

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  
ฟิล์มบาง CdS/CdTe

Fabrication of Novel Back Contact Suitable for CdS/CdTe Thin Film  
Solar Cells

RCH  
TA  
418.9  
.T45  
จ 3357  
พ.ศ. 1

นายอุตินัย แก้วแดง  
นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ  
นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

12408/48

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 121186  
วัน, เดือน, ปี 25 ส.อ. 2555

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้า

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุมารใช้งานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นส.วราภรณ์ บุญเกื้อ นส.ชญญา ไทยสะเทือนและนายอดิศร นพรุจิกุล นักศึกษาระดับปริญญาโท ของสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสทิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He $\lambda$ ios  $\alpha$  ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu $\kappa_1$  1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2554 ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์  
แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe

(ภาษาอังกฤษ) Fabrication of Novel Back Contact Suitable for CdS/CdTe Thin  
Film Solar Cells

แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน  
ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 200,000 บาท  
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

#### หัวหน้าโครงการวิจัย

นายฐิตินัย แก้วแดง สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kgthitin@kmitl.ac.th

#### ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kwngamni@kmitl.ac.th

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพ อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, E-mail: tiparatana.w@bu.ac.th

คำสำคัญ (Keywords) CdS/CdTe solar cells, novel back contact, I-V characterization, C-V  
characterization, Impedance spectroscopy

#### บทคัดย่อ

หลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง CdTe เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน  
ในแบบรอยต่ออวกาศ p-CdS/p-CdTe ได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยจำนวนมาก และพบว่า  
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เหมาะสมที่จะเป็นสิ่งที่ประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงาน  
ไฟฟ้าที่ดีได้ การเกิดเป็นรอยต่อโอห์มิกหรือรอยต่อโอห์มิกเทียมของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์ม  
บาง CdTe เป็นหัวข้อที่นักวิจัยให้ความสำคัญกันมาก ความยากลำบากในการสร้างรอยต่อโอห์มิก  
คือการหาโลหะที่มีฟังก์ชันงานค่าสูงๆ นักวิจัยส่วนใหญ่มุ่งที่จะพัฒนารอยต่อโอห์มิกเทียมโดยการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างชั้นบางๆของสารประกอบที่เหมาะสมให้อยู่ระหว่างรอยต่อ CdTe และโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe โดยมี SnO<sub>2</sub>:F เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและ ZnTe:Cu เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ฟิ์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สามารถเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี จากนั้นนำไปเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เตรียมโดยวิธีการระเหิดในระยะประชิดในสุญญากาศที่ความดัน 3x10<sup>-2</sup> มิลลิบาร์ ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที โดยระยะสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 550 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วนำไปจุ่มในสารละลายแคดเมียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe นำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสามารถคำนวณจากการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร จากการวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟฟ้าฮาโลเจน ELH พารามิเตอร์ที่สำคัญ อย่างเช่น แฟกเตอร์อุดมคติ, ความสูงกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรมสามารถคำนวณได้จากลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวินกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะเป็นกลไกที่โดดเด่นในการนำกระแสของพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ

#### Abstract

In recent years, investigations aimed at developing solar cells based on p-CdTe polycrystalline films with a n-CdS/p-CdTe heterojunction have been performed by many researchers. It was shown that such solar cells are very promising for solar energy conversion. The formation of a low resistance ohmic or pseudo-ohmic contact to CdTe solar cells has been the subject of a great deal of research. The difficulty in achieving this is primarily due to the requirement of a metal with a high work function. Most practical approaches to contacting CdTe rely on the formation of pseudo-ohmic contact by using a suitable interface layer between the p-CdTe and the outer metal contact. In this research, the preparation and characterization of CdS/CdTe heterojunction solar cell using SnO<sub>2</sub>:F as front contact and ZnTe:Cu as back contact were performed. CdS thin films were prepared by chemical bath deposition (CBD) method. CdTe thin films were deposited by close-spaced sublimation (CSS) method in reaction chamber have

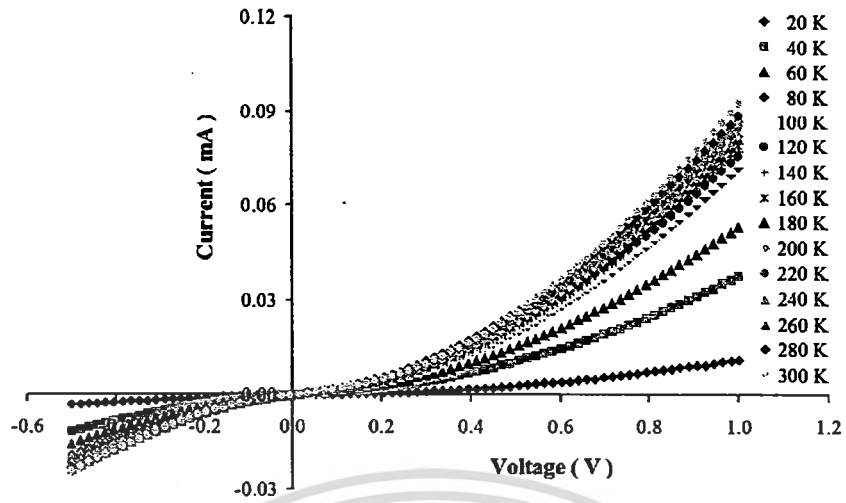
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
low pressure about 3x10<sup>-2</sup> mbar. The films were prepared with precursor-substrate placing 6 mm  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a part and using 30 min of deposition time. The temperature of the precursor and substrate were fixed at 550 and 450 °C, respectively. These films were treated with CdCl<sub>2</sub> solution about 1 h and annealed at 400 °C for 30 min. Finally, thin film solar cell in the form SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe was obtained. Crystal structure and crystal morphology of thin films were checked by XRD and SEM, respectively. The optical transmission spectrum of CdTe thin films were performed by UV-VIS spectrophotometer with wavelength in the range 300-800 nm. Then, energy gap value of the films was evaluated from it. The electrical properties of the solar cell were performed by using dark current-voltage and light current-voltage measurements from ELH halogen lamp. Important parameters such as ideality factor, barrier height and series resistance were obtained from I-V characteristics carried out at low temperature in the range 20-300 K. Tunneling enhanced recombination has been found to dominate carrier conduction mechanism in the junction.

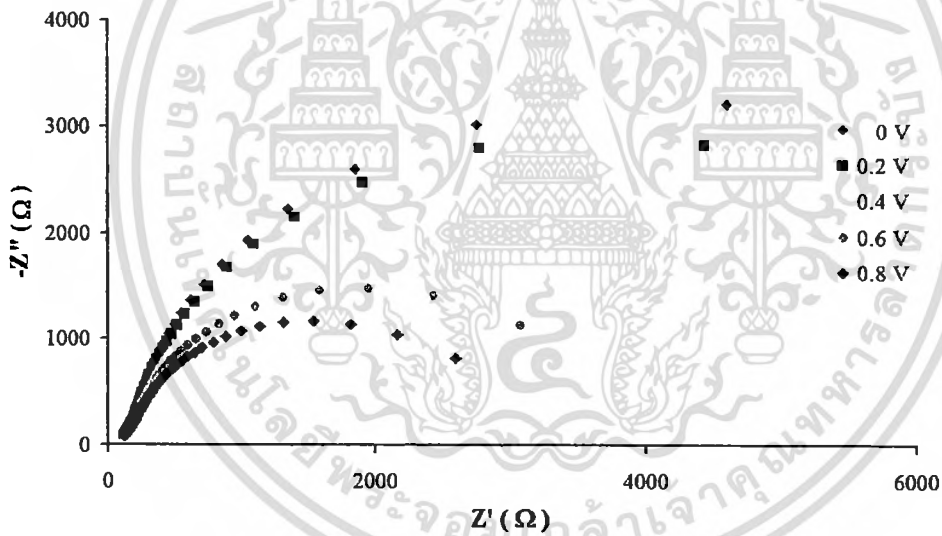


รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe



รูปที่ 3 แสดงอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก	6
2.2.1 การระบุตำแหน่ง	6
2.2.2 การระบุทิศทาง	6
2.2.3 การระบุชื่อระนาบ	6
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม III และกลุ่ม VI	8
2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	8
2.3.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์	9
2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	10
2.3.4 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	11
2.4 ผลึกจริง	11
2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	11
2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น	13
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	14
2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.4.3.2 ผลึกแปดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแปดหรือระนาบของโครงผลึกแปด	15
2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	15
2.5 กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิด	17
2.6 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	18
2.6.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	18
2.6.2 การเกิดฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	19
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	23
2.9 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	28
2.9.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	28
2.9.2 การส่งผ่านแสง	32
2.9.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	33
2.9.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	34
2.10 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์	37
2.11 สภาพนำไฟฟ้า	38
2.11.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	39
2.11.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	39
2.11.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว	40
2.11.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	41
2.11.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	42
2.12 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	43
2.12.1 การตอบสนองต่อแสง	44
2.12.2 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า	51
2.13 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.13.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	56
2.13.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงสัคย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ	56
2.14 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงสัคย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	59
2.15 อินพีแคนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	62
2.15.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	62
2.15.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	63
2.15.3 กราฟของโบด	67
2.15.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์	70
2.15.5 แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี	72
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	79
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	79
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	79
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	80
3.1.3 การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	80
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด	81
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	82
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	82
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	83
3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	83
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้ อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	84
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	84
3.2.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์	85
3.3 ขั้นตอนการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	85
3.3.1 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	85
3.3.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์	86
3.3.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า	87
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	88
4.1 ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	88
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	92
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	96
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	102
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพหุของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้ อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
4.2.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	111
4.2.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	118
4.2.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

4.2.4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	128
4.2.5 ผลการศึกษสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 – 300 เคลวิน ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	136
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	146
เอกสารอ้างอิง	154
ภาคผนวก	158
ประวัติผู้เขียน	163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	7
4.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบาง 30 นาที	95
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	100
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	102
4.4	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่		หน้า
4.5	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	115
4.6	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	122
4.7	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า	
4.8	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมตัวย้อนกลับ ( $I_g$ ) ค่าแฟกเตอร์อุคมคติ ( $\eta$ ) และค่าความสูงของกำแพงศักย์( $\phi_{bo}$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	131
4.9	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	133
4.10	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	135
4.11	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	5
2.2	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	7
2.3	แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	8
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	9
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไจท์	9
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	10
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS	10
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์	11
2.9	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่ ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่ ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่	12
2.10	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขดตักและ ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	13
2.11	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบขอบ	14
2.12	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบสกรู	14
2.13	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน	15
2.14	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของ โครงผลึกแฝดและระนาบของ โครงผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	15
2.15	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
2.16	แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกของเป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ก. กระบวนการเซทเทอโรจีเนียส ข. กระบวนการโฮโมจีเนียส ค. กระบวนการผสมระหว่างเซทเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส	18
2.17	แสดงการเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับโดย กระบวนการโฮโมจีเนียส	19
2.18	แสดงการเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับโดย กระบวนการเซทเทอโรจีเนียส	19
2.19	แสดงการเกี่ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	21
2.20	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเกี่ยวเบน รังสีเอกซ์	23
2.21	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
2.22	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ ก. ฉนวน ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ค. สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี จ. โลหะ ฉ. สารกึ่งโลหะ	29
2.23	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน) ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง	31
2.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟ ตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน) ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้าง	31

### โฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
2.25	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	32
2.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของแสงและแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	34
2.27	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน	35
2.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	36
2.29	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe	38
2.30	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	39
2.31	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	40
2.32	แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้ว ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	41
2.33	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	42
2.34	แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน	44
2.35	ก. อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากบริเวณผิวยุติของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว ข. มิติของเซลล์แสงอาทิตย์และความกว้างของการแพร่พาหะข้างน้อย ค. ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่บริเวณผิวยุติของเซลล์แสงอาทิตย์	45
2.36	ก. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อเอกพันธ์ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีโดยแสดงการแจกแจง 3 บริเวณ ( เส้นประแทนด้วยการตอบสนองในเชิงอุดมคติ ) ข. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อเอกพันธ์ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวยุติ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
2.37	แสดงวงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์	51
2.38	ก. ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การฉายแสง ข. ภาพกลับหัวของรูป 2.38 (ก)	51
2.39	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน	52
2.40	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์	54
2.41	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ $Cu(In,Ga)Se_2$ ที่แปรตามอุณหภูมิ	55
2.42	แสดงกลไกผลของการขุดคูโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการ รวมตัวของพาหะโดย ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	57
2.43	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ $J_0$ และค่า แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของ CdTe ที่ผ่าน และไม่ผ่านการแอนนีกด้วย $CdCl_2$	59
2.44	แสดงกราฟของในควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่าง ง่าย ๆ	63
2.45	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	63
2.46	แสดงกราฟของในควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูป ครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	65
2.47	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง ) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ )	65
2.48	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนต เชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ $Z'$ และ $Z''$ จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็น ตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90^\circ$ และมุมเฟสของตัว ต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์ประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90^\circ$ และมุม เฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	68
2.49	แสดงกราฟในควิสต์(ก) และกราฟของโบค(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัว เก็บประจุของบริวอลล์ โพล่าไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
2.50	แสดงวงจรมวลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของโนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรมวลดังกล่าว	70
2.51	แสดงวงจรมวลของแบบจำลองชนิดโคโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของโนควิสต์ (ข)	71
2.52	แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ก) และกราฟโนควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ข)	72
2.53	แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า C <sub>SCR</sub> แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับศักย์ประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจรวม	76
2.54	แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se <sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง	76
2.55	แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่างๆ ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na	77
2.56	แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe <sub>2</sub>	78
3.1	แสดงระบบการระเหิดสารในระยะประชิดภายใต้สุญญากาศ	81
3.2	แสดงเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรค โตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	82
3.3	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV	82
3.4	แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.1	89
4.2	90

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.3	91
<p>แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีชั้นแคดเมียมซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีลงบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที</p> <p>ก. แคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์</p> <p>ข. แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน</p> <p>ค. แคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน</p> <p>ง. แคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบที่บนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน</p> <p>จ. ภาพการต่อขั้วไฟฟ้าด้านหลังของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่โครงสร้างแบบ <math>\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}</math></p>	
4.4	93
<p>แสดงที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที</p>	

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.5	แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบาง 30 นาที	94
4.6	แสดงความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	94
4.7	แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	95
4.8	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.9	แสดงขนาดของเกรนที่ได้จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	98
4.10	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	99
4.11	แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	100
4.12	แสดงสเปกตรัม EDX ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	101
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20 และ 30 นาที โดยใช้ อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดสารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 40 และ 50 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	104
4.15	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดสารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20 และ 30 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	105
4.16	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 40 และ 50 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	106
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของ ก. slide glass/SnO <sub>2</sub> :F ข. slide glass/SnO <sub>2</sub> :F/CdS	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	108
4.19	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน	108
4.20	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการอาบสารละลายเคมีและรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	109
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	112
4.22	แสดงกราฟอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\text{Current})$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	113
4.24	แสดงการจำลองข้อมูลเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	113
4.25	แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	114
4.26	แสดงกราฟของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	119
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	119
4.29	แสดงกราฟของกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	120
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln ( Current )$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.31	แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	121
4.32	แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	121
4.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $T(K)$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	123
4.34	แสดงกราฟอาร์เรเน็สของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	124
4.36	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	124
4.37	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่ สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	126
4.38	แสดงกราฟของกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิ แก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.39	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\text{Current})$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	127
4.40	แสดงการจำลองข้อมูลเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	127
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	129
4.42	แสดงกราฟอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า	
4.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\text{Current})$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	130
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	132
4.45	แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้ การฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	132
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.47	136
4.48	137
4.49	138
4.50	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.51	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	139
4.52	แสดงอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	139
4.53	แสดงการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	140
4.54	วงจรมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

## (List of Abbreviation)

CdS/CdTe	รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe
FTO	ฟิล์มบางทินออกไซด์เจือฟลูออรีน
ZnTe:Cu	ฟิล์มบางซิงค์เทลลูไรด์เจือด้วยอะตอมทองแดง
I-V characterization	ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้า
C-V characterization	ลักษณะสมบัติของความจุ-แรงดันไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากวิกฤตการราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างมากทั่วโลก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำใช้ได้ในระยะยาวนาน

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบเนดิกโต เอล เซเรนิ ในปี ค.ศ. 1839 จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า งานวิจัยและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI<sub>2</sub> เช่น CdTe, CdS, CuInSe<sub>2</sub> และ CuInGaSe<sub>2</sub> เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธ์ุ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ก็เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI อีกชนิดหนึ่ง ที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหมาะสำหรับประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับช่วงพลังงานของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงสุด แคดเมียมเทลลูไรด์มีประสิทธิภาพสูง 16 เปอร์เซ็นต์ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงประมาณ  $6 \times 10^4$  ต่อเซนติเมตร [1] วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ มีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การพิมพ์สกรีน การระเหิดสารในระยะประชิด (closed space sublimation: CSS) การเคลือบในสารละลายเคมีโดยใช้ไฟฟ้า (electro-deposition) และการระเหยสารภายใต้สุญญากาศ ซึ่งวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดมีราคาต้นทุนที่ต่ำแต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ยังคงอยู่ในระดับสูง โดยวิธีการนี้ควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 100 องศาเซลเซียส และการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์เหมาะสำหรับเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe และสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอน โวลต์และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงในระดับ 10<sup>5</sup> ต่อเซนติเมตร

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2515 โดยบอนเนต (Bonnet) และราเบนโฮสต์ (Rabenhorst) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ [2] จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งประสิทธิภาพสูงถึง 16.5 เปอร์เซ็นต์ [3-6] และมีแนวโน้มที่จะนำออกสู่ตลาดได้ในอนาคตอันใกล้

ข้อพิพาทด้านพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญมาก เนื่องจากจะต้องเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก เพื่อลดปัญหาความต้านอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความต้านอนุกรมนี้อาจทำให้เกิดกระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าลดลง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาข้อต่อไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี และเพื่อให้ง่ายต่อการต่อสายไฟฟ้าด้วย ถ้าข้อต่อไฟฟ้าด้านหลังมีสมบัติไม่เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี จะทำให้เกิดโรล โอเวอร์ (roll over) ขึ้นในกราฟของลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) ซึ่งจะส่งผลให้ฟิลแฟกเตอร์ (fill factor) มีค่าลดลง แล้วประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าลดลงตามไปด้วย แต่เนื่องจาก CdTe มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีค่อนข้างสูง ดังนั้นโลหะส่วนใหญ่จึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นรอยต่อโอห์มมิกกับ p-CdTe อย่างไรก็ตาม โลหะ Cu สามารถนำมาใช้ทำเป็นรอยต่อโอห์มมิกได้ โดยจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าของ CdTe เสียก่อนด้วยสารละลายเคมี เคมี Br<sub>2</sub>-Methanol หรือสารละลาย HNO<sub>3</sub>/HPO<sub>3</sub> เพื่อให้ผิวหน้าของ CdTe อุดมไปด้วยธาตุ Te เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบาง Cu ไปบน CdTe แล้วจะเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง Cu<sub>1-x</sub>Te (1 ≤ x ≤ 2)

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเริ่มต้นจากการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยวิธีอบสารละลายเคมีบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (FTO) ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ชั้นตอนที่สองจะทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) โดยวิธีการระเหิดสารในระยะเวลาประชิดให้เคลือบบนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ชั้นตอนที่สามได้ทำการระเหยฟิล์มบาง ZnTe ให้เคลือบบนฟิล์มบาง CdTe แล้วทำการเจืออะตอม Cu จากสารละลาย Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ชั้นตอนสุดท้ายทำข้อต่อไฟฟ้าด้านหลังโดยใช้สายไฟขนาดเล็กมากเชื่อมด้วยกาวเงินให้ติดกับฟิล์มบาง ZnTe:Cu ส่วนฟิล์มบางของทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนจะทำหน้าที่เป็นข้อต่อไฟฟ้าโปร่งแสงด้านหน้า ต่อจากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เคลือบฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดให้เคลือบบนกระจกสไลด์ที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง FTO และฟิล์มบาง CdS เพื่อให้เป็นรอยต่อแบบ slide glass/FTO/CdS/CdTe โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.2.2 ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้มีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิกบนฟิล์ม CdTe โดยการเคลือบฟิล์มบาง ZnTe บนฟิล์มบาง CdTe ด้วยวิธีระเหิดด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการเจือด้วยอะตอม Cu จากสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และทำการแอนนัลในอากาศด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.2.3 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า, วัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาวิธีการเตรียมรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางทินออกไซด์เจือฟลูออรีน
- 1.3.2 ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้มีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิกบนฟิล์ม CdTe โดยการเคลือบฟิล์มบาง ZnTe บนฟิล์มบาง CdTe ด้วยวิธีระเหิดด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการเจือด้วยอะตอม Cu จากสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  และทำการแอนนัลในอากาศด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe
- 1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe
- 1.3.5 วัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) และหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิพันธุ์

เอกสารนี้เป็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เช่น การวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าและการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3.7 วัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe แล้วนำผลที่ได้ไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วงจรสมมูลจำลองผลด้วยโปรแกรมเฉพาะ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบหลักการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่ถูกล้างด้วยฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางทินออกไซด์เจือฟลูออรีน
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ตลอดจนรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{SnO}_2/\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติของรอยต่อโอห์มิกที่ประดิษฐ์จากฟิล์มบาง ZnTe:Cu ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe
- 1.4.4 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ต่อไป

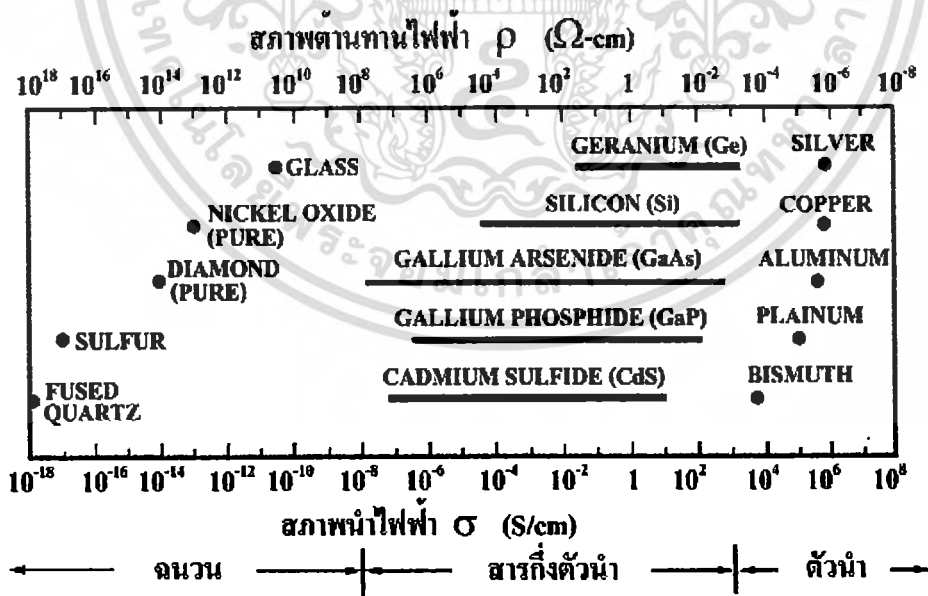
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [7-10]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง  $10^{-18}$ - $10^{-8}$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง  $10^4$ - $10^6$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

## 2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [7-17]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.2.1 การระบุตำแหน่ง

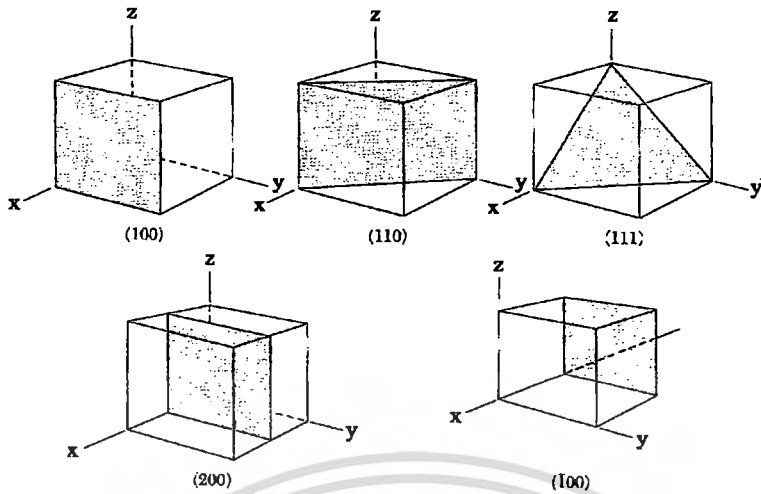
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “;” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$

### 2.2.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยม และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{2}\ \bar{1}\ \bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

### 2.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบแต่ละระนาบจะใช้อักษร  $(hkl)$  โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ค่า  $(hkl)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์(Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ค่าดัชนีมิลเลอร์มีวิธีการหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนผลึกแต่ละแกนคือค่า  $(x,y,z)$  และจึงทำให้เป็นเศษส่วนกลับ ต่อจากนั้นให้หาผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย (-) บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่นระนาบ  $(010)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(\infty, 1, \infty)$  และระนาบ  $(\bar{1}11)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(-1, 1, 1)$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก	ดัชนีมิลเลอร์(hkl)หรือระนาบ
(x,y,z)	$\frac{1}{h} \frac{1}{k} \frac{1}{l}$	
(∞,1,∞)	$\frac{1}{0} \frac{1}{1} \frac{1}{0}$	(010)
(-1,1,1)	$-\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}{1}$	( $\bar{1}$ 11)
(-1,-1,-1)	$-\frac{1}{1} -\frac{1}{1} -\frac{1}{1}$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )
( $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ )	$\frac{1}{\frac{1}{2}} \frac{1}{\frac{1}{2}} \frac{1}{\frac{1}{4}}$	(224)
( $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$ )	$\frac{1}{\frac{1}{2}} \frac{1}{\frac{1}{2}} \frac{1}{0}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hki) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

$$i = -(h + k) \tag{2.1}$$

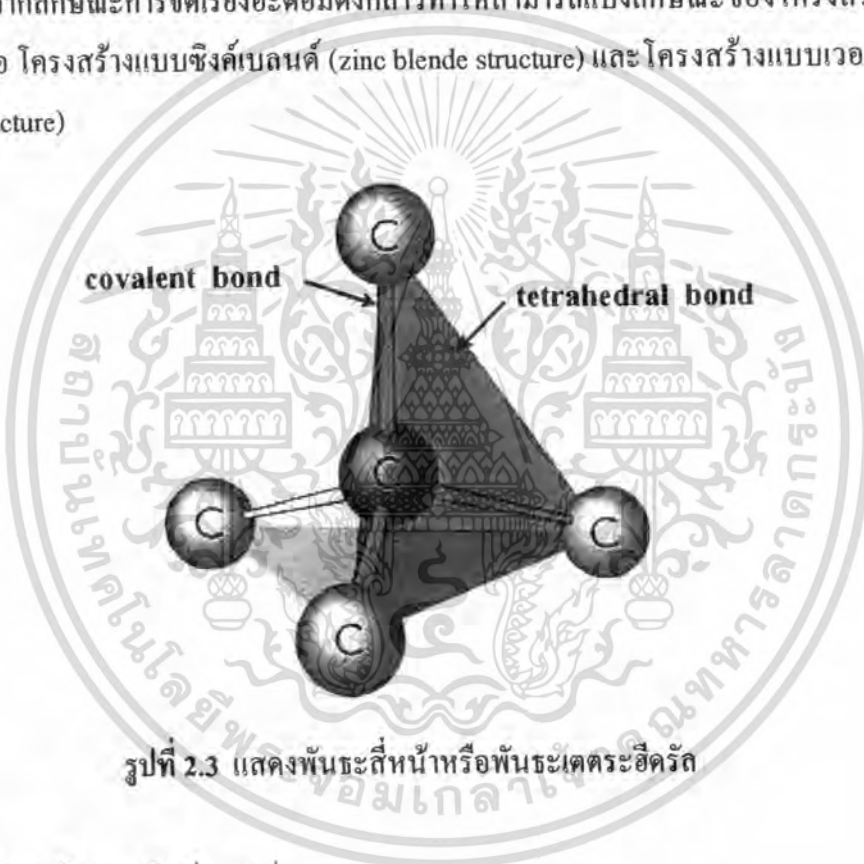
เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ(110) จะเรียกว่า ( $11\bar{2}$ ) นอกจากนี้มักพบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกันนั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[7-28]

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 2.3 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

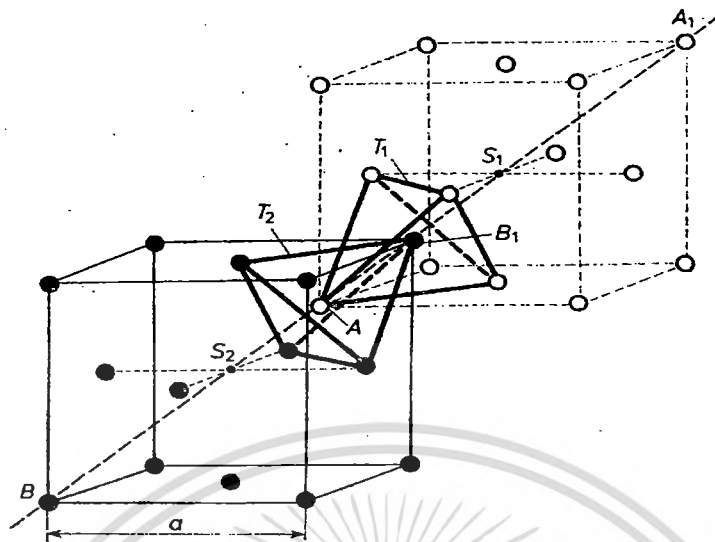


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$  ฐานของพันธะสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม  $60^\circ$  อดสารรอบแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$

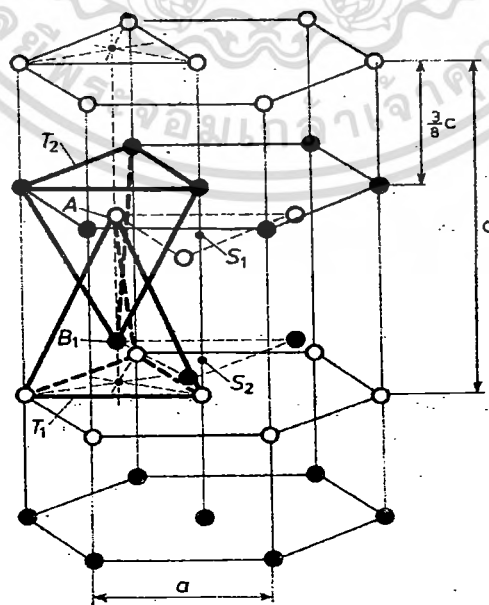
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

### 2.3.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเอกซะโกนิต 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$  ฐานพื้นระลีสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$



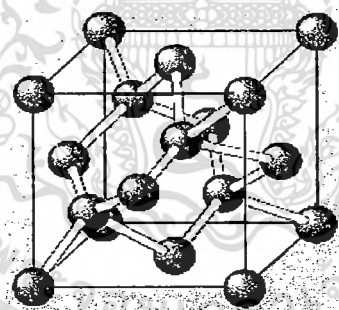
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

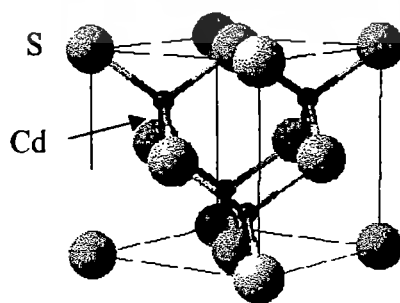
### 2.3.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ [11,13-14,16-17,20,22]

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกันคือโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ตไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์หรือแบบซิงค์เบลนด์ โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.6 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกันว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ  $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสอง โครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

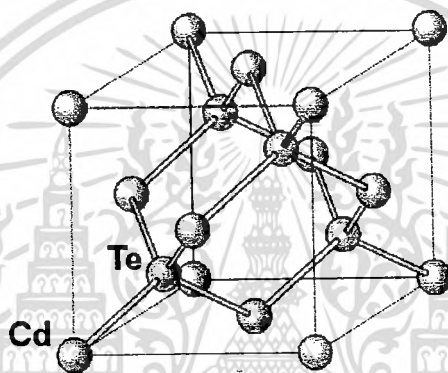


รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ [12-15,19-24]

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอมและมีความหนาแน่น 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอน โวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.50 อิเล็กตรอน โวลต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์

## 2.4 ผลึกจริง [7-17]

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง(defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่าผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

### 2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ดังนี้

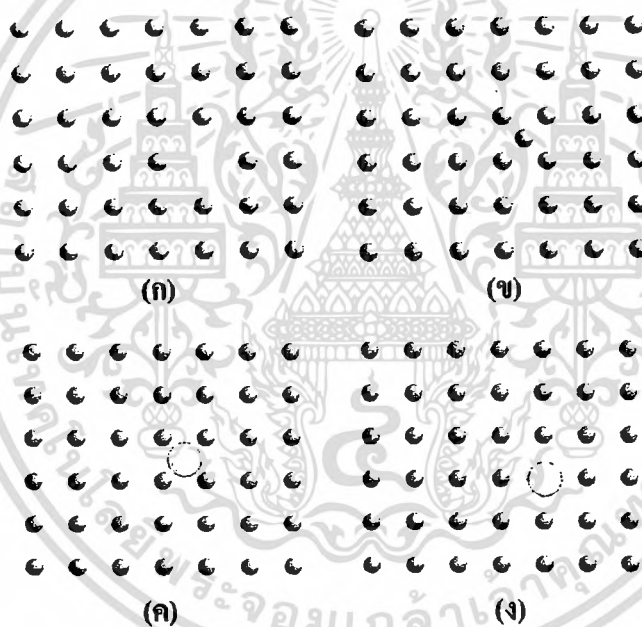
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี(vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่ (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก (interstitial impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity - atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



○ อะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ ◐ อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน

**รูปที่ 2.9 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด**

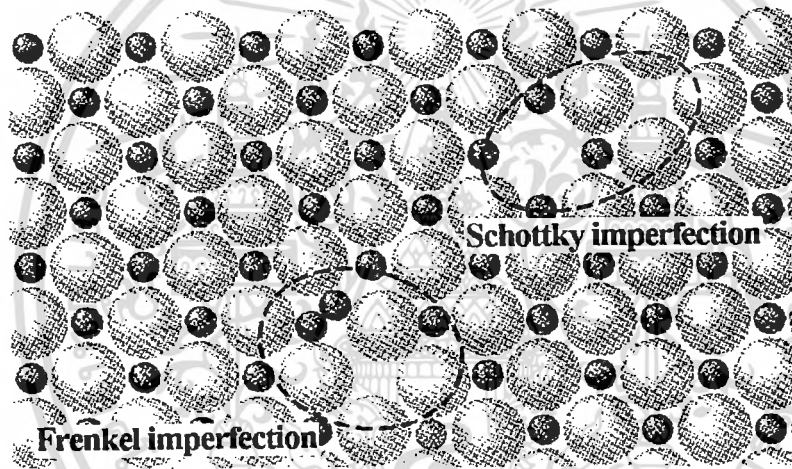
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ใน โครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี ( Schottky imperfection ) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก - ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล ( Frenkel imperfection ) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล

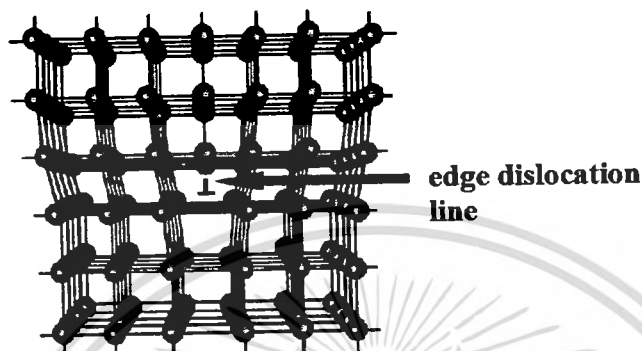
#### 2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเชิงเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว(distortion)หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

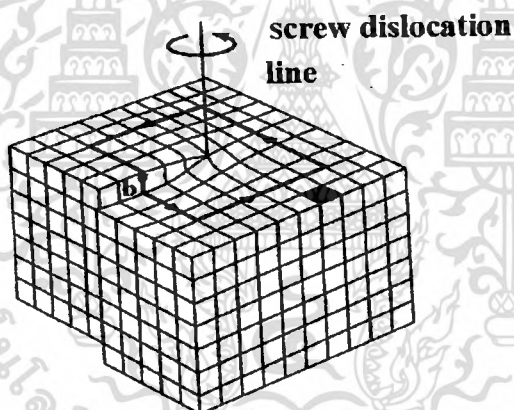
ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบ์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector :  $\vec{b}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกว่าคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

### 2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

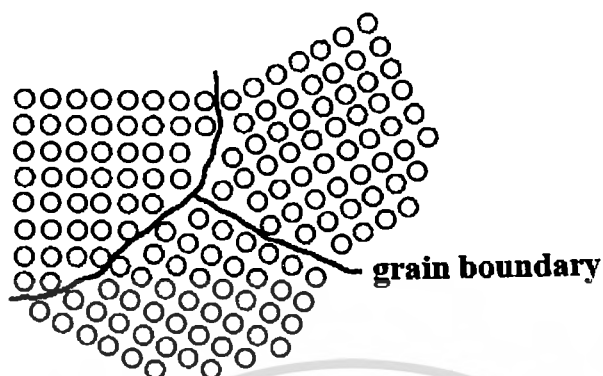
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีกเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้น เรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่ผลึกที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

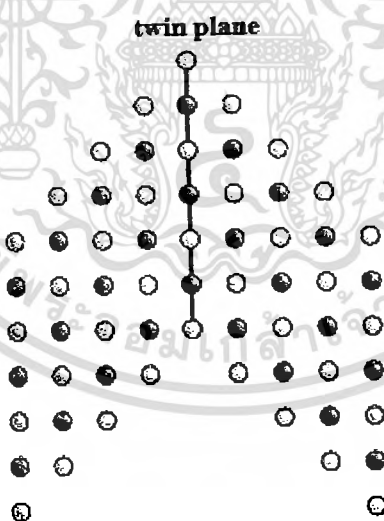
มากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



รูปที่ 2.13 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.4.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twiplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

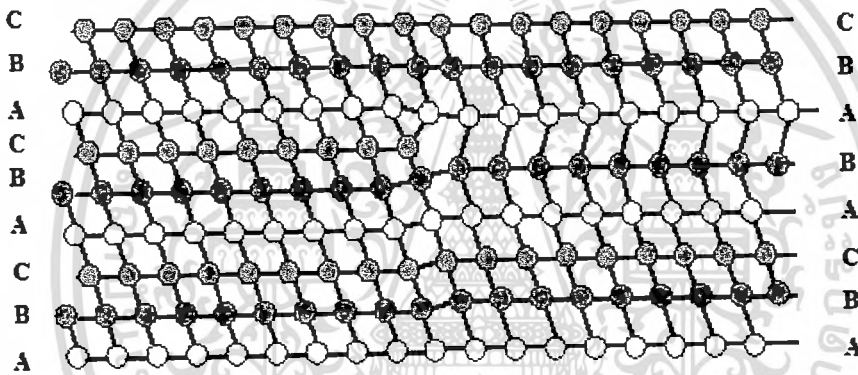


รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)**

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงสร้างผลึกออคตาฮีดรอลแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.15

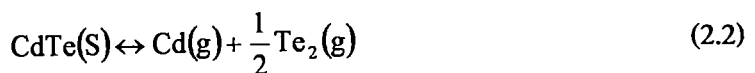


รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด

**2.5 กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS)**

[12,14,21-34]

กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้นที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลื่อนต่ำ ในกระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดนี้พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวลพิจารณาสมการเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right) = K_p(T) \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$  คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Delta G(T)$  คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์  $\Delta G_{CdTe} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T$  กิโลแคลอรีต่อโมล

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ ( $T_{so}$ )

และแผ่นฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ ( $T_{sub}$ ) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{so}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{so}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{so}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{so}}\right] \quad (2.5)$$

$$K_p(T_{sub}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{sub}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{sub}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}}\right] \quad (2.6)$$

ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd และโมเลกุลของก๊าซ  $Te_2$  ระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของฟิคส์ (Fick's first law)

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

$$J_{Te_2,j} = \frac{D_{Te_2,j}}{Rd} \left( \frac{P_{Te_2}(T_{so})}{T_{so}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $J_{Cd,j}$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในก๊าซ j

$J_{Te_2,j}$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ  $Te_2$  ในก๊าซ j

J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

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

ซึ่งในกรณีนี้น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของก๊าซ  $Te_2$  มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่  $D_{Cd,j} = 1.85 D_{Te_2,j}$  (ในบรรยากาศของก๊าซ  $H_2$ , He หรือ Ar) จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น ( $T_{so}$ ) และแผ่นฐานรองรับ ( $T_{sub}$ ) มีค่าต่างกัน  $T_{so} - T_{sub} = 70$  องศาเซลเซียส จะได้  $P_{Cd}(T_{so}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$  และ  $P_{Te_2}(T_{so}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ} \quad \frac{P_{Cd}(T_{so})}{P_{Te_2}(T_{so})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad \text{ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า} \quad (2.9)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการ (2.5),(2.6),(2.7),(2.8),(2.9) สามารถคำนวณหา  $J$  และอัตราการปลูก(growth rate)

ฟิล์มบาง ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR \left( \frac{\mu\text{m}}{\text{min}} \right) = \frac{J \times M \times 60 \times 10^4}{\rho} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $J$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่

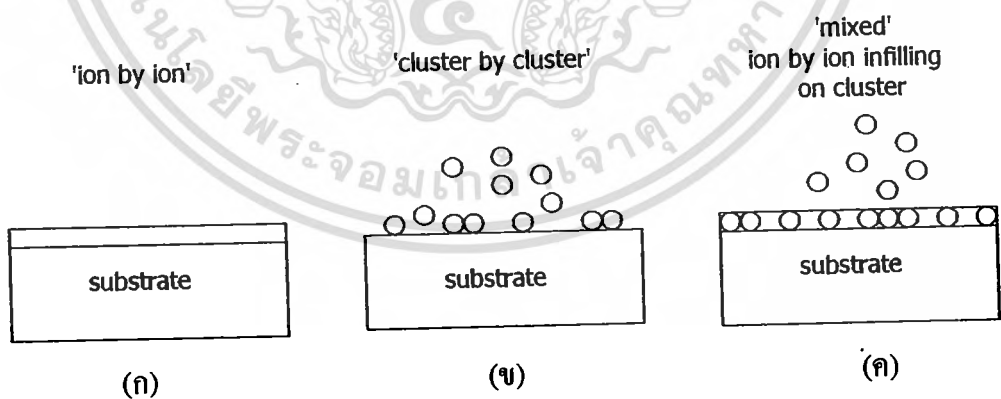
$M$  คือ มวลโมเลกุลของแคดเมียมเทลลูไรด์

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของแคดเมียมเทลลูไรด์

## 2.6 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี

### 2.6.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [11,13-14,16-17,20,22,32]

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์สามารถทำได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีโดยการจุ่มแผ่นฐานรองรับซึ่งเป็นกระจกใส ซึ่งสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วยไทโอยูเรีย ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) เกลือแคดเมียมซัลเฟต ( $\text{CdSO}_4$ ) ไอออนของแคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) ตามลำดับ โดยในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า pH ของสารละลายในอ่างอบสารละลายเคมีประมาณ 10.6 – 11.8 ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางจะเกิด  $\text{Cd}^{2+}$  อย่างช้า ๆ โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ก. กระบวนการเฮเทอโรโรจีเนียส

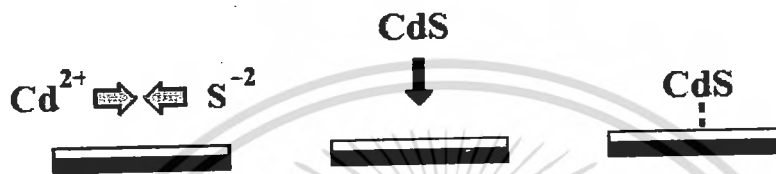
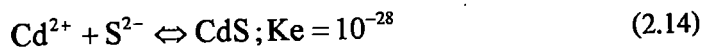
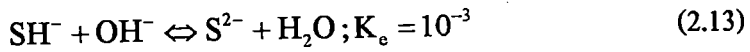
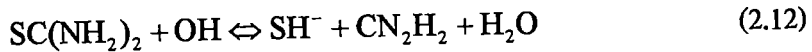
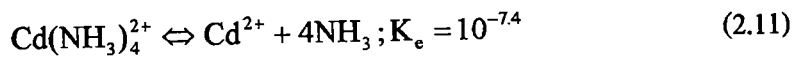
ข. กระบวนการโฮโมโรจีเนียส

ค. กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรโรจีเนียสและโฮโมโรจีเนียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

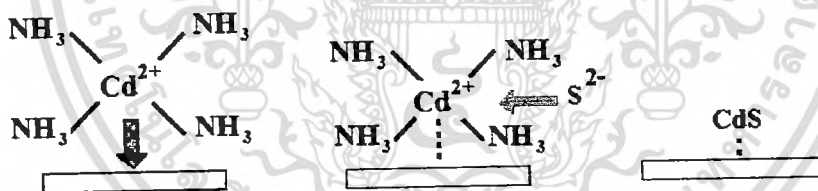
การเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

- กระบวนการโฮโมจีเนียส



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

- กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส



รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

2.6.2 การเกิดฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส

[11,13-14,16-17,20,22,32]

ในการตกผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ;  $K_{sp}$ ) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant ;  $K_e$ ) ในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบ ด้วยกันดังนี้ คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบเอกพันธ์ (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบกลุ่มก้อนต่อกกลุ่มก้อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับดังรูปที่ 2.17 และ

2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ เรียกว่า ไอออนต่อไอออน (ion by ion) หรือการตกผลึกแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous precipitation) ซึ่ง  $\text{Cd}^{2+}$  จะไปจับกับ  $\text{NH}_3$  กลายเป็น  $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{2+}$  แล้วก็เคลื่อนที่มายังตำแหน่งบน ผิวแผ่นฐานรองรับเกิดการดูดซับ (adsorption) อิเล็กตรอนทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียหลุดออกมาในขณะนั่นเอง ไอออน  $\text{S}^{2-}$  ที่อยู่บริเวณนั้นจะสร้างพันธะรวมตัวกับแคดเมียม ไอออนหรือซิงค์ไอออนกลายเป็น  $\text{CdS}$  หรือ ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18

เนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของทั้ง  $\text{CdS}$  มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการควบคุมการตกผลึก สามารถทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิสระ  $\text{Cd}^{2+}$  กล่าวคือต้องเลือกตัวแทนเชิงซ้อน (complexing agent) ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปล่อยไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  ในปริมาณความเข้มข้นน้อยมาก ซึ่งในที่นี้คือ  $\text{NH}_3$  ซึ่งจะรวมตัวกับ  $\text{Cd}^{2+}$  กลายเป็นไอออนเชิงซ้อน (complexing ions) ลดกระบวนการเกิดฟิล์มแบบโฮโมจีเนียส ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดและคุณภาพ นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{NH}_3$  ยังช่วยลดคอลลอยด์  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการในปฏิกิริยาอีกด้วย

## 2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [7-24]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

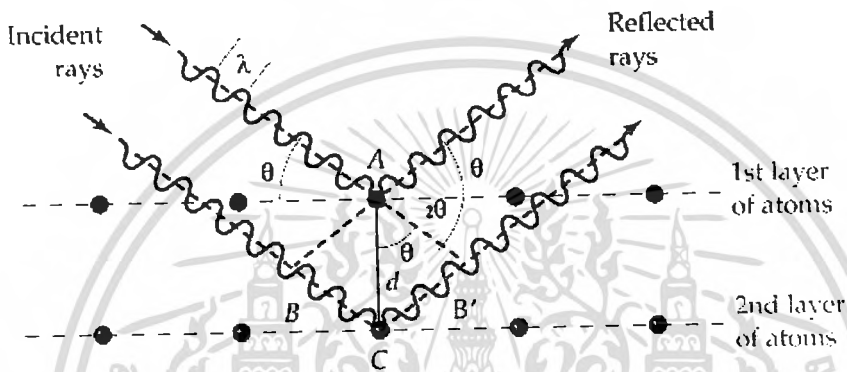
ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ  $10^{-10}$  เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงรูปร่างการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.16)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 $2\theta$  คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน  
 $n$  คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.19 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ( $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.16) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.17) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a$ ) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $hkl$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.18)$$

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.16) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.19) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a, c$ ) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $hkl$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.20)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (texture coefficient) ของระนาบ ( $hkl$ ) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $TC(hkl)$  คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก ( $hkl$ )

$I(hkl)$  คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ

$I_0(hkl)$  คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

$N$  คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

ขนาดของเกรน ( $D$ ) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.22)$$

ดังนั้น

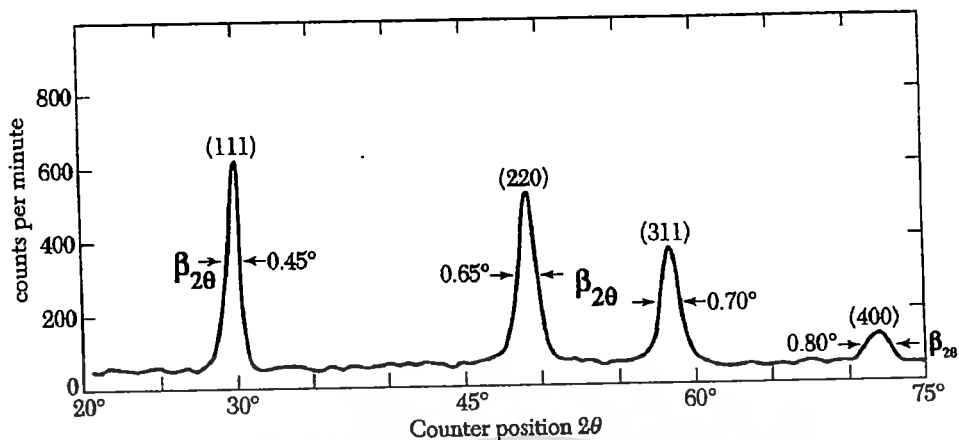
$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.23)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน

$\beta$  คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum : FWHM)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก

$\epsilon_s$  คือ ความเครียด

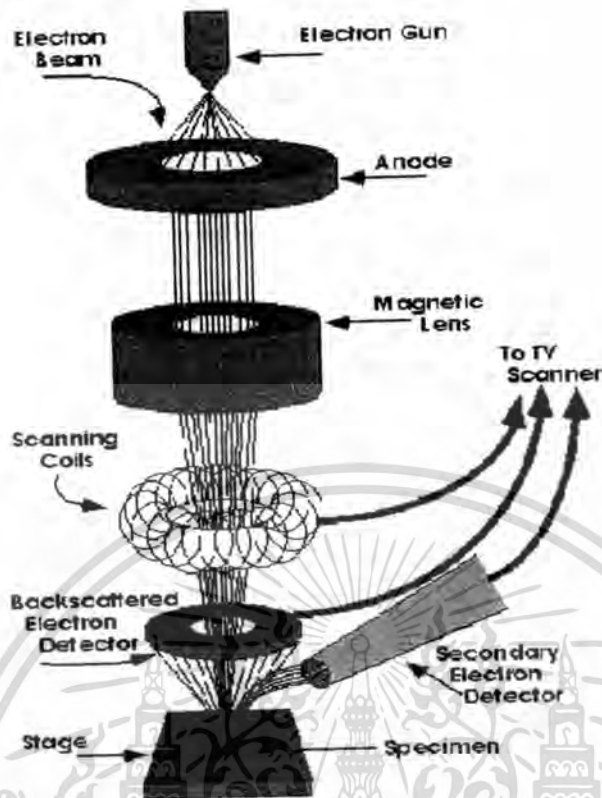


รูปที่ 2.20 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

## 2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

[7-24]

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



รูปที่ 2.21 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe diameter :  $d_p$ )
2. กระแสตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe current :  $i_p$ )
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence :  $\alpha_p$ )

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผกผันตรงกับ  $i_p$  แต่แปรผันแบบผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  เล็กขึ้น ค่าของ  $i_p$  จะเพิ่มขึ้น และเมื่อ  $\alpha_p$  เล็กขึ้น ค่าของ  $i_p$  จะเพิ่มขึ้น การศึกษานี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจิอิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (Cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิดโดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

#### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปในเรื่องของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจำนวนมากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่างโอกาสที่

เออร์รับเป็นเอกสารที่ส่งไปสำหรับขอรับทราบ  
ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลิแกนนี้น้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเกิดการหลุดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบีใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี  $E_0 > E_1$ )

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.24)$$

เมื่อ  $E_0$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา

$E_1$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล.วินาที

$\nu$  คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) จากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### ออเจิลีเก็ตรอน

ออเจิลีเก็ตรอนเกิดจากอิลีเก็ตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์ เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำยโอนพลังงานให้กับอิลีเก็ตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิลีเก็ตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิลีเก็ตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่จำอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิลีเก็ตรอนปฐมภูมิทำให้อิลีเก็ตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิลีเก็ตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิลีเก็ตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิลีเก็ตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิลีเก็ตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิลีเก็ตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิลีเก็ตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลแทนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิลีเก็ตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิลีเก็ตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิลีเก็ตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าลักษณะของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นบน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิลีเก็ตรอน}}$$

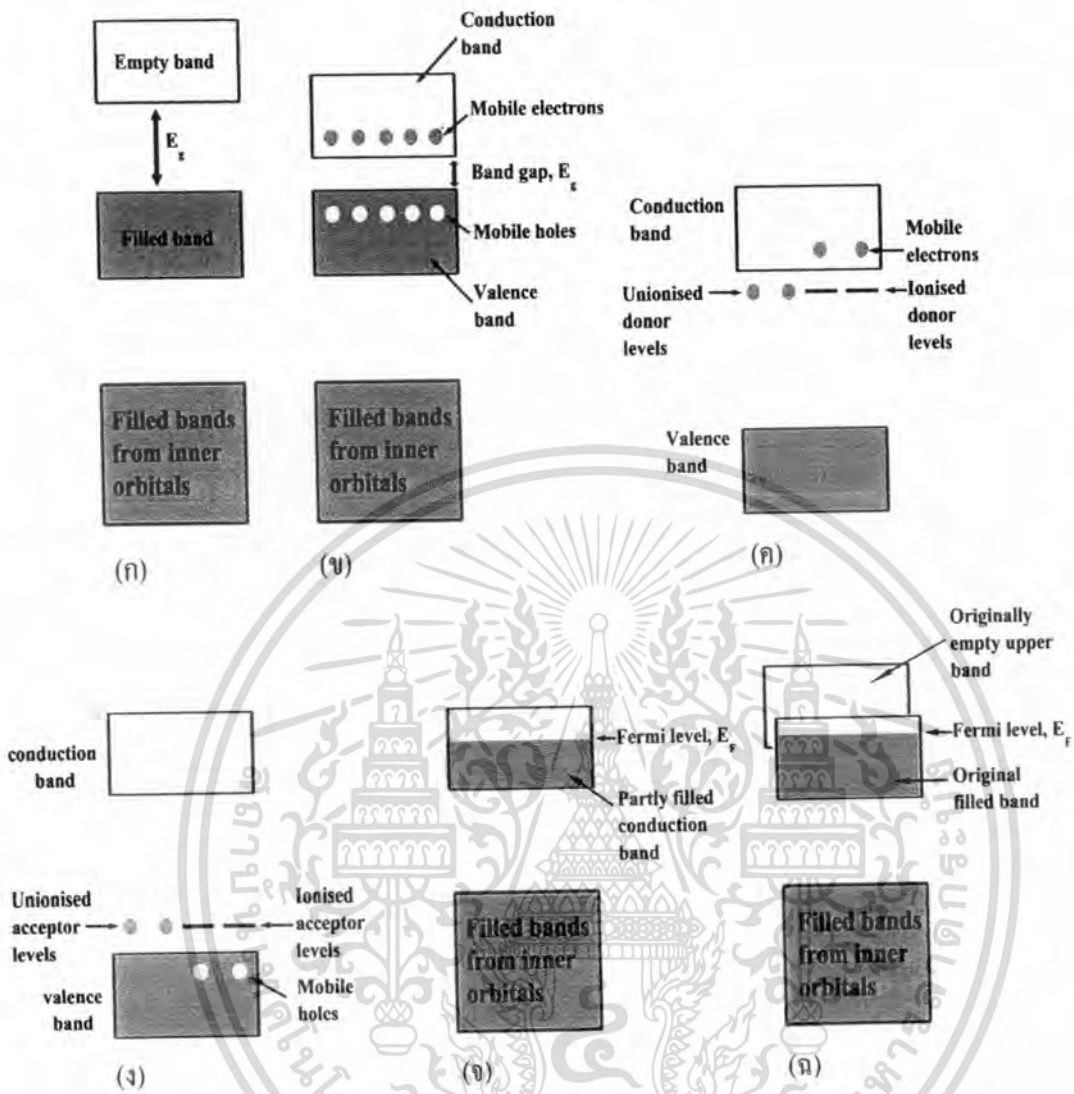
ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิลีเก็ตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

## 2.9 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [7-24]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน(energy band) และขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap :  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำการส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

### 2.9.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

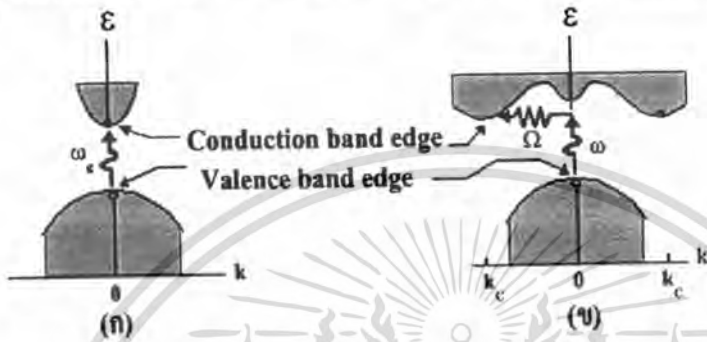
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่างลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.22(ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.22(ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่ามิ้อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.22(จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.22(ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่  $(n+1)$  ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่  $n$  และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.23(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.24(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือ

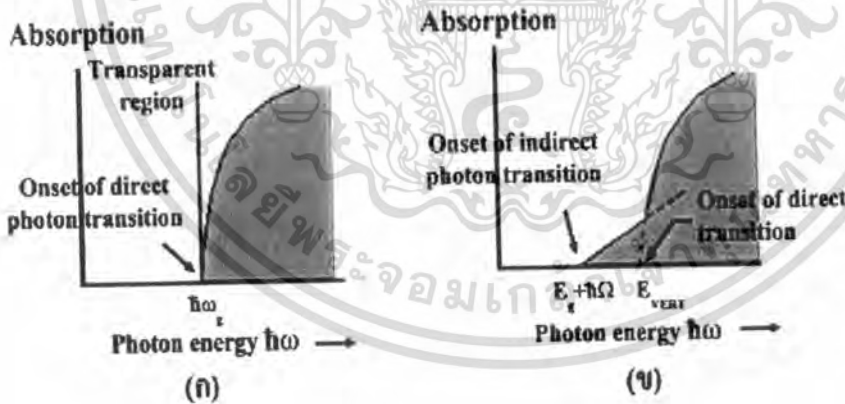
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g = \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{VERT}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.24(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดง ในรูปที่ 2.24(ข)



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)  
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

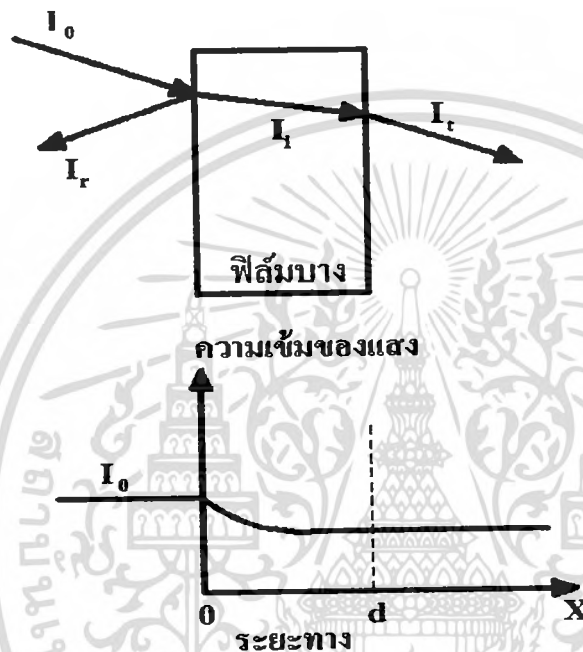


รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)  
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวិธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.25)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1-R)I_0 \quad (2.26)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.27)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.28)$$

### 2.9.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.29)$$

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.30)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.31)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนจริง

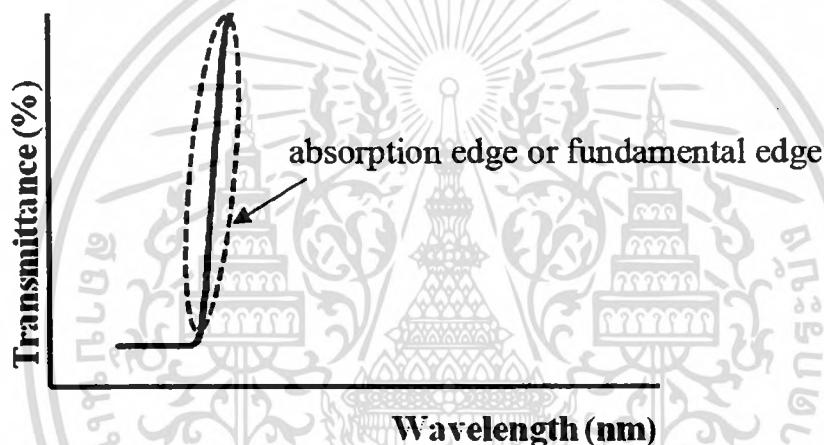
$K$  คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียบ (extinction coefficient)

โดยทั้ง  $n$  และ  $K$  เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.9.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.26 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของแสง และแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

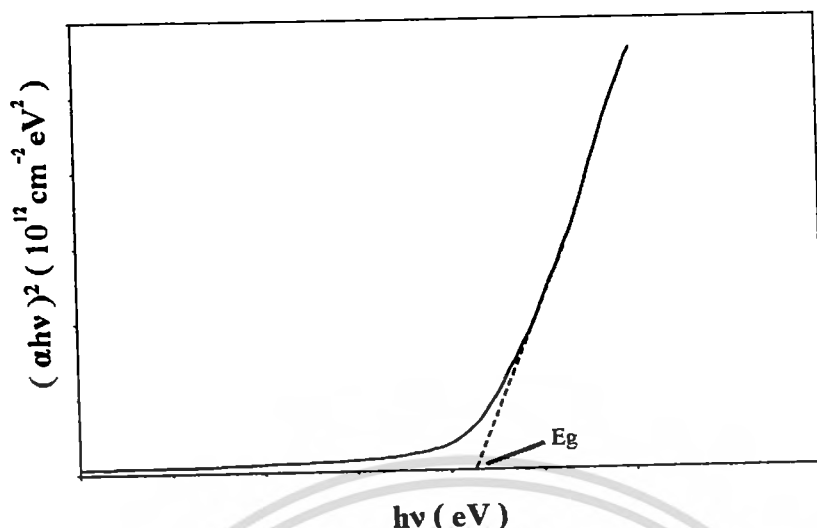
การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จากรูปที่ 2.25 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปการสะท้อน ( $R$ ) มีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.32)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์

การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.35)$$

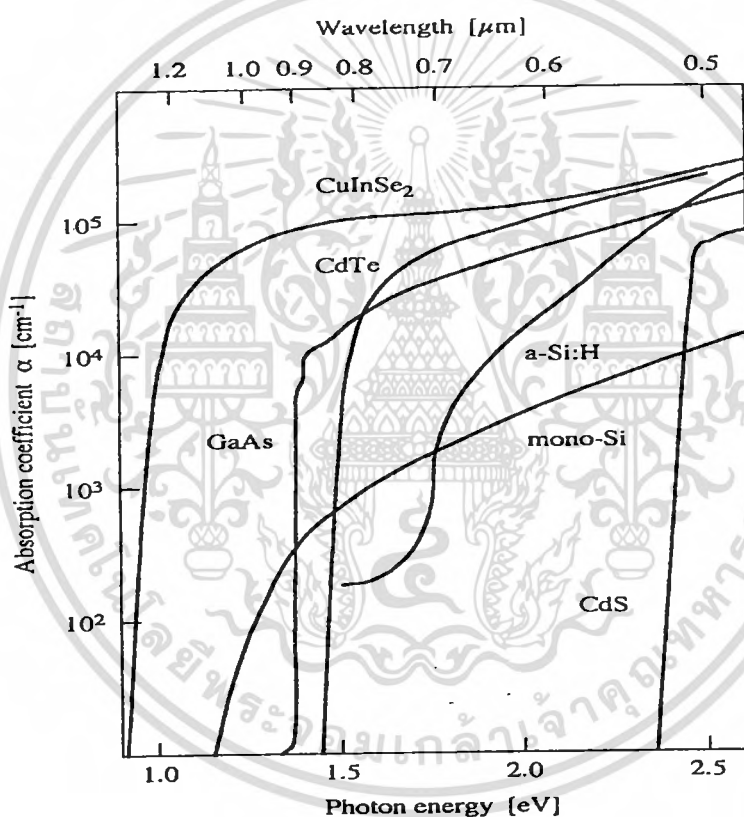
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

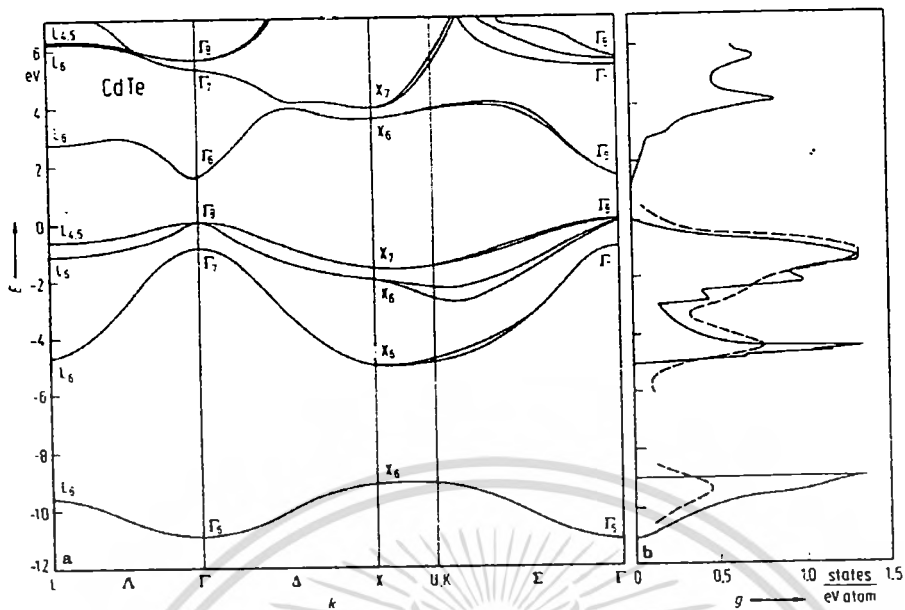
$h\nu$  คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงาน โฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

## 2.10 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ [7-28,34-36]

ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ผลึก CdTe ชนิดเอ็นมีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนประมาณ 800-900 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร·วินาที) ส่วน CdTe ชนิดพีมีสภาพคล่องของโฮลประมาณ 80 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร·วินาที) ความหนาแน่นของพาหะมีค่า  $10^{16}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร การแอนนัลสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีกรนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นในบรรยากาศของแคดเมียมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ส่วนสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีกรนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีซึ่งมีความต้านทานสูงเมื่อให้ความร้อนในบรรยากาศของเทลลูเรียมจะทำให้มีความต้านทานต่ำซึ่งแสดงถึงการเพิ่มสภาพต้านทาน การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากเทลลูเรียมจะสร้างระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างพลังงานที่ 0.1 ถึง 0.28 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์กลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe ขึ้นกับคุณสมบัติของผลึก ปี 1972 จากการศึกษานองบาโกซิวนท์ (Bagociunait) และคณะ แสดงให้เห็นถึงขอบของเกรนมีบทบาทมากกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe จากผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงฟิล์มบาง CdTe มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ  $10^{16} - 10^{17}$  ลูกบาศก์เซนติเมตรและสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 5-50 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร·วินาที)

## 2.11 สภาพนำไฟฟ้า [7-28,34-36]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field :  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p) E \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity :  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.38)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดขวาง  $A$  ซึ่งให้แรงดัน  $V$  และเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.39)$$

และ

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (2.40)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.37) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{\ell} \right) \quad (2.41)$$

หรือ

$$V = \left( \frac{\ell}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho \ell}{A} \right) I = IR \quad (2.42)$$

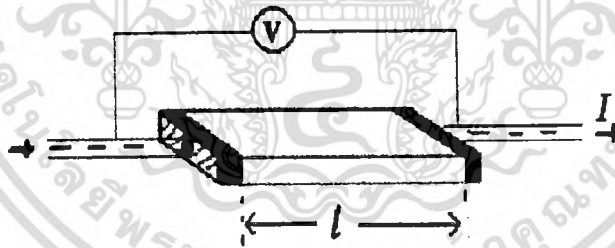
สมการที่(2.42) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

### 2.11.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

#### 2.11.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้าน ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมและมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ พื้นที่หน้าตัด  $A$  คือบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ  $\ell$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.43)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{\ell} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{\ell} \right) \quad (2.44)$$

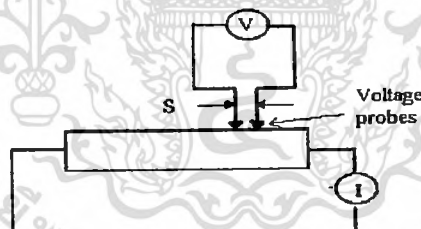
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

### 2.11.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว (two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.31 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง



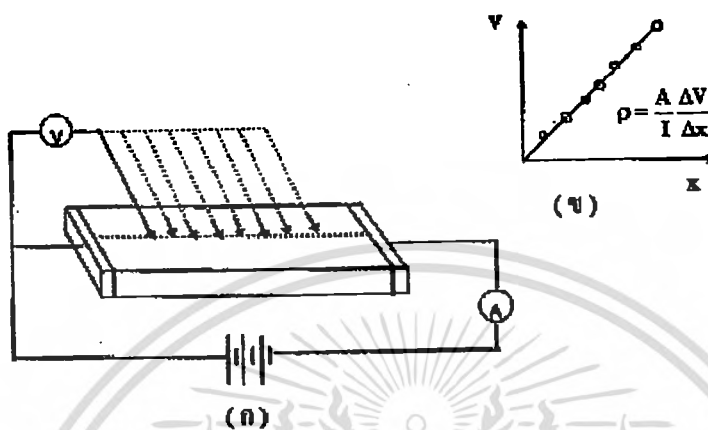
รูปที่ 2.31 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สักส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า

ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีที่ตรงที่  
 ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมา  
 เขียนกราฟดังรูปที่ 2.32 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

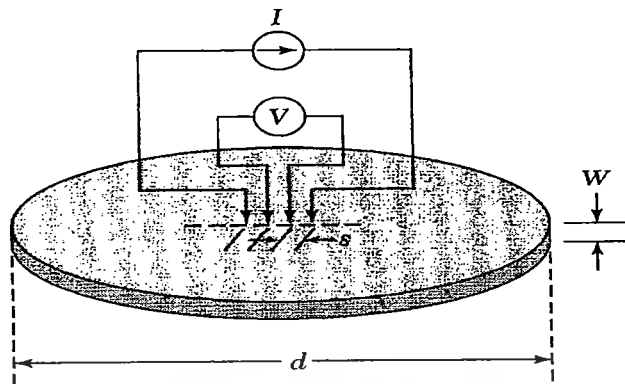


รูปที่ 2.32 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้ว  
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง  
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทาง  
 ที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพ  
 ผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.11.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probes)

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดง  
 ในรูปที่ 2.33 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จาก  
 กฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่  
 มักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น (sheet resistance :  $R_{sh}$ ) ซึ่ง  
 มีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ( $\Omega/\text{sq}$ )



รูปที่ 2.33 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.33 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใดๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \left[ \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right] \quad (2.45)$$

โดยที่  $S$  คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่  $S_1 = S_2 = S_3$  สมการที่ (2.45) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.46)$$

### 2.11.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [7-27]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของซีโด ในแบบจำลองนี้ ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดกำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกับดักประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกำแพงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-2} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.47) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Phi_0$  คือ ค่ากำแพงศักย์

A คือ ค่าคงที่

T คือ อุณหภูมิหน่วยเป็นเคลวิน

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์  $= 1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

ส่วนในช่วงอุณหภูมิที่นำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ มอตต์ (Mott) ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดแบบพิสัยที่ไม่คงที่ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (2.48)$$

เมื่อ  $T_0$  คือ อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน)

## 2.12 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction solar cell)[7,11-17]

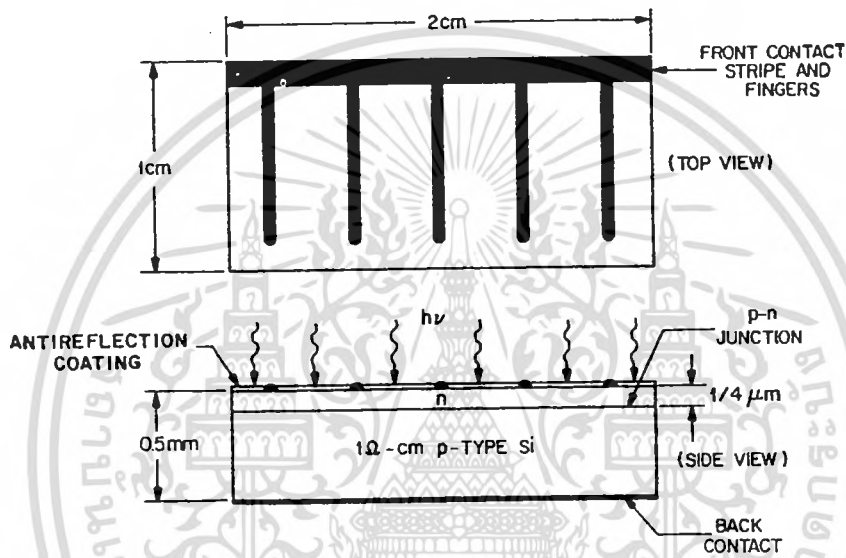
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน มีความสำคัญต่อเซลล์แสงอาทิตย์ทุกชนิดทั้งในดาวเทียม อวกาศหรือบนพื้นดิน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆ (flat-plate solar cell) ทำมาจากซิลิกอนมีช่วงอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพสูง และมีความน่าเชื่อถือได้ ตัวอย่างเช่น ไม่เกิดความเสื่อมคุณภาพได้ง่ายเมื่อมีการแผ่รังสีอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากภายนอก นอกจากประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือแล้วจึงต้องคำนึงถึงราคาด้วยเพื่อที่จะได้แข่งขันกับแหล่งพลังงานอื่นๆ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆจำเป็นต้องลดราคาการผลิตให้มากขึ้นเท่าที่จะเป็นไปได้ และในขณะเดียวกันต้องมีประสิทธิภาพอย่างน้อยที่สุด 10 เปอร์เซ็นต์ จึงมีการใช้เทคนิคเอ็ดจ์-ดีไฟน์ฟิล์ม-เฟด-โกรท (edge-defined film-fed growth : EFG), กระบวนการริบบอนทูริบบอน (ribbon to ribbon) และกระบวนการเดนไดรต์-เวบ (dendrite-web) การใช้ผลึกพหุพันธ์ของ ซิลิกอนบนเซรามิกส์หรือบนซิลิกอนเกรดสูงแร่ (metallurgical-grade silicon) เป็นการช่วยลดราคา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นฐานรองรับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิซิลิกอนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแผ่นบางๆ

### 2.12.1 การตอบสนองต่อแสง (spectral response)

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.34 ประกอบด้วย รอยต่อพี-เอ็นชนิดตั้งด้านบนสุดเป็นขั้วสัมผัสที่ผิวหน้า (front contact) แบบสไตรป์ (stripe) และฟิงเกอร์ (finger) มีชั้นด้านการสะท้อนแสงเคลือบอยู่ และด้านล่างสุดเป็นขั้วสัมผัสด้านหลัง (back contact)



รูปที่ 2.34 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน

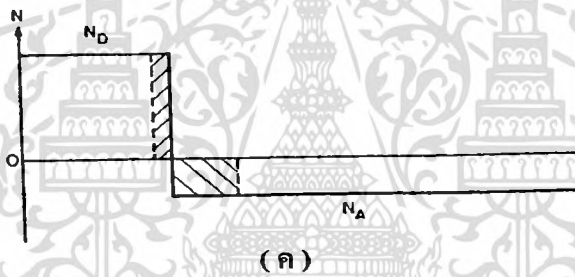
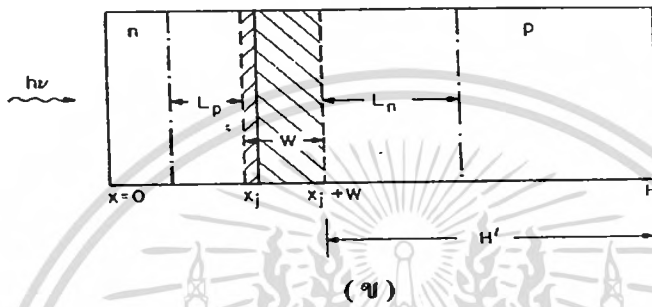
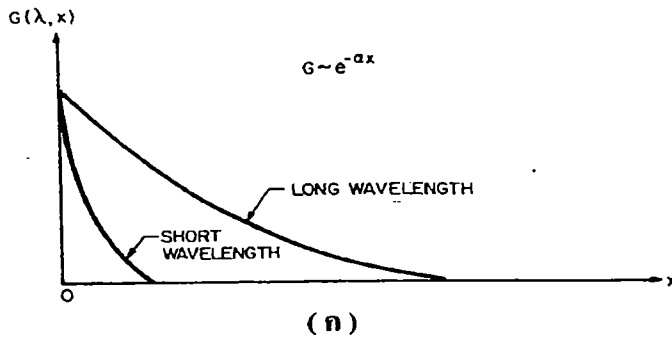
เมื่อแสงความยาวคลื่นเดียว ( $\lambda$ ) ตกกระทบบนขั้วสัมผัสด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เกิดกระแสวิกฤตและการตอบสนองต่อแสงเกิดขึ้น อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ระยะทาง  $x$  จากผิวด้านบน ดังรูปที่ 2.35 แสดงดังสมการที่ (2.49)

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (2.49)$$

เมื่อ  $\alpha(\lambda)$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$F(\lambda)$  คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีต่อหนึ่งหน่วยความกว้างแถบสเปกตรัมแสง

$R(\lambda)$  คือ สัดส่วนของจำนวนโฟตอนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า



- รูปที่ 2.35 ก. อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว  
 ข. มิติของเซลล์แสงอาทิตย์และความกว้างของการแพร่พาหะข้างน้อย  
 ค. ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่บริเวณผิวรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

ในกรณีที่ลึกระแสเข้าไปน้อย ในระบบ 1 มิติ ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน ดังสมการที่ (2.50) และ (2.51)

สำหรับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (2.50)$$

สำหรับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกระแส ดังสมการที่ (2.52) และ (2.53)

$$J_n = q\mu_n n_p \xi + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (2.52)$$

$$J_p = q\mu_p p_n \xi - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (2.53)$$

เมื่อ  $J_n$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนตรงบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะกับฐานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$J_p$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนตรงบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะกับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อมีการเจืออย่างคงที่ในแต่ละด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 2.35(ข) และ 2.35(ค) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกเขตปลอดพาหะ (depletion region) ในกรณีนี้ที่เซลล์แสงอาทิตย์มีรอยต่อแบบเอ็น-พี โดยมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่ด้านหน้ารับแสงและสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นฐานด้านล่าง จากสมการที่ (2.49), (2.50) และ (2.53) เขียนใหม่ ได้ดังสมการที่ (2.54)

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha F(1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} = 0 \quad (2.54)$$

สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ ดังสมการที่ (2.55)

$$p_n - p_{no} = A \cosh(x/L_p) + B \sinh(x/L_p) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (2.55)$$

เมื่อ  $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$  คือ ค่าความยาวแห่งการแพร่ มีเงื่อนไขของขอบเขต 2 ข้อ บริเวณพื้นผิว จะมีความเร็วของการรวมตัว ( $S_p$ ) ดังสมการที่ (2.56)

$$D_p \frac{d(p_n - p_{no})}{dx} = S_p (p_n - p_{no}) \quad \text{เมื่อ } x = 0 \quad (2.56)$$

บริเวณขอบของเขตปลอดพาหะ เมื่อความหนาแน่นของพาหะที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมากเนื่องจากสนามไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะ ดังสมการที่ (2.57)

$$p_n - p_{no} \cong 0 \quad \text{ที่ } x = x_j \quad (2.57)$$

และความหนาแน่นของโพล คือ

$$p_n - p_{no} = [\alpha F(1-R)\tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)]$$

$$\times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_i - x}{L_p}\right) + e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p} \right)}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (2.58)$$

ความหนาแน่นของกระแสจากแสงของโพลที่ขอบของเขตปลอดพาหะ คือ

$$J_p = -qD_p \left( \frac{dD_n}{dx} \right)_{x_j} = [qF(1-R)\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)]$$

$$\times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p} \right)}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} - \alpha L_p e^{-\alpha x_j} \right] \quad (2.59)$$

กระแสจากแสงได้จากบริเวณชั้นด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าบริเวณนี้มีช่วงชีวิต สภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการเจือมีค่าคงที่ การหากระแสจากแสงของอิเล็กตรอนมีการรวมตัวกันที่ฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ จากสมการที่ (2.49), (2.50), และ (2.53) จะได้ว่า

$$n_p - n_{po} \cong 0 \quad \text{ที่} \quad x = x_i + W \quad (2.60)$$

$$S_n(n_p - n_{po}) = -D_n dn_p / dx \quad \text{ที่} \quad x = H \quad (2.61)$$

เมื่อ  $W$  คือ ความกว้างของเขตปลอดพาหะ

$H$  คือ ความกว้างของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด

จากสมการที่ (2.60) ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยที่เพิ่มขึ้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่บริเวณขอบของเขตปลอดพาหะ ส่วนสมการที่ (2.61) แสดงว่าการรวมตัวของพาหะอิสระที่ผิวด้านหลังจะเกิดที่ขั้วโอห์มมิก ใช้เงื่อนไขขอบเขตนี้ จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฐานะที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีการเจือสม่ำเสมอ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_p - n_{p0} = \frac{\alpha F(1-R)\tau_n \exp[-\alpha(x_j + W)] \left[ \cosh\left(\frac{x - x_j - W}{L_n}\right) - e^{-[\alpha(x - x_j - W)]} \right]}{\alpha^2 L_n^2 - 1} - \frac{(S_n L_n / D_n) [\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{(S_n L_n / D_n) \sinh(H'/L_n)} \times \sinh\left(\frac{x - x_j - W}{L_n}\right) \quad (2.62)$$

และความหนาแน่นกระแสจากแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้จากขอบของเขตปลอดพาหะ

$x = x_j + W$  คือ

$$J_n = qD_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{x_j + W} = \frac{qF(1-R)\alpha L_n \exp[-\alpha(x_j + W)] \times \left\{ \alpha L_n - \frac{(S_n L_n / D_n) [\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{(S_n L_n / D_n) \sinh(H'/L_n) + \cosh(H'/L_n)} \right\}}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \quad (2.63)$$

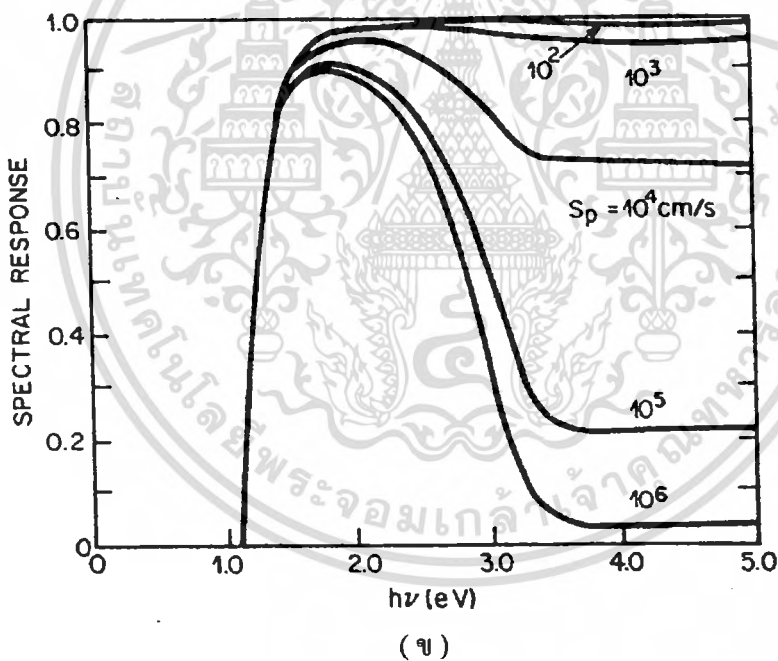
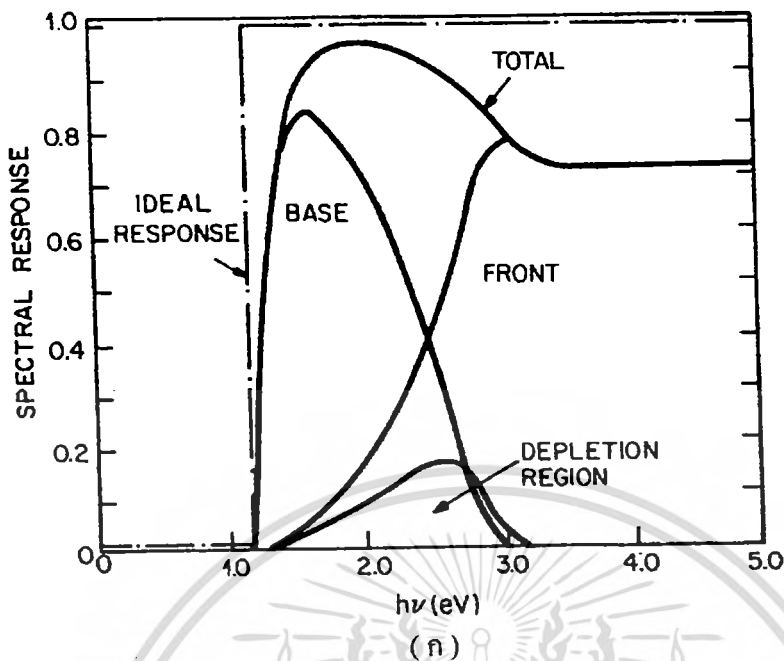
เมื่อ  $H'$  คือ บริเวณที่เป็นกลางในชั้นฐานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูป 2.35(ข) สมการที่ (2.63) มีสมมุติฐานว่ามีช่วงชีวิต สภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการเจือมีค่าคงที่ ถ้าสิ่งเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของระยะทาง จำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การเกิดกระแสจากแสงสามารถเกิดภายในเขตปลอดพาหะได้ ในขอบเขตนี้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่จะเร่งพาหะให้ออกไปจากเขตปลอดพาหะได้ก่อนที่จะเกิดการรวมตัวของพาหะ กระแสจากแสงต่อหนึ่งหน่วยความกว้างแถบสเปกตรัมแสงเท่ากับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

$$J_{dr} = qF(1-R)\exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (2.64)$$

กระแสรวมที่ความยาวคลื่นหนึ่ง เกิดจากผลรวมของสมการที่ (2.59), (2.62) และ (2.63)

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (2.65)$$



- รูปที่ 2.36 ก. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยแสดงการแจกแจง 3 บริเวณ (เส้นประแทนด้วยการตอบสนองในเชิงอุดมคติ)
- ข. ผลจากการคำนวณการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่เป็นรอยต่อชนิดเอ็น-พีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อแสง (spectral response :SR) เท่ากับผลรวมของการตอบสนองต่อแสงภายนอกเป็น  $qF$  หรือผลรวมของของการตอบสนองต่อแสงภายในเป็น  $qF(1-R)$  ดังสมการที่ (2.66)

$$SR(\lambda) = \frac{1}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} [J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda)] \quad (2.66)$$

การตอบสนองต่อแสงภายในเชิงอุดมคติสำหรับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  เป็นฟังก์ชันแบบขั้นบันไดมีค่าศูนย์เมื่อ  $h\nu < E_g$  และเป็นหนึ่งเมื่อ  $h\nu \geq E_g$  (เส้นประดังรูปที่ 2.36(ก)) สำหรับการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนมีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเคลือบบนพี แสดงดังรูปที่ 2.36(ก) โดยแบ่งบริเวณออกเป็น 3 ส่วน พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ

$N_D = 5 \times 10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร,  $N_A = 1.5 \times 10^{16}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร,  
 $\tau_p = 0.4$  ไมโครวินาที,  $\tau_n = 10$  ไมโครวินาที,  $x_j = 0.5$  ไมโครเมตร,  $H = 450$  ไมโครเมตร  
 $S_p(\text{front}) = 10^4$  เซนติเมตรต่อวินาที,  $S_n(\text{back}) = \infty$

เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ พหุส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณฐานเนื่องจากซิลิกอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ เมื่อพลังงานโฟตอนมากกว่า 2.5 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานโฟตอนสูงกว่า 3.5 อิเล็กตรอนโวลต์ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงมากกว่า  $10^6$  ต่อเซนติเมตร การตอบสนองต่อแสงจะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า แต่การรวมตัวของพาหะที่ผิวมีค่าสูงจึงส่งผลกระทบต่อ การตอบสนองต่อแสง เนื่องจากจะไปลดจำนวนพาหะบริเวณผิวหน้าซึ่งเกิดจากโฟตอนที่ มีพลังงานสูง การตอบสนองต่อแสง เมื่อ  $\alpha L_p \gg 1$  และ  $\alpha x_j \gg 1$  จากสมการที่ (2.59) กระแสจากแสงผิวด้านหน้าเท่ากับ

$$SR = \frac{1 + S_p / \alpha D_p}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} \quad (2.67)$$

อัตราการรวมตัวบริเวณผิวหน้า ( $S_p$ ) มีผลกระทบต่อ การตอบสนองต่อแสงที่พลังงานโฟตอนมีค่าสูง แสดงดังรูปที่ 2.36(ข) เมื่อ  $S_p$  แปรค่าจาก  $10^2$  เป็น  $10^6$  เซนติเมตรต่อวินาที จากสมการที่ (2.67) แสดงว่าสำหรับค่า  $S_p$  หนึ่งๆ ถ้าต้องการให้การตอบสนองต่อแสงดีขึ้นจะต้องเพิ่มความยาวแพร่ ( $L_p$ ) โดยทั่วไปการตอบสนองต่อแสงที่ดีนั้นตลอดช่วงความยาวคลื่น จะต้องเพิ่มทั้ง  $L_n$  และ  $L_p$  แต่ลดค่า  $S_n$  และ  $S_p$

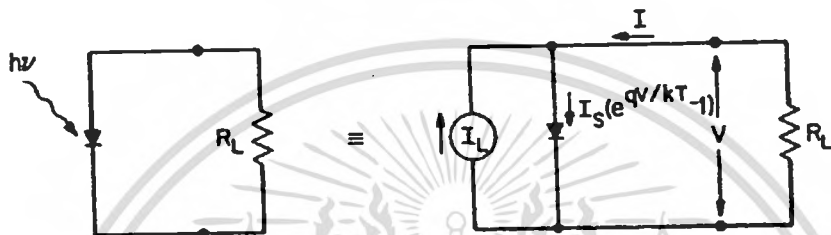
เมื่อทราบค่าการตอบสนองต่อแสงแล้ว สามารถหาค่าความหนาแน่นของกระแสจากแสงจากการแจกแจงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $F(\lambda)$ ) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

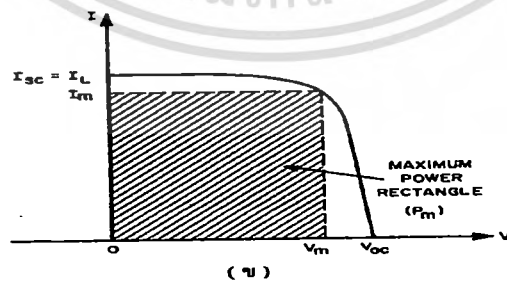
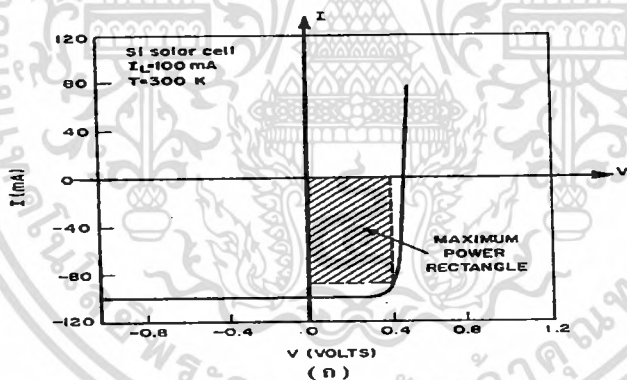
$$J_L = q \int_0^{\lambda_m} F(\lambda)[1 - R(\lambda)]SR(\lambda)d\lambda \quad (2.68)$$

เมื่อ  $\lambda_m$  คือ ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานนั้นๆ  
 ถ้าต้องการให้  $J_L$  มากๆ จะต้องลดค่า  $R(\lambda)$  และเพิ่มค่า  $SR(\lambda)$  ตลอดช่วงความยาวคลื่น  
 $0 < \lambda < \lambda_m$  ความหนาแน่นของกระแสจากแสงในอุดมคตินั้น จะต้องมามีค่า  $R(\lambda)=0$  และ  $SR=1$

2.12.2 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.37 แสดงวงจรสมมูลในอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์



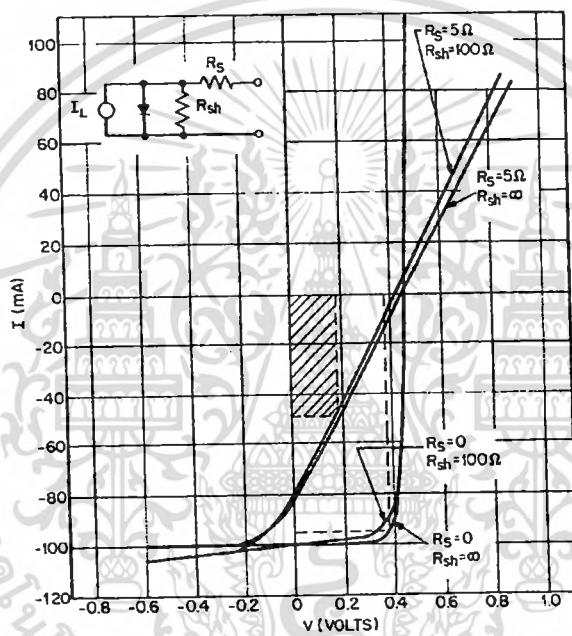
รูปที่ 2.38 ก. ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่มีการฉายแสง  
 ข. ภาพกลับหัวของรูป 2.38 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัตินั้นจะพิจารณาวงจรสมมูลในอุดมคติดังรูปที่ 2.37 ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมจากการสูญเสียของโอห์มมิก และความต้านทานชั้นที่จากกระแสรั่วไหล วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.38 . ถ้ากระแสไดโอดเป็นดังสมการที่ (2.69) ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ (2.70)

$$I = I_s \left( e^{qV/kT} - 1 \right) - I_L \quad (2.69)$$

$$\ln \left( \frac{I + I_L}{I_s} - \frac{V - IR_s}{I_s R_{sh}} + 1 \right) = \frac{q}{kT} (V - IR_s) \quad (2.70)$$



รูปที่ 2.39 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นที่

จากสมการที่ (2.70) ถ้ากำหนดให้  $R_s = 0,5$  โอห์ม และ  $R_{sh} = 0, \infty$  โอห์ม สามารถเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ 2.39 ซึ่งพารามิเตอร์  $I_s$ ,  $I_L$  และ  $T$  ยังเหมือนกับรูปที่ 2.38 จะพบว่าความต้านทานชั้นที่ที่มีค่าต่ำกว่า 100 โอห์มนั้นจะไม่ทำให้กำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเปลี่ยนแปลง ส่วนความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 5 โอห์มจะทำให้กำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความต้านทานอนุกรมเท่ากับศูนย์ ( $R_s=0$ ) ดังนั้น เราสามารถที่จะละพารามิเตอร์  $R_{sh}$  ได้แล้ว กระแสขาออกและกำลังเอาต์พุตได้จาก

$$I = I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - I_L \quad (2.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = |V| = I \left[ \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I + I_L}{I_s} + 1 \right) + IR_s \right] \quad (2.72)$$

จากความสัมพันธ์กำลังเอาต์พุตสูงสุดที่ได้ คือ 1, 0.77, 0.57, 0.27 หรือ 0.14 สำหรับ  $R_s$  เท่ากับ 0, 1, 2, 5 หรือ 10 โอห์ม ตามลำดับ ค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความลึกของรอยต่อ ความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น และการทำขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก จากรูปที่ 2.38 และ 2.39 สามารถคำนวณหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor : FF) ได้จาก

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_L V_{OC}} \quad (2.73)$$

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_L V_{OC}}{P_{in}} \quad (2.74)$$

ในเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดกระแสการรวมตัวของพาหะขึ้นในบริเวณพร่องพาหะ เป็น

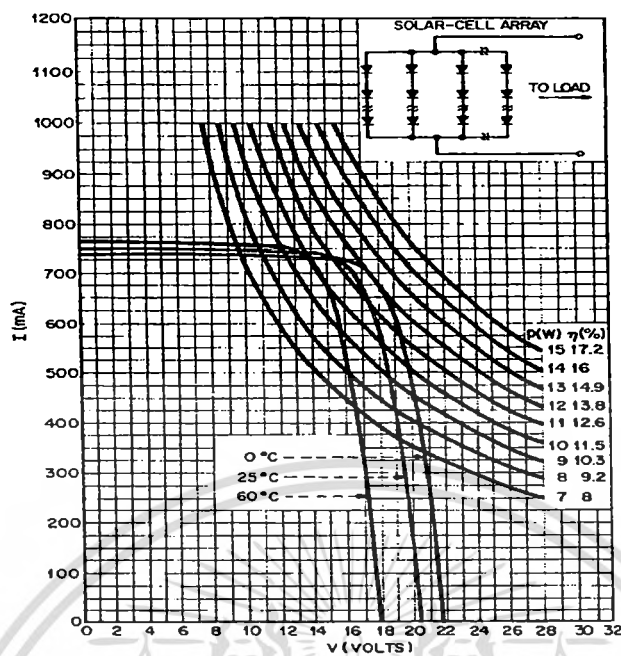
$$I_{rec} = I_s' \left[ \exp \left( \frac{qV}{2kT} \right) - 1 \right] \quad (2.75)$$

โดย

$$\frac{I_s'}{A} = \frac{qn_i W}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} \quad (2.76)$$

ประสิทธิภาพสำหรับในกรณีที่กระแสการรวมตัวของพาหะมีค่าน้อยกว่ากรณีกระแสในอุดมคติ เนื่องจาก  $V_{oc}$  และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน กระแสการรวมตัวของพาหะจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงถึง 25 เปอร์เซ็นต์

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีทั้งกระแสแพร่และกระแที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะ หรือเซลล์แสงอาทิตย์มีข้อบกพร่องประจุมาก กระแสไฟฟ้าภายใต้ไบแอสตรงอาจจะแสดงในรูปของเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ขึ้นกับแรงดันคือ  $\exp(qV/mkT)$  เมื่อ  $n$  คือแฟกเตอร์ในอุดมคติ โดยปกติประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อค่าแฟกเตอร์อุดมคติเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.40 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนที่มีพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตรจะมีค่าแรงดันวงจรเปิด ( $V_{\infty}$ ) เท่ากับ 0.5 ถึง 0.6 โวลต์และมีกระแสลัดวงจรเท่ากับ 30 ถึง 60 มิลลิแอมป์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์สามารถต่อกันได้ทั้งแบบอนุกรมและขนาน ตัวอย่างการต่อเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 7 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะให้กำลังประมาณ 10 วัตต์ มีประสิทธิภาพ 11.5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไข AM1 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งกราฟของกำลังจะแสดงโดยเส้นสัมพันธ์กับกราฟกระแส-แรงดันไฟฟ้า ที่จุดที่มีกำลังสูงสุดจะสอดคล้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ ) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_m$ ) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการต่อดังรูปที่ 2.40 นี้จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 720 มิลลิแอมป์ และในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่ากำลังอาทิตย์เท่ากับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีค่าลดลง

### 2.13 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อพี-ไอ-เอ็น [7-28,34-36]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.41 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสที่ขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่อพี-ไอ-เอ็นจะแสดงได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.77)$$

เมื่อ  $J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.78)$

โดยที่  $V$  คือ แรงดันไบอัสตรง

$n$  คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

$J_0$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์

$J_{00}$  คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

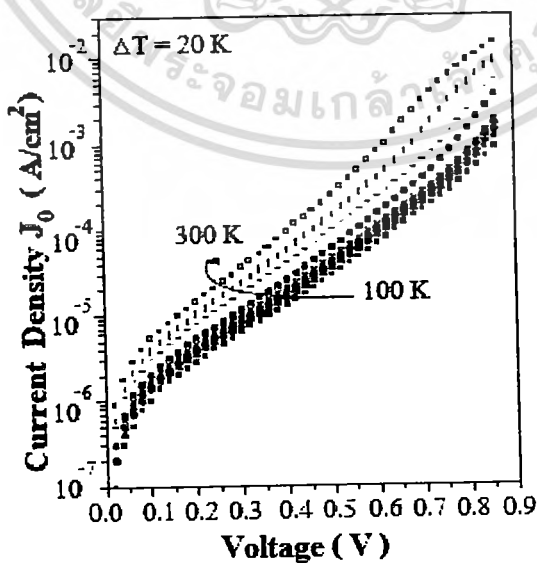
ซึ่ง  $J_{00}$  จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน ( $V_b$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_V \left[ \frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[ \frac{-qV_n}{kT} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.79)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.80)$$

เมื่อ  $S_p$  คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล,  $N_V$  ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $\phi_b^p$ ) คือค่าแฟกซ์กัขขวางกัน โฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.41 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  ที่แปรตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $J_0$  นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่ออวิวิพพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์) คือแฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกัปดักประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และชนิดพี และ  $\ln J_0$  จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ( $\ln J_0 \propto T^{-1}$ )

### 2.13.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอกลีย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ใช้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกัปดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

จากแบบจำลองของ ชอกลีย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอด ( $m$ ) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง  $J_0$  จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น  $E_g/2$  สำหรับกรณีที่กัปดักประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับ โฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น  $p-n^+$ ) ปริมาณ  $N_d > N_a$  กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุณหพลศาสตร์ของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ  $\epsilon_p N_a / \epsilon_n N_d$  ซึ่ง  $N_D$  และ  $N_A$  คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า  $\epsilon_n$  และ  $\epsilon_p$  คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และชนิดพีตามลำดับ

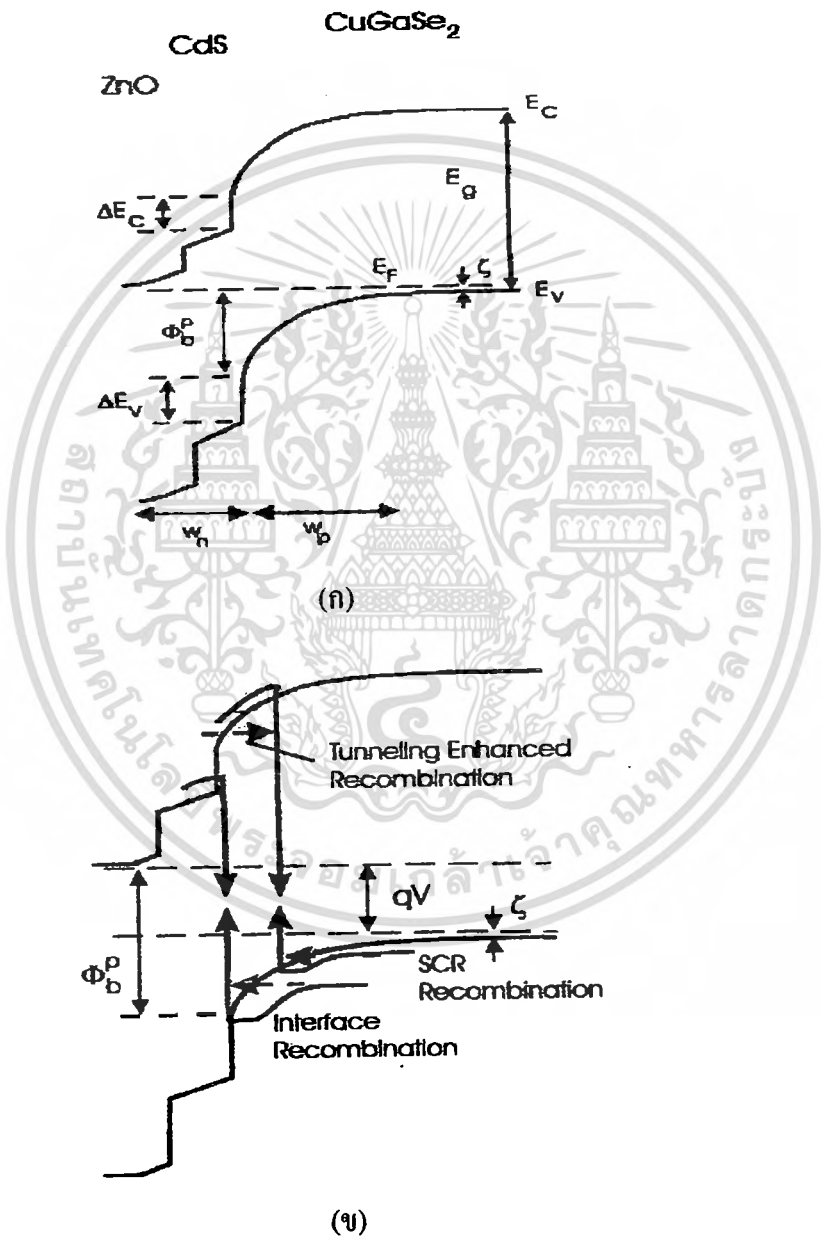
### 2.13.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.81)$$

โดยที่  $A$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ซึ่งค่าของ  $A$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น  $\ln J_0$  จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง  $\ln J_0$  ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิต่ำ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อขอตติ์ การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้  $J_0$  จะขึ้นกับอุณหภูมิต่ำเล็กน้อย



รูปที่ 2.42 แสดงกลไกผลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.82) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln (J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln (J_{\infty}) \quad (2.82)$$

พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J_0$  กับ  $1/T$  พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดกลไกการนำกระแสเกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดุกกึ่งแสง พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของตัวดุกกึ่งแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดุกกึ่งแสงขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{\infty}}{kT} \coth \left( \frac{E_{\infty}}{kT} \right) \quad (2.83)$$

โดย  $E_{\infty}$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy)

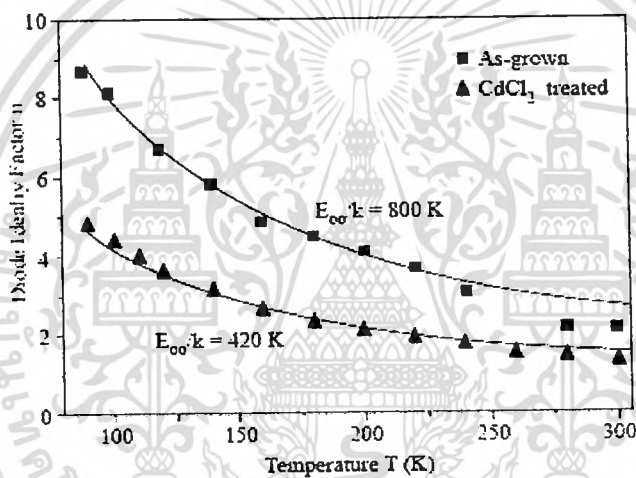
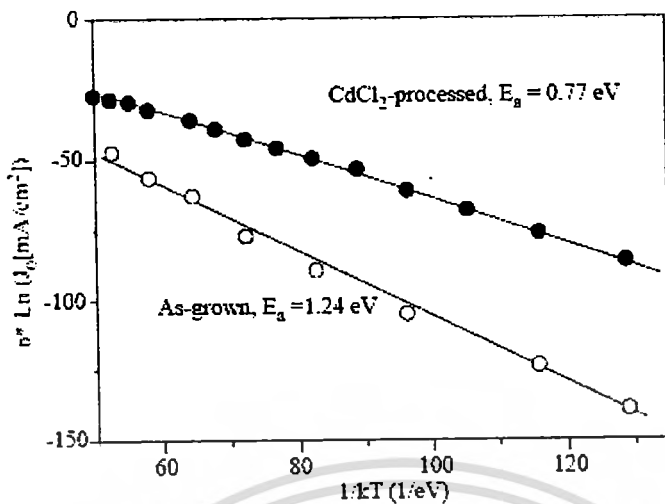
ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม  $E_{\infty}$  คือ

$$E_{\infty} = \left( \frac{q\hbar}{2} \right) \left[ \frac{N_A}{m^* \epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.84)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ  $\epsilon_s$  คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกึ่งแสง แฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2} \right) \quad (2.85)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่ง  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.43 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  $J_0$  และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย CdCl<sub>2</sub>

### 2.14 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [7-28,34-36]

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \tag{2.86}$$

เมื่อนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  $n^* = N_C \exp[-(E_C^* - E_T)/kT]$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 
$$p^* = N_V \exp[-(E_T - E_V)/kT]$$

ซึ่ง  $N_C$  และ  $N_V$  คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกัปดักประจุ,  $n$  และ  $p$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ,  $\eta$  คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือโฮล (electron/hole cross section:  $\gamma_{n/p}$ ) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \quad (2.87)$$

หรือ 
$$\gamma_{n/p} = \frac{\tau_{n/p}}{1 + \Gamma}$$

เมื่อ  $S_{np}$  คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือโฮล,  $\tau_{n/p}$  คือ ค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ส่วน  $\Gamma$  คือ แฟกเตอร์แก้ไข (correction factor) ของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.88)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลา ดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W - x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.89)$$

เมื่อ  $F(x)$  คือ สนามไฟฟ้าท้องถิ่น (local electrical field) ที่ตำแหน่งกัปดักประจุ

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดักกลืนแสง จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวของกัปดักประจุ และ  $\eta = E_v - \frac{E_T}{\eta}$  หรือ

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกัปดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.85) ร่วมกับสมการ (2.90) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดูดกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{\infty} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.91)$$

ซึ่ง  $J_{\infty}$  จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{\infty}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*}\right) \quad (2.92)$$

จากสมการที่ (2.92) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดูดกลืนแสงที่มีกัปดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ  $T^* \rightarrow \infty$  กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกัปดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี  $E_{\infty} \rightarrow 0$  จะได้ว่า  $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$  ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของชอกส์เลย์-ริค-ฮอลล์ โดยผ่านกัปดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{\infty}$ ) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{\infty} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{\infty}}{J_{sc}}\right) \quad (2.93)$$

เมื่อ  $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง  $n$ ,  $J_{sc}$  และ  $J_{\infty}$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{\infty}$  และ  $T$  ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ  $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{\infty}}{J_{sc}}\right)$  และ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดแกน  $V_{\infty}$  (เมื่อ  $T = 0$  เคลวิน) คือค่า  $E_g / q$  ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อ โดยไม่มีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องกับและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า  $E_g = \phi_p^c$  ซึ่ง  $\phi_p^c$  ก็คือ  $\phi_p^c$  นั่นเองเมื่อ  $\phi_p^c$  คือกำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดูดกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง  $V_{\infty}$  กับ  $T$  ซึ่ง  $V_{\infty}$  นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ซอกคัลเลย์-รีด-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องกับ แฟกเตอร์อุณหคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{\infty}$  กับ  $T$  ในสมการ (2.93) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.82) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ )

## 2.15 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน [7-27,37-38]

### 2.15.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

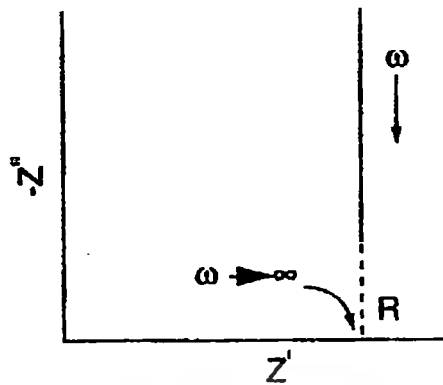
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัทธิจะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.94)$$

อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น  $Z_C = 1/j\omega C = -j/\omega C$  และ  $Z_R = R_s$  แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_s - \frac{j}{\omega C} \quad (2.95)$$

โดยที่  $R_s$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน  $1/\omega C$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่อำนาจ  $R_s$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แสดงกราฟของในควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.15.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

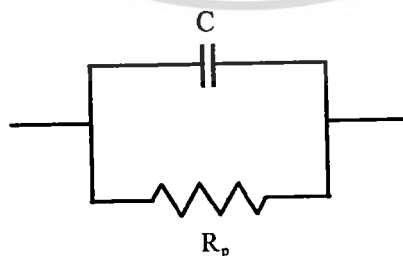
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.45 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.96)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.45 ดังนั้นสมการ (2.96) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.97)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.98)$$



รูปที่ 2.45 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $1 - j\omega R_p C$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ (2.98) จะได้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p(j\omega R_p C - 1)}$$

$$= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \right]$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.99)$$

$$Z_{RC} = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right)$$

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.100)$$

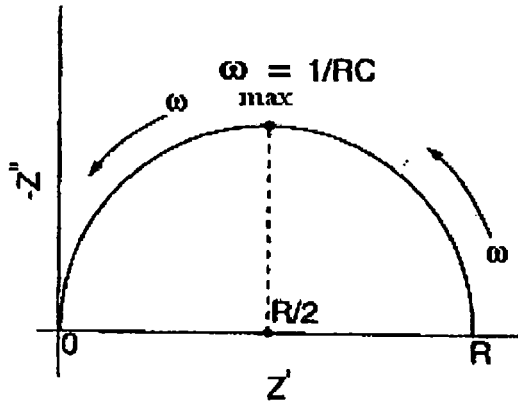
และ

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.101)$$

เมื่อ  $\tau = R_p C =$  ค่าคงตัวเวลา (time constant)

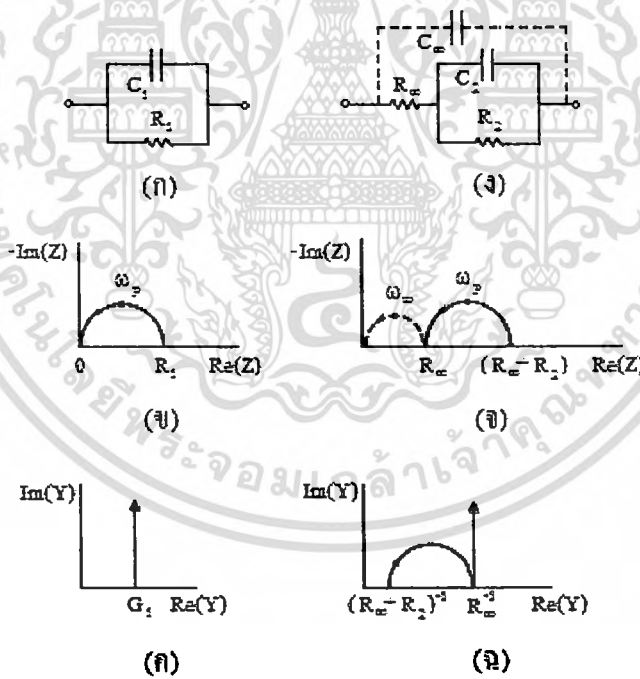
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่า กราฟของไบนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.46 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,ฉ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,จ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.47 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance:  $R_b$ ) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเวลา  $\tau = R_\infty C_\infty = R_1 C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุด คือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.47(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{\max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{\max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{\max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีนี้ที่  $R_1 = R_\infty$  และ  $C_1 = C_\infty$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.47(ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูปที่ 2.47(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลา คือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไขว้ไปตามรูปที่ 2.47(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z^* = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z^*)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรรูปที่ 2.47(ก) ค่าแอดมิตแดนซ์ลัทพ์คือผลรวมของแอดมิตแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $j\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.102)$$

กราฟของสมการที่ (2.102) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.47(ค) ส่วนแอดมิตแดนซ์ของวงจรรูปที่ 2.47(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกราฟของสมการ (2.103) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.47(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.47(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีต่างๆ ไปทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับ  $C$  และ  $R$  ซึ่งทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า  $Z'$  กับ  $Z''$  มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.104)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.105)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.47 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.15.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.48 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

และ

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.106)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.107)$$

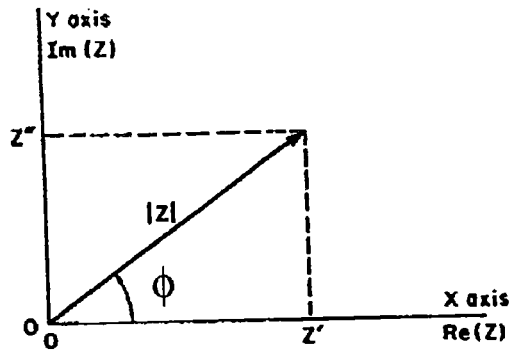
จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

ดังนั้น

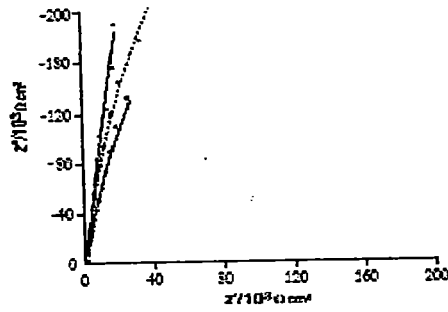
$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.108)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

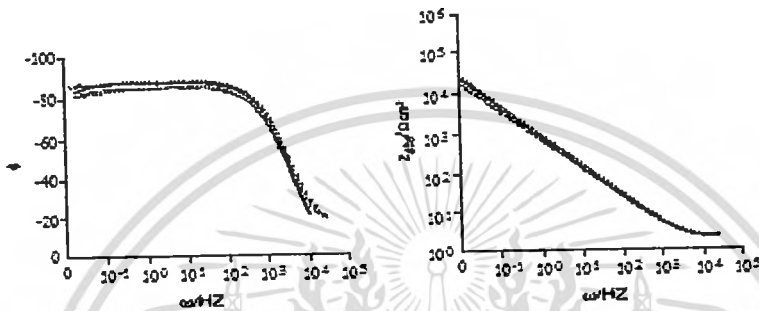


รูปที่ 2.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว มุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบคจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบคคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส  $\phi = -90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะมีเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบคสำหรับอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.48 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.49 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของโบด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ  $P$  และ  $n$  เมื่อ  $P$  คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน  $n$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 \leq n \leq 1$  แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ  $Z(\text{CPE})$  จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (2.109)$$

ส่วนความจุสองชั้น (double-layer capacitance:  $C_{dl}$ ) เนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรดจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = \sqrt[n]{\frac{P}{R_s(n-1)}} \quad (2.110)$$

พารามิเตอร์  $P$  จะสัมพันธ์กับมุมเฟส  $\phi$  ดังนี้คือ  $\phi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$  ถ้ามุมเฟส  $\phi$  เข้าใกล้  $1$  ก็จะประพุดิตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.15.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [7-27,37-38]

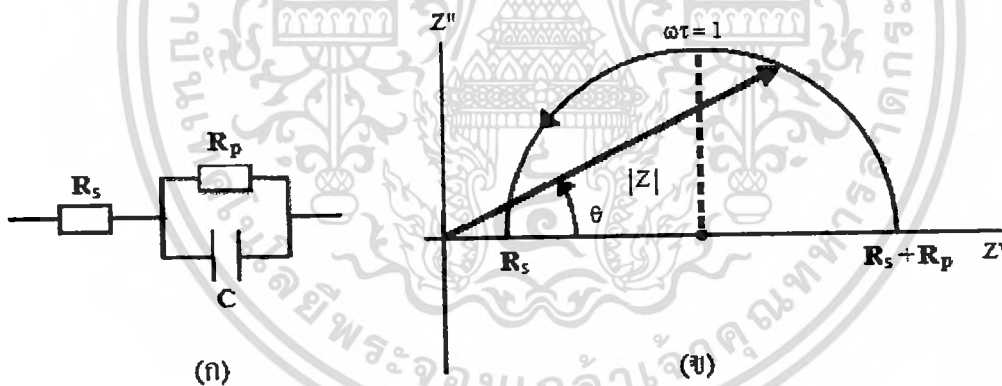
พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอยต่อความต้านทานชั้นที่ และความต้านทานอนุกรมสามารถหาค่าหรือคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ขณะที่การวัดจะต้องป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกค่ากระแสสลับ จากนั้นอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Z = \frac{V \sin \omega t}{I \sin (\omega t + \phi)} = Z' - jZ''$$

$$= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.111)$$

เมื่อ  $Z' = \frac{1}{G}$  และ  $Z'' = \frac{1}{\omega C}$

$G$  คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง  $G = \frac{1}{R}$  และ  $\phi$  คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไปอีตักกระแสสลับ วงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงดังรูปที่ 2.50 โดยที่  $R_p$  คือความต้านทานชั้นที่ หรือความต้านทานขนาน (parallel resistor),  $C$  คือ ความจุของรอยต่อ และ  $R_s$  คือ ความต้านอนุกรมของวงจร



รูปที่ 2.50 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมจะอยู่บนแกน  $Z'$  โดยมีรัศมีเท่ากับ  $\frac{R_p}{2}$  จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่  $R_s$  และ  $R_s + R_p$  ส่วน  $Z''$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

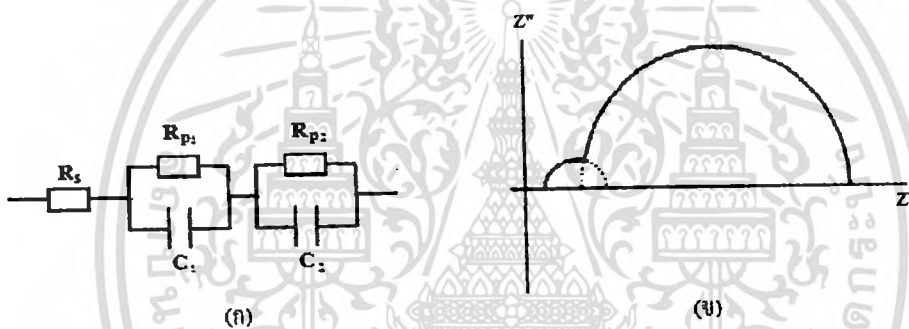
$$Z'' = R_p = \frac{1}{\omega_{\max} C} \quad (2.112)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุ C สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.112) จากวงจรสมมูลจะมีส่วนของ RC ที่ต่อขนานกัน 1 ชุด ส่งผลให้ได้รูปครึ่งวงกลมซึ่งจะมีค่าคงตัวเวลา 1 ค่า ดังสมการ

$$\omega_{\max} = \tau^{-1} = (R_p C)^{-1} \quad (2.113)$$

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.51(ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงในรูปที่ 2.51(ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



รูปที่ 2.51 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข)

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษา ซึ่งป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรนเป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกลดให้อยู่ต่ำกว่าแกน  $Z'$  (ดังรูปที่ 2.52(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย  $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$  ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงได้แล้วในสมการ(2.73) ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(j\omega)^n}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

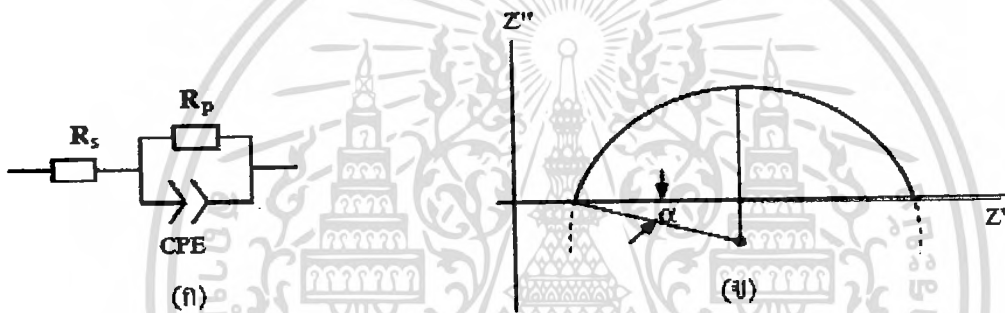
อิมพีแดนซ์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R, C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า  $n$  และ  $P$  ดังนั้นคือ

$$T = C^n (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-n} \quad (2.114)$$

ถ้า  $n = 1$  แล้ว  $Z(\text{CPE})$  จะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติ แต่ถ้า  $n = 0$  แล้ว  $Z(\text{CPE})$  จะเท่ากับ  $R_s^{-1} + R_p^{-1}$  ซึ่งถ้า  $n$  มีค่าแตกต่างไปจาก 1 มากๆ แสดงว่าตัวเก็บประจุมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาก ส่วนมุมกด (depression angle:  $\alpha$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(1-n)$$

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.52 แสดงแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ก) และกราฟในควิสต์ของแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว (ข)

### 2.15.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี [7-27, 37-38]

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่  $\omega$  ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.115)$$

เมื่อ  $G(\omega)$  คือความนำไฟฟ้า และ  $C(\omega)$  คือความจุไฟฟ้า ทั้งค่าจำนวนจริง  $G(\omega)$  และจำนวนจินตภาพ  $\omega C(\omega)$  จะเกี่ยวข้องกันตามความสัมพันธ์ของ เครมเมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig relation)

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีแต่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับพื้น ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริกคังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.116)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือสภาพนำไฟฟ้าและ  $\epsilon$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แต่ถ้าความถี่สูงกว่าค่า  $\frac{1}{\tau_D}$  แล้วพาหะข้างมากจะไม่ตอบสนองต่อความถี่และถ้าความถี่ยิ่งสูงขึ้นไปอีก สารกึ่งตัวนำนี้จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า และ  $C$  จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าขึ้นกับรูปทรงของสารตัวอย่างซึ่งเรียกว่า ความจุเรขาคณิต ความถี่การผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation frequency) ของความจุเรขาคณิตนี้ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ถ้า  $\sigma$  เปลี่ยนตามอุณหภูมิอย่างไรก็ตามในสารตัวอย่างที่เป็นสารพหุพันธ์ (polycrystalline materials) พลังงานการกระตุ้น (activation energy) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายพาหะอิสระซึ่งถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ที่อยู่ภายในเกรนหรือที่บริเวณรอยต่อเกรน (grain-boundaries)

รอยต่อขอต็คก็ก็เป็นรอยต่อที่ง่ายสุด ความจุของรอยต่อนี้เกิดขึ้นที่ย่านปลอดพาหะส่วนรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จะประมาณว่าเป็นรอยต่อ n<sup>+</sup>-p โดยความจุของรอยต่อนี้จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left( \frac{\epsilon_s q N_A}{2 V_{bi}} \right)^{-2} \quad (2.117)$$

เมื่อ  $W$  คือความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะ,  $N_A$  คือความหนาแน่นของผู้รับ,  $\epsilon_s$  คือคงที่ไดอิเล็กทริก และ  $V_{bi}$  คือแรงดันในตัว (built-in voltage) กับดักประจุที่อยู่ในย่านปลอดพาหะก็มีผลต่อความจุของรอยต๋อด้วยกล่าวคือกับดักประจุที่มีพลังงานเท่ากับระดับพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอน ( $E_F^n$ ) หรือของโฮล ( $E_F^p$ ) กับดักประจุนั้นจะมีการให้ประจุและมีการคายประจุ (charging and discharging) สำหรับกับดักประจุนิดเดียว (single trap) จะส่งผลทำให้ความจรวมเป็นดังนี้คือ

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{if} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^*{}^2} \quad (2.118)$$

เมื่อ  $C_{if}$  คือค่าความจุที่ความถี่ต่ำซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นกับดักประจุ (trap density :  $N_T$ ) และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) ส่วน  $\tau^*$  คือค่าคงตัวเวลา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $N_T$ ,  $N_A$  และ  $W$  ของบริเวณปลอดพาหะในกรณี  $N_T \ll N_A$  ค่าคงตัวเวลา  $\tau^*$  จะมีค่าเข้าใกล้ค่า  $\tau^* = \tau_0 = \frac{1}{\omega_0}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ซึ่ง  $E_{\omega}$  ของสมการที่ (2.123) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน  $E_{\omega}$  จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวรอยต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงตัวเวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F^p$ ) หรือ ( $E_F^n$ ) จะหาได้จากความถี่ของจุดเบี่ยงเบน  $\omega_0$  สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ  $C(\omega)$  ค่าพลังงานกระตุ้นของ  $\omega_0$  จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F^p$ ) หรือ ( $E_F^n$ ) เว้นเสียแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากสมการ (2.116) ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  ที่สอดคล้องกับ  $\tau_D$  จะแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

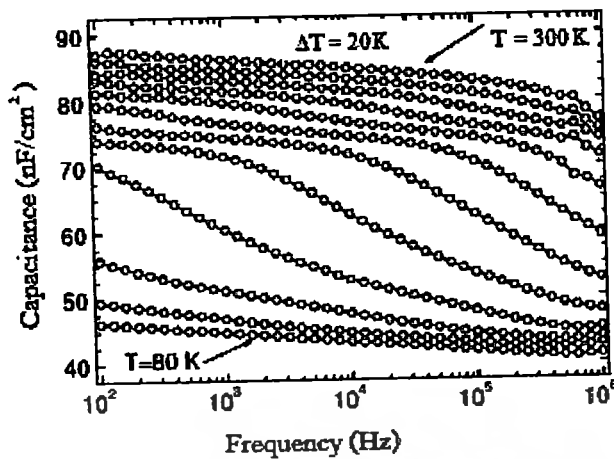
พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม  $\omega$  ที่ใช้ในการวัด  $\omega$  มีค่ามากกว่า  $\omega_D$  ( $\omega > \omega_D$ ) พหุอิสรจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุจะขาดคณิตคือ

$$C_{geo} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.124)$$

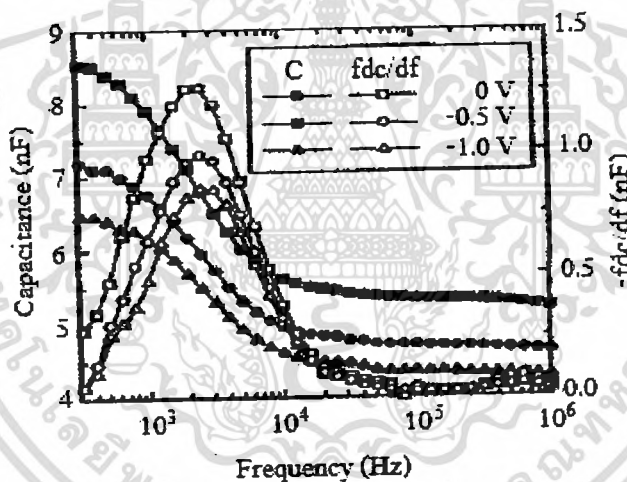
เมื่อ  $d$  คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  จะมีค่าสูงกว่า  $\omega$  และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เบี่ยงเบน  $\omega_0$  สถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น [36-38]

1. สำหรับ  $\omega_0 < \omega < \omega_D$  เราจะวัดได้ค่า  $C_{SCR}$  แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวิน ไปเป็น 300 เคลวิน ขึ้นจากการทรานซิชันครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้นจาก  $C_{SCR}$  ไปเป็น  $C_f$  ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega = \omega_0$  ตามสมการ (2.118) การทรานซิชันของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.53 ส่วนรูปที่ 2.54 จะแสดงค่า  $C$  ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชันของค่าความจุจากช่องความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  ซึ่งพีคของกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.53 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า  $C_{SCR}$  แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม



รูปที่ 2.54 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ  $-\frac{f_{dc}}{df}$  ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง

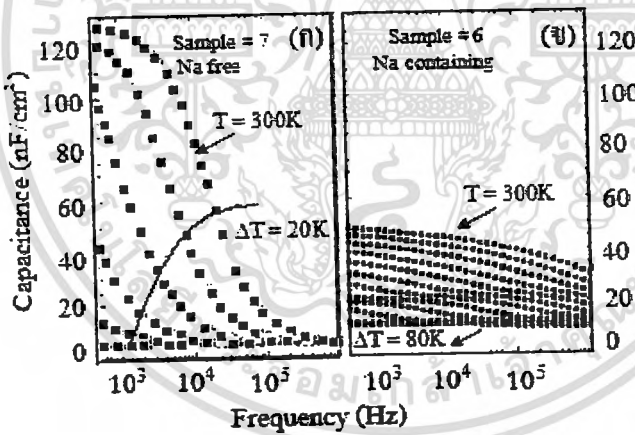
2. สำหรับ  $\omega < \omega_D < \omega_0$  ในแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจะเห็นการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวซึ่งเกิดจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ ( $C_U$ ) ซึ่งการทรานซิชันนี้เกิดขึ้นที่  $\omega = \omega_D$  พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะรูปที่ 2.55 แสดงการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิสูง/ความถี่ต่ำ โดยมี

ค่าประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นแบนได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของ CuGaSe<sub>2</sub> ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่า การทรานซิชันที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก ( $\tau_D$ ) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชันที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโฮลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s} = \frac{q p \mu_p}{\epsilon_s} = \frac{q N_V \mu_p}{\epsilon_s} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \tag{2.125}$$

ถ้าทราบค่า  $\mu_p$  และ  $\epsilon_s$  ก็สามารหาค่าความหนาแน่นของโฮล(p)ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า  $C_f$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออไนซ์ซึ่งก็คือมีการจับประจุและการคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า การทรานซิชันในรูป 2.55(ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริกค่อนข้างสูงอยู่ในราว  $\tau_D = 10^{-5}$  s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้  $\omega_D = \omega_0$  ดังนั้นจากการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เบี่ยงเบน ( $\omega_0$ ) ของกับดักประจุนั้นคือไม่สามารถตรวจวัดระดับพลังงานของกับดักประจุได้

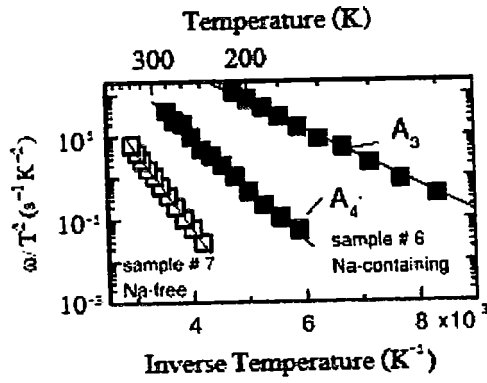


รูปที่ 2.55 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ

- ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na
- ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na

รูปที่ 2.56 แสดงการหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในรูปที่ 2.55 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ได้จากสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na ส่วน CuGaSe<sub>2</sub> ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.56 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของ  
กับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuGaSe}_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ช่วงแรกจะเน้นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที หลังจากนั้นศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบทั้งสองหน้าของชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน แล้วทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบทินออกไซด์เจือฟลูออรีน สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$  แล้วนำไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป

**3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที [11-24]**

**3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์**

1. เตาอบ
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. เครื่องเป่าลมร้อน
4. หม้อดูดความชื้น ( desiccator )
5. กระจกสไลด์
6. ที่ตัดกระจกสไลด์
7. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
8. ปากคืบ
9. นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
10. สารเคมี (นํ้ายาล้างจาน นํ้าปลอດประจุ อะซิโตนและ เอทานอล) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบ สารละลายเคมี

1. แผ่นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ขนาด  $12 \times 26$  ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. อ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้คงที่
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. เครื่องชั่งดิจิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
6. แทนซ์
7. เทปล่อน
8. แท่งแก้ว
9. นาฬิกาจับเวลา
10. ปากคืบ
11. กระจกทึบดำ
12. เครื่องกวนสารละลายเคมี
13. สารตั้งต้นประกอบด้วย
  - แคดเมียมซัลเฟต ( $\text{CdSO}_4$ )
  - ไทโอยูเรีย ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ )
  - แอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )
  - น้ำปอดประจุ (deionized water : DI water)

### 3.1.3 การทำความสะอาดผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบ สารละลายเคมี

อุปกรณ์ประกอบด้วยดังนี้

1. แคดเมียมซัลไฟด์เคลือบลงทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ได้จากวิธีการอบ  
สารละลายเคมีขนาดพื้นที่  $12 \times 26$  ตารางมิลลิเมตร
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. น้ำปอดประจุ
4. เครื่องเป่าลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารใน ระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารในระยะประชิด(CSS) ประกอบด้วย
  - ท่อแก้วบอโรซิลิเกตปลายปิดหนึ่งด้าน
  - กล้องแกรไฟต์
  - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
  - เครื่องวัดอุณหภูมิ
  - เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP23
  - หลอดทังสเตน 1,000 วัตต์ ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DP-50A
  - ปั๊มฟลักโรตารี (Rotary pump)
  - เกจพิรามิตรีวัดความดันต่ำ
2. แคดเมียมซัลไฟด์เคลือบลงบนหินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ได้จากวิธีการอบ  
สารละลายแคดเมียมขนาดพื้นที่ 12×26 ตารางมิลลิเมตร
3. สารแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99%
4. หน้ากากกันไอระเหยของสารแคดเมียม
5. แวนตากรองแสง
6. ภาชนะเก็บความชื้น (dessicator) ที่ใช้ได้ตัวอย่าง
7. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.1 แสดงระบบการระเหิดสารในระยะประชิด(CSS) ภายใต้สุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดัน 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 10-90 องศา



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

### 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 5,000 และ 20,000 เท่า



รูปที่ 3.3 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios ใช้ความยาวคลื่น 300 - 1,100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios

### 3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า

1. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
2. กาวเงิน
3. อะซีโตน
4. กาวคาร์บอน
5. สายไฟ
6. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
7. ระบบทำความเย็นยี่ห้อ Leybold
8. หลอดไฟฮาโลเจน (ELH)
9. เครื่องวัดความเข้มแสง Lux meter ยี่ห้อ DIGICON รุ่น LX-50
10. เครื่องวัดค่าความจุต่อแรงดันไฟฟ้า ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A Precision LCR Meter
11. เครื่องทำความเย็นไครโอเจนิกและไครโอสแตต

### 3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

1. เครื่องวัดค่าความจุต่อแรงดันไฟฟ้า ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A Precision LCR Meter
2. เครื่องทำความเย็นไครโอเจนิกและไครโอสแตต
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
4. สายไฟ
5. ระบบทำความเย็นยี่ห้อ Leybold
6. กาวคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคลเซียมเทลลูไรด์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที [12-14,21-24]

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

1. ตัดแผ่นกระจกใสให้มีขนาด 12×26 ตารางมิลลิเมตร นำไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อล้างคราบไขมัน จากนั้นเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานอีกครั้งทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกใสเข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
3. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. นำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
6. นำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
7. นำแผ่นกระจกใสไปกัดด้วยกรดกัดแก้วเนื่องจากความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 13 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
8. ล้างแผ่นกระจกใสในน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที อีก 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งต้องเปลี่ยนน้ำปอดประจุใหม่ทุกครั้ง
9. นำแผ่นกระจกใสทั้งหมดไปเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้งโดยไม่ต้องถอดกระจกใสออกจากตัวยึดที่ทำด้วยเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็ว แล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบ ๆ
10. นำแผ่นกระจกใสไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยไม่ต้องถอดกระจกใสออกจากตัวยึดเทฟลอนเพราะควรให้กระจกใสตั้งขึ้นในระหว่างการอบเพื่อให้ความชื้นระเหยได้ดีทั้งสองด้านของกระจก
11. เมื่อกระจกใสเย็นตัวก็เก็บใส่ถุงซิปล็อคแยกจากกันในแต่ละชิ้น เพื่อป้องกันกระจกใสชุกกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อสุญญากาศความชื้น

### 3.2.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์

1. นำกล่องแกรไฟต์ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนแล้วไปแอลกอฮอล์ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
3. ชั่งสารแคดเมียมเทลลูไรด์ 0.03 กรัม บรรจุลงในกล่องแกรไฟต์
4. นำแผ่นฐานรองรับที่ผ่านการอบสารละลายเคมีแล้วมาปิดตรงช่องใส่สารแคดเมียมเทลลูไรด์โดยจะอยู่ห่างจากช่องใส่สารตั้งต้นเป็นระยะทาง 6 มิลลิเมตร
5. นำฝากล่องแกรไฟต์ประกบกันให้แน่น
6. นำกล่องแกรไฟต์เข้าสู่ระบบการระเหิดสารในระยะประชิด
7. ทำการลดความดันโดยใช้เครื่องโรตารีปั๊มให้ได้ความดันที่ประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
8. ทำการระเหิดสารแคดเมียมเทลลูไรด์ เปิดหลอดไฟทั้งสแตนท์ที่ใช้ให้ความร้อน ใช้เวลาขาขึ้น(Ramp Time) เท่ากับ 20 นาที ควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคืออบฟิล์มบาง 30 นาที จึงปิดหลอดไฟที่ให้ความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บไว้ในหม้อสุญญากาศ
9. เริ่มทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใหม่ภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้น(Ramp Time) เท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยทำตามขั้นตอน 1-8 จากนั้นจึงนำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปสร้างขั้วไฟฟ้า

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที [11-22]

#### 3.3.1 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรองรับมาตัดออกให้ได้ขนาดพื้นที่  $12 \times 26$  ตารางมิลลิเมตร
2. นำหน้ากามาปิดปลายด้านใดด้านหนึ่งให้มีความกว้างประมาณ 2 มิลลิเมตร
3. นำไปเสียบภาชนะเทปลอนโดยมีแท่งแก้วยึดเทปลอนแล้วจึงนำไปติดตั้งไว้กับเครื่อง

เอกสารนี้เป็น **กวนสารละลายเคมี** ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำแผ่นฐานรองรับที่ติดตั้งกับเครื่องกวนสารละลายเคมีมาวางลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปอดประจุบรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางลงในอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ถึง 90 องศา และให้ปรับความเร็วในการหมุนเครื่องกวนสารละลายเคมีให้ได้ความเร็วช้าที่สุด
5. เมื่ออุณหภูมิของน้ำปอดประจุที่อยู่ในบีกเกอร์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เทสารแคดเมียมซัลเฟตจำนวน 0.3847 กรัม ที่ละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทแอมโมเนีย 17 มิลลิลิตร เทสารไทโอยูเรียจำนวน 0.5709 กรัม ที่ละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วจึงเทน้ำปอดประจุให้ท่วมแผ่นฐานรองรับตามลำดับวัดค่า pH ได้ประมาณ 11.6 ใช้เวลาในการอบสารละลายเคมี 1 ชั่วโมง
6. นำแผ่นรองรับไปแช่ตะกอน (colloid) ออกด้วยน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 30 นาที 3 รอบ โดยเปลี่ยนน้ำปอดประจุทุกรอบ
7. อบสารละลายเคมีรอบที่ 2 โดยทำตามขั้นตอน 3-6
8. นำฟิล์มบางของสารตัวอย่างถอดหน้ากาออก เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เมื่อตัวอย่างแห้งดีแล้วจึงบรรจุในถุงซิปล็อกไว้ในหม้อสุญญากาศเตรียมเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ต่อไป

### 3.3.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์

1. นำกล่องแกรไฟต์ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนแล้วไปแอลกอฮอล์ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
3. ชั่งสารแคดเมียมเทลลูไรด์ 0.03 กรัม บรรจุลงในกล่องแกรไฟต์
4. นำแผ่นฐานรองรับที่ผ่านการอบสารละลายเคมีแล้วมาปิดตรงช่องใส่สารแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยจะอยู่ห่างจากช่องใส่สารตั้งต้นเป็นระยะทาง 6 มิลลิเมตร
5. นำฝากล่องแกรไฟต์ประกบกันให้แน่น
6. นำกล่องแกรไฟต์เข้าสู่ระบบการระเหิดสารในระยะประชิด
7. ทำการลดความดันโดยใช้เครื่องโรตารีปั๊มพีให้ได้ความดันที่ประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
8. ทำการระเหิดสารแคดเมียมเทลลูไรด์ เปิดหลอดไฟทั้งสแตนท์ที่ใช้ให้ความร้อน ใช้ช่วงเวลาขึ้น 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่แผ่นฐานรองรับแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที จึงปิดหลอดไฟที่ให้ความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำตัวอย่างที่เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ไปจุ่มในสารละลาย แคลเมียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำไปแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เป็น รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ไปสร้างขั้วไฟฟ้า

### 3.3.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า

1. ทำการระเหยฟิล์มบาง ZnTe ให้เคลือบบนฟิล์มบาง CdTe ด้วยความร้อนในระบบ สูญญากาศ แล้วทำการเจืออะตอม Cu โดยการจุ่มในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  เป็นเวลา 15 นาที และทำการแอนนีกในอากาศที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เป็น รอยต่อโอห์มมิก
2. ทำขั้วไฟฟ้าด้านหลังโดยใช้สายไฟขนาดเล็กมากเชื่อมด้วยกาวเงินให้ติดกับฟิล์มบาง ZnTe:Cu ส่วนฟิล์มบางของทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงด้านหน้ารอให้กาวเงินแห้ง แล้วเข้าสู่กระบวนการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

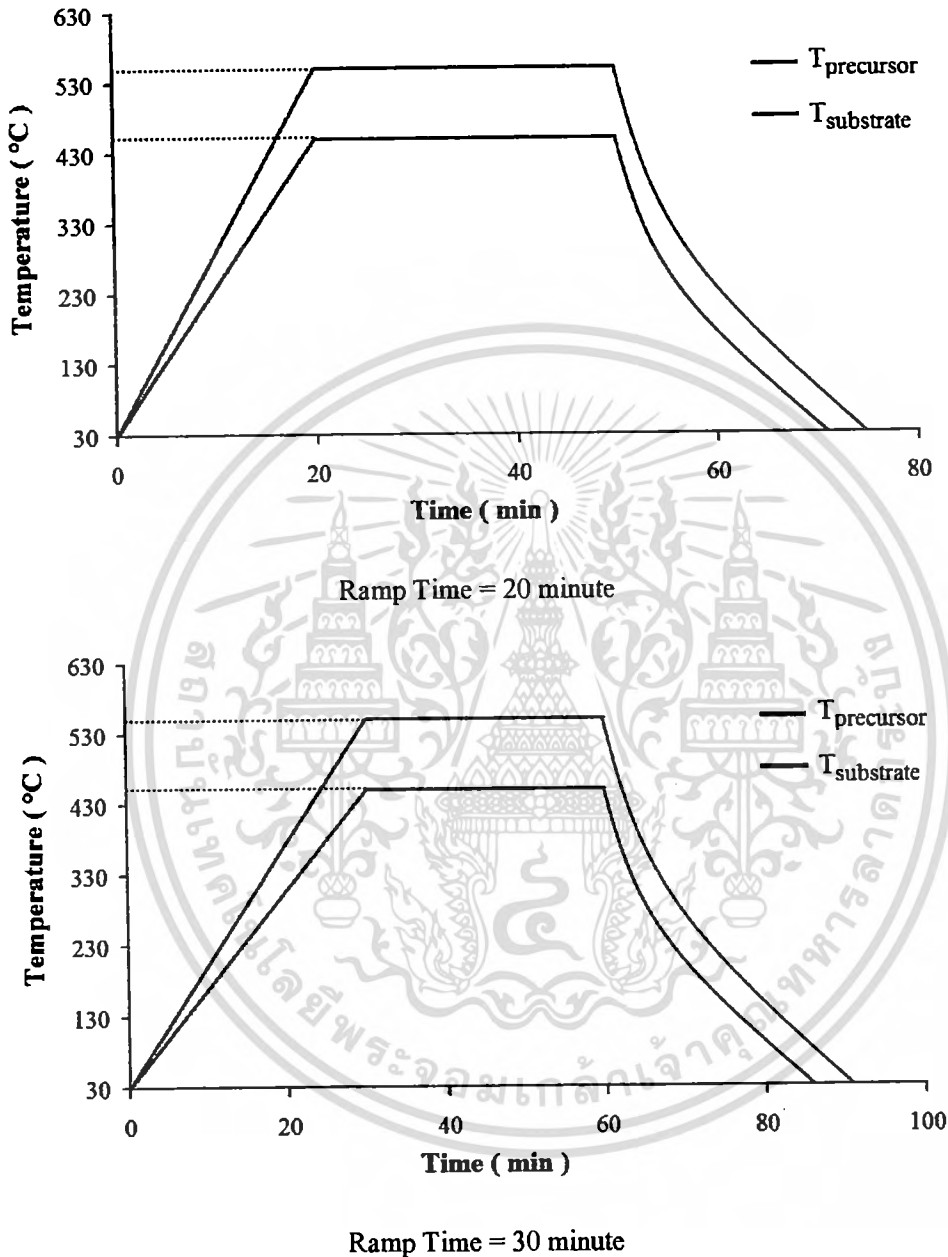
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ถูกเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ได้จากกระบวนการอาบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน สุกท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{SnO}_2/\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Cu}$  นำไปศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสตึเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟฟ้าฮาโลเจน ELH ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ 20 – 300 เคลวิน

4.1 ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ ดังรูป 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที หลังจากนั้นจึงศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอาบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ซึ่งมีลักษณะสีเหลืองส้มโดยแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบทั้งสองหน้าของชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน แล้วทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบทินออกไซด์เจือฟลูออรีน มีลักษณะสีเทาอำพันน้ำเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายโดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ

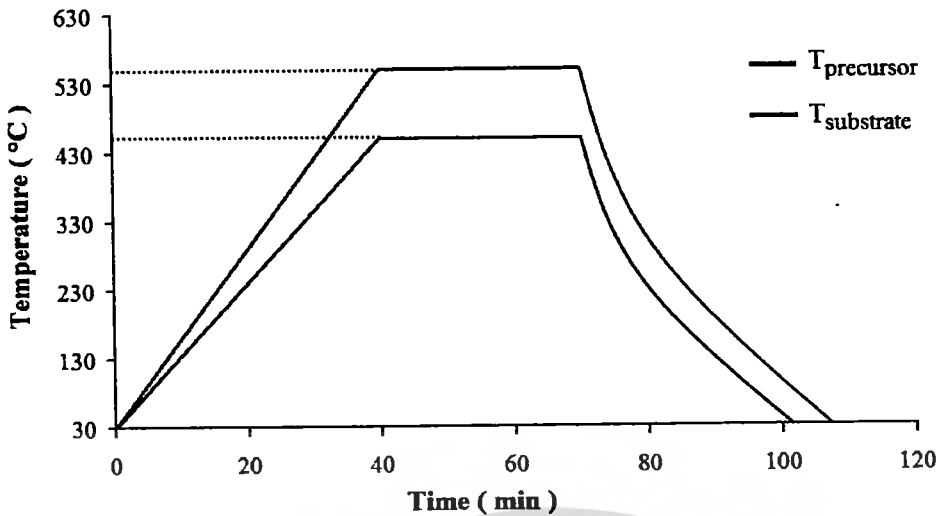
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการ  
ไม่วารณี่ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที สุดท้ายจะได้รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ดังรูป 4.3

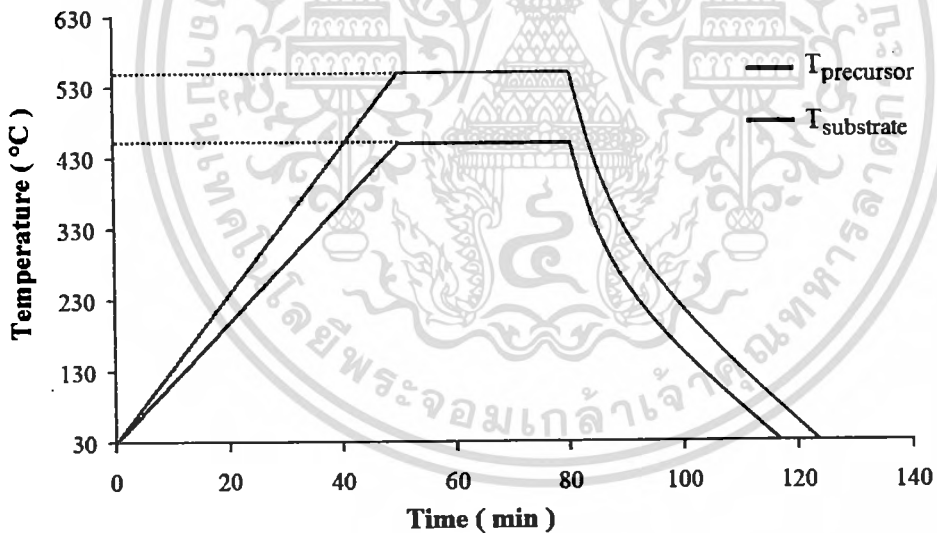


รูปที่ 4.1 แสดงโปรไฟล์การควบคุมอุณหภูมิของระบบการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



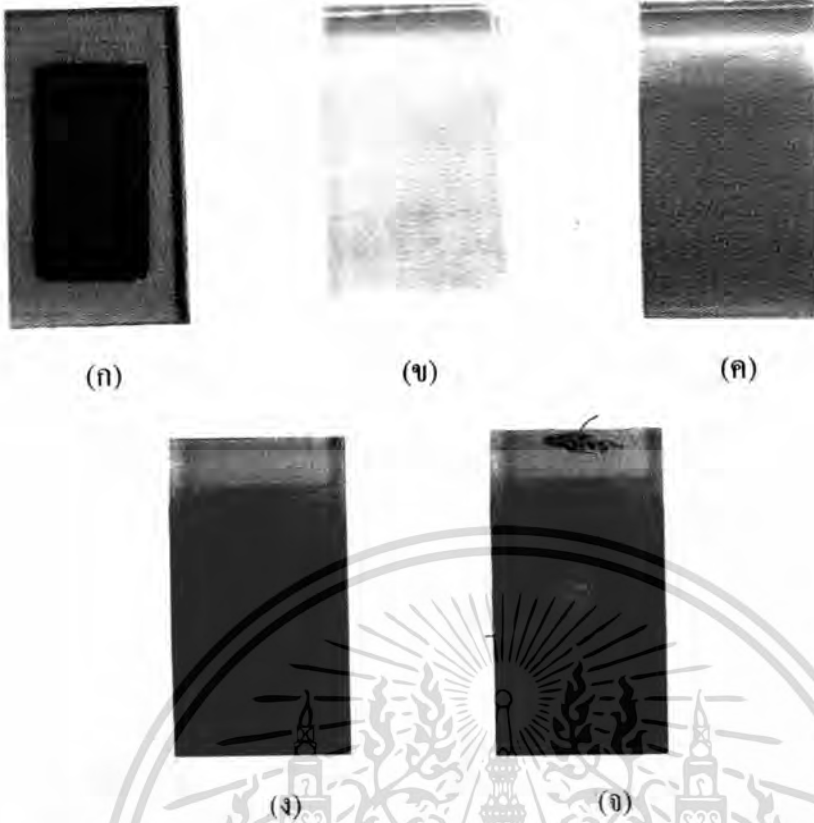
Ramp Time = 40 minute



Ramp Time = 50 minute

รูปที่ 4.2 แสดงโปรไฟล์การควบคุมอุณหภูมิของระบบการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาที่ขึ้นเท่ากับ 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีชั้นแคดเมียมซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีออบสารละลายยเคมีลงบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

- ก. แคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- ข. แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน
- ค. แคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน
- ง. แคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบที่บนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน
- จ. ภาพการต่อขั้วไฟฟ้าด้านหลังของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}:\text{Cu}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

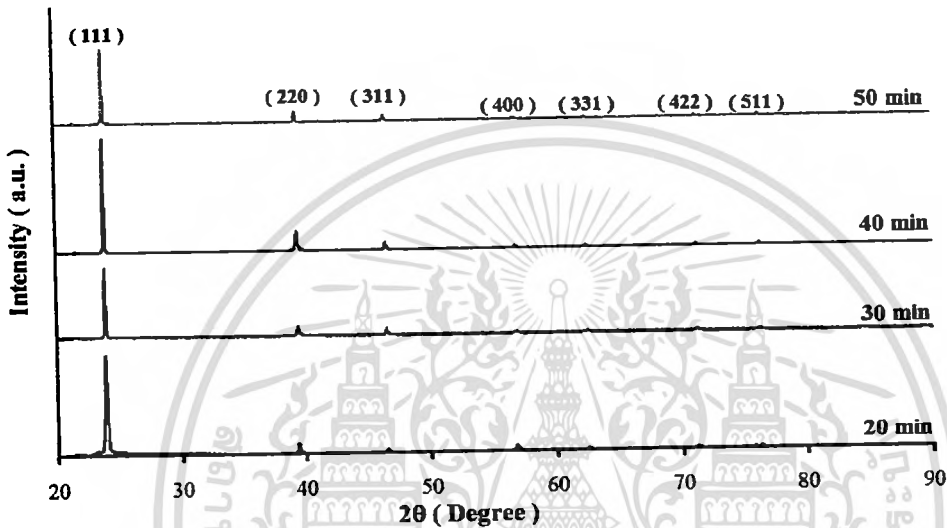
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

4.2.1 การศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

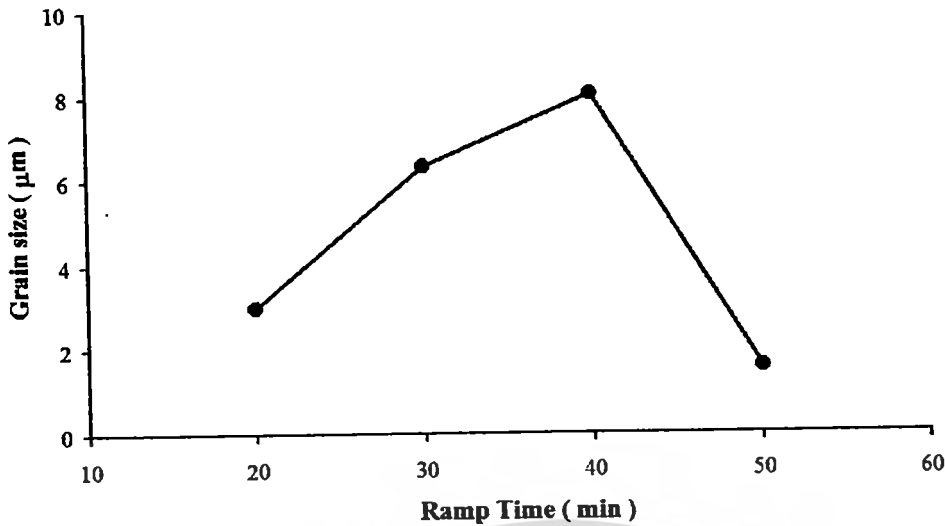
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ผลปรากฏพบว่าระนาบ โครงผลึก (111) เค้นชัดที่สุดที่มุม  $2\theta \approx 23.75$  องศา ระนาบ (220) ที่มุม  $2\theta \approx 39.31$  องศา และระนาบ (311) ที่มุม  $2\theta \approx 46.43$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับ ฟิล์มมาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับฟิล์มมาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบซิงค์เบลนด์คั่งรูปที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และขนาดของเกรนจะแสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 .

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอาบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะที่ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ผลปรากฏพบว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

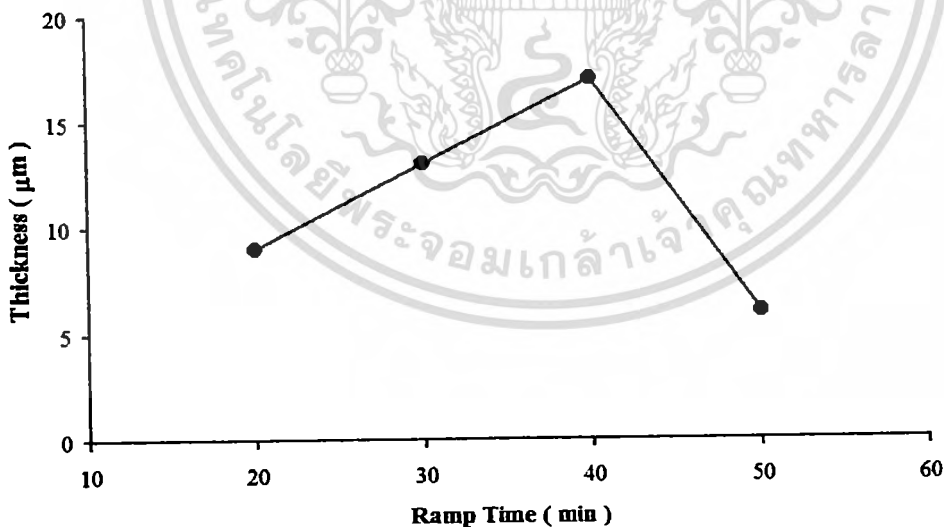
สารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีระนาบโครงสร้างผลึก (111) เค้นชัดที่สุดที่มุม  $2\theta \approx 23.75$  องศา ระนาบ(220)ที่มุม  $2\theta \approx 39.31$  องศา ระนาบ(311)ที่มุม  $2\theta \approx 46.43$  องศา ระนาบ(331) ที่มุม  $2\theta \approx 62.35$  องศา ระนาบ(422) ที่มุม  $2\theta \approx 71.21$  องศา และระนาบ(511)ที่มุม  $2\theta \approx 76.30$  องศา เมื่อนำระนาบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐาน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบซิงค์เบลนด์ ดังรูปที่ 4.7



**รูปที่ 4.4** แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลา ขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.5 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

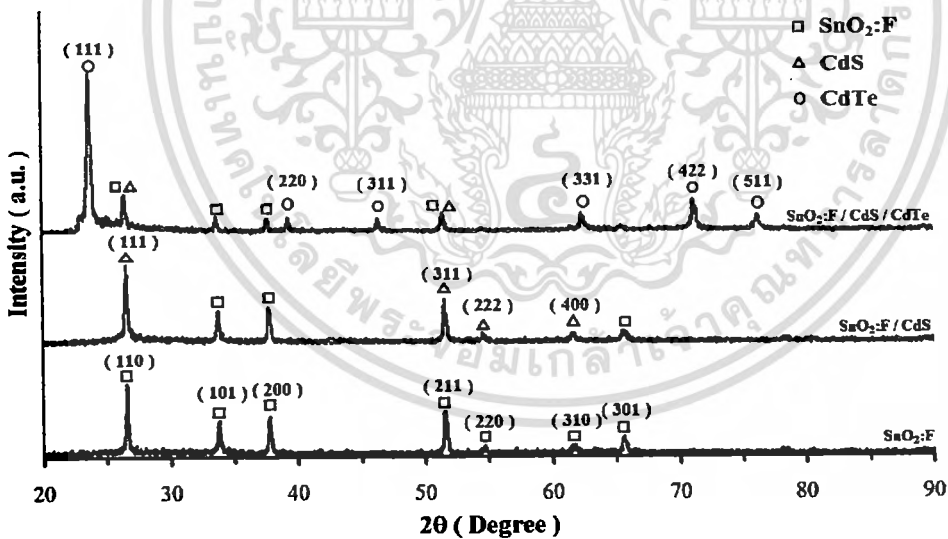


รูปที่ 4.6 แสดงความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Ramp Time (min)	Ramp Rate (°C/min)	Deposition Time (min)	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Lattice Constant ( $\text{\AA}$ )	Strain ( $\times 10^{-5}$ )	Grain size ( $\mu\text{m}$ )	
						XRD	SEM
20	5.00	30	9	6.45	3.32	3.01	3.22
30	3.30	30	13	6.46	5.45	6.35	6.45
40	2.50	30	17	6.46	14.00	8.05	8.16
50	2.00	30	6	6.47	24.60	1.58	1.66



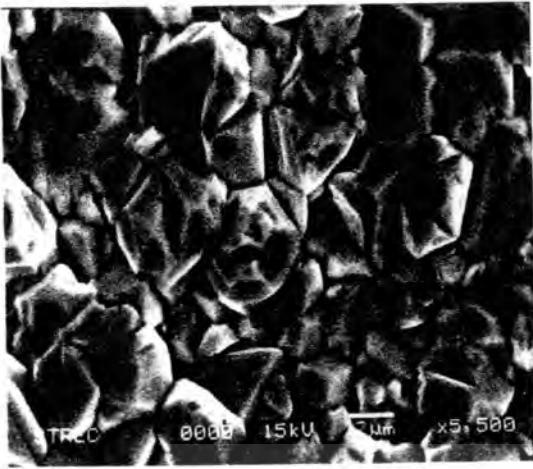
รูปที่ 4.7 แสดงที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

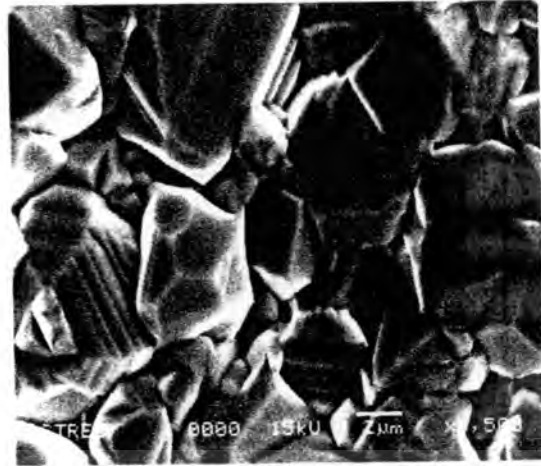
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์บนกระจกสไลด์ เคลือบโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้เวลาจากขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที เกรนมีขนาดประมาณ 3.22, 6.45, 8.16 และ 1.66 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

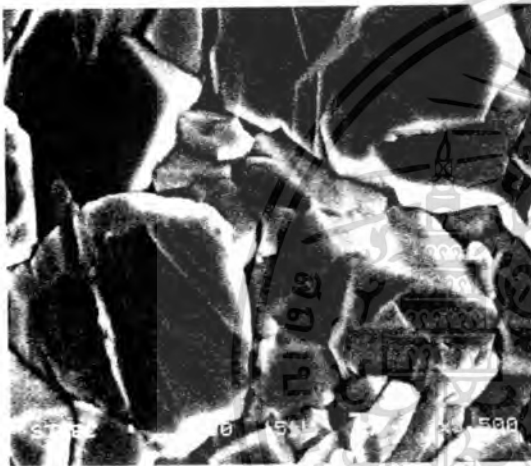
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพถ่าย SEM ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที เกรนมีขนาดประมาณ 0.30, 0.11 และ 27.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.11



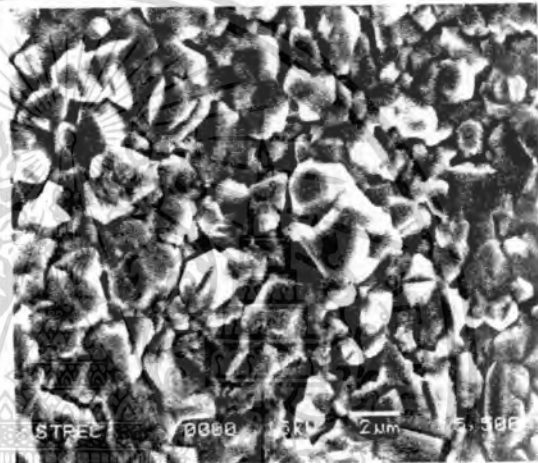
Ramp Time = 20 minute



Ramp Time = 30 minute



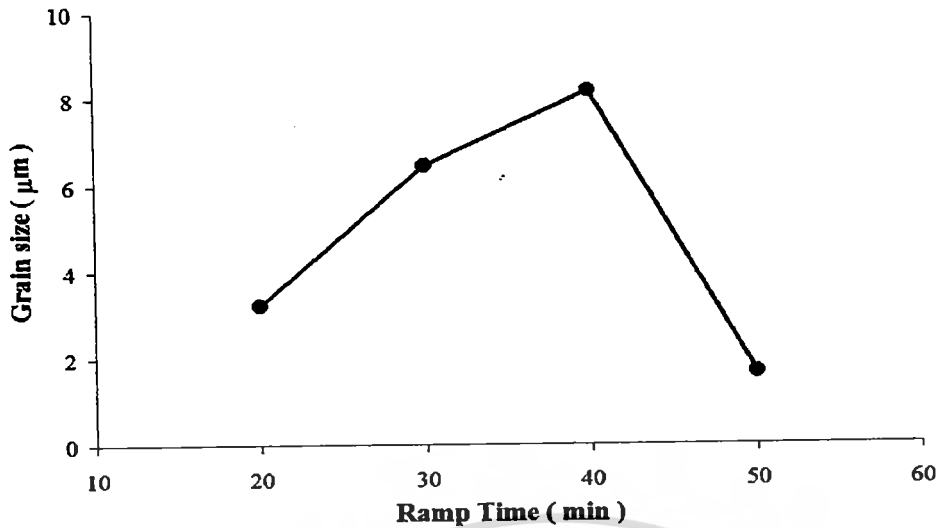
Ramp Time = 40 minute



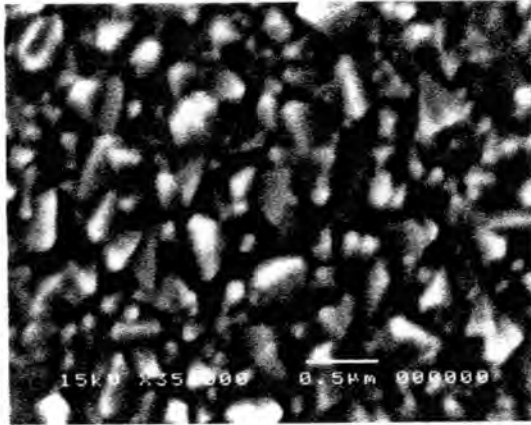
Ramp Time = 50 minute

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางแคลเซียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงขนาดของเกรนที่ได้จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



$\text{SnO}_2\text{:F}$



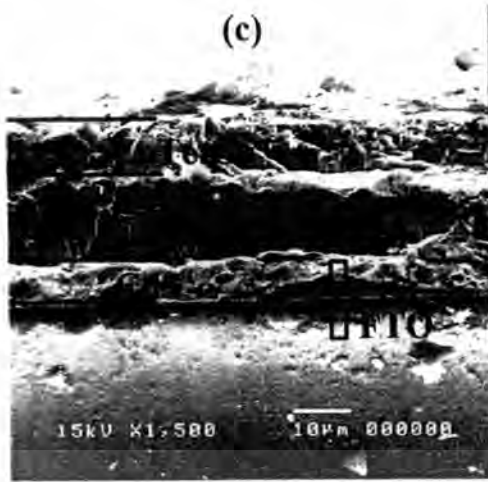
$\text{SnO}_2\text{:F/CdS}$



$\text{SnO}_2\text{:F/CdS/CdTe}$

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของรอยต่อวิวิชพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

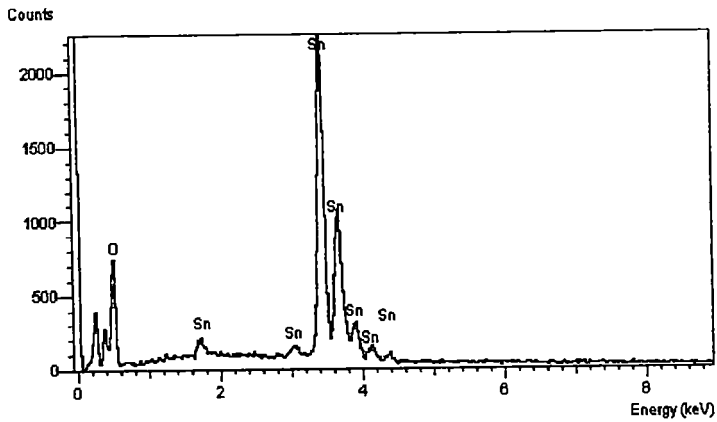
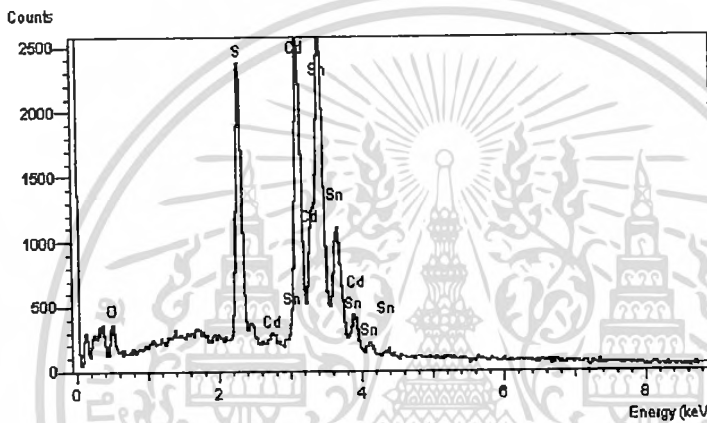
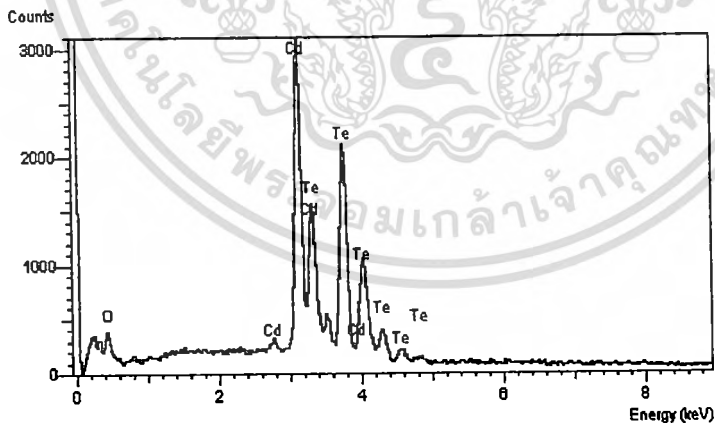


รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

thin films	Lattice constant ( Å )		Grain Size ( μm )	
	a	c	XRD	SEM
SnO <sub>2</sub> :F	4.737	3.185	0.30	0.42
SnO <sub>2</sub> :F/CdS	5.820	-	0.10	0.11
SnO <sub>2</sub> :F/CdS/CdTe	6.481	-	27.35	27.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 $\text{SnO}_2:\text{F}$ 

 $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}$ 

 $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$ 

**รูปที่ 4.12** แสดงสเปกตรัม EDX ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่าง สารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของรอยต่อวิวิธพันธุ์สารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

thin films	EDX				
	Sn (at. %)	O <sub>2</sub> (at. %)	Cd (at. %)	S (at. %)	Te (at. %)
SnO <sub>2</sub> :F	60.47	39.53	-	-	-
SnO <sub>2</sub> :F/CdS	33.87	0.63	34.15	31.35	-
SnO <sub>2</sub> :F/CdS/CdTe	-	0.61	49.06	-	50.33

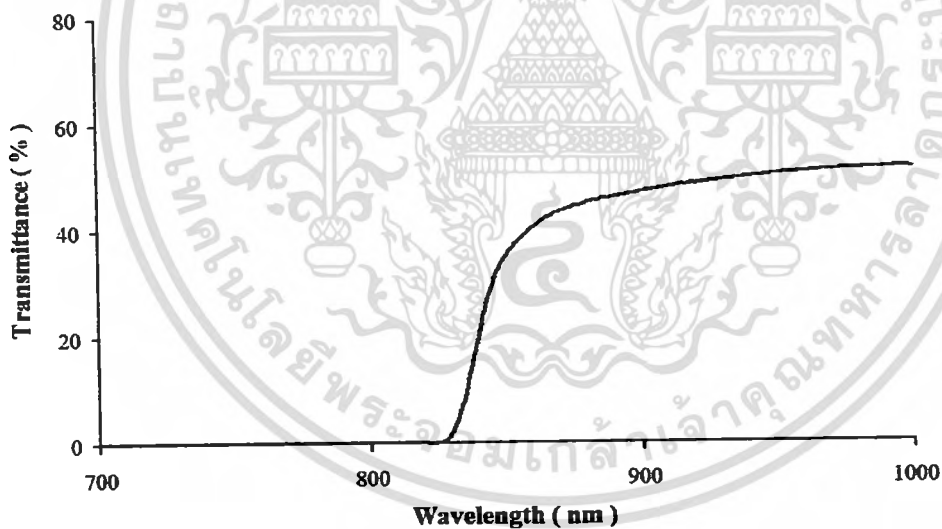
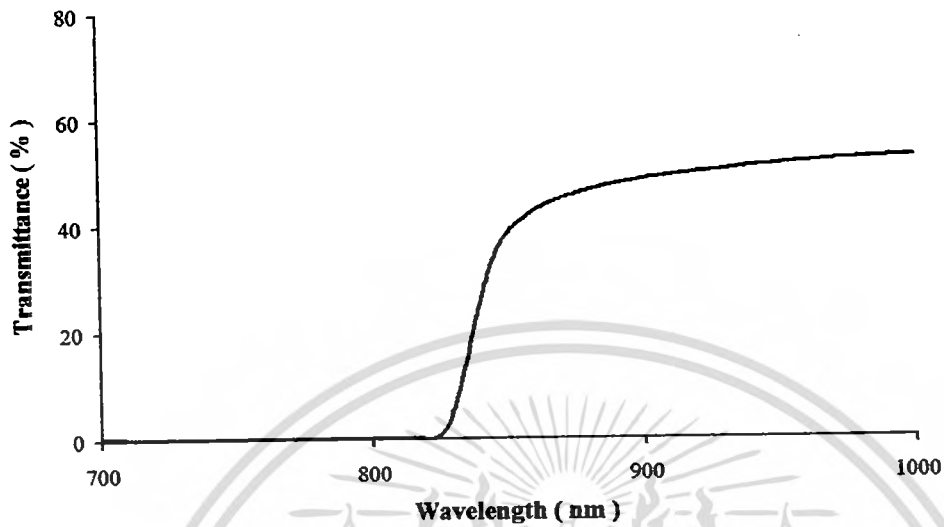
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้เวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีขอบดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตร และมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40 - 60 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) แล้วลากเส้นตรงตัดกับแกนพลังงานโฟตอน โดยจุดตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.490, 1.485, 1.480 และ 1.495 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอาบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วย ทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที พบว่า รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีขอบดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ

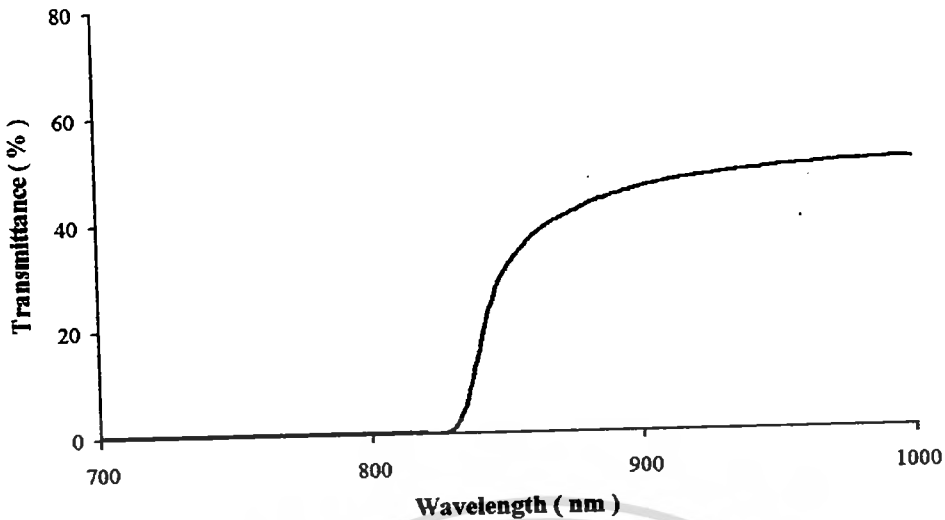
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 - 800 นาโนเมตร และมีการส่งผ่านแสงประมาณ 10 - 80 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20

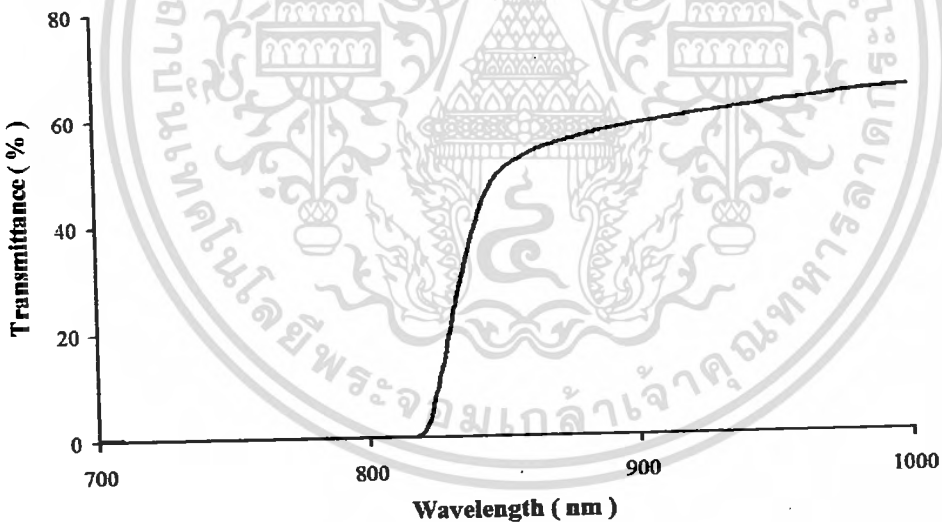


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดสารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20 และ 30 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร

เอกสารนี้ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



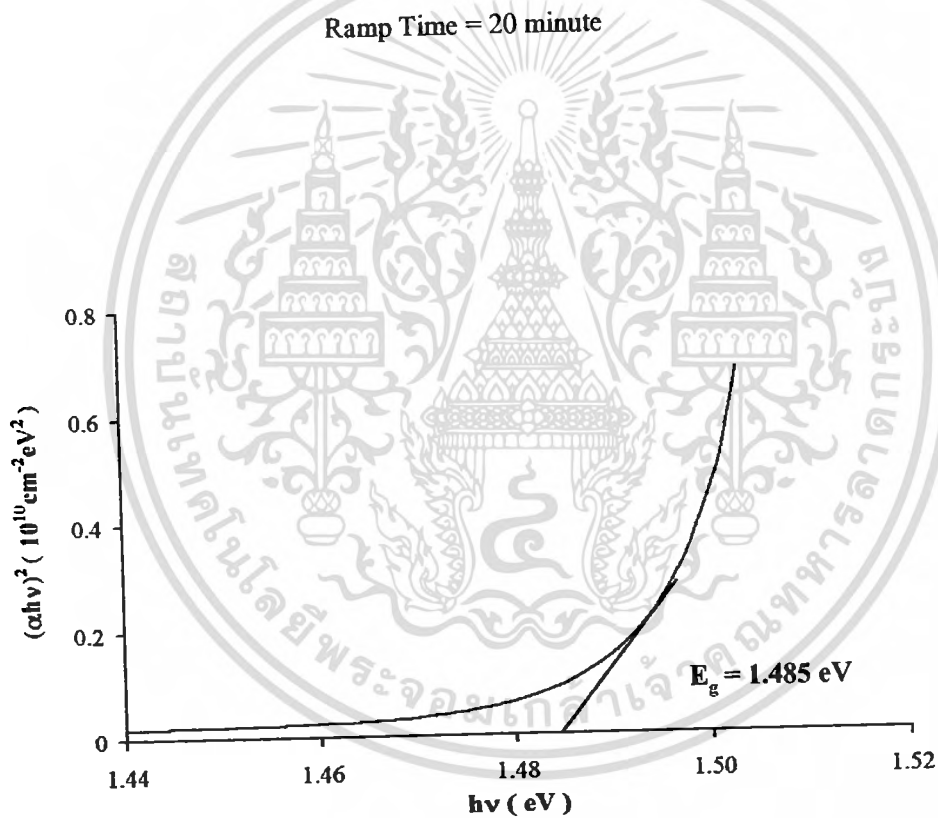
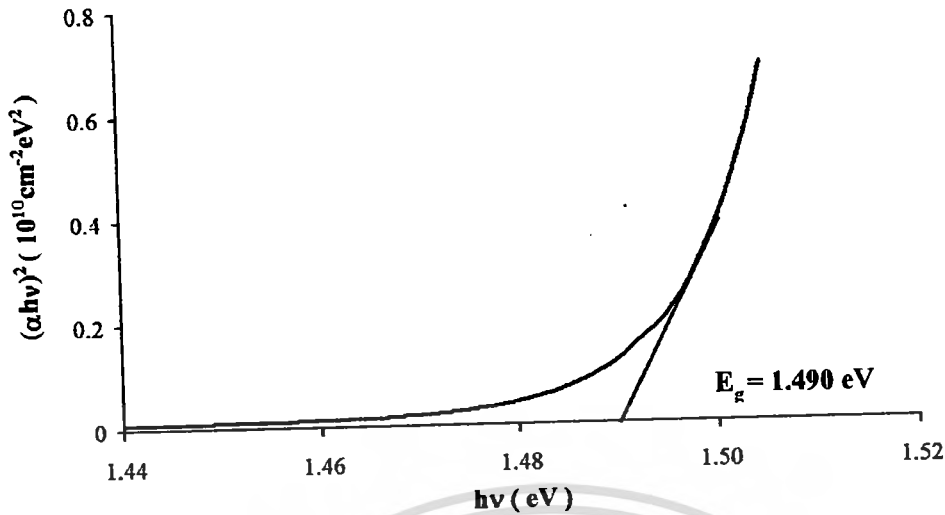
Ramp Time = 40 minute



Ramp Time = 50 minute

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดสารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 40 และ 50 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระยะ 6 มิลลิเมตร

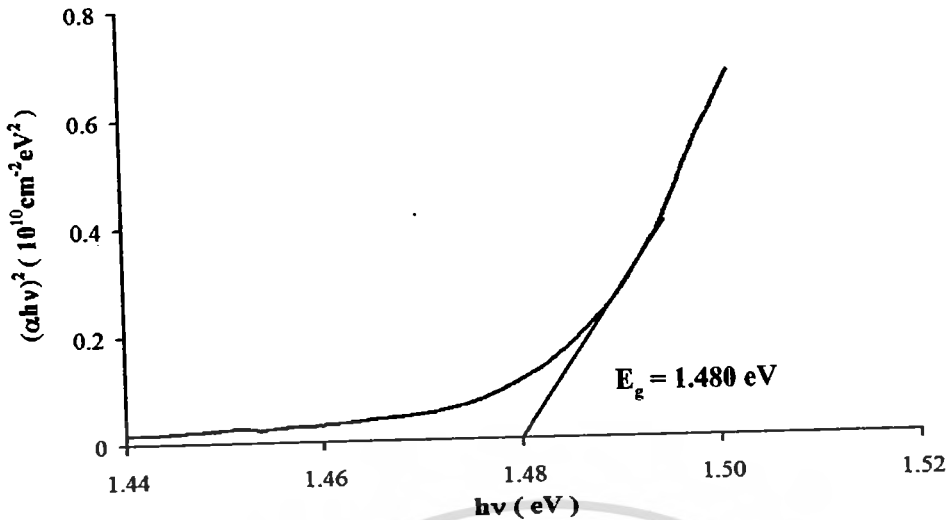
เอกสารนี้เป็นใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



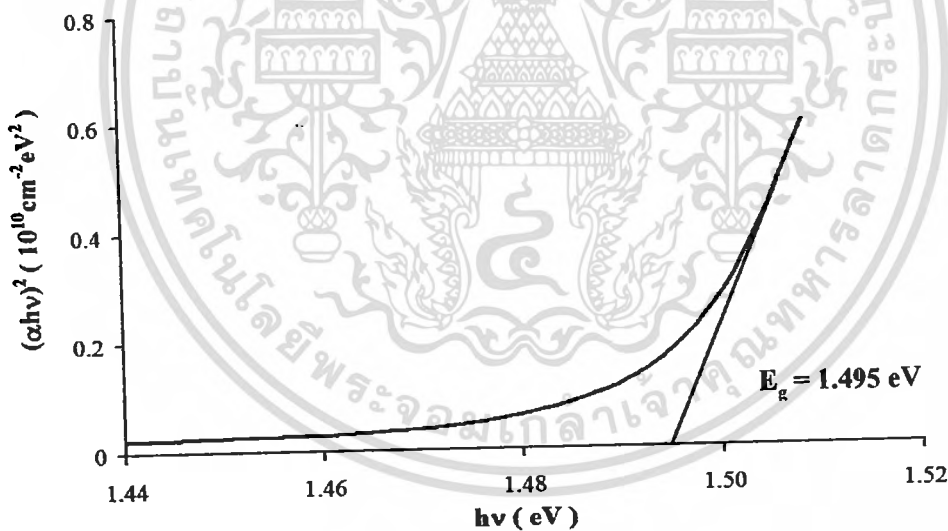
Ramp Time = 30 minute

รูปที่ 4.15 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดสารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20 และ 30 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นใช้เวลาในการเคลื่อนฟิล์มบาง 30 นาที การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ramp Time = 40 minute

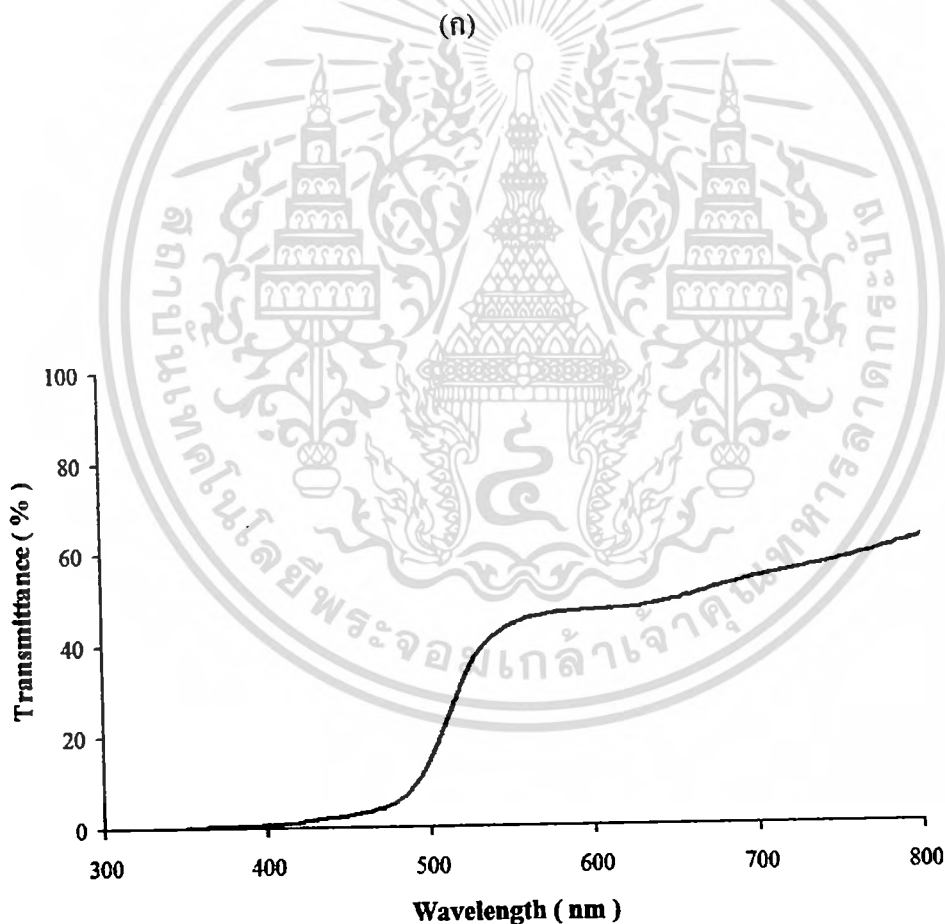
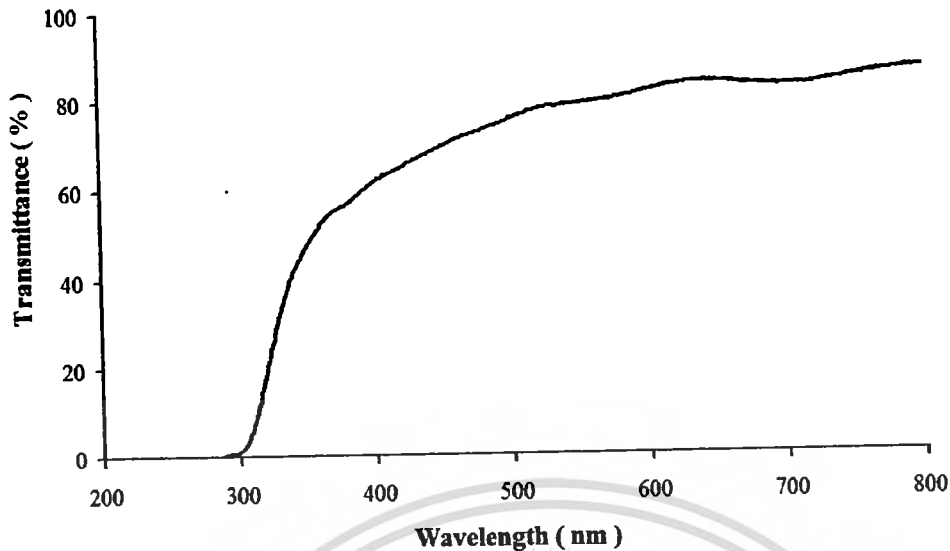


Ramp Time = 50 minute

รูปที่ 4.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 40 และ 50 นาที โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 6 มิลลิเมตร

ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



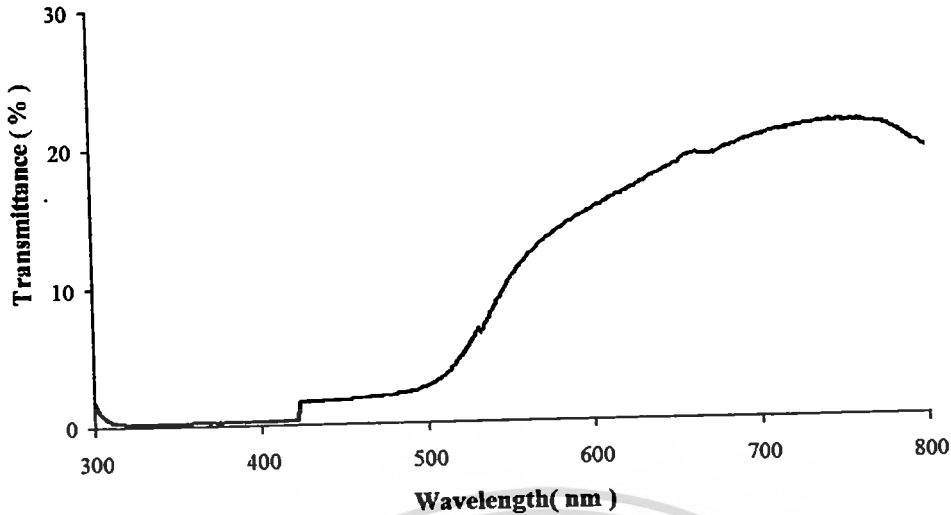
(ข)

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของ

ก. slide glass/ $\text{SnO}_2\text{:F}$

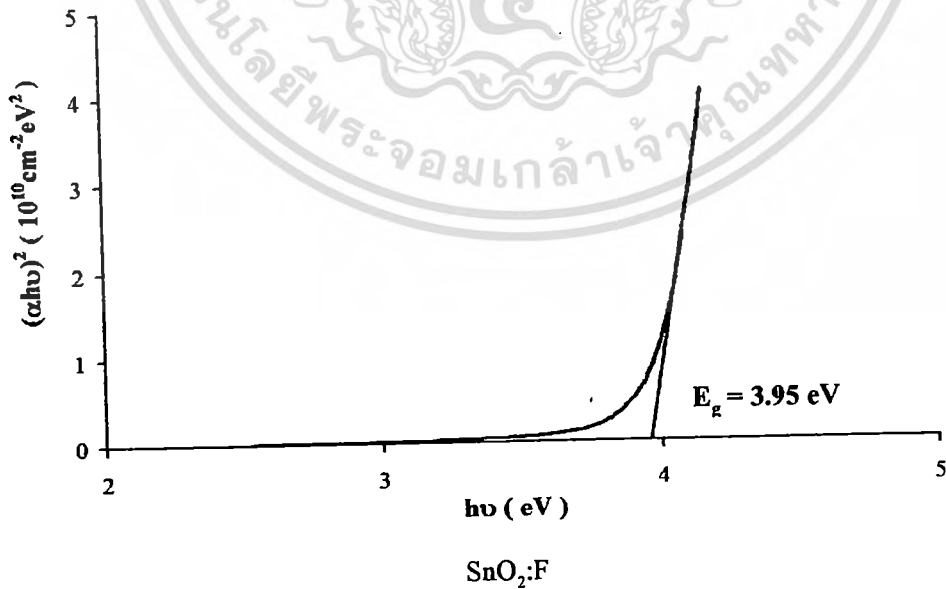
ข. slide glass/ $\text{SnO}_2\text{:F/CdS}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



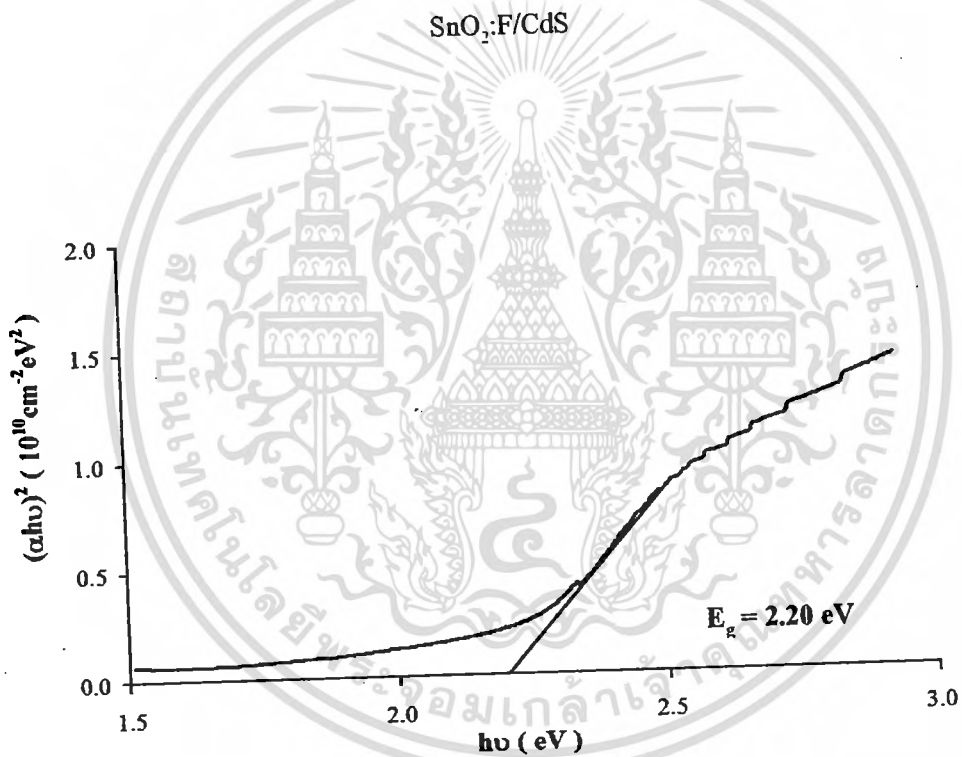
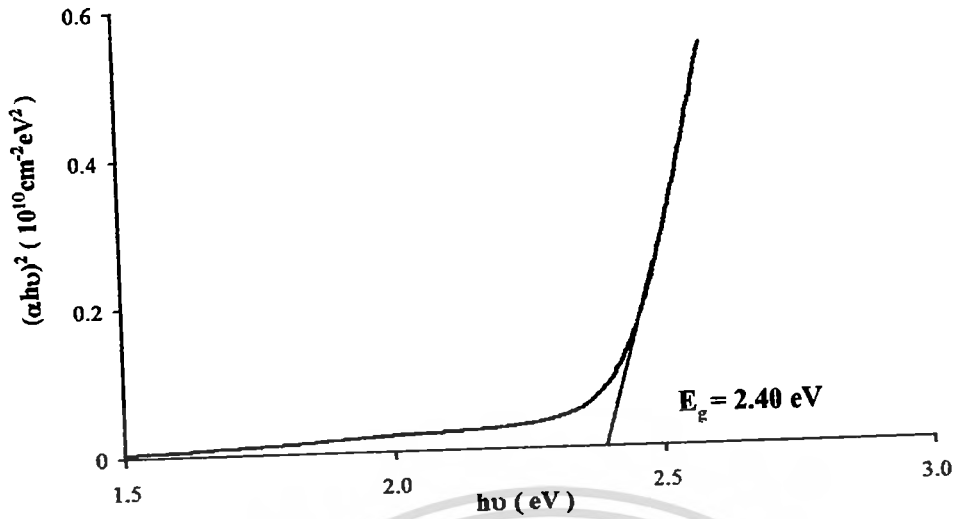
SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$

เอกสารนี้เป็นของชั้นหินออกไซด์เจือฟลูออรีน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe

รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการอาบสารละลายเคมีและรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบด้วยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$  จากนั้นนำไปวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว พบว่าในขณะที่ยังไม่ได้ฉายแสง มีทั้งมีความต้านทานไฟฟ้า (resistance) ความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง (sheet resistance) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (bulk resistivity) มีค่าสูงแต่เมื่อมีการฉายแสง ค่าความต้านทานเหล่านี้จะลดลง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

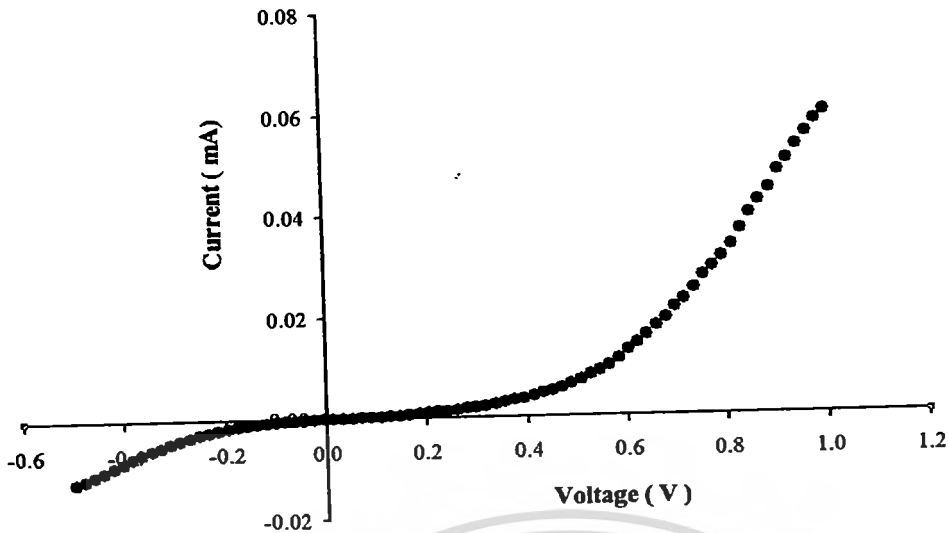
Thin films	Resistance ( $\Omega$ )		Sheet Resistance ; $R_s$ ( $\Omega$ )		Bulk resistivity ; $\rho_b$ ( $\Omega\text{-cm}$ )	
	Darkness	Illumination	Darkness	Illumination	Darkness	Illumination
$\text{SnO}_2:\text{F}$	$1.00 \times 10^7$	$2.65 \times 10^6$	$2.70 \times 10^7$	$7.16 \times 10^6$	$8.10 \times 10^6$	$2.15 \times 10^6$
$\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}$	$1.08 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6$	$1.48 \times 10^6$	$1.38 \times 10^6$	$4.75 \times 10^5$	$4.41 \times 10^5$
$\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$	$9.97 \times 10^5$	$9.03 \times 10^5$	$1.37 \times 10^6$	$1.25 \times 10^6$	$4.65 \times 10^5$	$4.23 \times 10^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

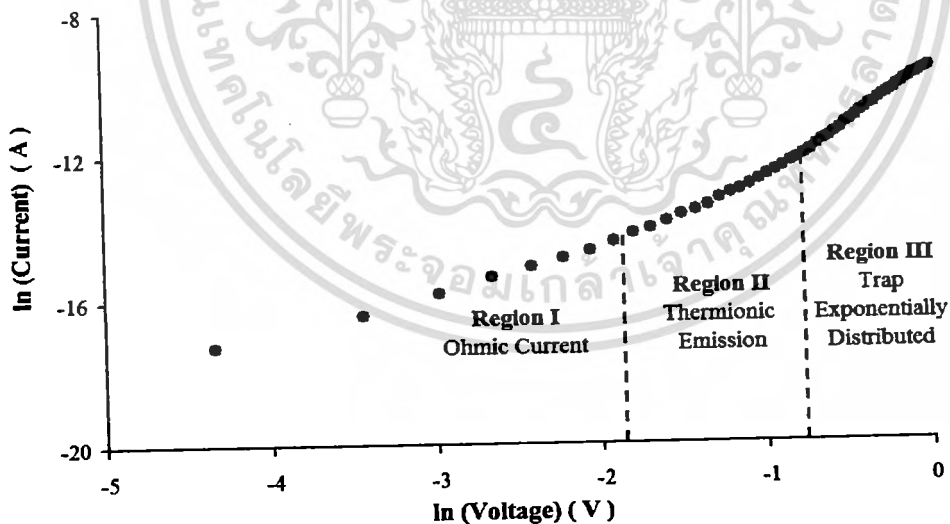
**4.2.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที**

การศึกษาศสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในช่วง  $-0.5$  ถึง  $1.0$  โวลต์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงดังรูปที่ 4.21 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนไดโอด โดยมีแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่  $0.55$  โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า  $-0.5$  ถึง  $1.0$  โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า  $0.146$  โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้า  $0.146$  ถึง  $0.469$  โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $0.469$  โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.22 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.23 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งจากกราฟนี้จะได้อ่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.26 จะได้อ่าค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง แสดงในตารางที่ 4.5

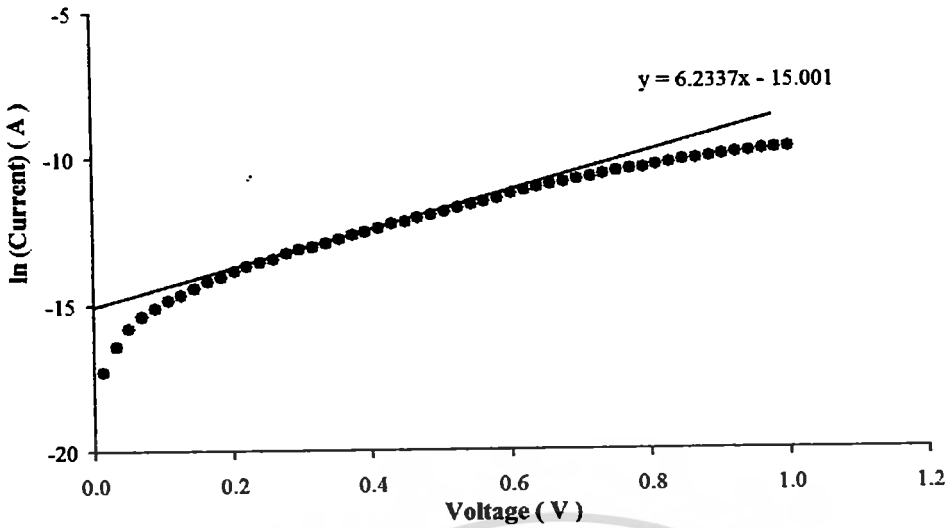


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

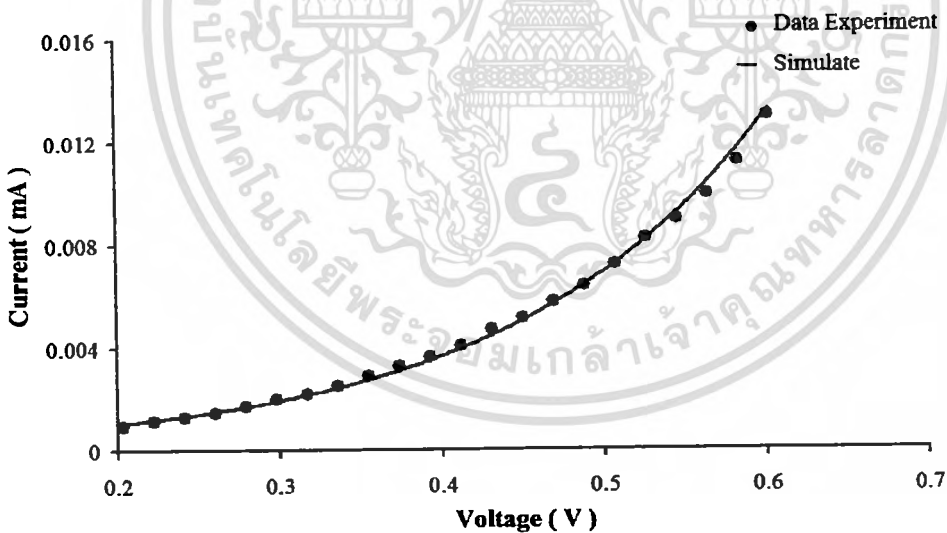


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

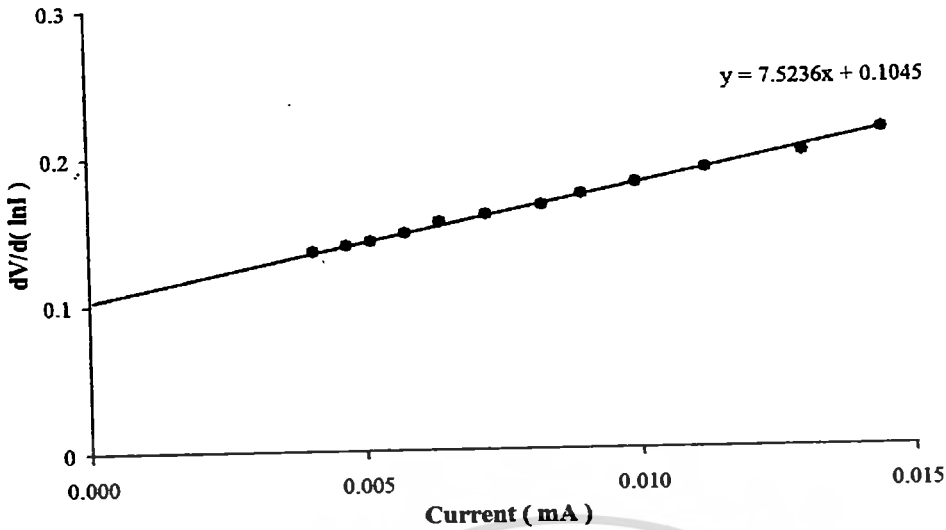


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\text{Current})$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

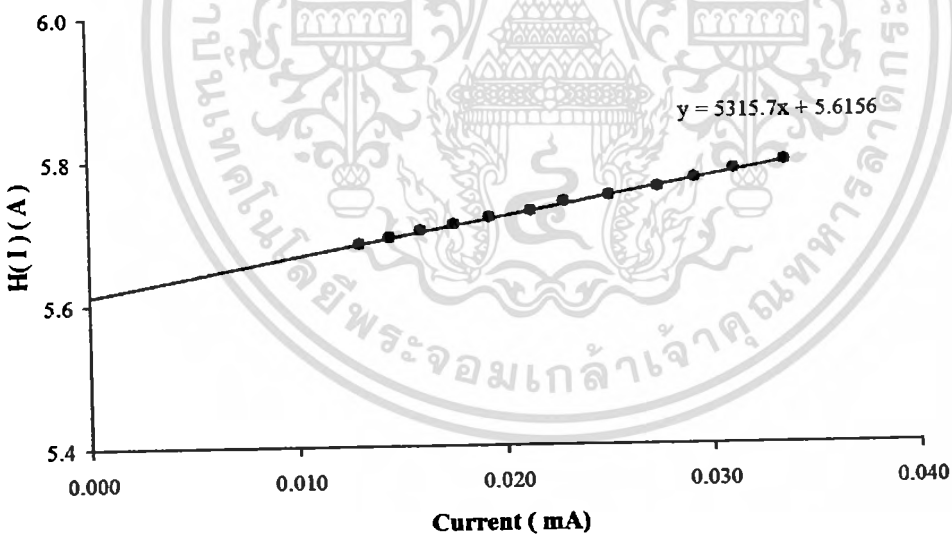


รูปที่ 4.24 แสดงการจำลองข้อมูลเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Temperature (K)	Saturation Current ( $I_s$ ) (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height ; $\phi_{BO}$ (eV)		Series Resistance; $R_s$ ( $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	dV/d(lnI)-I
300	$3.06 \times 10^{-7}$	6.20	4.04	1.37	1.39	$5.32 \times 10^3$	$7.52 \times 10^3$

กระแสไฟฟ้าที่ข้ามกำแพงศักย์ขอตักก็เมื่อให้แรงดันไบแอส  $V \geq 3kT/q$  จากกลไกของเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ จะได้ว่ากระแสที่ข้ามกำแพงศักย์เท่ากับ

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเท่ากับ มีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{BO}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ตัดแกน  $\ln I$  โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ  $\ln I_s$  และความชันของกราฟเท่ากับ  $nkT/q$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ได้ สามารถหา  $A^*$  ได้จากกราฟริชาร์ดสัน (Richardson plot) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2)$  กับ  $1000/T$  โดยจุดตัดแกน  $\ln I_s/T^2$  จะมีค่าเท่ากับ  $\ln(AA^*)$  และความชันของกราฟเส้นตรงที่ลากมีค่าเท่ากับ  $-\left(\frac{q\phi_{BO}}{1000k}\right)$  ถ้ารู้ค่า  $A^*$  ที่ค่อนข้างน่าเชื่อถือก็สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จากผลการทดลองค่า  $A^*$  เท่ากับ 15 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร-เคลวินยกกำลังสอง ( $A/cm^2 K^2$ ))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{A^* T^2}{J_s} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ  $J_s$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ

จากสมการที่ (4.3) สามารถที่จะคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ขณะไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่างๆได้ แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมาจากค่า  $A^*$  แต่อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนนี้ยังมีค่าน้อยกว่า  $kT/q$

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

ในความเป็นจริงแล้วรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มักจะมี ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \left( \frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right) - 1 \right\} \quad (4.5)$$

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^* T^2 \exp \left( -\frac{q\phi_{B0}}{kT} \right) \quad (4.6)$$

อาจจะเขียนสมการที่ (4.6) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \frac{q}{nkT} (V - IR_s) [1 - \exp(-qV/kT)] \right\} \quad (4.7)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของชวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า โดยจัดรูปสมการที่ (4.5) ได้เป็น

$$V = IR_s - n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (4.8)$$

หาอนุพันธ์ของ  $V$  เทียบกับ  $\ln I$  และจัดรูปใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.9)$$

และนิยามฟังก์ชัน  $H(I)$  มีค่าเท่ากับ

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.10)$$

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (4.11)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  จะได้ความชันมีค่าเท่ากับ  $R_s$  และจุดตัดแกน  $dV/d(\ln I)$  มีค่าเท่ากับ  $nkT/q$  ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ความชันของกราฟเท่ากับ  $R_s$  และจุดตัดแกน  $H(I)$  มีค่าเท่ากับ  $n\phi_B$

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

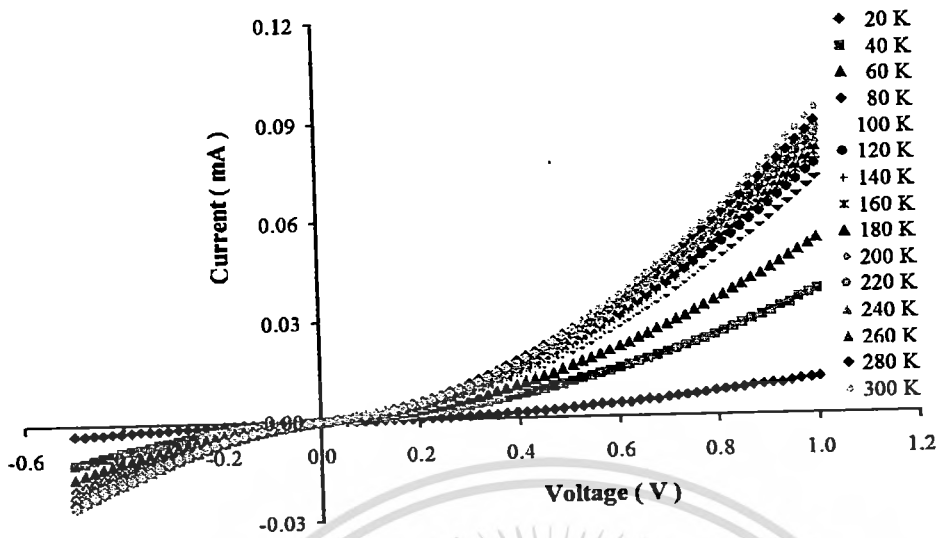
$$I = kV^m \quad (4.12)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

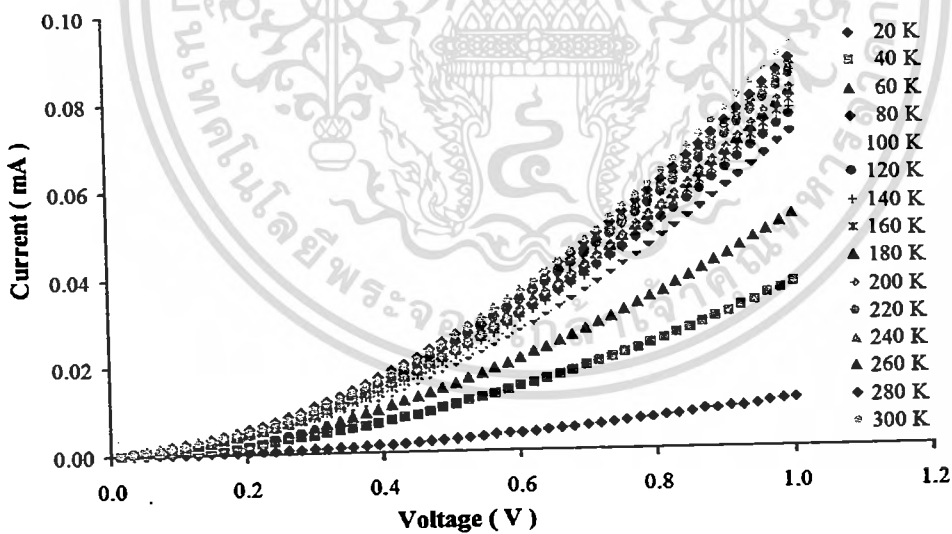
เมื่อ  $m$  คือความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไซค์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m$  เท่ากับ 2.42 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

**4.2.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ  
ต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  
CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สาร  
ตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450  
องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร  
ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที**

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยวัดค่า  
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ  
20 – 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสง พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามรอยต่อกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น  
ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.27 และค่าแรงดันจืดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิ  
ลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  
CdS/CdTe ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 1.0 โวลต์แสดงดังรูปที่ 4.28 พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  
 $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ขณะไม่มีการฉายแสงที่อุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน  
พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.164 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม  
ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.164 ถึง 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์  
มิออน-นิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิด  
กระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนน  
เชียลแสดงดังรูปที่ 4.29 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  แสดงดังรูปที่ 4.30 เพื่อหา  
ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธี  
ของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งจากกราฟนี้  
จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$   
กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.32 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูง  
กำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนนิกอิมิสชันและวิธีของชวง  
แสดงในตารางที่ 4.6 กลไกเทอร์มิออนนิกอิมิสชันและวิธีของชวงสามารถหาค่า  $E_{00}$  จาก  
ความสัมพันธ์  $n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)$  ค่า  $E_{00}$  ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการ  
รวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.143 และ 0.083 อิเล็กตรอน โวลต์ ตามลำดับ ดัง  
รูปที่ 4.33 จากรูปที่ 4.34 แสดงกราฟอาร์เรเนียสทำให้ทราบค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของกลไกเทอร์  
มิออนนิกอิมิสชัน ซึ่งมีค่าประมาณ 1.868 อิเล็กตรอน โวลต์

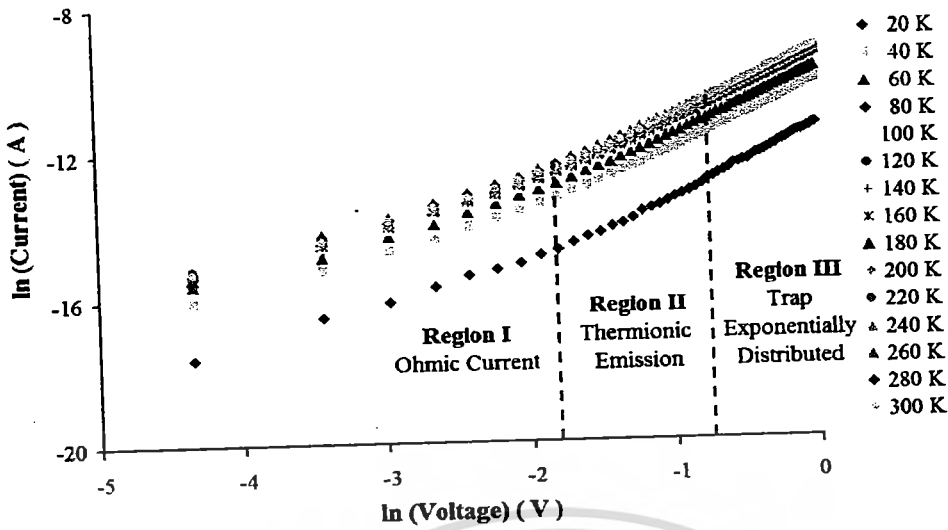


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

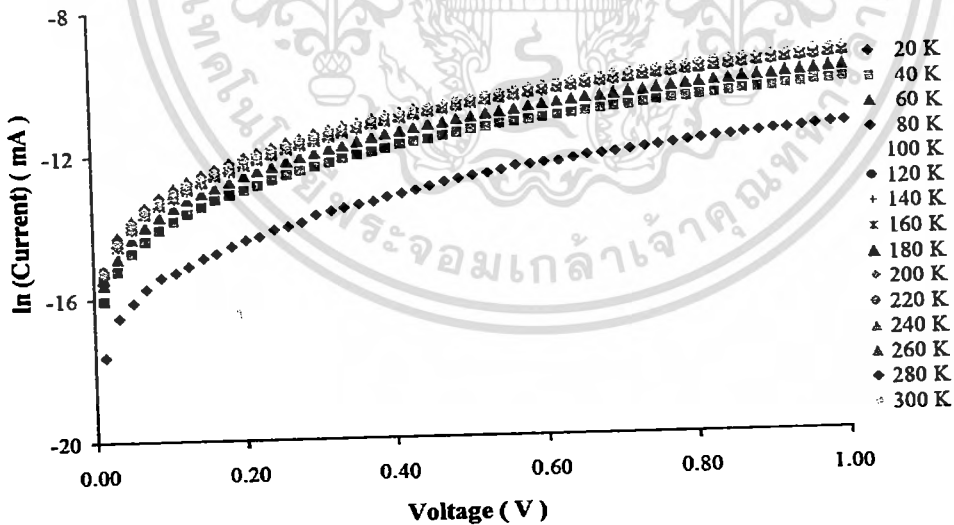


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็น 30 นาที ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

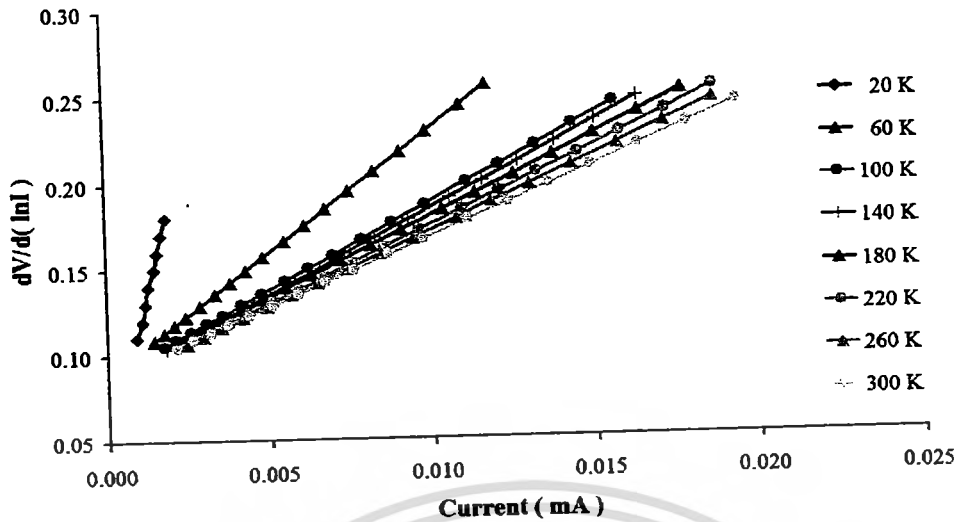


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟของกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

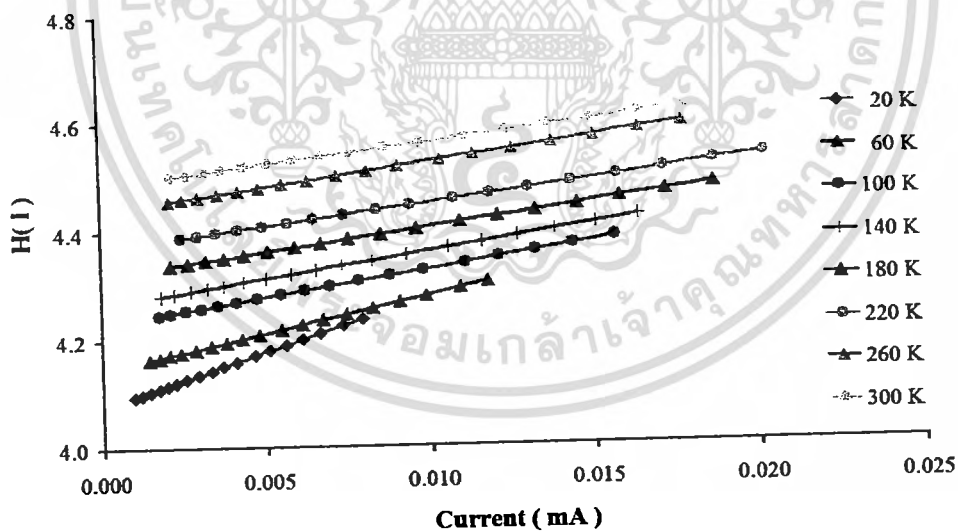


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln ( Current ) กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(I)$  กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ Current เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิก่อสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร

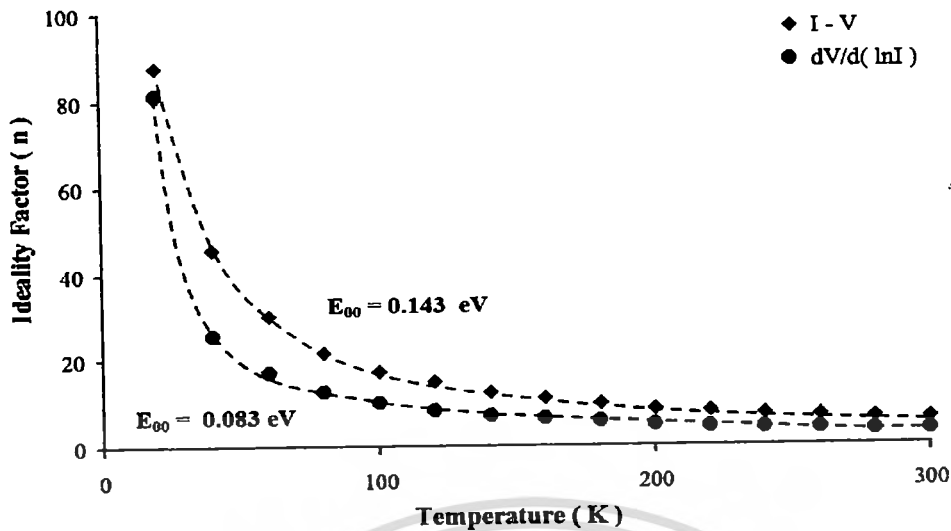
ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

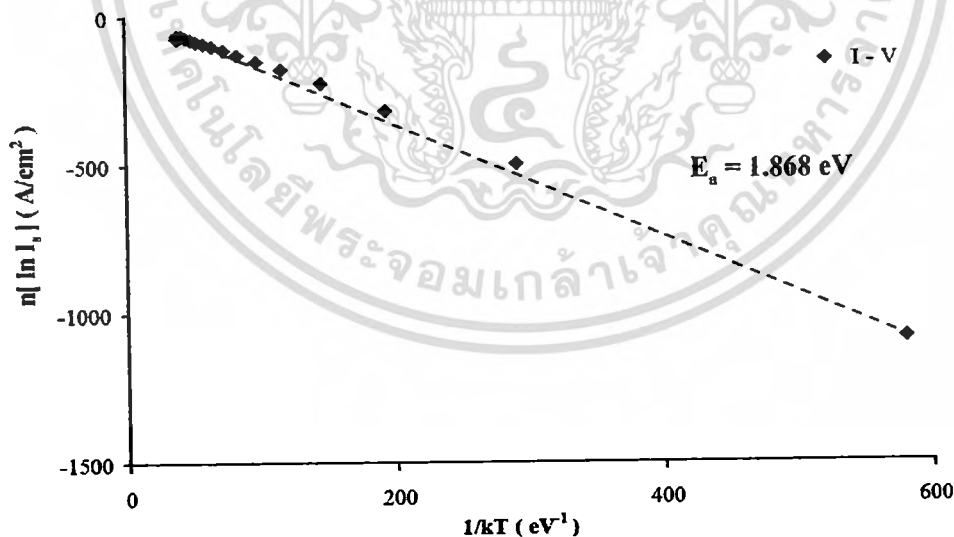
ตารางที่ 4.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20–300 เคลวินขณะที่ไม่มีการฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Temperature (K)	Saturation Current ( $I_s$ ) (A)	Ideality Factor ( $n$ )		Barrier Height ; $\phi_{BO}$ (eV)		Series Resistance; $R_s$ ( $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	dV/d(lnI)-I
20	$1.23 \times 10^{-7}$	87.71	81.39	0.08	0.08	$3.67 \times 10^4$	$4.40 \times 10^4$
40	$5.82 \times 10^{-7}$	45.65	25.62	0.16	0.17	$1.53 \times 10^4$	$2.15 \times 10^4$
60	$8.44 \times 10^{-7}$	30.17	17.08	0.25	0.25	$1.11 \times 10^4$	$1.41 \times 10^4$
80	$9.73 \times 10^{-7}$	21.68	12.74	0.34	0.34	$9.60 \times 10^3$	$1.03 \times 10^4$
100	$1.00 \times 10^{-6}$	17.31	10.19	0.42	0.42	$8.12 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$
120	$1.24 \times 10^{-6}$	15.09	8.34	0.51	0.51	$8.03 \times 10^3$	$1.00 \times 10^4$
140	$1.06 \times 10^{-6}$	12.39	7.13	0.60	0.60	$7.60 \times 10^3$	$9.82 \times 10^3$
160	$1.15 \times 10^{-6}$	11.00	6.48	0.69	0.67	$7.38 \times 10^3$	$9.22 \times 10^3$
180	$1.21 \times 10^{-6}$	9.85	5.67	0.78	0.79	$7.15 \times 10^3$	$9.20 \times 10^3$
200	$1.07 \times 10^{-6}$	8.57	4.96	0.87	0.90	$6.96 \times 10^3$	$9.17 \times 10^3$
220	$1.27 \times 10^{-6}$	8.02	4.48	0.95	0.97	$6.94 \times 10^3$	$8.96 \times 10^3$
240	$1.37 \times 10^{-6}$	7.44	4.13	1.04	1.06	$6.83 \times 10^3$	$8.78 \times 10^3$
260	$1.45 \times 10^{-6}$	6.94	3.82	1.13	1.15	$6.71 \times 10^3$	$8.74 \times 10^3$
280	$1.36 \times 10^{-6}$	6.35	3.50	1.23	1.25	$6.70 \times 10^3$	$8.56 \times 10^3$
300	$1.23 \times 10^{-6}$	5.74	3.37	1.32	1.34	$6.15 \times 10^3$	$8.08 \times 10^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

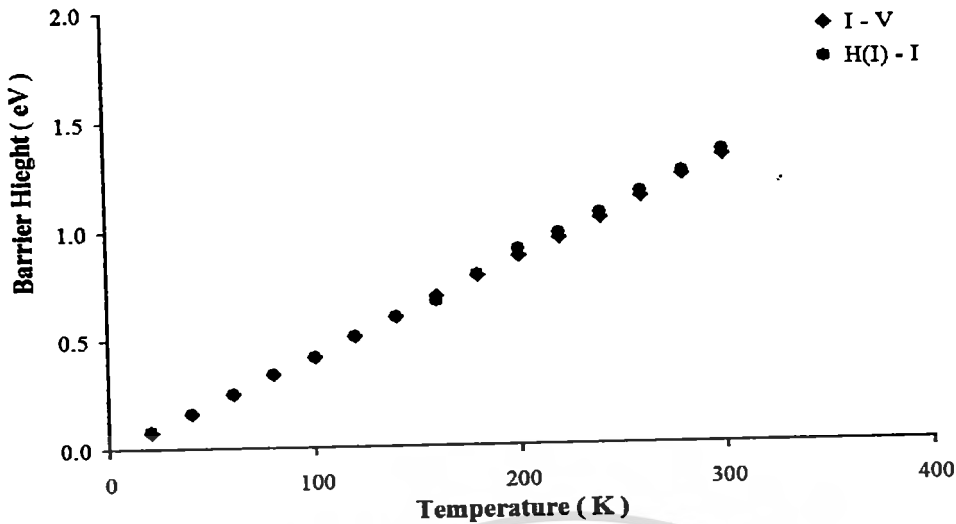


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากกลไกเทอร์มิ ออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $T(K)$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้ อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

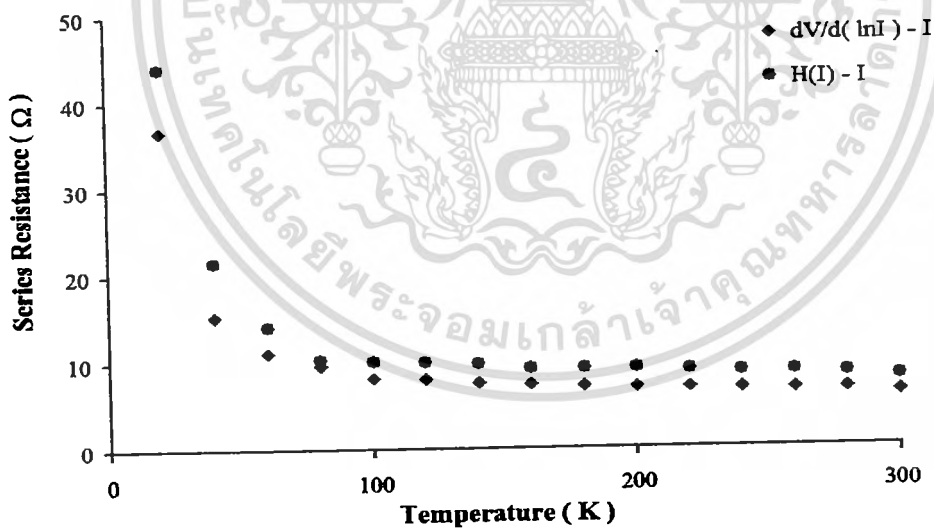


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n \ln I_0$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



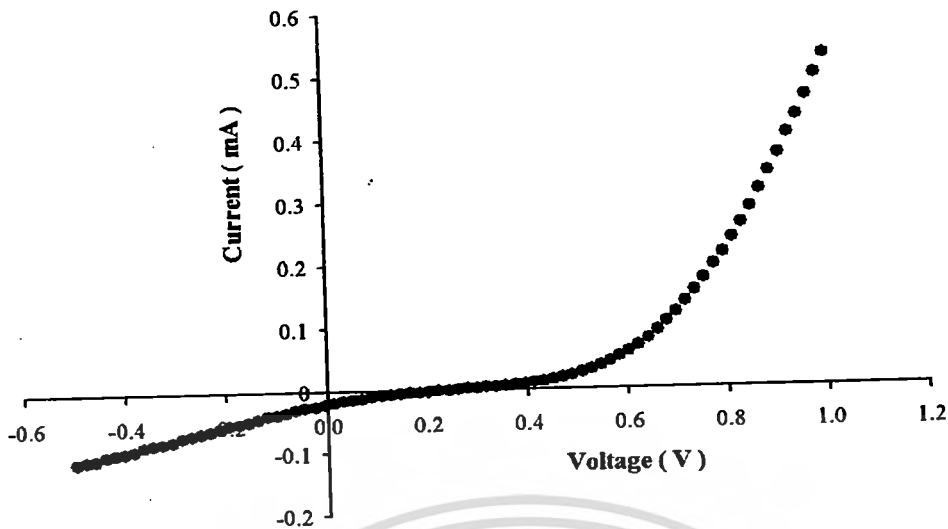
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงของรอยต่ออิวิรพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

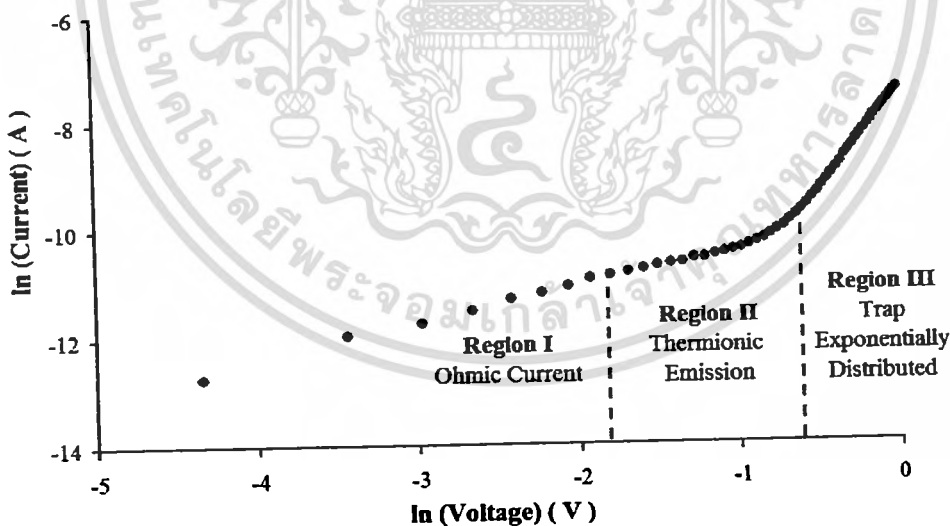
**4.2.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที**

การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงดังรูปที่ 4.37 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนไดโอด โดยมีแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.55 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.23 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.23 ถึง 0.57 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.57 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.38 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.39 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.40 ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันแสดงในตารางที่ 4.5

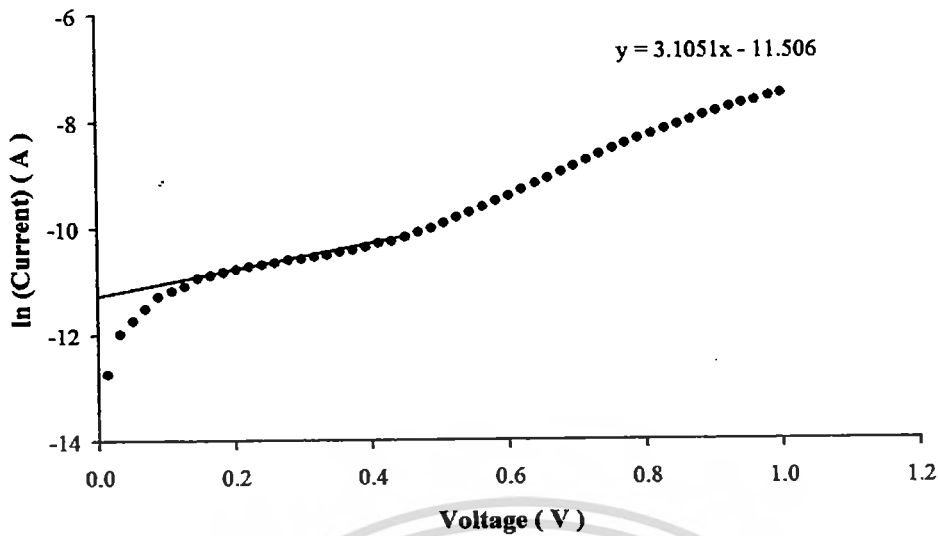


รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

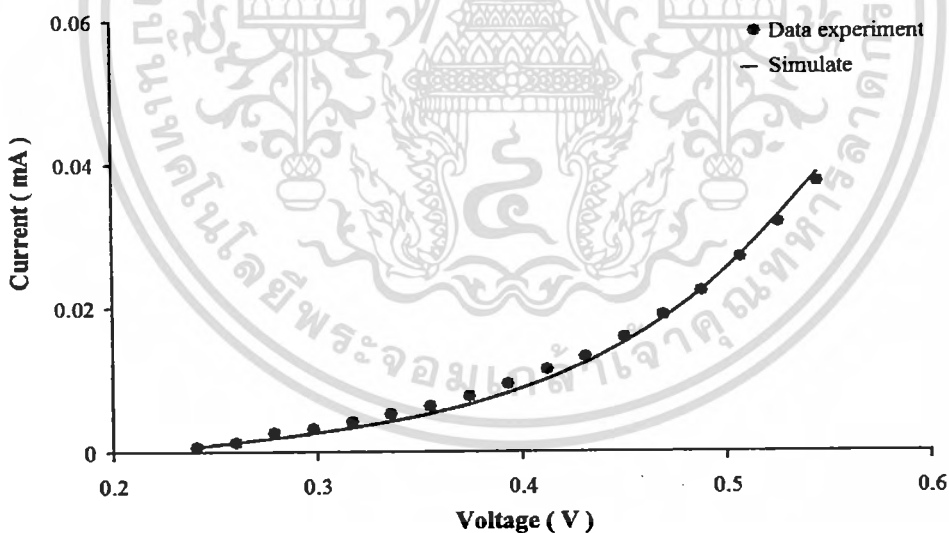


รูปที่ 4.38 แสดงกราฟของกลไกการนำไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\text{Current})$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.40 แสดงการจำลองข้อมูลเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{Bo}$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

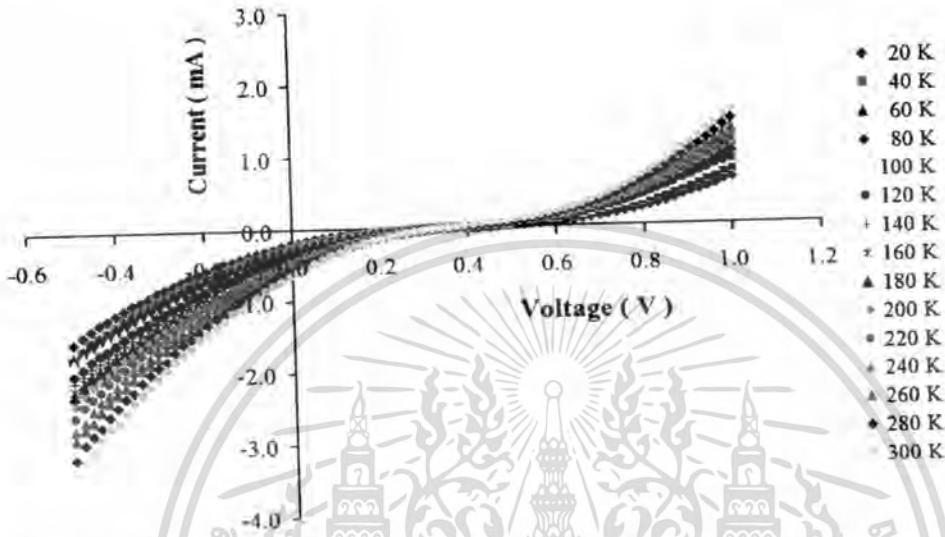
Temperature (K)	Saturation Current ( $I_s$ ) (A)	Ideality Factor (n)	Barrier Height ; $\phi_{Bo}$ (eV)
		I-V	I-V
300	$1.01 \times 10^{-5}$	12.00	1.08

4.2.4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 -300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 – 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสง พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามรอยต่อกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.41 และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิค่า 20 – 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.146 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.146 ถึง 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแสดงดังรูปที่ 4.42 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  แสดงดังรูปที่ 4.43 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันแสดงในตารางที่ 4.6 กลไก

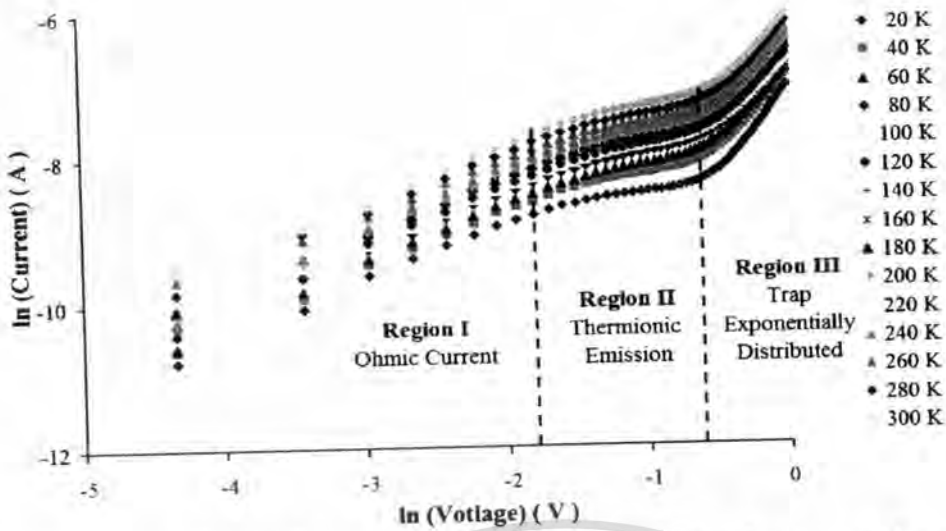
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์มิอ็อกซิมิสชันสามารถหาค่า  $E_{00}$  จากความสัมพันธ์  $n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)$  ค่า  $E_{00}$  ของกลไกการ  
 ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.770  
 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 4.44 จากรูปที่ 4.45 แสดงกราฟอาร์เรเนียสทำให้ทราบค่าพลังงาน  
 กระตุ้น ( $E_g$ ) ของกลไกเทอร์มิอ็อกซิมิสชัน ซึ่งมีค่าประมาณ 4.680 อิเล็กตรอนโวลต์

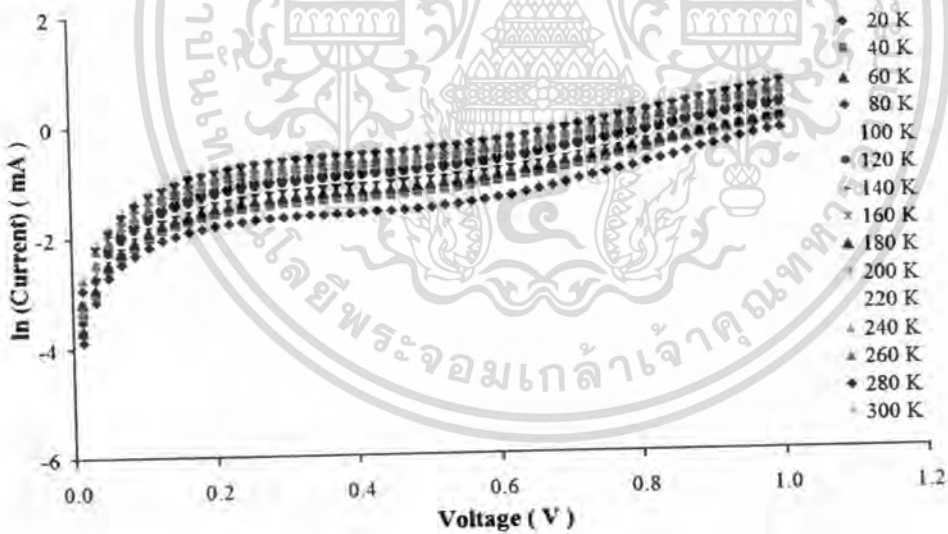


รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า  
 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่ง  
 เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550  
 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสาร  
 ตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงกราฟลอการิทึมของกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



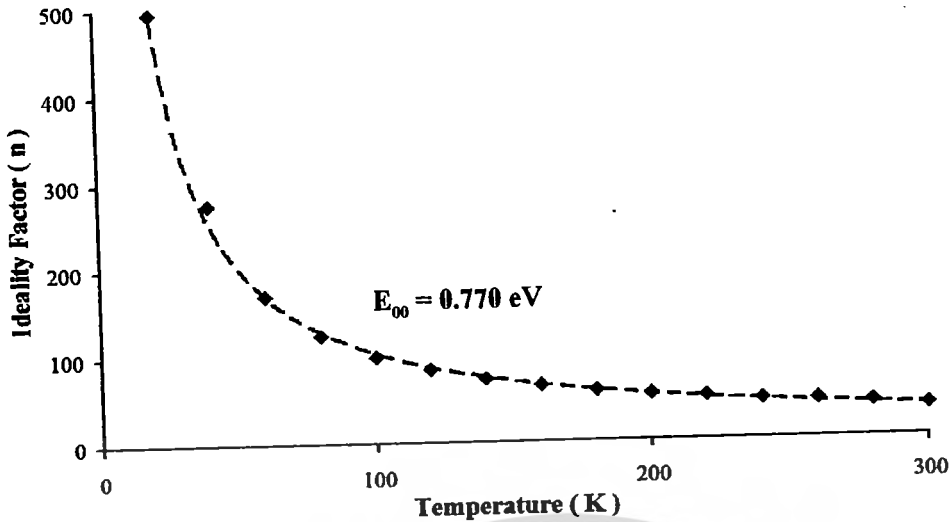
รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\text{Current})$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

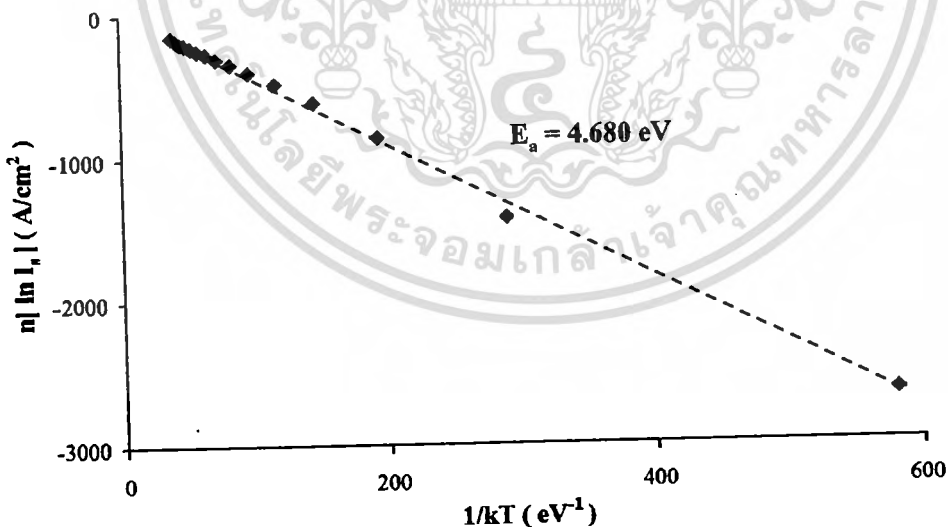
ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{BO}$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Temperature ( K )	Saturation Current ( $I_s$ ) ( $\times 10^{-4}$ A )	Ideality Factor ( $n$ )	Barrier Height ; $\phi_{BO}$ ( eV )
		I-V	I-V
20	1.47	495	0.06
40	1.75	275	0.12
60	1.92	170	0.18
80	2.22	124	0.25
100	2.42	99	0.32
120	2.49	84	0.38
140	2.70	73	0.45
160	2.78	65	0.52
180	2.80	58	0.58
200	2.98	53	0.65
220	3.19	49	0.72
240	3.31	45	0.79
260	3.63	44	0.85
280	3.94	40	0.92
300	4.36	36	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกมิสชันเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n \ln I_p$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Temperature (K)	$J_{sc}$ ( $\times 10^{-3}$ A/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	F.F.	$\eta$ (%)	$R_{sh}$ ( $\times 10^3 \Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )
20	6.42	0.355	0.24	1.22	10.00	769
40	8.26	0.355	0.25	1.80	5.00	667
60	9.33	0.355	0.24	1.96	3.33	625
80	10.90	0.355	0.23	2.37	2.50	556
100	11.10	0.355	0.23	2.45	2.27	526
120	11.20	0.355	0.24	2.51	2.12	500
140	11.80	0.355	0.25	2.60	2.08	476
160	12.10	0.355	0.25	2.68	2.00	455
180	12.50	0.355	0.25	2.82	1.67	435
200	13.10	0.355	0.24	3.01	1.61	385
220	13.60	0.355	0.24	3.14	1.43	370
240	14.60	0.355	0.24	3.21	1.35	382
260	14.90	0.355	0.26	3.57	1.29	344
280	16.80	0.355	0.24	4.03	1.25	333
300	20.70	0.355	0.22	4.97	1.11	303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_A A^2} \right) \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} V \right) \quad (4.14)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า  $\epsilon_s$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ ส่วน  $A$  คือ พื้นที่ของรอยต่อมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นของโฮล ( $N_A$ ) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า คือ

$$\text{slope} = \frac{2}{q\epsilon_s N_A A^2} \quad (4.15)$$

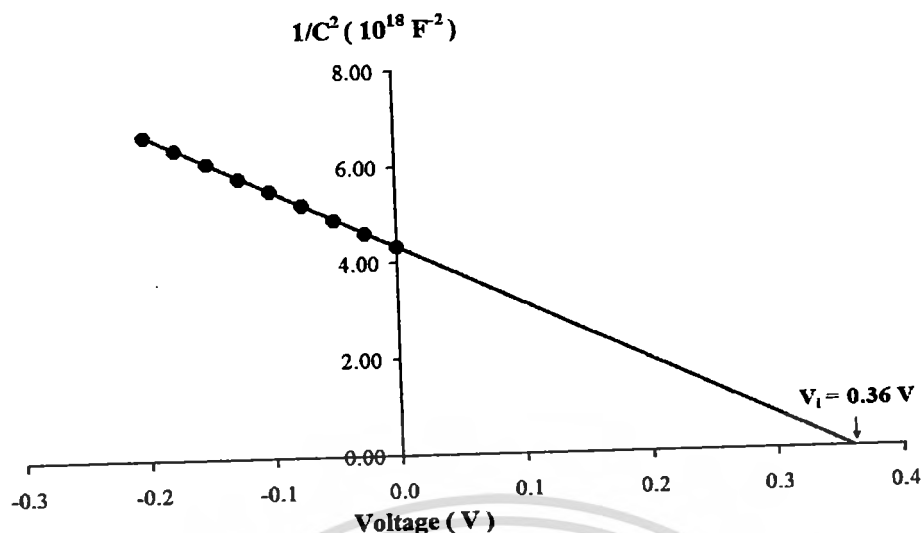
$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{slope})} \quad (4.16)$$

เมื่อค่าคงที่ไดโอดิกทริกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ เท่ากับ 9.4 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จุดตัดแกนนอนหรือแกนแรงดันไฟฟ้า ( $V_i$ ) คือ

$$V_i = V_{bi} - \frac{kT}{q} \quad (4.17)$$

แล้วแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential,  $V_{bi}$ ) คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.18)$$



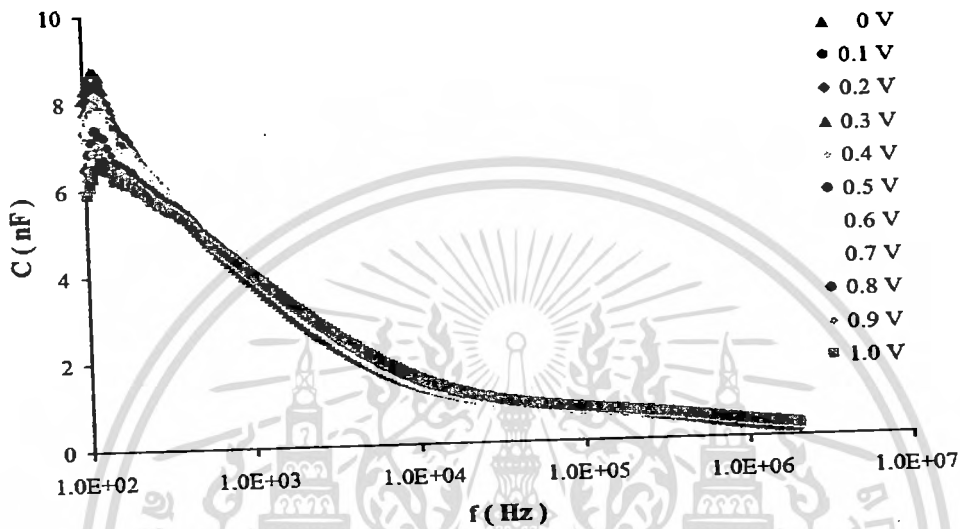
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

Temperature (K)	$V_i$ (V)	$V_{bi}$ (V)	$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
300	0.36	0.38	$1.27 \times 10^{15}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 – 300 เคลวิน ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ในช่วงความถี่ต่ำ ความจุไฟฟ้าเท่ากับ

$$C_{\max} = C_{sc} + C_{ss} \tag{4.19}$$

ในช่วงความถี่สูง ความจุไฟฟ้าเท่ากับ

$$C_{\min} = C_{sc} \tag{4.20}$$

เมื่อ  $C_{sc}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณประจุค้าง (space charge region)  
 $C_{ss}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณสถานะผิวรอยต่อ (surface state)

นำสมการที่ (4.19) ลบด้วยสมการที่ (4.20) จะได้

$$C = C_{\max} - C_{\min} \quad (4.21)$$

$$C = C_{ss} \quad (4.22)$$

กำหนดให้

$$C_{ss} = AqN_{ss} \frac{\arctan(\omega\tau)}{\omega\tau} \quad (4.23)$$

ในกรณีที่  $\omega\tau$  มีค่าน้อยๆ จะได้ว่า

$$C_{ss} = AqN_{ss} \quad (4.24)$$

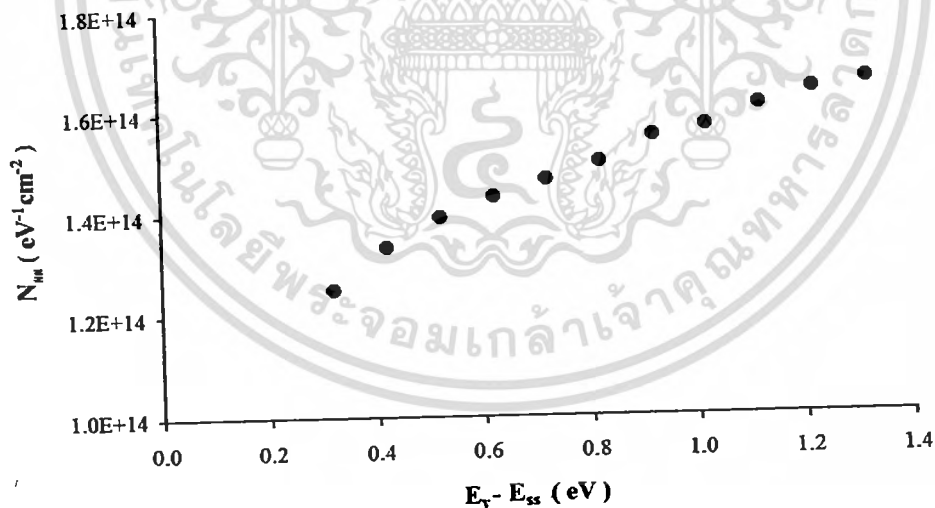
ความหนาแน่นของสถานะผิวรอยต่อ ( $N_{ss}$ ) เท่ากับ

$$N_{ss} = \frac{C_{ss}}{qA} \quad (4.25)$$

และพลังงานของสถานะผิวรอยต่อ ( $E_{ss}$ ) มีค่าเท่ากับ

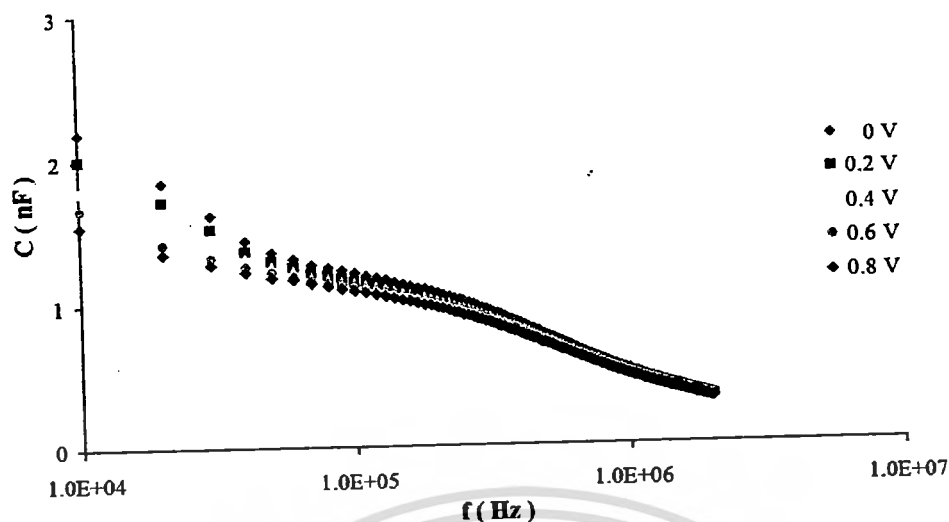
$$E_v - E_{ss} = q(\phi_{BO} - V) \quad (4.26)$$

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสถานะผิวรอยต่อกับพลังงานของสถานะผิวรอยต่อ พบว่า เมื่อพลังงานของสถานะผิวรอยต่อเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของสถานะผิวรอยต่อเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.48

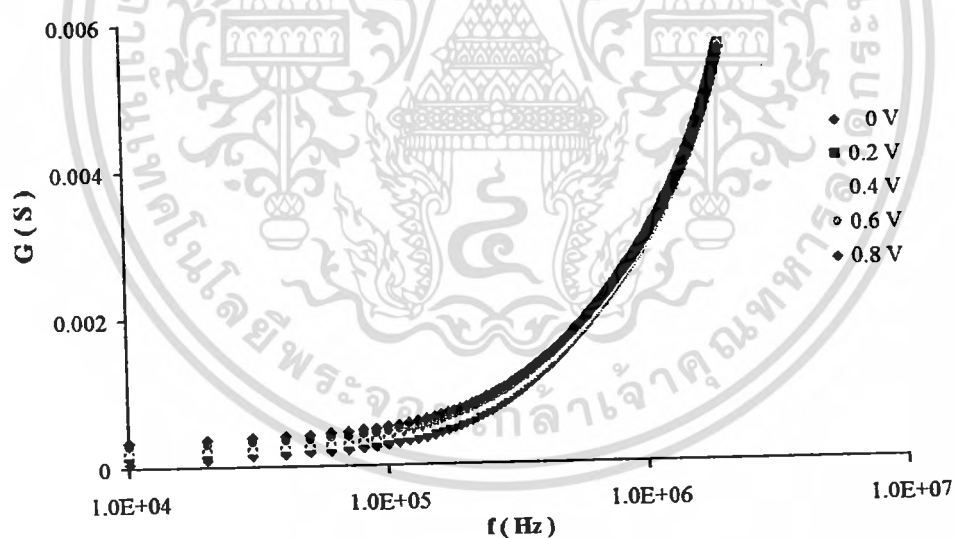


รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะผิวรอยต่อกับพลังงานของสถานะผิวรอยต่อ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

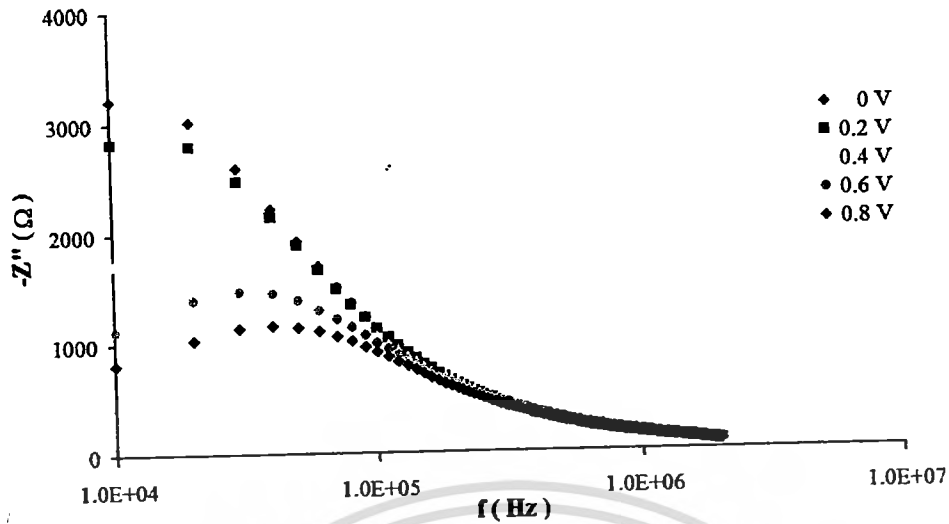


รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

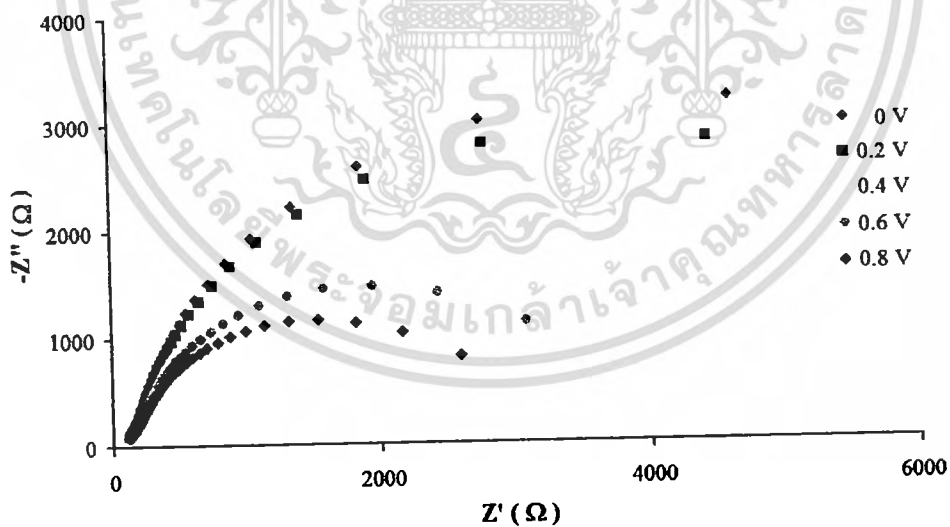


รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

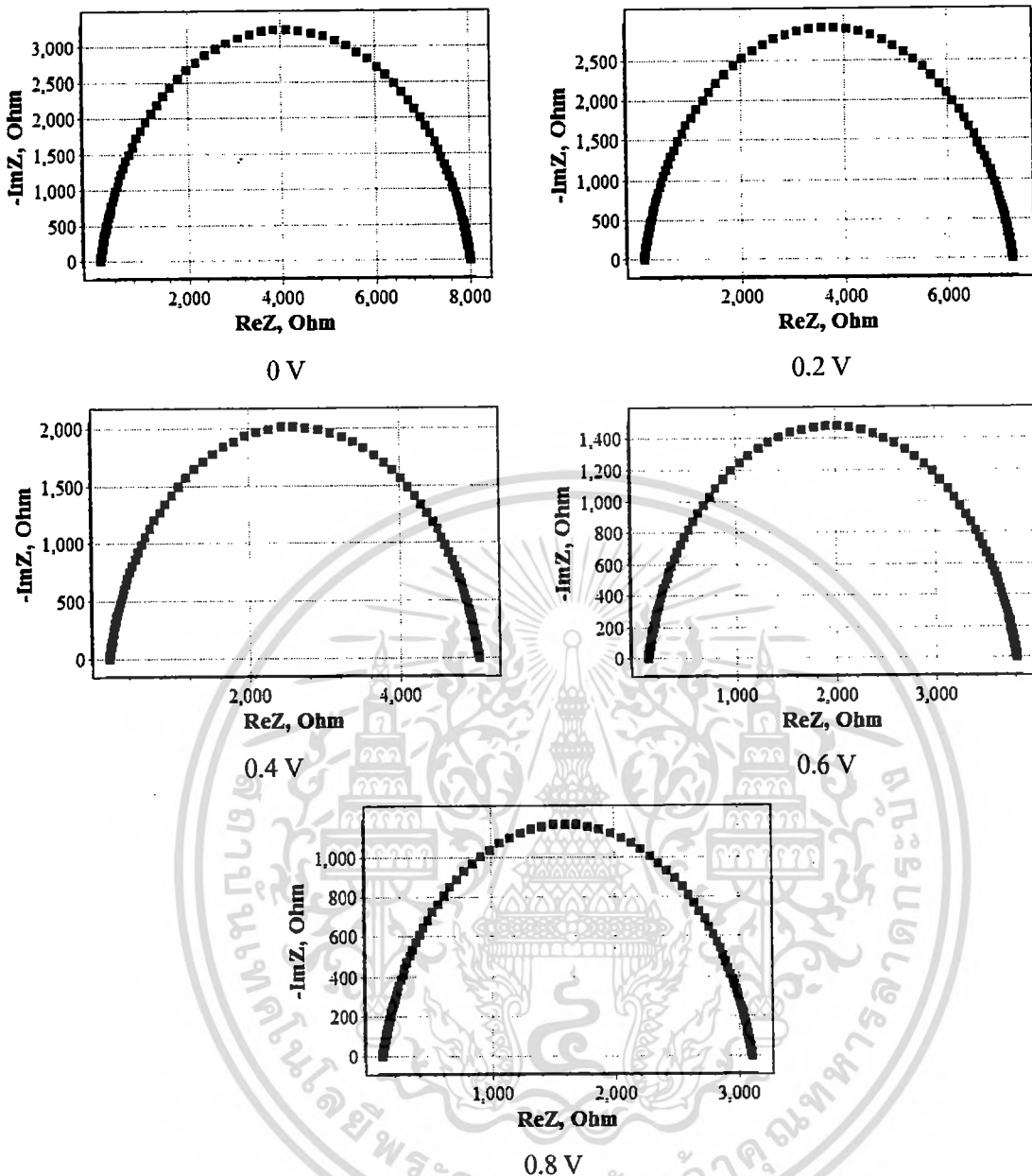


รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

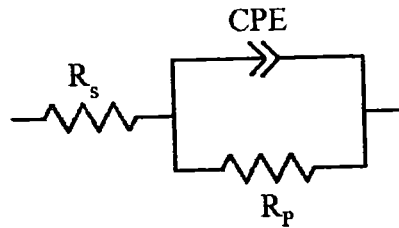


รูปที่ 4.52 แสดงอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 160 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. ให้ความสำคัญสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.53** แสดงการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิ 160 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่น ฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที



รูปที่ 4.54 วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

ตารางที่ 4.11 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

T (K)	Bias (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	P ( $\times 10^{-9} \text{ S}\cdot\text{s}^{-1/n}$ )	n	C (nF)	$\tau$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}$ )	$\omega_{max}$ ( $\times 10^4 \text{ s}^{-1}$ )	$f_{max}$ (Hz)		$\omega_{max} \tau$
									Calculate	Simulate	
20	0.0	121.89	7826	5.48	0.89	1.56	12.23	8.18	13020	13156	1.01
	0.2	122.17	7183	5.42	0.89	1.53	11.01	9.08	14465	14968	1.03
	0.4	122.33	5058	5.34	0.89	1.45	7.35	13.60	21650	22047	1.02
	0.6	122.05	3852	5.39	0.89	1.41	5.41	18.48	29424	30443	1.03
	0.8	120.27	3165	5.87	0.88	1.37	4.35	22.99	36610	36946	1.01
40	0.0	122.16	7988	5.42	0.89	1.56	12.50	8.00	12739	12945	1.02
	0.2	122.52	7223	5.26	0.89	1.52	11.00	9.09	14471	14797	1.02
	0.4	122.14	5101	5.33	0.89	1.46	7.43	13.46	21438	20669	0.96
	0.6	121.21	3880	5.57	0.89	1.41	5.47	18.27	29096	30867	1.06
	0.8	120.21	3158	5.86	0.88	1.37	4.34	23.04	36687	35282	0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

T (K)	Bias (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	P ( $\times 10^9 \text{ S} \cdot \text{s}^{-1/2}$ )	n	C (nF)	$\tau$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}$ )	$\omega_{\max}$ ( $\times 10^4 \text{ s}^{-1}$ )	$f_{\max}$ (Hz)		$\omega_{\max} \tau$
									Calculate	Simulate	
60	0.0	122.16	7981	5.15	0.89	1.48	11.80	8.48	13497	12945	0.96
	0.2	122.21	7213	5.34	0.89	1.53	11.04	9.06	14427	14797	1.03
	0.4	121.79	5056	5.39	0.89	1.46	7.38	13.55	21574	22098	1.02
	0.6	120.81	3868	5.66	0.89	1.41	5.47	18.28	29110	28871	0.99
	0.8	119.74	3156	5.96	0.88	1.38	4.36	22.96	36555	37720	1.03
80	0.0	121.32	8033	5.58	0.89	1.58	12.69	7.88	12544	12945	1.03
	0.2	121.56	7208	5.49	0.89	1.54	11.12	8.99	14319	14797	1.03
	0.4	121.29	5051	5.54	0.89	1.47	7.43	13.46	21428	22098	1.03
	0.6	120.09	3852	5.85	0.88	1.43	5.50	18.19	28967	28871	1.00
	0.8	119.07	3138	6.14	0.88	1.39	4.36	22.95	36549	37720	1.03
100	0.0	120.89	7932	5.68	0.89	1.59	12.59	7.94	12646	12945	1.02
	0.2	120.72	7174	5.66	0.89	1.56	11.16	8.96	14268	14007	0.98
	0.4	119.94	4935	5.97	0.88	1.49	7.37	13.56	21595	20359	0.94
	0.6	117.39	3751	6.61	0.88	1.46	5.47	18.30	29136	27460	0.94
	0.8	115.00	3023	7.36	0.87	1.42	4.31	23.22	36975	37037	1.00
120	0.0	116.51	7947	6.15	0.88	1.61	12.83	7.79	12408	12976	1.05
	0.2	114.99	7174	6.32	0.88	1.59	11.43	8.75	13937	14624	1.05
	0.4	115.50	4955	6.51	0.88	1.52	7.53	13.28	21145	22223	1.05
	0.6	95.40	3720	7.46	0.87	1.47	5.48	18.24	29040	29964	1.03
	0.8	80.00	3021	9.34	0.85	1.45	4.37	22.88	36430	38057	1.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

T (K)	Bias (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	P ( $\times 10^9 \text{ S}\cdot\text{s}^{-1\text{th}}$ )	n	C (nF)	$\tau$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}$ )	$\omega_{\text{max}}$ ( $\times 10^4 \text{ s}^{-1}$ )	$f_{\text{max}}$ (Hz)		$\omega_{\text{max}}\tau$
									Calculate	Simulate	
140	0.0	115.63	7920	6.31	0.88	1.63	12.88	7.76	12361	12223	0.99
	0.2	114.77	7229	6.53	0.88	1.61	11.61	8.62	13720	13776	1.00
	0.4	114.74	4966	6.79	0.87	1.53	7.60	13.15	20946	22223	1.06
	0.6	114.78	3685	7.27	0.87	1.49	5.49	18.21	28995	29964	1.03
	0.8	80.00	3020	9.71	0.85	1.46	4.40	22.71	36158	38057	1.05
160	0.0	114.69	7897	6.62	0.88	1.64	12.98	7.70	12269	12223	1.00
	0.2	113.89	7110	6.69	0.88	1.62	11.48	8.71	13865	13776	0.99
	0.4	113.97	4927	7.00	0.87	1.54	7.59	13.18	20981	22223	1.06
	0.6	95.00	3688	7.97	0.86	1.49	5.50	18.18	28942	28225	0.98
	0.8	83.00	3000	10.26	0.84	1.47	4.42	22.63	36040	38057	1.06
180	0.0	60.12	5325	54.47	0.73	2.85	15.19	6.58	10482	10705	1.02
	0.2	73.06	5180	51.36	0.74	2.81	14.54	6.88	10949	11099	1.01
	0.4	60.21	4544	55.36	0.73	2.70	12.29	8.14	12961	13630	1.05
	0.6	60.84	4076	62.50	0.72	2.70	11.02	9.07	14444	14773	1.02
	0.8	60.49	3577	79.53	0.71	2.76	9.87	10.13	16127	14773	0.92
200	0.0	68.04	5251	46.34	0.75	2.76	14.47	6.91	11005	10852	0.99
	0.2	74.31	5291	49.33	0.74	2.78	14.69	6.81	10842	10852	1.00
	0.4	76.24	4581	48.59	0.74	2.63	12.07	8.29	13197	13871	1.05
	0.6	70.94	4106	65.35	0.72	2.81	11.52	8.68	13822	13871	1.00
	0.8	72.27	3581	76.94	0.71	2.81	10.06	9.94	15829	16337	1.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

T (K)	Bias (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	P ( $\times 10^9 \text{ S}\cdot\text{s}^{-1\text{m}}$ )	n	C (nF)	$\tau$ ( $\times 10^{-9} \text{ s}$ )	$\omega_{\text{max}}$ ( $\times 10^4 \text{ s}^{-1}$ )	$f_{\text{max}}$ (Hz)		$\omega_{\text{max}}\tau$
									Calculate	Simulate	
220	0.0	53.06	5273	5.01	0.74	2.82	14.85	6.74	10726	10000	0.93
	0.2	60.84	5097	5.04	0.74	2.78	14.17	7.06	11239	10852	0.97
	0.4	65.69	4547	5.63	0.73	2.74	12.46	8.02	12778	12781	1.00
	0.6	71.10	4043	6.87	0.72	2.79	11.29	8.86	14109	15053	1.07
	0.8	60.77	3595	9.57	0.70	2.92	10.50	9.52	15160	15053	0.99
240	0.0	73.12	5066	5.48	0.74	2.91	14.73	6.79	10812	10852	1.00
	0.2	71.64	5052	5.85	0.73	2.92	14.73	6.79	10810	10852	1.00
	0.4	71.00	4442	6.37	0.72	2.84	12.61	7.93	12626	12781	1.01
	0.6	65.66	4012	8.87	0.70	3.00	12.06	8.29	13208	13697	1.04
	0.8	72.57	5025	5.92	0.73	2.96	14.87	6.73	10710	10553	0.99
260	0.0	50.91	5066	6.69	0.72	3.14	15.92	6.28	10000	10553	1.06
	0.2	60.94	4838	6.54	0.72	2.99	14.47	6.91	11003	11511	1.05
	0.4	50.59	4381	7.89	0.71	3.03	13.30	7.52	11977	11511	0.96
	0.6	66.04	3860	9.63	0.70	3.08	11.88	8.42	13404	13697	1.02
	0.8	62.15	3524	14.58	0.67	3.35	11.79	8.48	13500	13697	1.01
280	0.0	65.02	4853	8.41	0.71	3.27	15.87	6.30	10034	10553	1.05
	0.2	63.77	4733	9.00	0.70	3.29	15.59	6.42	10216	10553	1.03
	0.4	58.62	4149	10.74	0.69	3.31	13.72	7.29	11607	11511	0.99
	0.6	50.25	3787	16.98	0.66	3.69	13.99	7.15	11384	11960	1.05
	0.8	49.63	3381	25.74	0.63	4.05	13.69	7.30	11631	10908	0.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า 20 - 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่ระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

T (K)	Bias (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	P ( $\times 10^{-9} \text{ S}\cdot\text{s}^{-1/n}$ )	n	C (nF)	$\tau$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}$ )	$\omega_{max}$ ( $\times 10^4 \text{ s}^{-1}$ )	$f_{max}$ (Hz)		$\omega_{max} \tau$
									Calculate	Simulate	
300	0.0	51.00	4664	11.10	0.69	3.53	16.48	6.07	9662	9948.5	1.03
	0.2	48.98	4578	11.88	0.68	3.58	16.40	6.10	9712	9948.5	1.02
	0.4	74.62	3394	7.72	0.72	2.90	9.85	10.16	16172	15765	0.97
	0.6	68.09	3010	11.40	0.69	3.09	9.29	10.76	17134	17285	1.01
	0.8	47.19	3278	33.00	0.61	4.47	14.67	6.82	10857	11647	1.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ และรอยต่ออวิวิหพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางแต่ละชนิด การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบเพื่อเป็นแนวทางในการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิหพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิหพันธ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu

#### ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาดำ ผิวหน้าฟิล์มบางเรียบสม่ำเสมอ

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที ผลปรากฏพบว่าระนาบโครงสร้างผลึก (111)เด่นชัดที่สุดที่มุม  $2\theta \approx 23.75$  องศา ระนาบ (220) ที่มุม  $2\theta \approx 39.31$  องศา และระนาบ (311) ที่มุม  $2\theta \approx 46.43$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบซิงค์เบลนด์ และความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มากขึ้นส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ

ไม่วารณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที เกรนมีขนาดประมาณ 3.22, 6.45, 8.16 และ 1.66 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ผลการศึกษการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีขอบดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตร และมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.490, 1.485, 1.480 และ 1.495 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

#### รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีนซึ่งมีลักษณะสีเหลืองส้ม โดยแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบทั้งสองหน้าของชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีนแล้วทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน มีลักษณะสีเทาดำ ผิวหน้าฟิล์มเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดี ไม่หลุดร่อนง่าย โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}$

การศึกษการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์สารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ผลปรากฏพบว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีระนาบโครงสร้างผลึก (111) เค้นชัดที่สุดที่มุม  $2\theta \approx 23.75$  องศา ระนาบ(220) ที่มุม  $2\theta \approx 39.31$  องศา ระนาบ(311) ที่มุม  $2\theta \approx 46.43$  องศา ระนาบ(331) ที่มุม  $2\theta \approx 62.35$  องศา ระนาบ(422) ที่มุม  $2\theta \approx 71.21$  องศา และระนาบ(511) ที่มุม  $2\theta \approx 76.30$  องศา เมื่อนำระนาบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็น การบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบซิงค์เบลนด์

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบลงบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เกรนมีขนาดประมาณ 0.30, 0.11 และ 27.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากภาพตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe พบว่า อะตอมของธาตุ S จะแพร่เข้าไปในเนื้อสารแคดเมียมเทลลูไรด์ ส่วนอะตอมของธาตุ Te จะแพร่เข้าไปในเนื้อสารแคดเมียมซัลไฟด์เกิดเป็นชั้นของอัตรอดยค์ของสารประกอบ  $CdS_xTe_{1-x}$

ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.95 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผ่านแสงในย่าน 300 นาโนเมตร ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบลงบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.40 อิเล็กตรอนโวลต์ ดูดกลืนแสงในย่านตามมองเห็นและส่งผ่านแสงในย่าน 470 นาโนเมตร เป็นต้นไป และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผ่านแสง ในย่าน 590 นาโนเมตร เป็นต้นไป

#### สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที มีความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแผ่นฟิล์มบางและสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร มีค่าสูงแต่เมื่อมีการฉายแสง ค่าความต้านทานเหล่านี้จะลดลง

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะไม่มีการฉายแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนไดโอด โดยมีแรงดันจิกเริ่มอยู่ที่ 0.55 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ย้อนกลับ  $3.06 \times 10^{-7}$  แอมแปร์ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ที่หาได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันกับวิธีของ ชวงคือ 6.20 และ 4.04 ตามลำดับ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่หาได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันกับวิธีของชวงคือ 1.37 และ 1.39 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่หาได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันกับวิธีของชวงคือ  $5.32 \times 10^3$  และ  $7.52 \times 10^3$  โอห์ม ตามลำดับ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสง พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามรอยต่อกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 1.0 โวลต์ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.164 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.164 ถึง 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากความชันของกราฟ  $\ln I$  กับ  $V$  มีค่าเท่ากับ 2.42 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ย้อนกลับ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้อ่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้อ่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันและวิธีของชวง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของกระแสอิมิตซ์ย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดมีค่าลดลง กลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันและวิธีของชวงสามารถหาค่า  $E_{\infty}$  จากความสัมพันธ์  $n = \frac{E_{\infty}}{kT} \coth\left(\frac{E_{\infty}}{kT}\right)$  ค่า  $E_{\infty}$  ของกลไกการขุดควมูกทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.143 และ 0.083 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ จากกราฟอาร์เรเนียสทำให้ทราบค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชัน ซึ่งมีค่าประมาณ 1.868 อิเล็กตรอนโวลต์

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนไดโอด โดยมีแรงดันจิกเริ่มอยู่ที่ 0.55

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ย้อนกลับ  $1.01 \times 10^{-5}$  แอมแปร์ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตีที่หาได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันคือ 12.00 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่หาได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชันคือ 1.08 อิเล็กตรอนโวลต์

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ภายใต้การฉายแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.146 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.146 - 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.545 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของกระแสอิมิตซ์ย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตีของไดโอดมีค่าลดลง ค่า  $E_{\infty}$  ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.770 อิเล็กตรอนโวลต์ จากกราฟอาร์เรเนียสทำให้ทราบค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตซ์ชัน ซึ่งมีค่าประมาณ 4.680 อิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นถึง 4.9 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จากการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อเท่ากับ 0.36 โวลต์ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ  $1.27 \times 10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu

ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที ทำการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยไปอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.54 จากแบบจำลองอิมพีแดนซ์เฟสคงตัว อิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Z_{CPE} = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $0 < n < 1$  และ  $P$  เป็นพารามิเตอร์ที่มีหน่วยเป็น  $S \cdot s^{-1/n}$

ค่าความจุของรอยต่อ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$C = \frac{(RP)^{1/n}}{R} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\tau = (RP)^{1/n} \quad (5.3)$

ซึ่งจะได้ว่า  $\tau = RC \quad (5.4)$

จะได้ค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานชั้น ( $R_{sh}$ ) พบว่ามีความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) แนวโน้มคงที่และความต้านทานชั้น ( $R_{sh}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อไบอัสแรงดันเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.11

### ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์ในหลายด้านคือ ความพยายามและอดทนในการศึกษาค้นคว้ากับผลงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ (Photonics Material Research Laboratory : PMRL) สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงซึ่งเรามีข้อจำกัดในด้านระบบคือ ความดันต่ำระบบสามารถทำได้ในระดับ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์และอุณหภูมิของระบบสามารถรองรับได้ไม่เกิน 600 องศาเซลเซียสซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบที่ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด ทำการเตรียมที่ความดันที่ต่ำกว่าและอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามหาข้อมูลจนได้สมมติฐานว่าระบบของเราจะสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจึงทดลองเตรียมฟิล์มบางโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างถูกเตรียมภายใต้ช่วงเวลาข้างขึ้นเท่ากับ 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ ปรากฏว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ด้วยความหนาและขนาดเกรนต่างกัน ผู้วิจัยจึงสร้างขอบเขตของงานวิจัยคือ ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu โดยมีทินออกไซด์เจือฟลูออรีนเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้า โดยเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากกระบวนการอบสารละลายเคมีบนชั้นทินออกไซด์เจือฟลูออรีน หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับระยะ 6 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง 30 นาที

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ค่า Strain และขนาดของเกรนจากค่า FWHM ของพีคการเลี้ยวเบนระนาบ (111)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM

ผลการศึกษาคการส่งผ่านแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน

การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังกระทำโดยการเคลือบฟิล์มบาง ZnTe ลงบนฟิล์มบาง CdTe และเจือด้วยอะตอม Cu โดยการจุ่มในสารละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงนำไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที ให้ความต้านทานอนุกรมน้อยกว่าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่ากรณีขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นกาวคาร์บอน (carbon paste)

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ 20 – 300 เคลวิน ขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวีวีพีของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu ซึ่งมีกลไกการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน จากนั้นคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างเช่น แฟกเตอร์อุดมคติ, ความสูงกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรม พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวีวีพีของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu

จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวีวีพีของฟิล์มบาง FTO/CdS/CdTe/ZnTe:Cu ทำการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยไบอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ จะได้ค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานชั้น ( $R_{sh}$ )

## ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะเวลาประชิดเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ในการเตรียมฟิล์มบางและการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เราพบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการวิจัย ซึ่งได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้ลุล่วงไปด้วยความสำเร็จ ซึ่งปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น

1. ปัญหาในการติดตั้งระบบ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะผู้ติดตั้งระบบควรศึกษาคการติดตั้งอย่างละเอียดทุกครั้งทีติดตั้งระบบต้องมีสมาธิในการทำงาน ผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะเวลาประชิดนี้ ถ้ามีความชำนาญในการติดตั้งและทำงานอย่างต่อเนื่องจะไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เวลาน้อยมากและได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี โดยตรวจสอบชั้นต้นคือมองด้วยตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มบางมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเป็นมันวาวจากนั้นดูรายละเอียดสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีจุดสีดำหรือรูพรุนเกิดขึ้น

2. ในการเตรียมฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่ได้วางแผนงานไว้จะต้องมีกระบวนการที่ต่อเนื่องจนได้สิ่งประดิษฐ์ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อลดผลจากสถานะผิวรอยต่อ

3. ในขั้นตอนการสุบอากาศออกจากระบบครั้งแรกที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ จะใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือมากกว่าก็ไม่สามารถทำความดันได้ตามต้องการ ผู้วิจัยมีแนวทางการแก้ไขปัญหาที่คือหลังจากสุบอากาศออกจากระบบประมาณ 15 นาที จะทำการให้อุณหภูมิแก่ระบบเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นปิดระบบการให้อุณหภูมิ ระบบก็จะทำการสุบอากาศออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว

4. ในขั้นตอนการเคลือบแคดเมียมเทลลูไรด์นั้น ผู้วิจัยใช้เวลาในการเคลือบนานเกินไป ส่งผลให้อะตอมของธาตุ S แพร่เข้าไปในเนื้อสารแคดเมียมเทลลูไรด์ ทำให้เกิด  $CdS_xTe_{1-x}$  ตรงบริเวณรอยต่อได้

5. หลังจากใช้งานระบบประเหิดสารในระยะประชิด ที่ขั้วหลอดทั้งสแตนจะเกิดออกไซด์ต้องคอยทำความสะอาดก่อนการใช้งานระบบทุกครั้งเพื่อให้ระบบทางไฟฟ้าสมบูรณ์และยังสามารถยืดอายุการทำงานของหลอดทั้งสแตนได้ด้วย

6. ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ควรขังสารให้มีความเที่ยงตรงมากที่สุด รักษาอุณหภูมิของการก่อเกิดปฏิกิริยาให้คงที่และรักษาระดับสารละลายตลอดระยะเวลาเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

7. การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มิกโดยการเคลือบฟิล์มบาง  $ZnTe:Cu$  ลงบน  $CdTe$  การเจืออะตอม  $Cu$  จากสารละลาย  $Cu(NO_3)_2$  พบว่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูงอยู่ ดังนั้นควรใช้วิธีระเหยสารตั้งต้น  $ZnTe$  และ  $Cu$  พร้อมๆ กันในระบบสุญญากาศและแยกเบ้าระเหยสารให้เป็นคนละอัน จะส่งผลให้การเจือด้วยอะตอม  $Cu$  แพร่กระจายในเนื้อสารดีกว่าการจุ่มในสารละลายเคมี