองเตรียมฟิล์มบางโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสปรากฏว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ ผู้วิจัยจึงสร้างขอบเขตของงานวิจัยคือ ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งระบบก็สามารถศึกษาที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ต่ำสุดเท่ากับ 375 องศาเซลเซียสจึงทำให้ผู้วิจัยศึกษาที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ต่ำสุดเท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การหาค่าคงตัวของโครงผลึก สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก ขนาดของเกรน

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน การคำนวณหาส่วนหางของแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น การคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง ระดับพลังงานต่างๆที่พบในฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระบะประชิดมีความเหมาะสมมากในกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความโดดเด่นมากในด้านขนาดของเกรนที่โตใช้เวลาเพียง 5-10 นาทีในการเคลือบฟิล์มเพื่อให้ความหนาในระดับ 5-10 ไมโครเมตร และปัจจุบันเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิพันธ์ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์/แคดเมียมซัลไฟด์ (CdTe/CdS)

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการเตรียมฟิล์มบางและการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เราพบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการวิจัย ซึ่งได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้ลุล่วงไปด้วยความสำเร็จ ซึ่งปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหามีดังนี้

1. ปัญหาในการติดตั้งระบบผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะผู้ติดตั้งระบบควรศึกษาการติดตั้งอย่างละเอียด ทุกครั้งที่ติดตั้งระบบต้องมีสมาธิในการทำงาน และลองติดตั้งก่อนการทำงานจริงจนเกิดความชำนาญเพราะในขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงต้องใช้ความระมัดระวังในการติดตั้งและใช้เวลาให้น้อยที่สุดเพราะผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดนี้ ถ้ามีความชำนาญในการติดตั้งและทำงานอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางนั้นจะใช้เวลาน้อยมากและได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดีโดยตรวจสอบขั้นต้นคือมองด้วยตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มบางมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเป็นมันวาวจากนั้นดูรายละเอียดสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางจากกล้องจุลทรรศน์ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีจุดสีดำหรือรูพรุนเกิดขึ้น

2. ในขั้นตอนการสูบอากาศออกจากระบบครั้งแรกที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์จะใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือมากกว่าก็ไม่สามารถทำได้ตามต้องการ ผู้วิจัยมีแนวทางการแก้ไขปัญหานี้คือหลังจากสูบอากาศออกจากระบบประมาณ 15 นาทีจะทำการให้อุณหภูมิแก่ระบบเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาทีหลังจากนั้นปิดระบบการให้อุณหภูมิ ระบบก็จะทำการสูบอากาศออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว

3. หลังจากใช้งานระบบระเหิดสารในระบะประชิด ที่ขั้วหลอดทั้งสแตนจะเกิดออกไซด์ต้องคอยทำความสะอาดก่อนการใช้งานระบบทุกครั้งเพื่อให้ระบบทางไฟฟ้าสมบูรณ์และยังสามารถยืดอายุการทำงานของหลอดทั้งสแตนได้ด้วย

4. ในการเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475 องศาเซลเซียสฟิล์มบางค่อนข้างเคลือบยากสำหรับระยะระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับกระจกสไลด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 4 มิลลิเมตรแนวทางการแก้ไขคือ ถ้าสารตั้งต้นถูกใช้งานมานานแล้ว ควรทำการเปลี่ยนสารตั้งต้นใหม่และต้องคอยควบคุมระบบอุณหภูมิให้คงที่ในช่วงเวลาที่เคลือบฟิล์ม เพราะในกรณีนี้ อุณหภูมิของระบบค่อนข้างมีการเปลี่ยนแปลงสูง

5. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดที่เล็กและสม่ำเสมอ โดยกาวเงินที่ใช้ขึ้นต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่ เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาการแพร่อย่างรวดเร็วของกาวเงินในเนื้อฟิล์มบาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

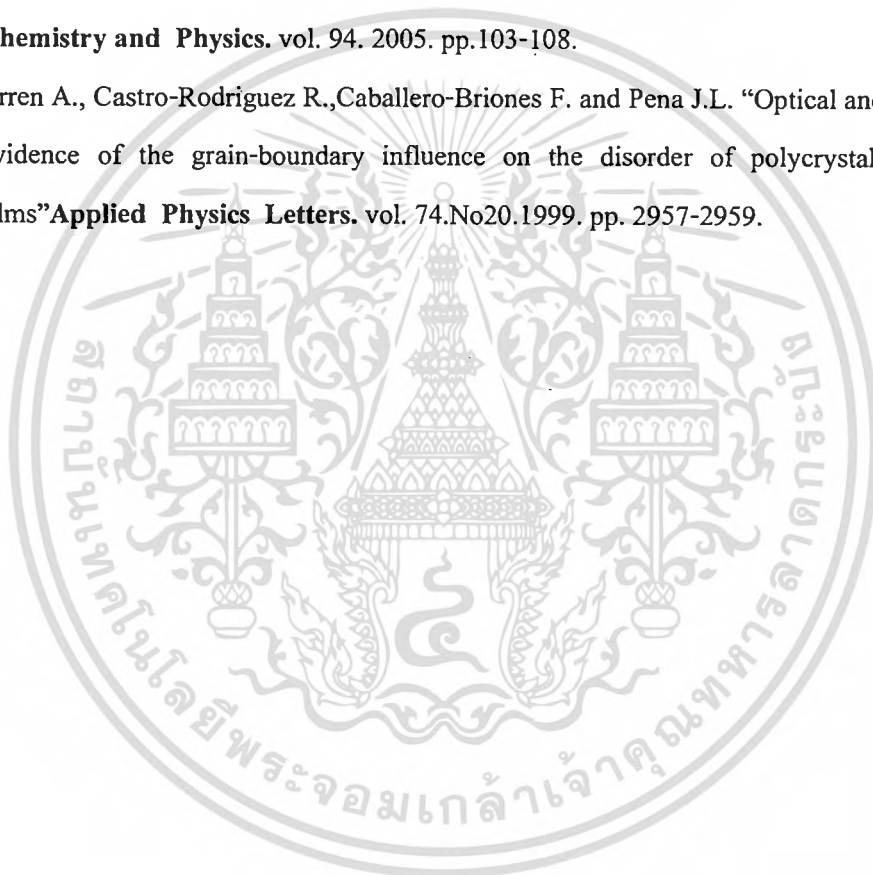
เอกสารอ้างอิง

- [1] X. We et al. 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000, pp. 470-474.
- [2] H.S. Ullal et al., Technical Digest of the International PVSEC-14 Bangkok, Thailand, 2004, pp. 417-420.
- [3] H.S. Ullal et al., 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000, pp. 418-423.
- [4] D. Rose et al. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, pp. 555-558.
- [5] U.P. Khairnar et al., Mat. Chem. Phys., vol. 80,2003, pp.421-427.
- [6] K.D. Dobson et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 62, 2000, pp. 295-325.
- [7] V.B. Patil et al., Mat. Chem. Phys. vol., 65, 2000, pp.282-287.
- [8] Ng. Gaewdang and T. Gaewdang, Materials Letters, Vol.59, 2005, pp. 3577-3584.
- [9] Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, Technical Digest of the International PVSEC-15, 2005, pp. 694-695.
- [10] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [11] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549 การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] T. Aramoto et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 75, 2003, pp. 211-217.
- [14] Sze S.M. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2nd ed., John Wiley & Sons. 2002
- [15] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley & Sons. 2005.
- [16] Ignatowicz S. and Kobendza A. **Semiconducting Thin Films of A^{II}B^{VI} Compounds**. Warsaw : PWN-POLISH SCIENTIFIC. 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Abrikosov N.Kh, Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. **Semiconducting II-VI,IV-VI, and V-VI Compounds.** New York : PLENUM PRESS. 1969.
- [18] Ray B. **II-VI Compounds.** Oxford : PERGAMON PRESS. 1969
- [19] Adachi S. **Properties of Group-IV,III-V and II-VI Semiconductors.** West Sussex : John Wiley&Sons. 2005.
- [20] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [22] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549 การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [23] Anthony T., Fahrenbruch A. and Bube R. "Growth of CdTe films by close-spaced vapor transport" *J.Vac.Sci.Technol.* 1984. pp. 1296-1302.
- [24] Perrier G., Philippe R. and Dodelet J.P. "Growth of semiconductors by the close-spaced vapor transport technique : A review" *J.Mater.Res.* 1988. pp. 1031-1042.
- [25] Runyan W.R. **Semiconductor Measurement and Instrument.** 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill. 1975.
- [26] ฐิตินัย แก้วแดง. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530.
- [27] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2550 การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B., Fernandez P. and Piqueras J. "Deep energy level in CdTe and CdZnTe" *Journal of Applied Physics.* vol. 83. No 4. 1998. pp. 2121-2126.

- [29] Komin V., Tetali B., Viswanathan V., Yu S., Morel D.L. and Ferekides C.S. "The effect of the CdCl₂ treatment on CdTe/CdS thin film solar cells studied using deep level transient spectroscopy" **Thin Solid Films**. 2003. pp. 143-147.
- [30] Mathew X. "Review Photo-induced current transient spectroscopic study of the traps in CdTe" **Solar Energy Materials&Solar cells**. vol. 76. 2003. pp. 225-242.
- [31] Ates A., Yildirim M. and Gurbulak. "Absorption measurement and Urbach's rule in InSe and InSe:Ho_{0.0025} single crystals" **Optical Materials**. vol. 28. 2006. pp.488-493.
- [32] Bilgin V., Kose S., Atay F. and Akyuz I. "The effect of substrate temperature on the structural and some physical properties of ultrasonically sprayed CdS films" **Materials Chemistry and Physics**. vol. 94. 2005. pp.103-108.
- [33] Iribarren A., Castro-Rodriguez R., Caballero-Briones F. and Pena J.L. "Optical and structural evidence of the grain-boundary influence on the disorder of polycrystalline CdTe films" **Applied Physics Letters**. vol. 74.No20.1999. pp. 2957-2959.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. **ชื่อผู้ขอรับทุน** (ภาษาไทย) นางงามนิศ์ วงษ์เจริญ
(ภาษาอังกฤษ) Mrs. Ngamnit Wongcharoen
2. **ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน**
รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2737-3000 ต่อ 6213, 6252
3. **ประวัติการศึกษา**
วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
วท.ม. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
4. **ประสบการณ์ในการวิจัย**
 - 4.1 การปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ และสารประกอบออกไซด์ ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ และวิธี CVD
 - 4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศวิธีอบสารละลายเคมี และวิธีสเปร์ไพโรไลซิส
 - 4.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐาน เช่น คุณสมบัติเชิงไฟฟ้า คุณสมบัติเชิงแสง เป็นต้น
5. **ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่นวารสารและสิ่งตีพิมพ์ต่าง ๆ**
 - 5.1 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripudchaiwon and N. Promros "Influence of Substrate Temperature on Some Properties of Close-Spacing Thermal Evaporated CdTe Thin Films" *Advanced Materials Research*, Vol. 55-57, 2008, pp.881-884.
 - 5.2 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, J. Wattananurak and C. Poo-Rakkiat "Structural and Electrical Properties of Ni-Doped CuAlO₂" *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology (ICEAST 2007)*, November 21-23, 2007, Bangkok, Thailand, Proceedings, pp.885- 888.
 - 5.3 T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" *ISES Solar World Congress 2007*, September 18- 21, 2007, Beijing, China, Proceedings, pp.1299-1302.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.4 Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Co-existence of F and Sb Dopant in Transparent Conducting SnO₂ Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Method” ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007. Beijing, China, Proceedings, pp.1269-1274.
- 5.5 T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Growth and Characterization of Co-Doped Fluorine and Antimony in Tin Oxide Thin Films Obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis” Journal of Solid Mechanics and Material Engineering, Vol. 1, No. 4, 2007, pp.592-601.
- 5.6 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Sittiketkorn and N. Promros “Effects of Sodium Incorporation in Copper Indium Diselenide Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method” Laos Journal on Applied Science, Vol 1, No. 1, November 2006 (Special Issue), pp.134-141.
- 5.7 T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Hanwunggmoung and N. Promros “Influence of Precursor-Substrate Spacer on Some Properties of CSS-CdTe Thin Films” Laos Journal on Applied Science, Vol 1, No. 1, November 2006 (Special Issue), pp.151-157.
- 5.8 T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nakaruk and N. Promros “Growth and Characterization of Co-Doped Fluorine and Antimony in Tin Oxide Thin Films Obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis” Asian Symposium on Materials and Processing 2006 (ASMP2006), November 9-10, 2006 Sofitel Central Plaza Bangkok, Thailand. Proceeding, p.36.
- 5.9 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Sittiketkorn and N. Promros “The Role of Sodium, Sulfur and Oxygen Incorporation in Copper Indium Diselenide Thin Films” Asian Symposium on Materials and Processing 2006 (ASMP2006), November 9-10, 2006 Sofitel Central Plaza Bangkok, Thailand. Proceeding, p.47.
- 5.10 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Prachopchok and P. Sittiketkorn “Electrical Properties of P-type CuAlO₂ Transparent Conducting Oxide” KMITL SCIENCE JOURNAL, Vol. 6, No. 1, 2006, pp.70- 77.
- 5.11 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang “Investigations on Chemically Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films With Low Zn Content” Materials Letters, Vol.59, 2005 pp. 3577- 3584.
- 5.12 Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Comparative Studies of Thermally Evaporated Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films Prepared by Using Different Precursors” Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.694- 695.

- 5.13 T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Optical and Electrical Properties of B-Doped $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method” Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696-697.
- 5.14 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, C. Poo-Rakkiat and A. Nakaruk “Optoelectronic Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Deposition Technique” The International Conference on Smart Materials SmartMat'04, 1-3 December 2004, Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, p.62.
- 5.15 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Sittiketkorn, S. Kirtsaeng and T. Chanyatham “Effects of Selenization Temperature on Some Properties of CuInSe_2 Thin” 31st Congress on Science and Technology of Thailand, 18- 20 October 2005, Technopolis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.207.
- 5.16 Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Sittiketkorn, S. Kirtsaeng and T. Chanyatham “Effects of Selenization Temperature on Some Properties of CuInSe_2 Thin” 31st Congress on Science and Technology of Thailand, 18- 20 October 2005, Technopolis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, p.207.
- 5.17 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and A. Nakaruk “Studies on the Electrical and Optical Properties of $\text{SnO}_2\text{:F}$ Thin Films Prepared by Intermittent Spray Pyrolysis Method” 30th Congress on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition and Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.152
- 5.18 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham “Some Properties of Cadmium Telluride Thin Films Grown by Thermal Evaporation” 30th Congress on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition and Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.158.
- 5.19 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham “Growth and Some Properties of CdTe Thin Films by Thermal Evaporation” The Third Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT III), 10-11 August 2004, Bangkok, Thailand, pp.264-266.
- 5.20 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, N. Promros, A. Nakaruk, W. Lipar and T. Chanyatham “Photochemical Deposition CdS Thin Films for Photovoltaic Applications” The First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004, Bangkok, Thailand, pp.75-79.

- 5.21 Ng. Gaewdang , T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittketkorn and A. Nakaruk
 “Chareacterization of CdS Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method” The
 First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004,
 Bangkok, Thailand, pp.80-83.
- 5.22 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang “Thickness Dependence of Structural, Optical and
 Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation”
 Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.581-582.
- 5.23 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar “Some Characterization of Chemical Bath
 Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films” Technical Digest of the International PVSEC-14,
 Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.
- 5.24 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang “CdS Thin Films Deposited by a Modified Chemical
 Bath Deposition Method” KMITL Science Journal, Vol.3, No.3, 2003, pp.21-29.
- 5.25 Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Photoluminescence of
 Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films” 29th Congress on Science and
 Technology of Thailand, 20-22 October 2003, Khonkaen University , p.195.
- 5.26 T. Gaewdang and Ng. Gaewdang “Chemical Bath Deposition and Characterization of
 $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films” Third Internatinal Conference on Inorganic Materials, 7-10
 September 2002, Steigenberger Hotel, Konstanz, Germany, p.39.