

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ  
วีวีรพันธ์ Cds/CdTe

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CdS/CdTe  
THIN FILM HETEROJUNCTION SOLAR CELL



เอกชัย วิลามาต  
AEKACHAI WILAMAD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-030-028

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ  
วิวิธพันธุ์ CdS/CdTe

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CdS/CdTe  
THIN FILM HETEROJUNCTION SOLAR CELL



เอกชัย วิลามาต

AEKACHAI WILAMAD

พ.ศ. ๒๕๕๒  
ค. ๘๗๓๓  
๒๕๕๒

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 105126  
วันเดือนปี 16 พ.ย. 2552

b. 12165992  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

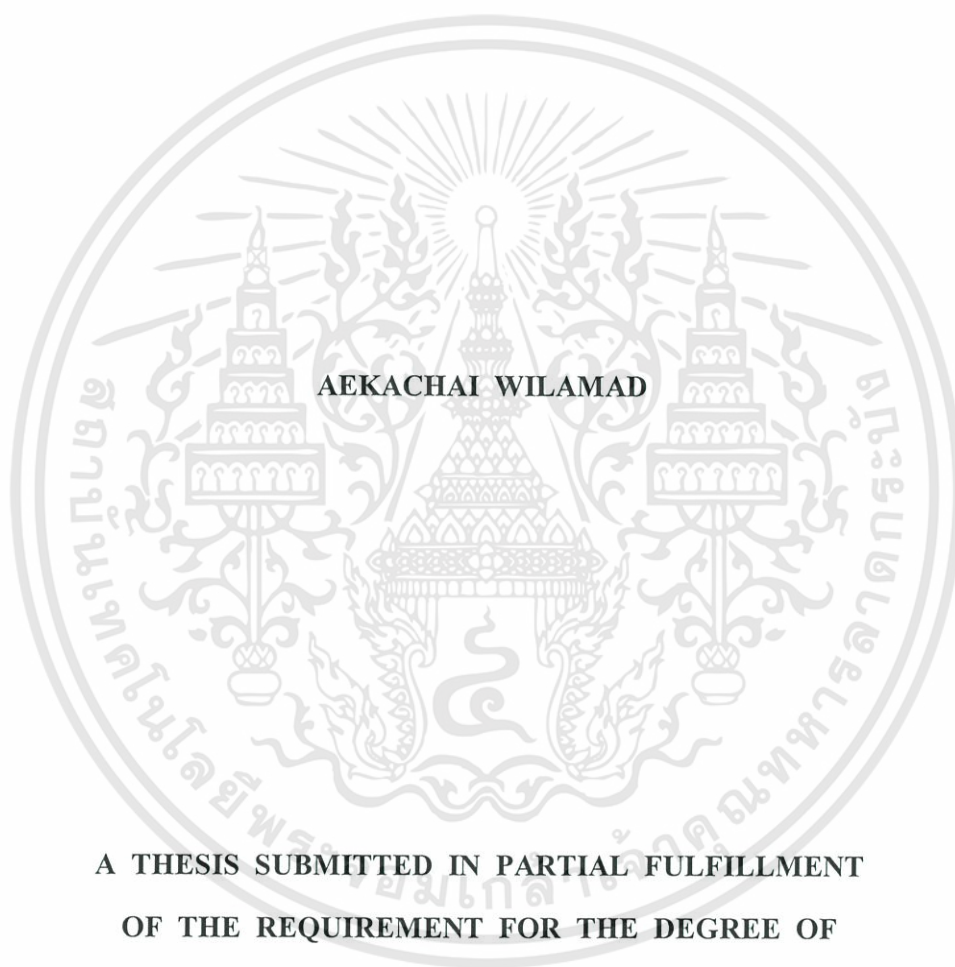
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-030-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CdS/CdTe  
THIN FILM HETEROJUNCTION SOLAR CELL**



**AEKACHAI WILAMAD**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL-2009-SC-M-030-028**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009



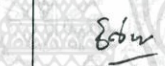

FACULTY OF SCIENCE

KING MOGNKUT ' INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe  
Preparation and Characterization of CdS/CdTe Thin Film Heterojunction Solar Cell  
นักศึกษา นายเอกชัย วิลามาศ  
รหัสประจำตัว 50067307  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ. วิจิต	ศิริโชติ	
รศ. งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
รศ. ดร. จุติณัย	แก้วแดง	
ผศ. ดร. ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2552 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 307

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 22 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe
นักศึกษา	นายเอกชัย วิลามาศ
รหัสประจำตัว	50067307
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. กามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS และ CdTe เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe โดยใช้ ITO (indium tin oxide) เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและ C/Ag เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS ลงบน ITO ที่เคลือบบนกระจกสไลด์อยู่ก่อนแล้วด้วยวิธีอบสารละลายเคมีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร ต่อจากนั้นจึงทำการเคลือบฟิล์มบาง CdTe ลงบนชั้นฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ โดยเลือกใช้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และควบคุมให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 550 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง CdTe นาน 30 นาที ได้ความหนาประมาณ 4 ไมโครเมตร ซึ่งจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางของ กระจกสไลด์/ITO/CdS/CdTe จากนั้นจึงนำสิ่งประดิษฐ์ที่ได้ขึ้นไปศึกษาการส่งผ่านแสงโดยเครื่อง ยูวี-วิสทิเบิลดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200-1,000 นาโนเมตร ค่าช่องว่างพลังงานสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงนี้ ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe โดยการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน ELH ที่ความเข้มแสงและที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ รวมทั้งได้ทำการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้ทราบค่าความหนาแน่นของโฮลและค่าแรงดันในตัวของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe

<b>Thesis</b>	Preparation and Characterization of CdS/CdTe Thin Film Heterojunction Solar Cell
<b>Student</b>	Mr. Aekachai Wilamad
<b>Student ID.</b>	50067307
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

### ABSTRACT

This thesis concerns the preparation and characterization of CdS/CdTe heterojunction solar cell using ITO (indium tin oxide) as front contact and C/Ag as back contact. CdS layer with thickness around 100 nm was deposited on ITO substrate by chemical bath deposition (CBD) at 80°C for 60 min. CdTe thin film was subsequently deposited on CdS layer by close-spaced sublimation (CSS) in vacuum at pressure of  $3 \times 10^{-2}$  mbar. CdTe thin film with thickness around 4  $\mu\text{m}$  was achieved by using the growth conditions : source - substrate spacer 4 mm, source temperature 550 °C, substrate temperature 450 °C and deposition time 30 min. Finally, heterojunction thin film solar cell in the form slide glass / ITO / CdS / CdTe was obtained. The optical transmission spectrum of this device was carried out with UV - VIS double beam spectrophotometer with wavelength in the range 200 - 1,000 nm. Thus, energy gap value of each semiconductor material layer was obtained from the spectral transmission data. The crystal structure of the films was checked by X - ray diffraction method. The surface morphology of the films was studied by using Scanning Electron Microscope (SEM). The electrical properties of the device were performed by using dark current - voltage and light current - voltage measurements with different illumination intensities from ELH halogen lamp at various temperatures. Carrier concentrations and built - in potential of CdS / CdTe heterojunction were also obtained from capacitance - voltage measurements.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ และอาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือและสร้างระบบระเหิดสารในระยะประชิดตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้ความรู้และคำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์, ดร. สมศักดิ์ แดงดีป และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร โอสดจันท์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์กระจกสไลด์เคลือบด้วย ITO ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุมาใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ยูพาพิน ประธานสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณ ไกรศักดิ์ ยืนยง คุณคทาวุฒิ กุลศิริรัตน์ คุณขันทอง สารพัฒน์ นักศึกษาปริญญาโทและ นักศึกษาปริญญาตรีตลอดจนขอขอบคุณ คุณกนกฤษณ์ ไพรวัลย์ และ คุณกุลวรางค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรีห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า และช่วยให้อำนาจแนะนำในการใช้เครื่อง Agilent E4980A Precision LCR meter และที่ช่วยถ่ายทอดองค์ความรู้

ขอขอบคุณ ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ วิลา มาศ ที่ขยันเขียนข่าว คุณแม่สมนา วิลา มาศ ที่ขยันปลูกผักเลี้ยงหมู และญาติทุกท่านและขอขอบคุณอาจารย์สุภัทรา จิตรเกษมสุข ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์เสมอมา

เอกชัย วิลา มาศ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	4
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก.....	7
2.3.1 การระบุตำแหน่ง.....	7
2.3.2 การระบุทิศทาง.....	7
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ.....	7
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI....	9
2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	9
2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไชท์.....	10
2.5 ผลึกจริง.....	11
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด.....	11
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น.....	13
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ.....	14
2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน.....	14

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.3.2	โครงผลึกแผ่นและขอบเขตรอยต่อของโครงผลึกแผ่น หรือระนาบของโครงผลึกแผ่น.....	15
2.5.3.3	ความผิดพร่องของการจัดเรียงระนาบผลึก.....	15
2.6	พันธะเคมี.....	16
2.7	ผลึกเคดเมียมเทลลูไรด์.....	20
2.8	กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิด.....	21
2.9	โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์.....	23
2.9.1	โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์หรือแบบซิงค์เบลนด์.....	23
2.10	การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี.....	24
2.10.1	กระบวนการเกิดปฏิกิริยา.....	24
2.10.2	การเกิดฟิล์มบางของ CdS บนกระจกสไลด์.....	26
2.11	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	27
2.12	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	30
2.13	สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	35
2.13.1	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	35
2.13.2	การส่งผ่านแสง.....	38
2.13.3	การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	40
2.13.4	การหาค่าช่องว่างพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	40
2.14	สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	44
2.15	สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	44
2.15.1	สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	44
2.15.1.1	สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน.....	46
2.15.1.2	สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรีนซิก.....	48
2.16	สภาพนำไฟฟ้า.....	52
2.16.1	ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ.....	53
2.17	รอยต่ออวิวิพพันธุ์.....	54
2.17.1	โครงสร้างแถบพลังงาน.....	55
2.17.2	แบบจำลองของรอยต่ออวิวิพพันธุ์.....	58

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.17.2.1 แบบจำลองการแพร่ซึม.....	59
2.17.2.2 แบบจำลองการปลดปล่อย.....	62
2.17.2.3 แบบจำลองการปลดปล่อย-การรวมตัวของพาหะ.....	65
2.17.2.4 แบบจำลองการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์.....	66
2.17.2.5 แบบจำลองการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์-การรวมตัว ของพาหะ.....	69
2.17.3 สารกึ่งตัวนำคู่วิธีพันธุ.....	72
2.17.4 การศึกษาลักษณะความจุไฟฟ้าในรอยต่อวิธีพันธุ.....	72
2.17.5 สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิธีพันธุ.....	74
2.17.5.1 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า.....	74
2.17.5.2 ลักษณะเฉพาะความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	80
2.17.5.2.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอะตอม สารเจือ.....	80
2.17.5.2.2 การวิเคราะห์ระดับพลังงานลึกของอะตอม ของสารเจือ.....	82
2.18 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิธีพันธุ.....	85
2.18.1 กลไกการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณประจุค้าง และที่บริเวณผิวรอยต่อ.....	87
2.18.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัว ของพาหะ.....	87
2.19 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกัน ของพาหะที่เนื้อสาร.....	91
2.20 อินพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน.....	93
2.20.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม.....	93
2.20.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน.....	94
2.20.3 กราฟของโบริด.....	98
2.20.4 อินพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์.....	101
2.20.5 แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี.....	104

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่3 การดำเนินการวิจัย.....	110
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	110
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี.....	110
3.1.2 การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี.....	110
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด.....	111
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	111
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	111
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง.....	111
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า.....	111
3.2 ขั้นตอนการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe.....	112
3.2.1 การเตรียมชั้นแคดเมียมซัลไฟด์.....	112
3.2.2 การเตรียมชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์.....	113
3.2.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า.....	113
บทที่4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	114
4.1 รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe.....	114
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด.....	115
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe.....	115
4.2.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดและรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe.....	124
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	132
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe .....	145

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	165
เอกสารอ้างอิง.....	171
ภาคผนวก.....	176
ประวัติผู้เขียน.....	179



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดระบบในระบบสามมิติ.....	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.....	8
2.4 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ A <sup>n</sup> B <sup>m</sup> .....	17
2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุสังกะสี อะตอมของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ.....	17
2.6 แสดงขนาดรัศมีของพันธะไอออนิกของแต่ละธาตุ.....	18
2.7 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ GaAs-Ge ชนิดพี-เอ็น.....	55
4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยมีแผ่นฐานรองรับต่างชนิดกัน.....	145
4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัด กระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	148
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัด กระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ.....	153
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	154
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	154
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิต่าง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ.....	157
4.7 แสดงความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	164

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ.....	4
2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	5
2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่าง ๆ ของผลึก.....	8
2.4 แสดงพันธะสี่หน้าและพันธะเตตระฮีดรัล.....	9
2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	10
2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์.....	11
2.7 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด.....	12
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง	
ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก	
ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสารเจือแทรกอะตอม	
ง. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่	
2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอบตึกและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล.....	13
2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ.....	14
2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู.....	14
2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน.....	15
2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแผ่และระนาบของโครงผลึกแผ่.....	15
2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด.....	16
2.14 แสดงสมมูลความดันไอรวม.....	20
2.15 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์.....	21
2.16 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	24
2.17 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของ CdS.....	24
2.18 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง.....	25
ก. กระบวนการเฮเทอโรอีพิตaxy	
ข. กระบวนการโฮโมอีพิตaxy	
ค. กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรอีพิตaxyและโฮโมอีพิตaxy การเกิด CdS	
2.19 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมอีพิตaxy.....	25
2.20 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรอีพิตaxy.....	26

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก..... 28
2.22	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์..30
2.23	อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง..... 30
2.24	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....31
2.25	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ.....36
ก. ฉนวน	
ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์	
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี	
จ. โลหะ	
ฉ. สารกึ่งโลหะ	
2.26	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน).....38
ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	
2.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน).....38
ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.28	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง.....39
2.29	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน.....41
2.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ..... 43

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์.....	43
2.32 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจาย แบบเฟอร์มิ-ดิแรกและความหนาแน่นพาหะของ.....	45
ก. สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิก	
ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี	
2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	49
2.34 แสดงประจุก้างของรอยต่อ.....	55
ก. รอยต่อแบบฉับพลัน	
ข. รอยต่อแบบลดหลั่นในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	
2.35 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน n-GaAs และ p-Ge.....	56
ก. ก่อนเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์	
ข. หลังนำมาต่อเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์	
2.36 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ของ GaAs-Ge.....	58
ก. เมื่อไม่มีแรงดันไบอัส	
ข. เมื่อมีแรงดันไบอัสตรง	
2.37 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดต่าง ๆ.....	59
ก. ก่อนการนำมาเชื่อมต่อกัน	
ข. หลังจากการนำมาเชื่อมต่อกันแล้ว	
2.38 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี-เอ็น ภายใต้การไบอัสตรง เส้นทึบแสดงถึงกรณี เมื่อไม่มีการไบอัส (zero bias) .....	62
2.39 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี-เอ็น ในลักษณะไม่สมดุล.....	63
2.40 แสดงลักษณะเฉพาะ กระแส-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี-เอ็น.....	64

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.41 แสดงถึงแบบจำลองการปลดปล่อย-รวมตัวสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น.....	65
2.42 แสดงถึงแบบจำลองการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์โดยอาศัยโครงสร้างแถบพลังงานตามแบบของแอนเดอร์สัน.....	67
2.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $V$ จากผลการทดลองสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	68
2.44 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น เมื่อไบอัสตรงและกระบวนการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะทั้งชั้นตอนเดียวและหลายชั้นตอน.....	70
2.45 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ภายใต้การไบอัสกลับซึ่งแสดงกลไกการขุดคูโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์.....	71
2.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุ-แรงดันไฟฟ้าสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น Ge-GaAs.....	73
2.47 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าอุดมคติ.....	77
ก. แบบเชิงเส้น	
ข. แบบกึ่งลอการิทึม	
2.48 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่ทำจาก Si.....	78
ก. เป็นกระแสที่เกิดจากกระบวนการก่อกำเนิดและการรวมตัวของพาหะ	
ข. เป็นกระแสแพร่ซึม	
ค. เป็นกระแสเนื่องจากการฉีดพาหะปริมาณสูง	
ง. เป็นผลของความต้านทานอนุกรม	
จ. เป็นกระแสอิมิตัวย้อนกลับเนื่องจากกระบวนการก่อกำเนิดพาหะและผลของสถานะผิวรอยต่อ	
2.49 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Ge/n-GaAs แบบไบอัสตรงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	79
2.50 แสดงโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น โดยมีสถานะพื้นผิวกระจายทั้งขอบเขตความกว้างและทั้งบริเวณประจุค้างภายในบริเวณเขตปลอดพาหะ.....	81

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.51 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานลึก และกลไกการจับ-ปล่อยพาหะ.....	83
2.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ $C^{-2}$ และ $V$ ซึ่งมีการแปรไปกับเวลาที่อุณหภูมิ 506.2 เคลวิน และ 241.5 เคลวิน.....	85
2.53 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของ $Cu(In,Ga)Se_2$ ที่แปรตามอุณหภูมิ.....	86
2.54 แสดงกลไกผลของการชุกคูโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย.....	88
ก. รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	
ข. รอยต่อไม่อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	
2.55 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ $J_0$ และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของ $CdTe$ ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนีลด้วย $CdCl_2$ .....	90
2.56 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย ๆ.....	94
2.57 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย.....	95
2.58 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$ .....	96
2.59 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง ) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ) .....	96
2.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ $Z'$ และ $Z''$ จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90^\circ$ และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์.....	99
2.61 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของโบด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด.....	100
2.62 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) กราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว.....	101
2.63 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข).....	102

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.64 แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ก) กราฟในควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์ เฟสคงตัว (ข) .....	103
2.65 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่าC <sub>SCR</sub> แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม.....	107
2.66 แสดงความจุของรอยต่อ CdS/Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ รวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดัน ไบอัสค่าหนึ่ง.....	108
2.67 แสดงสเปกตรัมความจุของ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่างๆ.....	109
ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na	
ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอม Na	
2.68 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe <sub>2</sub> .....	109
4.1 แสดงฟิล์มบางของรอยต่ออิวริทพันธุ์ CdS/CdTe มีชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD) ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (อินเดียมทินออกไซด์) จากนั้นเคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด (CSS) โดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเล็กระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 มิลลิเมตร โดย.....	114
ก. แสดงภาพด้านหลังของรอยต่ออิวริทพันธุ์ CdS/CdTe	
ข. แสดงภาพด้านหน้าของรอยต่ออิวริทพันธุ์ CdS/CdTe	
4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30นาที.....	117

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง เท่ากับ 30 นาที.....	118
4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	119
4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	120
4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	121
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง เท่ากับ 30 นาที.....	122

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางในกรณีต่างๆ .....	123
ก. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบนกระจกสไลด์ โดยการเคลือบ 2 ครั้ง	
ข. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง ITO ที่เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ	
ค. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบน ITO โดยการเคลือบ 2 ครั้ง	
4.9 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	125
4.10 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	125
4.11 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTeที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	126
4.12 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	126
4.13 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้ง ต้นถึงแผ่นฐานรองรับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	127

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	127
4.15 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้ง ต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	128
4.16 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด สารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตรและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	128
4.17 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	129
4.18 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	129
4.19 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	130
4.20 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสาร ตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	130

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	
แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร	
ในระยะเวลาประชิดที่มีระยะห่างและอุณหภูมิระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ	
ที่แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500, 550 องศาเซลเซียส	
อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400, 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการ	
เคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....131	
4.22	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง	
กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร	
ในระยะเวลาประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น	
กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น	
เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส	
และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที..... 133	
4.23	
แสดงการหาค่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์	
ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร	
ในระยะเวลาประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ	
ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น	
เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส	
ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที..... 134	
4.24	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง	
กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร	
ในระยะเวลาประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ	
ที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น	
เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส	
และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที..... 135	

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hu)^2$ กับ $hu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	136
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	137
4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hu)^2$ กับ $hu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	138
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	139

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้น ถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	140
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	141
4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	142
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	143
4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe และ CdS ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที.....	144

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	147
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe ในสเกลกึ่งลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	147
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe ในสเกลลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	148
4.37 แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n \ln J_0$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	149
4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด-อุณหภูมิของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	149
4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดในวงจรสมมูลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	150
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดในวงจรสมมูลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในสเกลกึ่งลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	150
4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในสเกลลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	151
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด-อุณหภูมิของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.....	151
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความถี่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	152

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 แสดงค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุ-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	152
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	153
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อ ตารางเซนติเมตร.....	154
4.47 แสดงการจำลองค่า อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	156
4.48 แสดงวงจรที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัด ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่าง ๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	156
4.49 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อ CdS/CdTe ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นถึงสถานะพลังงานที่ลึกรอยต่อ ของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจง แบบเอกซ์โพเนนเชียลและกับดักประจุนิคอะตอมผู้รับ และกับดักประจุนิคอะตอมผู้ให้.....	157
4.50 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของฟิล์มบางที่มีกับดักประจุ CdTe อยู่ ก. แสดงระดับพลังงานของกับดักที่มีค่าต่าง ๆ ปรากฏอยู่ในเนื้อฟิล์มบาง CdTe.....	158
ข. แสดงความหนาแน่นของสถานะพลังงานกับดักในข้อ (ก) .....	158
4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	163
4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $JdV/dJ$ กับ $J$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง.....	164

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เนื่องจากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างมากทั่วโลก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำ ใช้ได้ในระยะยาวนาน

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI เช่น CdTe, CdS, ได้ดำเนินไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และ ญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากที่สุดคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่ออวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2515 โดยบอนเนต (Bonnet) และราเบนโฮสต์ (Rabenhorst) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6% [1] จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งประสิทธิภาพสูงถึง 16.5 % [2-5] ในระดับห้องปฏิบัติการ และโมดูลขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 10% [6-7] และมีแนวโน้มที่จะนำออกสู่ตลาดได้ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องทดลองประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธ์ (polycrystal) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ซึ่งฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เตรียมโดยวิธีระเหิดในระบะประชิดเพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งพบว่าการปลูกฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีนี้มีผิวหน้าและขนาดของเกรนที่สม่ำเสมอแล้วเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีอาบสารละลายเคมีเป็นชั้นส่งผ่านแสงแล้วใช้กาวเงินเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง โดยมีชั้นคาร์บอนเคลือบก่อนกาวเงินและใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงด้านหน้า และในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการข้างต้นและทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วนำผลที่ได้ทำการคำนวณหาจรรยาสมมูลภายในด้วยโปรแกรมเฉพาะ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ปลูกฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยยะประชิดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วย ITO และที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่ได้จากกระบวนการอาบสารละลายเคมีบนชั้นอินเดียมทินออกไซด์โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.2.2 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค เช่นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
- 1.2.3 ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer)
- 1.2.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าและการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชั้นแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น
- 1.2.5 วัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วนำผลที่ได้ไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วงจรสมมูลจำลองผลด้วยโปรแกรมเฉพาะ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 เคลือบฟิล์มบาง CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วย ITO และบนฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหิดสารในระยยะประชิด โดยจะทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS ลงบนกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วย ITO เพื่อให้เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ด้วยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่อง UV-VIS สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดกระแส-แรงดัน เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชั้นแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น
- 1.3.4 วัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วนำผลที่ได้ไปทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วงจรสมมูลจำลองผลด้วยโปรแกรมเฉพาะ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงหลักการเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยยะประชิด
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงหลักการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอาบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง CdTe และฟิล์มบาง CdS ได้แก่โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.4.4 ทำให้ได้ข้อมูลในการเตรียมและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สำคัญของฟิล์มบาง CdTe และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.5 ทำให้ได้ข้อมูลในการเตรียมและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สำคัญของฟิล์มบาง CdS และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.6 สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบชนิด รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CdTe
- 1.4.7 นำข้อมูลที่ได้อาจการทดลองศึกษากลไกการนำไฟฟ้า และเป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CdTe ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

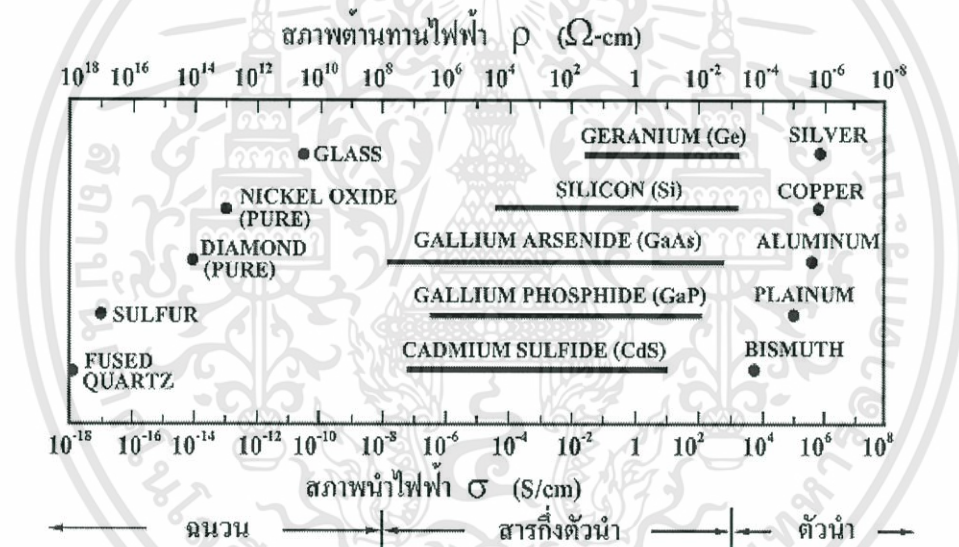


## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [8-20]

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 ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของ สารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์

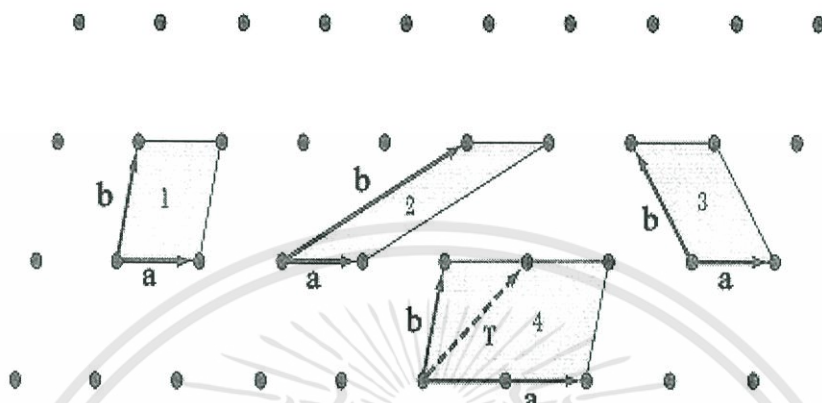


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

### 2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [8-20]

ผลึกประกอบด้วยอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่เรียกว่า เบสิส (basis) ที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ของโครงผลึกหรือที่เรียกว่า แลตทิซ (lattice) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบซ้ำซ้อนกัน หรือแบบเป็นคาบ (periodic) ในระบบสามมิติโดยที่เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดและอาจมีแลตทิซมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งแลตทิซนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้และมีสมมาตรค่อนข้าง

สูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึกสองมิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสองมิติค่าคงตัวของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุมผลึก  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



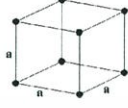
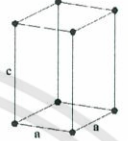
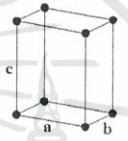


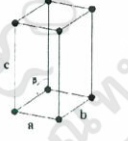
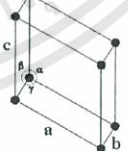
รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของ โครงผลึก	ค่าคงตัวของ โครงผลึก	มุมผลึก
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน $60^\circ$ ( $60^\circ$ rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มี ข้อกำหนด

ในระบบสามมิติ ค่าคงตัวของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  และ  $\vec{c}$  และ มุมผลึก  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงผลึกขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในระบบสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็น 7 ระบบดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดระบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก (system)	ค่าคงตัวของโครงผลึก และมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิต ของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

## 2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [8-20]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.3.1 การระบุตำแหน่ง

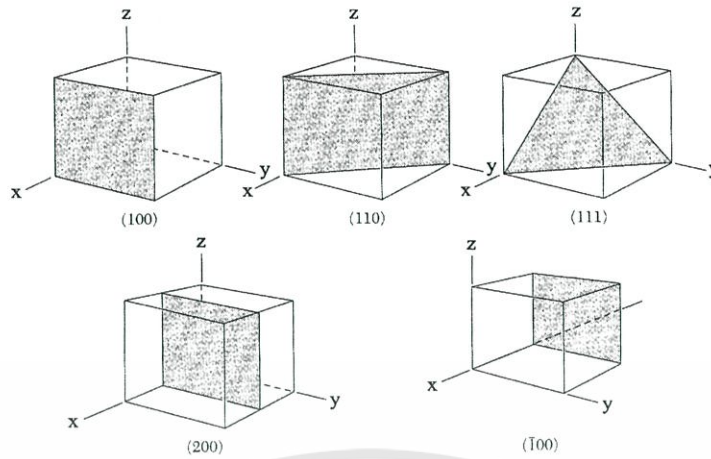
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$

### 2.3.2 การระบุทิศทาง

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

### 2.3.3 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  $(-1,1,1)$  ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

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

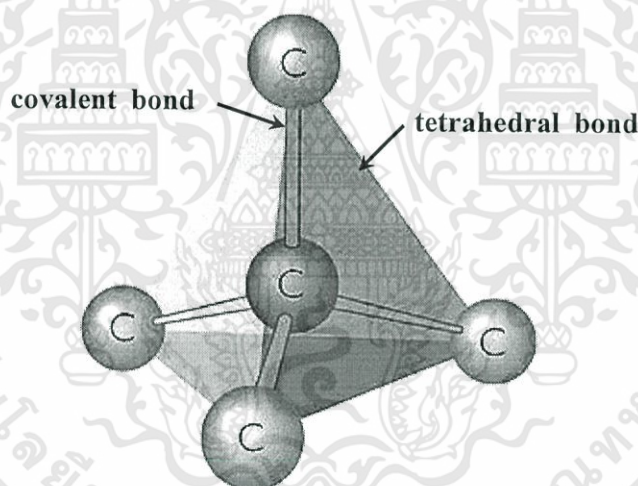
$$i = -(h + k) \quad (2.1)$$

เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ(110) จะเรียกว่า  $(11\bar{2}0)$  นอกจากนี้ก็มักพบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง  $[hkl]$  จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกันนั่นคือระนาบ  $(hkl)$  ตัวอย่างเช่น ทิศทาง  $[102]$  จะตั้งฉากกับระนาบ  $(102)$

## 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[8-24]

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 2.4 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และ โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

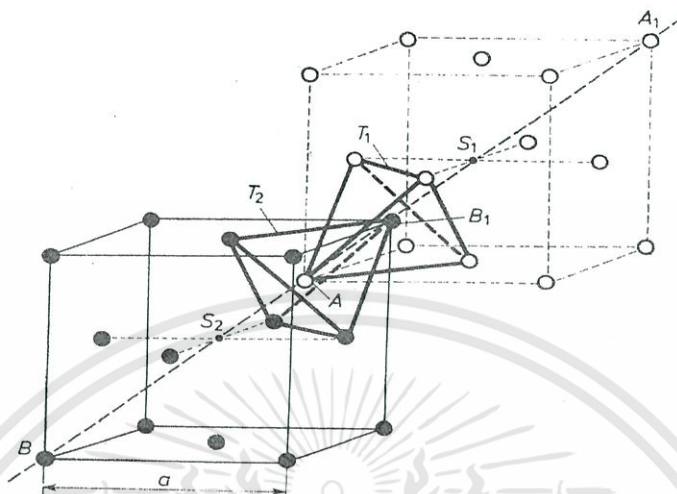


รูปที่ 2.4 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$  ฐานของพันธะสี่

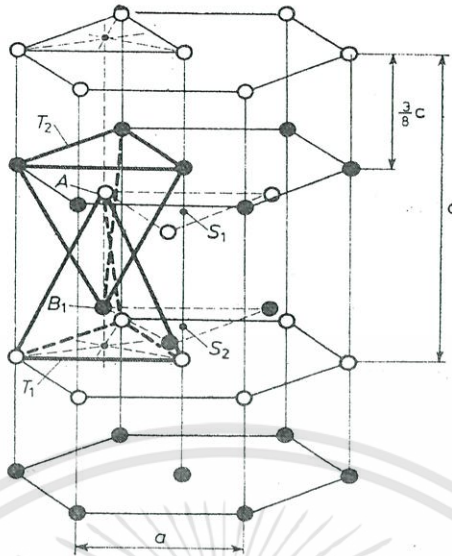
หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม  $60^\circ$  ออกจากแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

#### 2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์แสดงในรูปที่ 2.6 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8} c = \sqrt{\frac{3}{8}} a$  ฐานพื้นระตีสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

## 2.5 ผลึกจริง [9-17]

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

### 2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

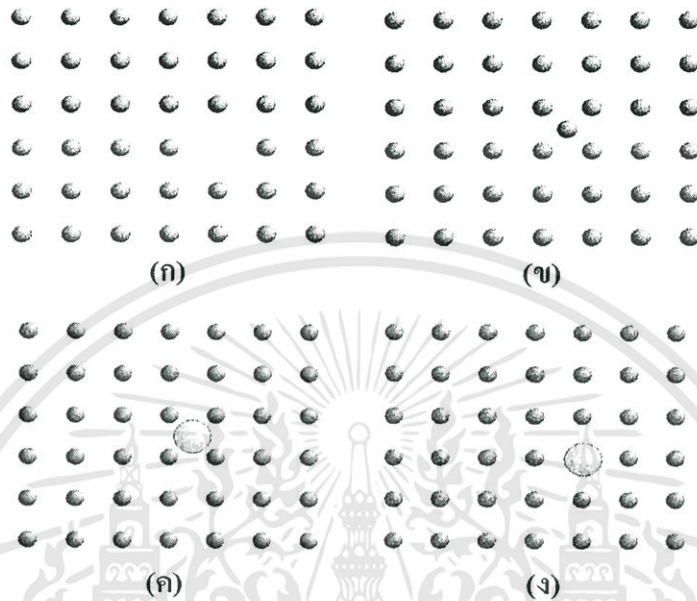
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่างหรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมเจ้าบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก (interstitial impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity - atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่น เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมเดิม



● อะตอมของสารเจือ ● อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน

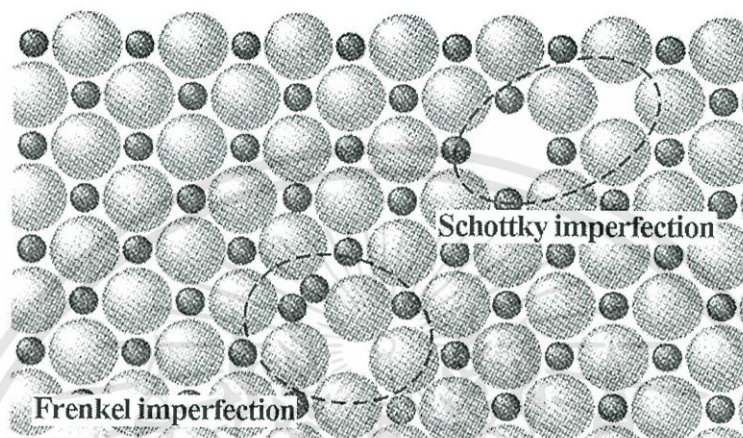
รูปที่ 2.7 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนี้

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

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



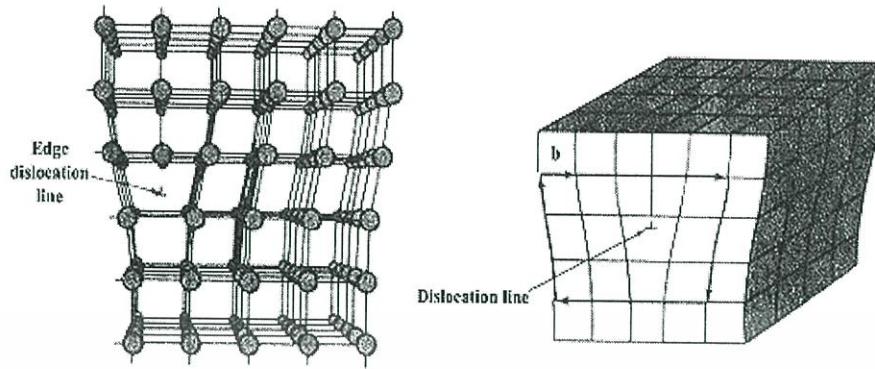
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

### 2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น

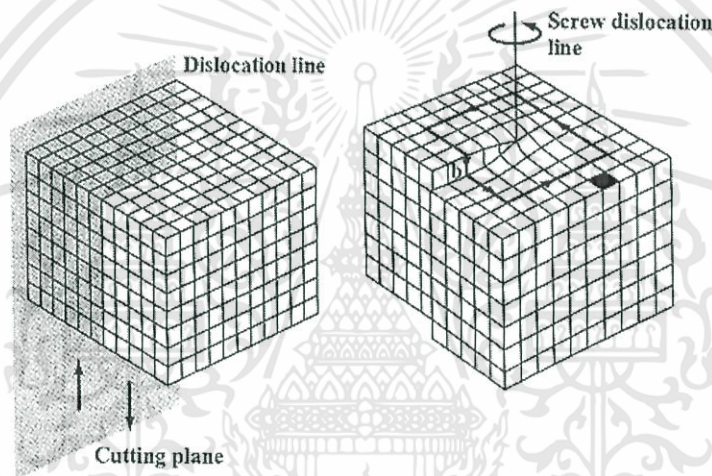
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากอะตอมของโครงผลึก ณ ที่จุดต่างๆ อยู่ในแนวหรือแถวเดียวกันไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว(distortion) ของโครงผลึก ขึ้น โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector :  $\vec{b}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเวบบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

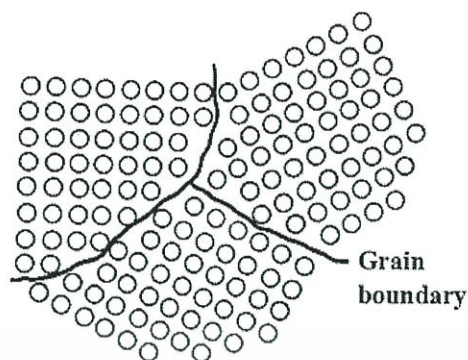
### 2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface-imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้น เรียกว่า รอยต่อเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้น เรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

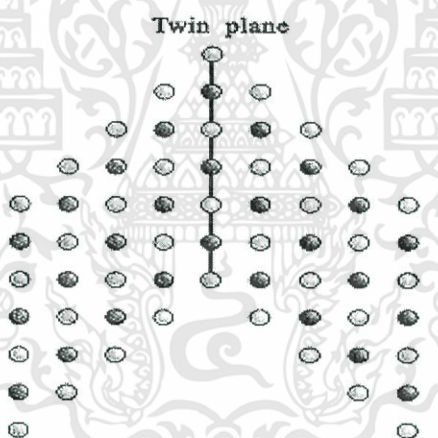
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

### 2.5.3.2 โครงผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

โครงผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจก โดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า รอยต่อโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

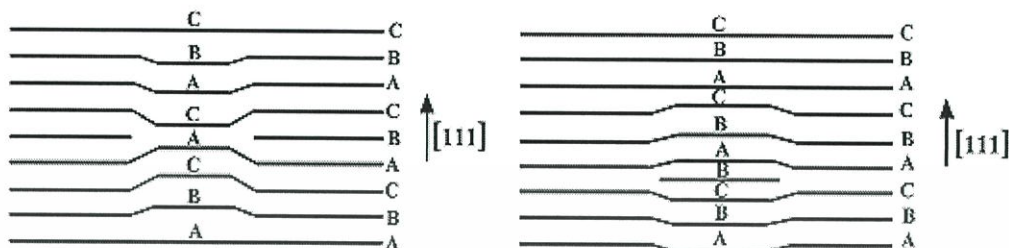


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแฝดและระนาบของโครงผลึกแฝด

### 2.5.3.3 ความผิดปรองของการจัดเรียงระนาบผลึก (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดลำดับ เช่น สำหรับโครงผลึกออคตาฮีดรอลแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ใน

โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนย้าย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผลึกลำดับ

## 2.6 พันธะเคมี [9,12-24]

พันธะเคมีระหว่าง 2 อะตอมขึ้นอยู่กับธาตุที่อยู่ในตารางธาตุ พันธะเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นมีอยู่ 3 ชนิดคือ พันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ และพันธะโลหะ ทฤษฎีทางพันธะเคมีศึกษาโดย เพาว์ลิง (Pauling) และ สเลเตอร์ (Slater) ซึ่งอธิบายถึงปริมาณที่บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของผลึก จากการทดลองระยะระหว่างอะตอมและพิกัดของอะตอมรวมทั้งการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากความเข้มของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นถึงพันธะเคมีในผลึกสารประกอบกลุ่ม II-VI ทั้งโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ และโครงสร้างแบบเวอร์ไทท์ โดยส่วนมากจะแสดงทั้งพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์

พันธะไอออนิกประกอบด้วยอันตรกิริยาคูลอมบ์ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบผลที่ตามมาอิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเคลื่อนย้ายจากธาตุโลหะไปยังธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่นการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นของพลังงาน  $4s^2$  จากอะตอมของธาตุสังกะสี (Zn) ไปยังระดับชั้นพลังงาน  $sp$  ของอะตอมของธาตุเทลลูเรียม (Te) ซึ่งทำให้เกิดไอออนของธาตุสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) และไอออนของธาตุเทลลูเรียม ( $Te^{2-}$ )

พันธะโควาเลนต์คือการสร้างคู่อิเล็กตรอนกับสปินตรงกันข้าม อิเล็กตรอนหนึ่งตัวของแต่ละอะตอมก็จะสร้างคู่อิเล็กตรอนด้วยกันทั้งสองอะตอมเป็นพันธะ ในกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์เท่ากับ 8 ( $4s^2$  จากอะตอมของธาตุสังกะสี และ  $5s^2 p^4$  จากอะตอมของธาตุเทลลูเรียม) ก็จะถูกแบ่งเท่าๆกันระหว่างของธาตุสังกะสีและอะตอมของธาตุเทลลูเรียมและประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากับ  $Zn^{2+}$  และ  $Te^{2-}$  ประจุสุทธินี้มีความสัมพันธ์กันกับผลึกที่เป็นพันธะไอออนิก

มูเซอร์ (Mooser) และ เพียร์สัน (Pearson) ได้พิสูจน์เกี่ยวกับแนวความคิดของพันธะเคมี ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน โดยแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของพันธะเคมีในสารประกอบกลุ่ม II-VI

ดังตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายของวาเลนซ์และความเป็นพันธะไอออนิกในสารประกอบกลุ่ม II-VI ถ้าอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่หลุดออกไปจากอะตอม A และอะตอม B เราจะได้ประจุเป็นบวก  $A^{2+}$  และ  $B^{6+}$  ประจุรวมของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่หลุดออกไปรวมกันเท่ากับ  $8e^-$  การส่งผ่านของประจุไปยังอะตอม  $B^{6+}$  ก็จะแทนด้วยไอออน  $B^{2-}$  นี่คือนิยามของพันธะไอออนิกที่มีประจุของอะตอมสุทธิ  $A^{2+}B^{2-}$  สำหรับกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่มีการเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างสองอะตอมซึ่งในกรณีนี้การกระจายของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่มีค่าเท่ากัน ทำให้พันธะโควาเลนต์นี้มีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมคือ  $A^{2-}B^{2+}$  และศูนย์กลางการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างอะตอม A กับอะตอม B ซึ่งแทนด้วย  $d_{AB}$  เมื่อศูนย์กลางของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ที่ใกล้กับไอออน  $B^{6+}$  ตัวอย่างเช่นที่ระยะ  $\frac{1}{4}d_{AB}$  เมื่อการกระจายอิเล็กตรอนวาเลนซ์คือ  $2e^-$  และ  $6e^-$  ในกรณีนี้สามารถแทนได้ด้วยโมเลกุล  $A^0B^0$  ซึ่งมีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากับศูนย์ นี่คือนิยามของพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมซึ่งทำให้เกิดพันธะไอออนิก

ตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่  $A^{II}B^{VI}$

Effective charge of atoms in the molecule	Distribution of valency electron charge (●—centre of "bridge")	Bond ionicity (%)	
		formal	effective
$A^{2+}B^{2-}$		100	100
$A^{1+}B^{1-}$		75	50
$A^0B^0$		50	0
$A^{1-}B^{1+}$		25	
$A^{2-}B^{2+}$		0	

ตารางที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุตั้งกะติอะตอมของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ

Atomic number Z	Symbol of the element	Principal quantum number n																	
		Orbitals																	
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	
Metals	30	Zn	2	2	6	2	6	10	2										
	48	Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10								
	80	Hg	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2			
Chalcogens	34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4									
	52	Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4					

ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดรัศมีของพันธะไอออนิกของแต่ละธาตุ

ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออนในเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)	ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออนในเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)
Li 3	1 <sup>+</sup>	0.68	Se 34	4 <sup>-</sup> 6 <sup>-</sup> 2 <sup>-</sup>	0.69 0.35 1.98
B 5	3 <sup>+</sup>	0.21	Br 35	7 <sup>-</sup> 1 <sup>-</sup>	0.39 1.96
N 7	5 <sup>+</sup> 3 <sup>+</sup>	0.15 1.48	Ag 47	1 <sup>+</sup>	1.13
O 8	6 <sup>-</sup> 2 <sup>-</sup>	0.09 1.36	Cd 48	2 <sup>-</sup>	0.99
F 9	7 <sup>-</sup> 1 <sup>-</sup>	0.07 1.33	In 49	1 <sup>+</sup> 3 <sup>+</sup>	1.30 0.92
Na 11	1 <sup>+</sup>	0.98	Sb 51	3 <sup>-</sup> 5 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	0.90 0.62 2.08
Al 13	3 <sup>+</sup>	0.57	Te 52	4 <sup>-</sup> 6 <sup>-</sup> 2 <sup>-</sup>	0.89 0.56 2.22
P 15	5 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	0.35 1.86	I 53	7 <sup>-</sup> 1 <sup>-</sup>	0.50 2.20
S 16	6 <sup>-</sup> 2 <sup>-</sup>	0.30 1.86	Au 79	1 <sup>+</sup> 3 <sup>+</sup>	1.37 0.85
Cl 17	7 <sup>-</sup> 1 <sup>-</sup>	0.26 1.81	Hg 80	2 <sup>-</sup>	1.12
K 19	1 <sup>+</sup>	1.33	Bi 83	3 <sup>-</sup> 5 <sup>-</sup>	1.20 0.74
Ti 22	2 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup> 4 <sup>-</sup>	0.78 0.69 0.64	Eu 63	2 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	1.09 0.96
Mn 25	2 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup> 4 <sup>-</sup> 7 <sup>-</sup>	0.91 0.70 0.52 0.46	Tb 65	3 <sup>-</sup> 4 <sup>-</sup>	0.92 0.84
Co 27	2 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	0.80 0.72	Dy 66	3 <sup>-</sup>	0.91
Ni 28	2 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	0.79 0.72	Ho 67	3 <sup>-</sup>	0.89
Cu 29	1 <sup>-</sup> 2 <sup>-</sup>	0.98 0.80	Er 68	3 <sup>-</sup>	0.87
Zn 30	2 <sup>-</sup>	0.83	Tm 69	3 <sup>-</sup>	0.86
Ga 31	3 <sup>-</sup>	0.62	Yb 70	3 <sup>-</sup>	0.85
As 33	3 <sup>-</sup> 5 <sup>-</sup> 3 <sup>-</sup>	0.69 0.47 1.91			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์รวมทั้งการทดลองจลศาสตร์ของการระเหิดสารประกอบ  
กลุ่ม II-VI สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ



เมื่อ A คือ อะตอมของ Hg, Cd, หรือ Zn

B คือ อะตอมของ Te หรือ Se

s คือ สภาวะของแข็ง

g คือ สภาวะก๊าซ

ตามทฤษฎีจลน์การระเหิดรวมทั้งการแพร่ของอะตอม A และอะตอม B ที่ผิวหน้า ซึ่งอะตอม B  
จะรวมกันเป็นโมเลกุล  $B_2$  ก่อนที่จะไปเป็นสภาวะก๊าซ

จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) [14] พิจารณาสภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal  
equilibrium) เมื่อ

$$P\left(\frac{A}{AB}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{B_2}{AB}\right) = K_p(T) \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$  คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\log K_p(T) = -\frac{\Delta G(T)}{4.575T} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Delta G(T)$  คือ พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy)

ความดันรวมของสารประกอบ AB

$$P_t = P\left(\frac{A}{AB}\right) + P\left(\frac{B_2}{AB}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P_t$  คือ ความดันรวม

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนของความดันน้อยที่สุดเมื่อส่วนประกอบของความดันไอเป็นตาม  
สัดส่วนทางเคมี

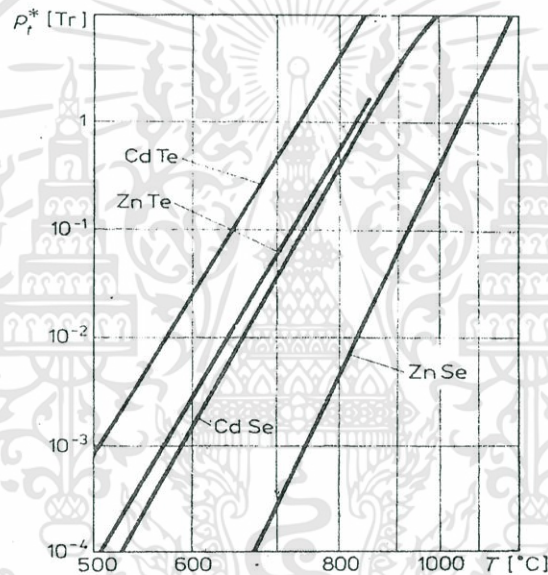
$$P\left(\frac{B_2}{AB}\right) = \frac{1}{2} P\left(\frac{A}{AB}\right) \quad (2.6)$$

ในกรณีความดันสมดุล สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$\log P_i^* = \frac{2}{3} \frac{\Delta G(T)}{4.575T} + \log 3 - \frac{2}{3} \log 2 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $P_i^*$  ในหน่วยบาร์(bar)

ความดันไอรวม ( $P_i^*$ ) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากสถานะของแข็งของ ZnSe, CdTe, ZnTe ที่ความดันไอเป็นสัดส่วนทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.14

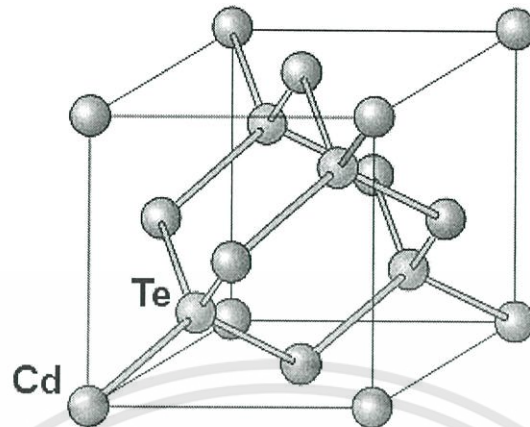


รูปที่ 2.14 แสดงสมดุลความดันไอรวม

## 2.7 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ [13,19,21-24]

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์มีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอมและมีความหนาแน่น 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

## 2.8 กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS)

[13,25-26,29-30]

กระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้นที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดสารในระยะประชิดนี้พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวลพิจารณาภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P \left( \frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}} \right) P^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}} \right) = K_p(T) \quad (2.9)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$  คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\Delta G(T)$  คือ พลังงานอิสระของกิบส์

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

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน  $K_p(T)$  ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ ( $T_{\text{so}}$ ) และแผ่นฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ ( $T_{\text{sub}}$ ) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{\text{so}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{so}}}\right] \quad (2.11)$$

$$K_p(T_{\text{sub}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{sub}}}\right] \quad (2.12)$$

ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd และโมเลกุลของก๊าซ  $\text{Te}_2$  ระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ  $d$  ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของ ฟิค (Fick's first law)

$$J_{\text{Cd},j} = \frac{D_{\text{Cd},j}}{Rd} \left( \frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv J \quad (2.13)$$

$$J_{\text{Te}_2,j} = \frac{D_{\text{Te}_2,j}}{Rd} \left( \frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.14)$$

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

$J_{\text{Te}_2,j}$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ  $\text{Te}_2$  ในก๊าซ  $j$

$J$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่

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

ซึ่งในกรณีนี้ นักโมเลกุลและขนาดของก๊าซ  $\text{Te}_2$  มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่  $D_{\text{Cd},j} = 1.85 D_{\text{Te}_2,j}$  (ในบรรยากาศของก๊าซ  $\text{H}_2$ , He หรือ Ar) จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น ( $T_{\text{so}}$ ) และแผ่นฐานรองรับ ( $T_{\text{sub}}$ ) มีค่าต่างกัน  $T_{\text{so}} - T_{\text{sub}} = 70$  องศาเซลเซียส จะได้  $P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})$  และ  $P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})} = \frac{2D_{\text{Te}_2,j}}{D_{\text{Cd},j}} = 1.1 \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการ (2.11),(2.12),(2.13),(2.14),(2.15) สามารถคำนวณหา  $J$  และอัตราการปลูก (growth rate) ฟิล์มบาง ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR\left(\frac{\mu\text{m}}{\text{min}}\right) = \frac{J \times M \times 60 \times 10^4}{\rho} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $J$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่

$M$  คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

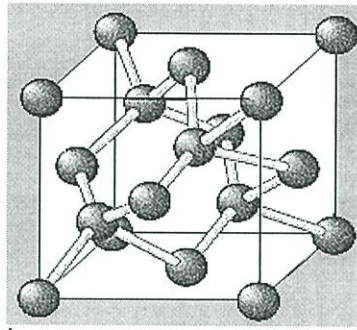
$\rho$  คือ ความหนาแน่นของ CdTe

## 2.9 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ [12,14,17-18,20]

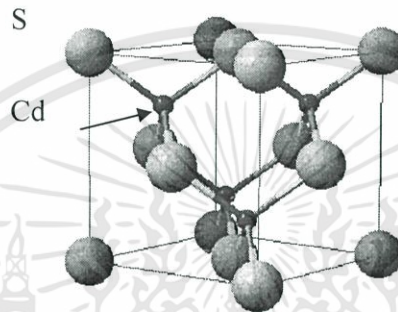
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

### 2.9.1 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์ [12,14,17-18,20]

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.16 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกับที่โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ  $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดคือ Cd และ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์

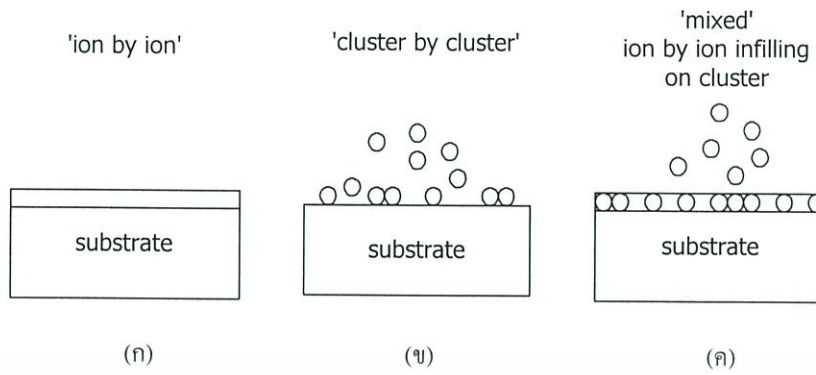


รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของ CdS

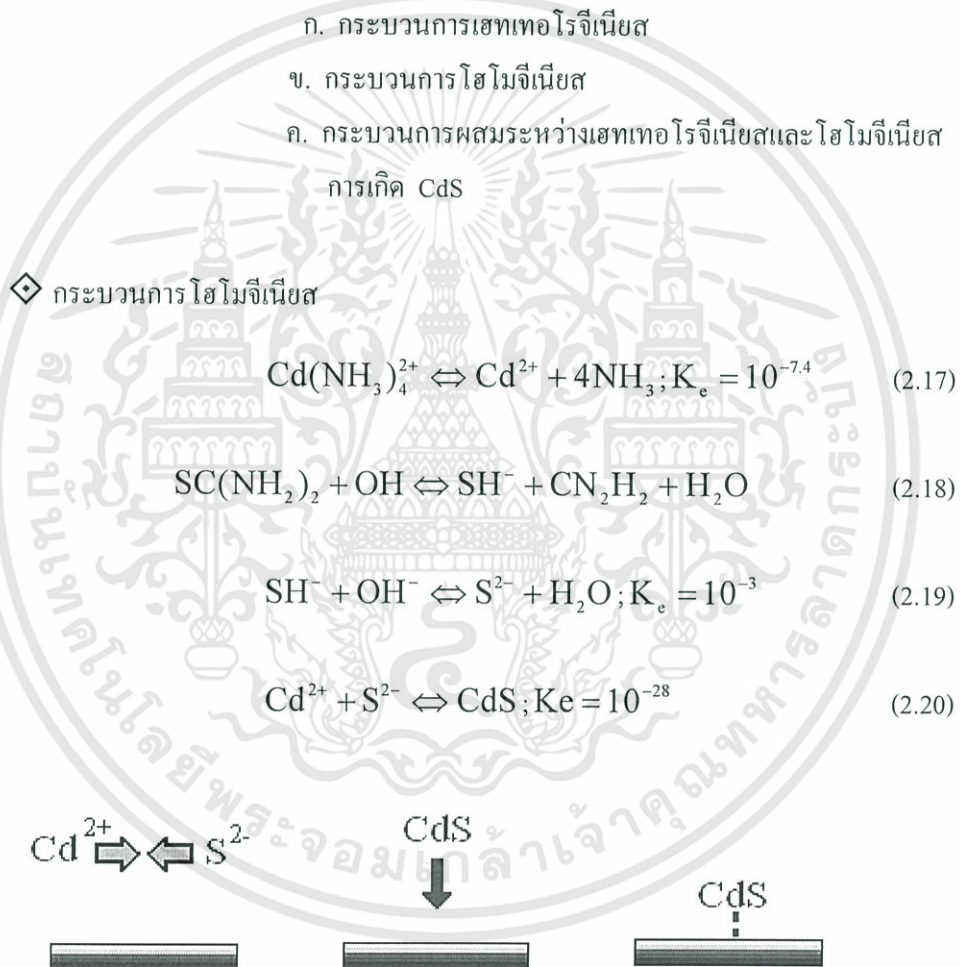
## 2.10 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี

### 2.10.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [12,14,18,20]

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์สามารถทำได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีโดยการจุ่มแผ่นฐานรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ ซึ่งสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วย ไทโอยูเรีย ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) เกลือแคดเมียมซัลเฟต ( $\text{CdSO}_4$ ) ไอออนของแคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) ตามลำดับ โดยในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า pH ของสารละลายในอ่างอบสารละลายเคมีประมาณ 10.6 – 11.8 ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางจะเกิด  $\text{Cd}^{2+}$  อย่างช้าๆ โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

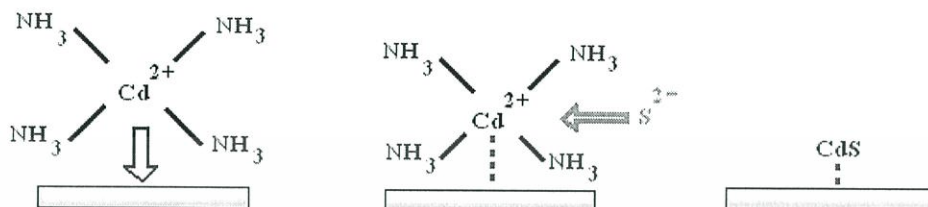


รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง



รูปที่ 2.19 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนแผ่นฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

◇ กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส



รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนแผ่นฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

### 2.10.2 การเกิดฟิล์มบางของ CdS บนกระจกสไลด์ [12,14,18,20]

ในการตกผลึกของ CdS ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ;  $K_{sp}$ ) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant ;  $K_c$ ) ในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบ ด้วยกันดังนี้ คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบเอกพันธ์ (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบกลุ่มก่อนต่อกลุ่มก่อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับดังรูปที่ 2.19 และ 2.20
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) อิเล็กตรอนทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียหลุดออกมาในขณะนั้นเอง ไอออน  $\text{S}^{2-}$  ที่อยู่บริเวณนั้นจะสร้างพันธะรวมตัวกับแคดเมียม ไอออนหรือซิงค์ไอออนกลายเป็น CdS หรือ ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20

เนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของทั้ง 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

## 2.11 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [8-20]

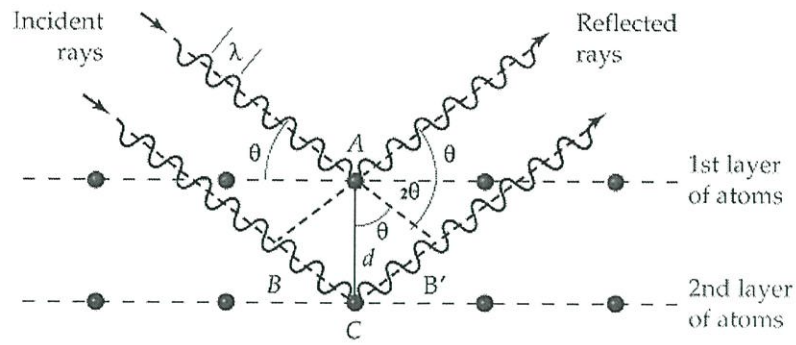
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใด เป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

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

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.22)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.22)$$

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



รูปที่ 2.21 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.22) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.23) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.24)$$

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.25)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.22) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.23) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ (h k l) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.26)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.27)$$

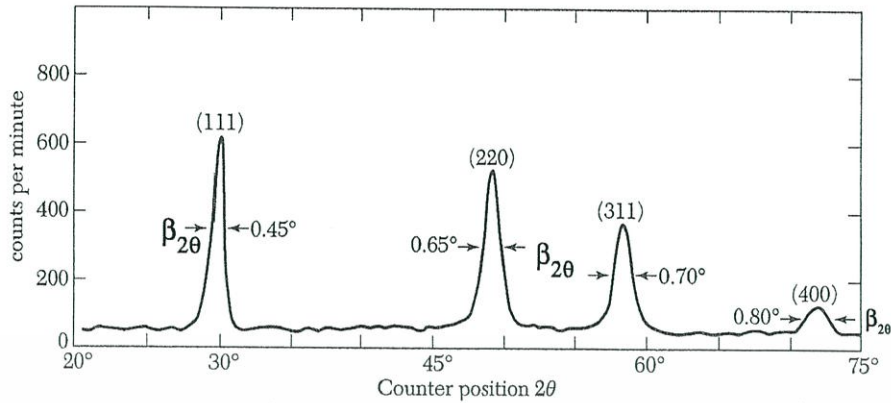
เมื่อ TC(hkl) คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (hkl)  
 I(hkl) คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ  
 I<sub>0</sub>(hkl) คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์  
 N คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ  
 ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ε<sub>s</sub>) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.28)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.29)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน  
 β คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum :FWHM)  
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 ε<sub>s</sub> คือ ความเครียด

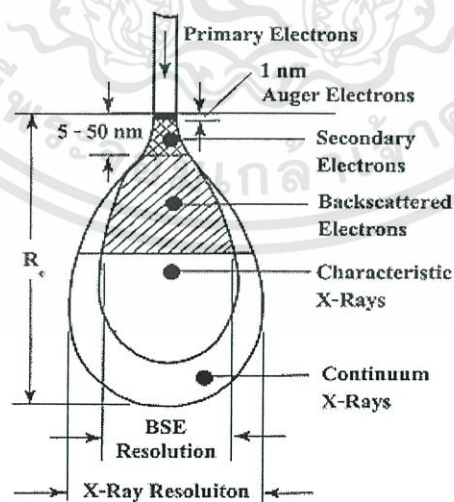


รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

## 2.12 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

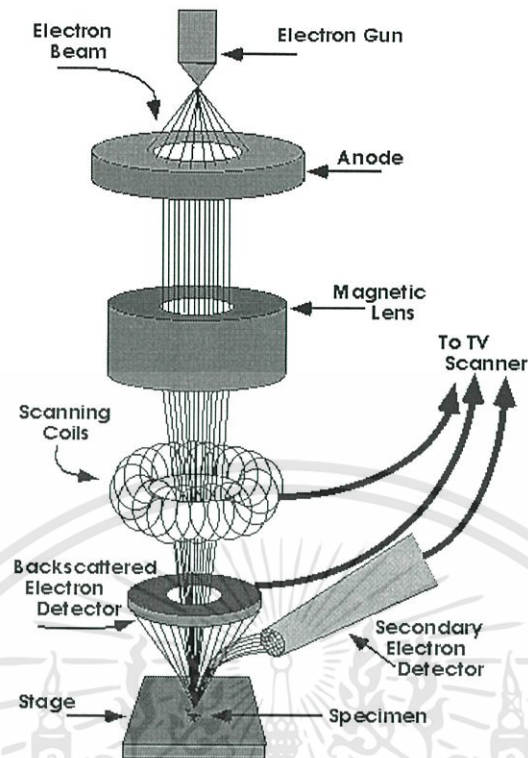
[12-16,18-20]

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



รูปที่ 2.23 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section ผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผกผันตรงกับ  $i_p$  แต่แปรผกผันแบบผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $I_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

## อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

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

### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

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

### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปในเรื่องของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิกำมากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่

SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

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

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.30)$$

เมื่อ	$E_0$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา
	$E_1$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
	$h$	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์ (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

### ออเจิลีكتروน

ออเจิลีكتروนเกิดจากอิลีكتروนปฐมภูมิตกกระทบบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิลีكتروนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิลีكتروนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิลีكتروนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิลีكتروนปฐมภูมิทำให้อิลีكتروนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิลีكتروนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิลีكتروนทุติยภูมิ

เมื่ออิลีكتروนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นตัวนำ (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิลีكتروนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กกลบนผิวของตัวอย่างและลำอิลีكتروนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิลีكتروนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิลีكتروนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิลีكتروนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิลีكتروนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่ากำลังขยายของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิลีكتروน}}$$

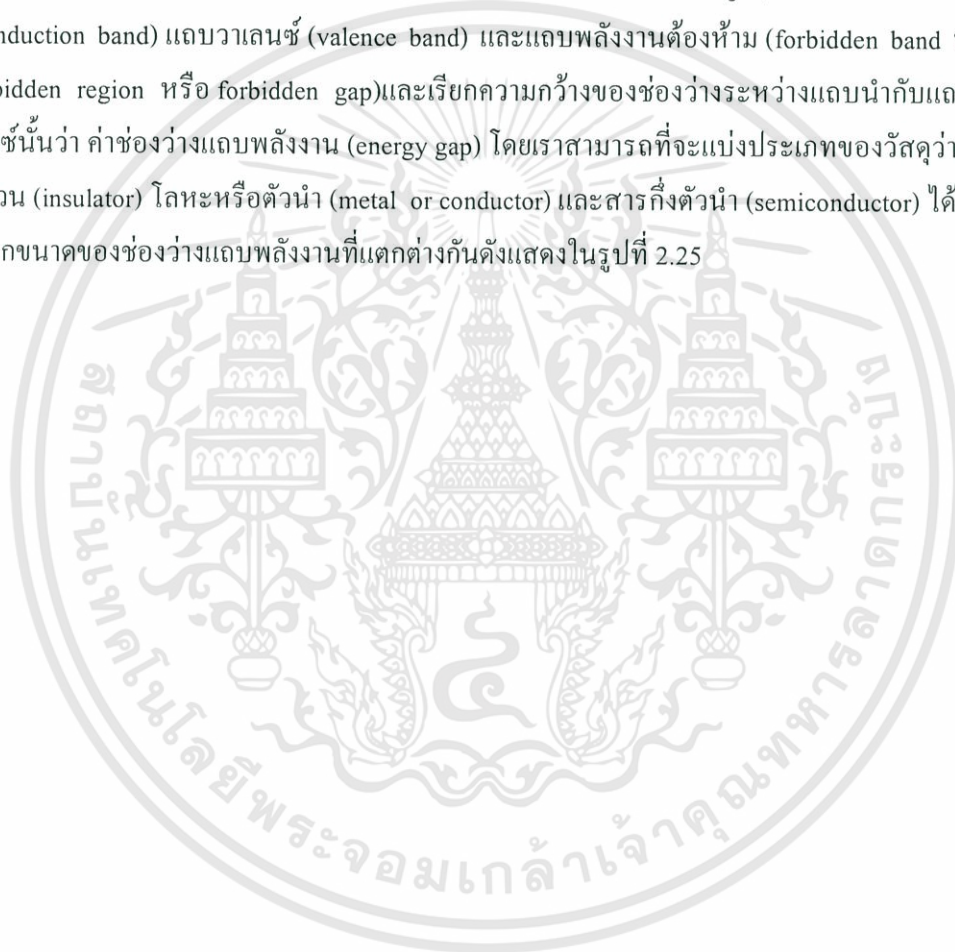
ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิลีكتروนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

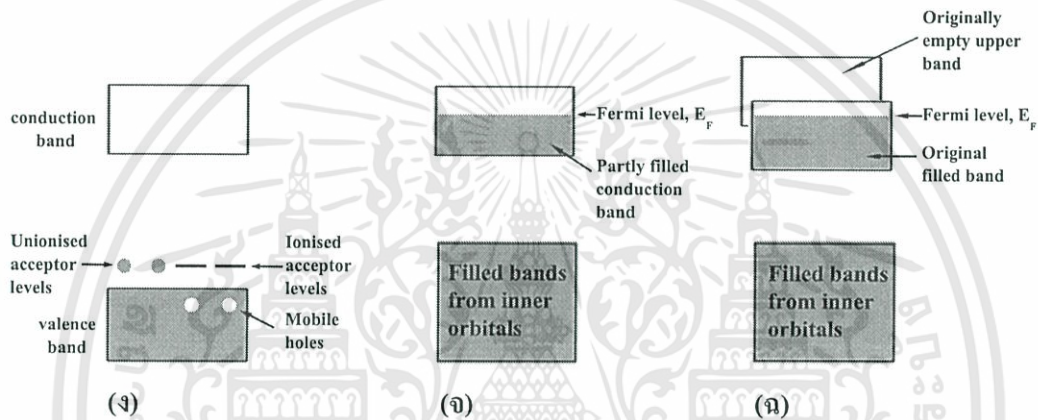
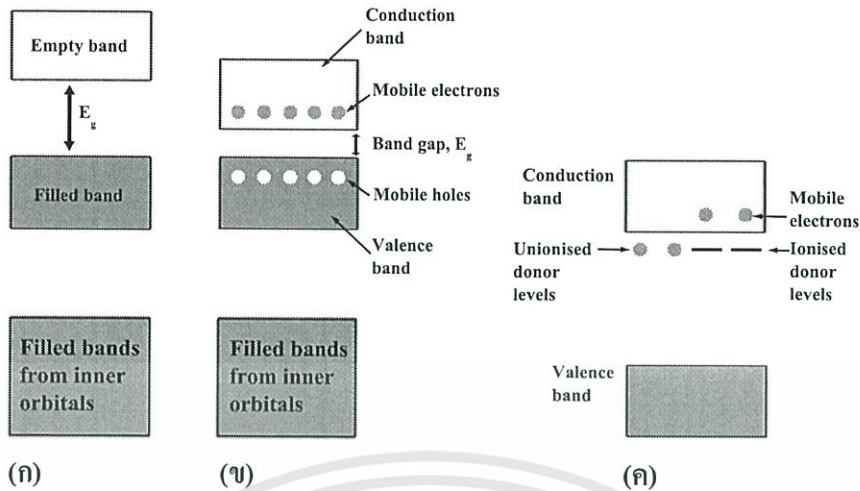
## 2.13 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [12-17]

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

### 2.13.1 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) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็น ฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.25



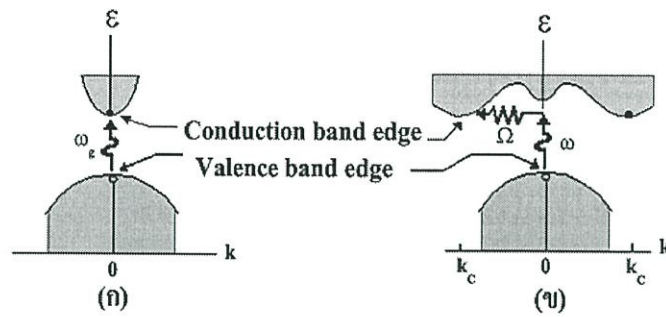


รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

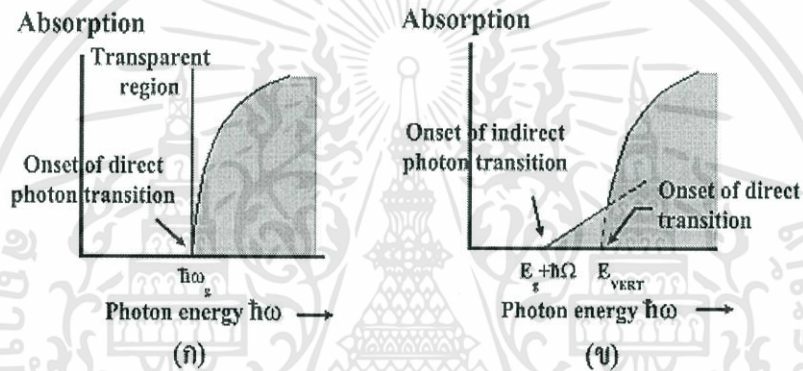
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะ

เรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่างลงไป ในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่า มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้ว บางส่วนรูปที่ 2.25 (จ) และเราบอกได้ว่า แถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.25 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่  $(n+1)$  ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่  $n$  และระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $\hbar\omega = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g = \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{VERT}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ข)



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

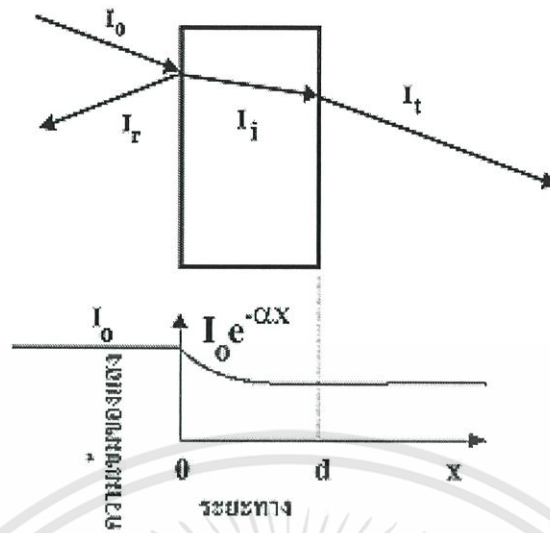


รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

### 2.13.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.31)$$

เมื่อ

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.32)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.33)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.34)$$

### 2.13.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.28 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.35)$$

เมื่อ

T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.36)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.37)$$

เมื่อ

n	คือ	จำนวนจริง
K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

### 2.13.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ

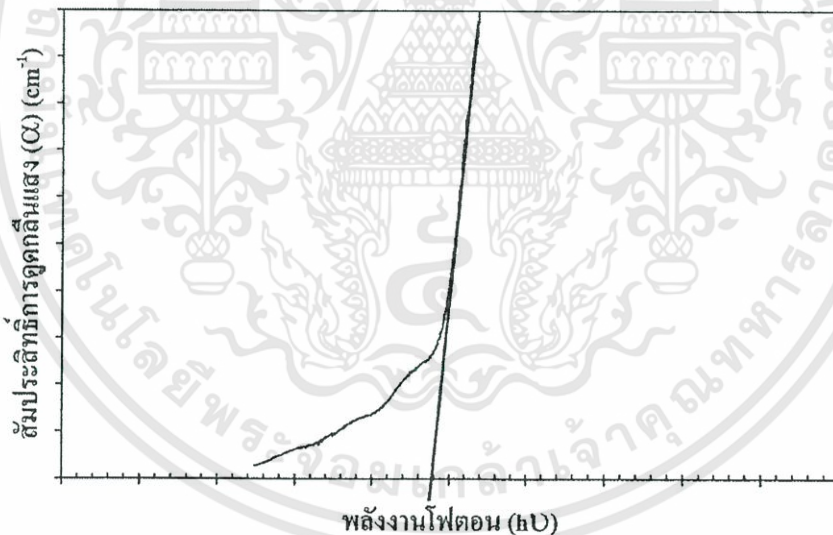
แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอปลักษณ์นี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.28 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบดงั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.38)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการ

ย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่มีอิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.41)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^3 \quad (2.42)$$

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



## 2.14 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ [8,12-24]

ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นมีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนประมาณ 800-900 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร.วินาที) ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีมีสภาพคล่องของโฮลประมาณ 80 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร.วินาที) ความหนาแน่นของพาหะมีค่า  $10^{16}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร การแอนนัลแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นในบรรยากาศของแคดเมียมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีซึ่งมีความต้านทานสูงเมื่อให้ความร้อนในบรรยากาศของเทลลูเลียมจะทำให้มีความต้านทานต่ำซึ่งแสดงถึงการเพิ่มสภาพต้านทาน การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากเทลลูเลียมจะสร้างระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างพลังงานที่ 0.1 ถึง 0.28 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์กลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ขึ้นกับคุณสมบัติของผลึก ปี 1972 จากการศึกษาของบาโกซิวนาไท์ (Bagociunaite) และคณะ แสดงให้เห็นถึงขอบของเกรนมีบทบาทมากกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ จากผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ  $10^{16}$  -  $10^{17}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร และสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 5-50 ตารางเซนติเมตรต่อ(ปริมาตร.วินาที)

## 2.15 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [8,12-24]

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.15.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำเพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายความหนาแน่นของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นไปตามฟังก์ชันการแจกแจงแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ดังสมการที่ (2.32)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1} \quad (2.43)$$

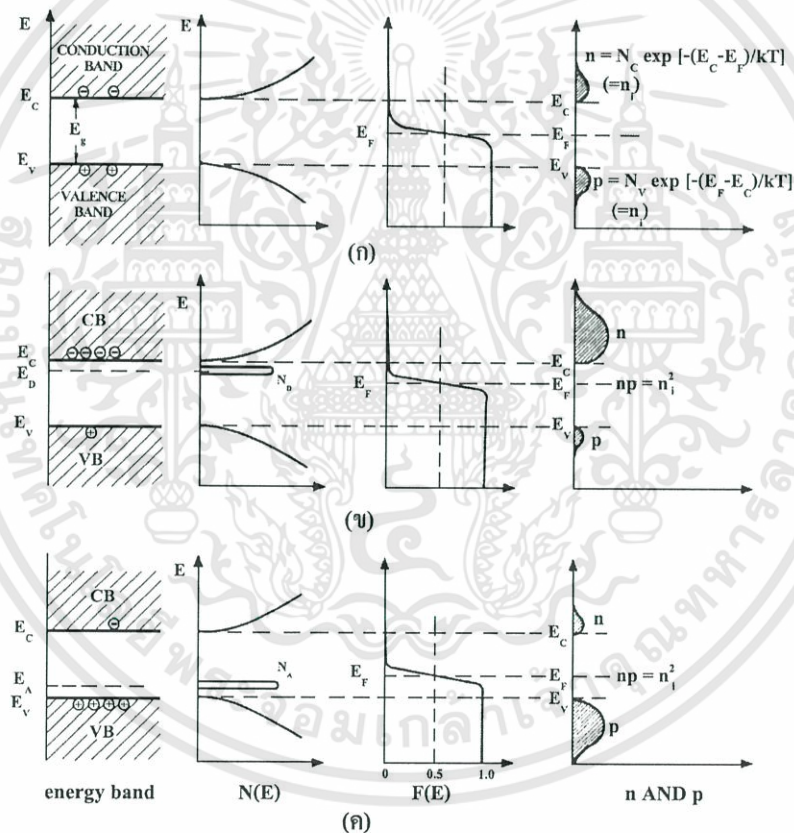
เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $E$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

$k$  คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann constant) =  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีที่สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็กซ์ทรินซิก (extrinsic semiconductor)



รูปที่ 2.32 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบ

เฟอร์มี - ดิแรกและความหนาแน่นพาหะของ

ก. สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิก

ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.15.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

ในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน ขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบเวเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_C(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะพลังงานในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (2.44)$$

เมื่อ  $N_C$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนี้

$$N_C(E) = 2\pi \left( \frac{2m_c^*}{h} \right)^{1/2} E^{1/2} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $m_c^*$  คือ มวลยังผล (effective mass of electron) ของอิเล็กตรอน ในแถบนำ

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล.วินาที

จากสมการที่ (2.40) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_i} n(E)d(E) = \int_0^{E_i} N_C f(E)dE \quad (2.46)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมาก กล่าวคือที่อุณหภูมิห้อง 300 เคลวิน นั้นพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกจะมีค่าประมาณ 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ขณะที่ช่องว่างแถบพลังงานของผลึกที่อุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสถานะที่ไม่ซ้อนสถานะ (non-degeneracy) และ  $n(E)d(E)$  มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.41) จึงสามารถขยายขอบเขต  $E_i$  ออกไปจนถึงอนันต์และสามารถเขียนสมการที่ (2.41) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \int_0^\infty \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} dE \quad (2.47)$$

เนื่องจาก  $\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1 \gg 1$  นั่นคือ

$$n_i = N_C \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.48)$$

เมื่อ

$$N_C = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.49)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_V \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.50)$$

เมื่อ

$$N_V = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right] \quad (2.51)$$

โดยที่  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

$N_V$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากันดังนั้นจากสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.45) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.52)$$

และ

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.53)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left( \frac{m_c^* m_h^*}{m^2} \right)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.49) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

### 2.15.1.2 สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรีนซิก

เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลความเข้มข้นของผลึกความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮล จะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิก ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_C \exp \frac{E_F}{kT} \quad (2.55)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_V \exp \left[ -\frac{E_F - E_g}{kT} \right] \quad (2.56)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานไม่ซ้อนสถานะจะยังคงมีความสัมพันธ์

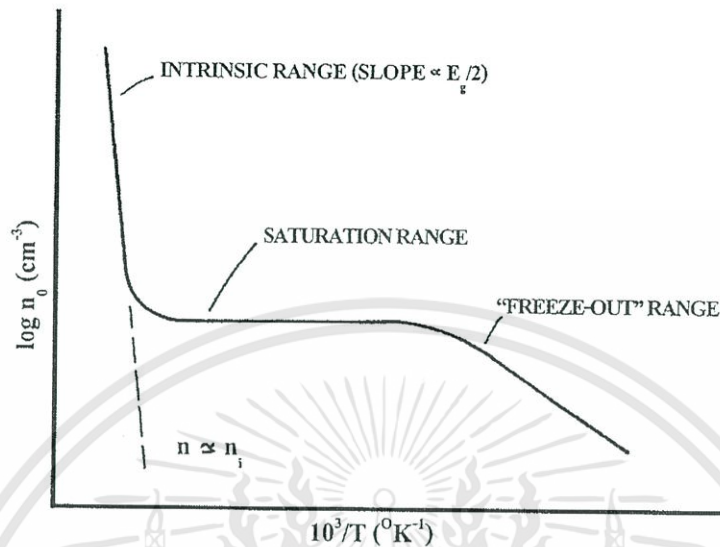
$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp \left[ -\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.57)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวชนิดอื่น ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่มีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงาน ( $E_d$ ) ของอะตอมผู้ให้ และอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงาน ( $E_a$ ) ของอะตอมผู้รับ จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.58)$$

เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

$N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ  
 $n_d, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์



รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.33 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ (อิเล็กตรอน) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมินั้น เราสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่มีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อนพาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.53) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.59)$$

จากสมการที่ (2.52) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.60)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.61)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนสิก ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือปนหลายๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิตั้งแต่แบบเอกซ์โพเนนเชียลเรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณอินทรีนสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.55) และ (2.56) จะกลายเป็นสมการในช่วงบริเวณอินทรีนสิก

$$n = p = n_i \quad (2.62)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนสิกพาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวินจะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนหลายๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.55) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.63)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ ( $n_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล ( $p$ ) และอะตอมผู้รับ ( $n_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.53) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.64)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.65)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ แฟกเตอร์สภาพซ้อนสถานะ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้จากสมการที่ (2.50) (2.59) และ (2.60) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.61) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \quad (2.66)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.67)$$

และเมื่อ  $n$  อยู่ในรูปของสมการกำลังสองซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d - N'_c) + \frac{1}{2}\left[(N_d - N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.68)$$

เมื่อ  $E_d \gg kT$  และ  $N'_c$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.63) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N'_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{N'_c(N_d + N_a)}{N_a + N'_c} + \dots$$

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.69)$$

ถ้า  $N_a \gg N'_c$  สมการที่ (2.64) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.70)$$

ถ้า  $N_a$  มีค่าน้อยมากนั่นคือ  $N_d \gg N'_c \gg N_a$  จะทำให้สมการที่ (2.61) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.71)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_c} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.72)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงที่สองนี้ว่าบริเวณ ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.66) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.67) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

## 2.16 สภาพนำไฟฟ้า [8, 12-20]

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

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

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

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.74)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดขวาง A ซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.75)$$

และ

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (2.76)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.73) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{\ell} \right) \quad (2.77)$$

หรือ

$$V = \left( \frac{\ell}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho \ell}{A} \right) I = IR \quad (2.78)$$

สมการที่ (2.78) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

### 2.16.1 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [16]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของซีโด ในแบบจำลองนี้ ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกักประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{-1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.79)$$

เมื่อ	$\Phi_b$	คือ	ค่าค่าแกงศักย์
	A	คือ	ค่าคงตัว
	T	คือ	อุณหภูมิหน่วยเป็นเคลวิน
	k	คือ	ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ = $1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ มอตต์ (Mott) ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดแบบพิสัยที่ไม่คงที่ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพจน์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (2.80)$$

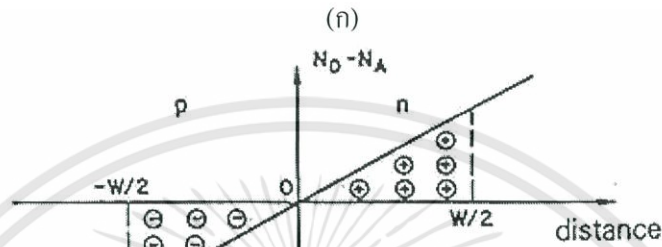
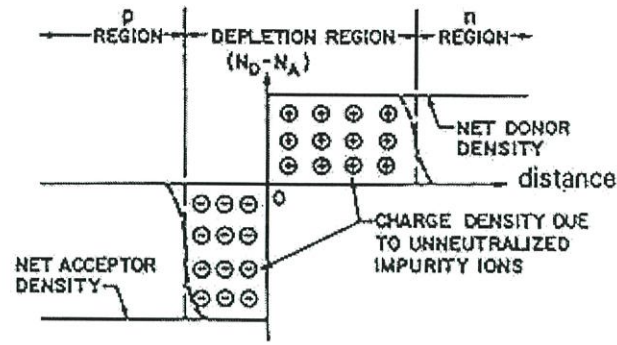
เมื่อ  $T_0$  คือ อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน)

## 2.17 รอยต่อวิวิธพันธุ์ [31-33]

โดยทั่วไปถ้ากล่าวถึงรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction) จะหมายถึงรอยต่อหรือผิวสัมผัสเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและหรือ สมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงอีกทั้งลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน 2 ชนิด โดยรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ระบบ คือ

1. การจำแนกรอยต่อแบบฉับพลัน (abrupt) และรอยต่อแบบลดหลั่น (graded) โดยพิจารณาจากระยะทางช่วงเปลี่ยน (transition) พหุจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งอย่างสมบูรณ์ที่บริเวณใกล้ผิวตัวอย่างเช่น ในกรณีรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันนั้น จะมีการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเพียงแคในระยะของอะตอมเท่านั้น ( $\ll 1 \mu\text{m}$ ) ในขณะที่รอยต่อแบบลดหลั่นจะมีระยะของการเคลื่อนย้ายกว้างถึงช่วงระยะการแพร่ (diffusion length) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.34(ก) และ (ข)
2. การจำแนกรอยต่อวิวิธพันธุ์ตามชนิดของสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของสารที่อยู่ในแต่ละด้านของรอยต่อ โดยที่ถ้าสารที่อยู่ในแต่ละด้านของรอยต่อมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นแบบเดียวกัน เช่น พี-พี (p-p) หรือ เอ็น-เอ็น (n-n) จะเรียกรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์นี้ว่า รอยต่อวิวิธพันธุ์แบบเหมือน (isotype heterojunction) แต่ถ้าสภาพการนำไฟฟ้าของสารในแต่ละด้านไม่เหมือนกันเช่น พี-เอ็น (p-n) หรือ เอ็น-พี (n-p) จะเรียกรอยต่อแบบต่าง (anisotype heterojunction)

สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์จะถูกกำหนดโดยตัวแปรของสารกึ่งตัวนำทั้งสองทำให้การจัดเรียงอะตอมมีความซับซ้อนกันมากกว่ารอยต่อแบบเอกพันธุ์ (homojunction) ซึ่งสมบัติทางกายภาพถูกกำหนดด้วยสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อที่นำไปสู่การโค้งงอของแถบนำและแถบวาเลนซ์



รูปที่ 2.34 แสดงประจุค้างของรอยต่อ

ก. รอยต่อแบบฉับพลัน

ข. รอยต่อแบบลดหลั่นในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

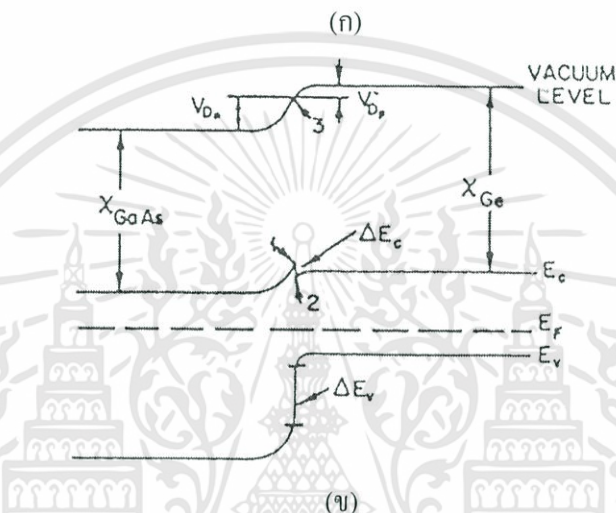
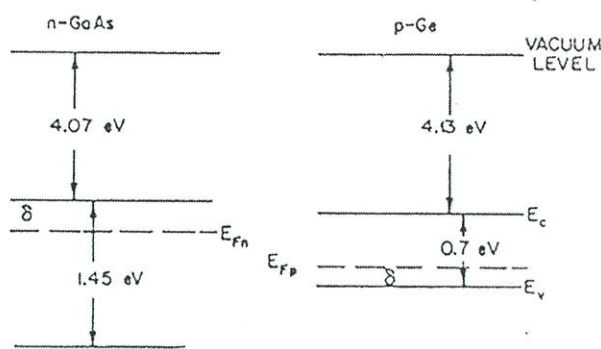
### 2.17.1 โครงสร้างแถบพลังงาน

เนื่องจากลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธุ์จะขึ้นกับตัวแปรของสารทั้งสองทั้งสองชนิดที่นำมาประกบกัน ดังนั้นในขั้นแรกพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของสารทั้งสองในขณะที่ยังไม่ได้นำมาประกบเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ โดยในที่นี้จะสนใจเฉพาะรอยต่อที่เป็นแบบฉับพลัน เพื่อให้เป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงขอยกตัวอย่างรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างสารกึ่งตัวนำ Ge ชนิดพี กับสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็น ซึ่งมีค่าตัวแปรต่างๆดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ GaAs-Ge ชนิดพี-เอ็น

	GaAs	Ge
Energy gap, $E_g$	1.45 eV	0.7 eV
Electron affinity, $\chi$	4.07 eV	4.13 eV
Net donor doping, $N_D - N_A$	$10^{16} \text{ cm}^{-3}$	—
Net acceptor doping, $N_A - N_D$	—	$3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$E_c - E_F = \delta_{0, \text{GaAs}}$	0.1 eV	—
$E_F - E_v = \delta_{0, \text{Ge}}$	—	0.14 eV
Lattice constant, $a$	5.654 Å	5.658 Å
Dielectric constant, relative	11.5	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน n-GaAs และ p-Ge  
 ก. ก่อนเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์  
 ข. หลังนำมาต่อเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์

ในรูปที่ 2.35 (ก) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแถบพลังงานของ n-GaAs และ p-Ge ในขณะที่แยกกันอยู่ โดยมีตัวแปรที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำแต่ละตัวคือค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี ( $\chi$ ) ซึ่งนิยามจากพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากขอบล่างสุดของแถบนำไปยังระดับสุญญากาศ (vacuum level) ค่าเวิร์กฟังก์ชัน ( $\Phi$ ) ซึ่งนิยามจากพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ไปยังระดับสุญญากาศ

ในรูปที่ 2.35 (ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานภายหลังจากนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาประกบกัน ซึ่งพบว่ามีการโค้งงอของแถบพลังงานที่บริเวณผิวรอยต่อ (interface) ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นผลของสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในทิศจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพีเท่านั้น แต่ยังรวมกับการเกิดขึ้นของตัวแปรใหม่อีก 4 ตัว คือ ผลต่างของขอบบนของแถบวาเลนซ์ ( $\Delta E_v$ ) ผลต่างของขอบล่างของแถบนำ ( $\Delta E_c$ ) ความต่างศักย์การแพร่ในสารกึ่งตัวนำชนิด

เอ็น ( $V_{Dn}$ ) และในสารสารกึ่งตัวนำชนิดพี ( $V_{Dp}$ ) โดยที่สภาพการโค้งงอของแถบพลังงานจะมากขึ้นขึ้นอยู่กับค่าของ  $V_{Dn}$  และ  $V_{Dp}$  ส่วนตัวแปร  $\Delta E_V$  และ  $\Delta E_C$  นั้นเป็นความไม่ต่อเนื่องของแถบนำและแถบวาเลนซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างกันของช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาประกบกันในสภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับเข้าหากันโดยพบว่าระยะกระจัดที่ระดับเฟอร์มิจะมีค่าเท่ากับ  $V_{Dn} + V_{Dp}$  ซึ่งจากรูปที่ 2.35 (ข) จะได้ว่า

$$E_{FP} - E_{Fn} = (\chi_{Ge} + E_{g(Ge)} - \delta_{Ge}) - (\chi_{GaAs}) = V_{Dn} + V_{Dp} \quad (2.81)$$

โดยที่ตัวแปร  $\delta$  คือผลต่างระหว่างระดับเฟอร์มิ กับขอบของแถบพลังงานที่อยู่ใกล้ที่สุด จะเห็นได้ว่า ผลต่างของระดับพลังงานในสมการที่ (2.81) จะบ่งชี้ถึงสภาพการโค้งงอของแถบพลังงานทั้งหมด โดยถ้าให้บริเวณที่มีการเคลื่อนย้ายของพาหะครอบคลุมถึงระยะ  $\chi_p$  และ  $\chi_n$  จากผิวของรอยต่อซึ่งจะได้ค่า

$$\chi_n / \chi_p = N_A / N_D \quad (2.82)$$

เพื่อเป็นการอนุรักษ์ประจุ จากสมการปัวซอง (Poisson's equation) สามารถเขียนได้ว่า

$$V_{Dn} = N_D \chi_n^2 / 2\epsilon_{Ge}$$

$$V_{Dp} = N_A \chi_p^2 / 2\epsilon_{GaAs}$$

โดย  $\epsilon_{GaAs}$  และ  $\epsilon_{Ge}$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ GaAs และ Ge ตามลำดับซึ่งจะได้

$$V_{Dn} / V_{Dp} = N_A \epsilon_{GaAs} / N_D \epsilon_{Ge} \quad (2.83)$$

จากรูป 2.35 (ข) พบว่าชั้นพลังงาน  $\Delta E_C$  เขียนได้ว่า

$$\Delta E_C = \delta_{Ge} + V_{Dn} - \{E_{gGaAs} - \delta_{GaAs}\} + V_{Dp} \quad (2.84)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.81) จะได้ว่า

$$\Delta E_C = \chi_{\text{GaAs}} - \chi_{\text{Ge}} \quad (2.85)$$

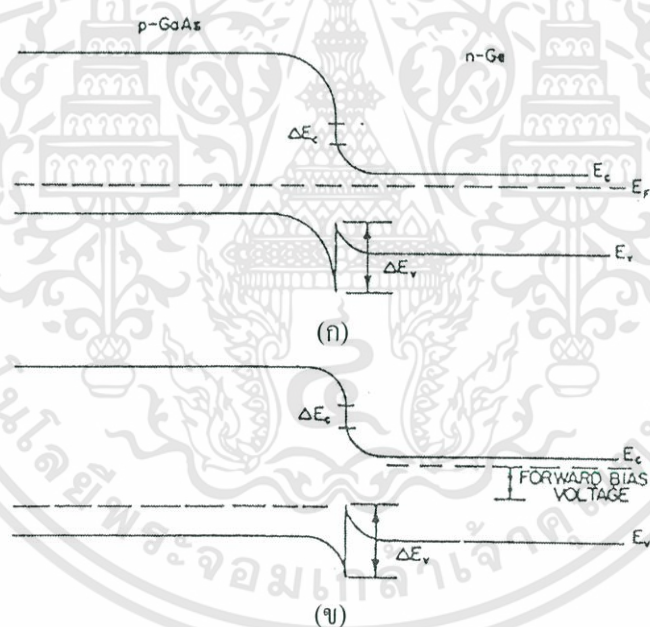
ในทำนองเดียวกันชั้นพลังงานของแถบวาเลนซ์จากรูป 2.35 (ข) ก็สามารถเขียนได้เช่นเดียวกันคือ

$$\Delta E_V = \{E_{g(\text{Ge})} - E_{g(\text{GaAs})}\} - \{\chi_{\text{Ge}} - \chi_{\text{GaAs}}\} \quad (2.86)$$

จากสมการ (2.85) และ (2.86) เมื่อนำมารวมกันจะได้

$$\Delta E_C + \Delta E_V = E_{g(\text{GaAs})} - E_{g(\text{Ge})} \quad (2.87)$$

ในแบบจำลองโครงสร้างแถบพลังงานในรูปที่ 2.35 นั้นให้ถือว่าไม่มีประจุอยู่ในบริเวณผิวระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด ซึ่งถ้ามีประจุอยู่ก็จะเกิดระดับพลังงานชั้นที่แนวผิวสัมผัสจะทำให้เกิดการกักเก็บอิเล็กตรอนหรือ โฮลจากสารกึ่งตัวนำด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของรอยต่อวิวิธพันธุ์



รูปที่ 2.36 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ของ GaAs-Ge

ก. เมื่อไม่มีแรงดันไบอัส

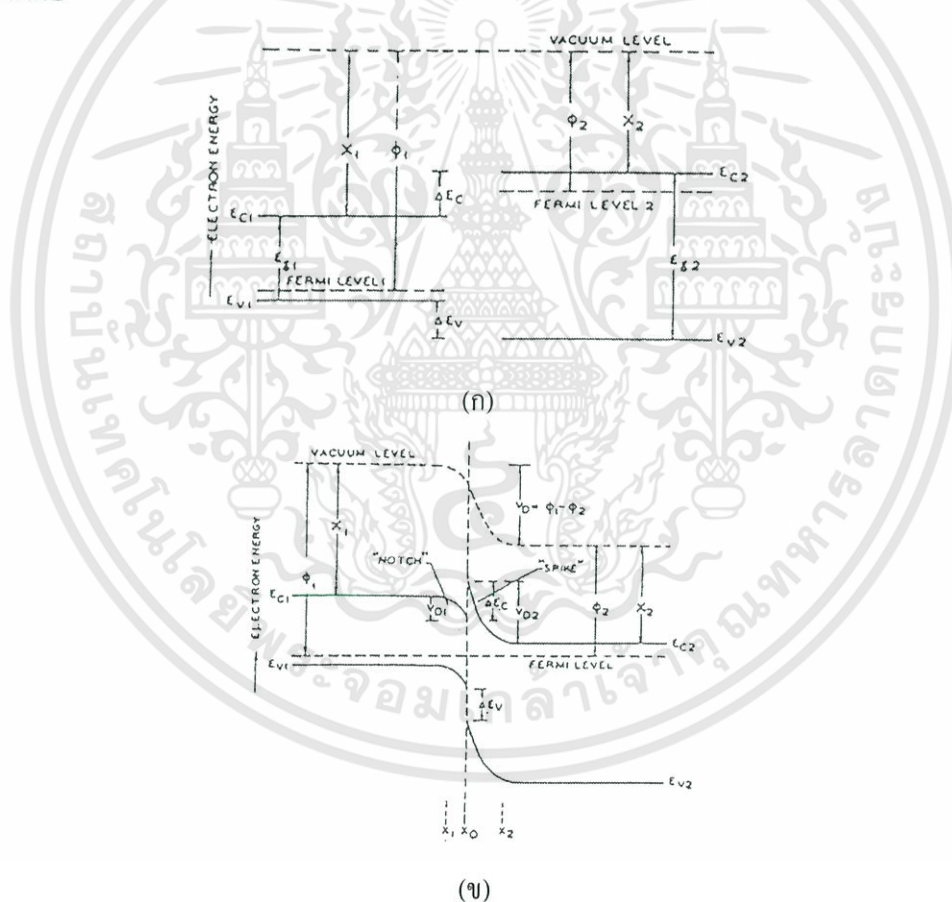
ข. เมื่อมีแรงดันไบอัสตรง

## 2.17.2 แบบจำลองของรอยต่อวิวิธพันธุ์

การศึกษาแบบจำลองของรอยต่อวิวิธพันธุ์ในที่นี้ จะเห็นถึงการศึกษารอยต่อวิวิธพันธุ์แบบต่างฉับพลัน (abrupt anisotype heterojunction) โดยรอยต่อชนิดนี้จะรวมถึงทั้งแบบที่เป็น พี-เอ็น และ เอ็น-พี โดยแบบจำลองที่ใช้อธิบายรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้น ส่วนใหญ่ได้พัฒนาและขยายจากแบบจำลองของรอยต่อเอกพันธุ์ที่เป็นพื้นฐานโดยทั่วไป ซึ่งถูกเสนอโดย ซอกค์เลย์ โดยแบบจำลองของรอยต่อวิวิธพันธุ์ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปมีดังนี้

### 2.17.2.1 แบบจำลองการแพร่ซึม (diffusion model)

แบบจำลองนี้ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย แอนเดอร์สัน และได้ถูกพัฒนากันต่อมา โดยที่ส่วนมากไม่คำนึงผลที่เกิดขึ้นจากไดโพล (dipole) และสถานะผิวรอยต่อ (interface state) พิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิด เอ็นและพี ในขณะที่อยู่อิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน และเมื่อนำมาต่อเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์แล้ว โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.37 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดต่าง

ก. ก่อนการนำมาเชื่อมต่อกัน

ข. หลังจากการนำมาเชื่อมต่อกันแล้ว

บริเวณขอบของแถบการนำในโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อในรูปที่ 2.37 (ข) พบว่ามีการปรากฏของยอดแหลม (spike) และรอยนูน (notch) ขึ้นที่ผิวรอยต่อ ซึ่งจะพบปรากฏการณ์นี้ในกรณีที่มีค่า  $\chi_1 > \chi_2$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่ต่างกัน โดยมีค่าของช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ต่างกันถูกเจือ (dope) ให้มีชนิดการนำไฟฟ้าต่างกัน มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon$ ) ต่างกัน อีกทั้งยังมีค่าเวิร์กฟังก์ชัน (work function)  $\Phi$  และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity)  $\chi$  ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองนี้ ก็ยังต่างกัน โดยปริมาณทั้งสองค่าดังกล่าวนิยามโดยค่าพลังงานของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มี ( $E_F$ ) และจากขอบล่างของแถบการนำ ( $E_C$ ) ไปยังตำแหน่งภายนอกสารหรือที่เรียกว่าระดับสูญญากาศ ตามลำดับ ขอบบนของแถบวาเลนซ์เขียนแทนด้วย  $E_V$  ดังนั้นห้อยท้าย 1 และ 2 แทนสารกึ่งตัวนำชนิด พี และชนิด เอ็น ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.37 (ก) จะเห็นว่า ขอบของแถบพลังงาน  $E_{C1}$ ,  $E_{C2}$ ,  $E_{V1}$  และ  $E_{V2}$  ในสภาวะก่อนที่จะเกิดรอยต่อจะเป็นเส้นตรงในแนวระดับ โดยมีระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ที่แตกต่างกัน ภายหลังจากการนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดมาเชื่อมเข้าด้วยกัน เมื่อถึงสภาวะสมดุลเชิงความร้อน พบว่าจะมีการปรับ ระดับพลังงานเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำทั้งสองให้มาเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน จากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นผลให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ และจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน ในรูปที่ 2.37 จะพบว่าความไม่ต่อเนื่องของขอบแถบการนำโดยเขียนช่วงของความไม่ต่อเนื่องนั้น แทนด้วย  $\Delta E_C$  ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดในรอยต่อแบบนี้ พบว่าชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) จะเกิดขึ้นที่ทั้งสองด้านของผิวรอยต่อ โดยที่ไม่คำนึงถึงการมีสถานะผิวรอยต่อแล้ว ผลรวมของแรงดันในตัว (built-in voltage:  $V_D$ ) อันเป็นผลมาจากความต่างของค่าเวิร์กฟังก์ชัน ( $\phi_1 - \phi_2$ ) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันในตัว ( $V_D$ ) ในแต่ละด้านของรอยต่อ ( $V_D = V_{D1} + V_{D2}$ ) โดยที่  $V_{D1}$  และ  $V_{D2}$  เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic potential) ที่สภาวะสมดุลของสารกึ่งตัวนำ 1 และ 2 ตามลำดับ และเพราะค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของทั้งสองสารมีค่าต่างกัน จึงทำให้สนามไฟฟ้าสถิตมีค่าไม่ต่อเนื่อง ณ ผิวสัมผัสของรอยต่อ

ถ้าตำแหน่งที่บริเวณผิวสัมผัส ในรูปที่ 2.37 (ข) เขียนแทนด้วย  $x_0$  ดังนั้นความกว้างของช่วงการเปลี่ยนแปลง (transition widths) ที่บริเวณทั้งสองข้างของผิวสัมผัสของรอยต่อวิธีพินธุ์แบบพี-เอ็น นี้จะสามารถหาได้จากการแก้สมการปัวซองที่ใช้กับรอยต่อเอกพันธ์ โดยจะได้ว่า

$$(x_0 - x_1) = \left[ \frac{2N_{A1}\epsilon_1\epsilon_2 V_D}{qN_{D2}(\epsilon_1 N_{A1} + \epsilon_2 N_{D2})} \right]^{1/2} \quad (2.88)$$

และ

$$(x_2 - x_0) = \left[ \frac{2N_{D2}\epsilon_1\epsilon_2 V_D}{qN_{A1}(\epsilon_1 N_{A1} + \epsilon_2 N_{D2})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.89)$$

โดย  $q$  เป็นค่าของประจุ  $\epsilon_1$  และ  $N_{A1}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเข้มข้นของอะตอมผู้รับในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วน  $\epsilon_2$  และ  $N_{D2}$  นั้นเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และค่า  $V_D$  จะเท่ากับผลรวมของ  $V_{D1}$  และ  $V_{D2}$  โดย  $V_D = V_{D1} + V_{D2}$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันในตัวสัมพัทธ์,  $V_{D1}$  และ  $V_{D2}$  ในสารกึ่งตัวนำแต่ละตัว สามารถเขียนได้เป็น

$$V_{D1}/V_{D2} = N_{D2}\epsilon_2/N_{A1}\epsilon_1 \quad (2.90)$$

และพบว่าถ้าความจุไฟฟ้า (capacitance) ต่อพื้นที่ของช่วงการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าเท่ากับ

$$C/a = \left[ \frac{qN_{A1}N_{D2}\epsilon_1\epsilon_2/2(\epsilon_1N_{A1} + \epsilon_2N_{D2})}{V_D^{-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.91)$$

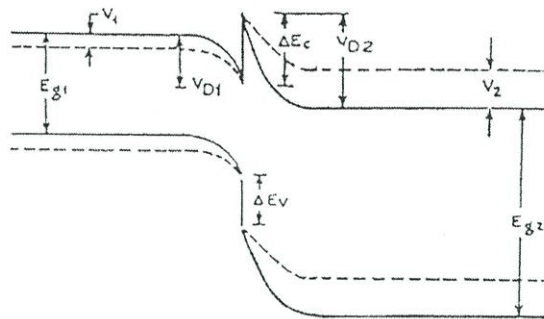
ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันจากภายนอก  $V$  คร่อมรอยต่อ สมการข้างต้นนั้น สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยเปลี่ยนเทอมจาก  $V_D$  เป็น  $(V_{D2}-V)$  ส่วนเทอม  $V_{D1}$  และ  $V_{D2}$  เปลี่ยนเป็น  $(V_{D1}-V_1)$  และ  $(V_{D2}-V_2)$  ตามลำดับ

ในแบบจำลองการแพร่ที่ แอนเดอร์สัน ถือว่า เพราะความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อ ดังนั้นกระแสการแพร่ (diffusion current) ที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย อิเล็กตรอน หรือ โฮลส่วนใหญ่ ซึ่งสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบ พี-เอ็น ในที่นี้ พบว่ากระแสพาหะหลักจะมาจากอิเล็กตรอนจะมีขนาดเล็กกว่าที่ขวางกั้นโฮล

ถ้าไม่คิดถึงผลกระทบการก่อเกิดและการรวมตัว (generation-recombination current) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าจะสามารถเขียนได้ว่า

$$I = A \exp(-qV_{D2}/kT) [\exp(qV_2/kT) - \exp(-qV_1/kT)] \quad (2.93)$$

โดยที่  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นส่วนของแรงดันที่ถูกป้อนซึ่งปรากฏอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ เอ็น ตามลำดับ แสดงได้ดังรูป 2.38,  $k$  เป็นค่าคงของโบลตซ์มันน์  $T$  คือ อุณหภูมิ และตัวแปร  $A$  จะมีค่าเท่ากับ  $aqXN_{D2}(D_{n1}\tau_{n1})^{\frac{1}{2}}$  โดยที่  $X$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ของอิเล็กตรอนข้ามผิวสัมผัสบริเวณรอยต่อ ส่วน  $a$  คือ พื้นที่ของรอยต่อ  $D_{n1}$  และ  $\tau_{n1}$  คือ ค่าคงที่การแพร่ และเวลาชีวิต (life time) ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ตามลำดับ



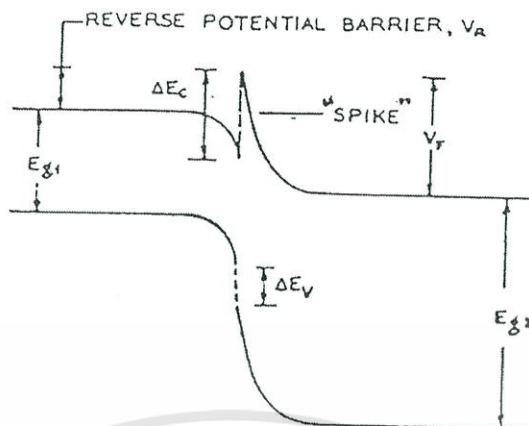
รูปที่ 2.38 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี-เอ็น ภายใต้การไบอัสตรง เส้นทึบแสดงถึงกรณี เมื่อไม่มีการไบอัส (zero bias)

จากสมการ (2.93) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เทอมแรกที่อยู่ในวงเล็บจะมีความสำคัญในกรณีที่มีการไบอัสตรง ส่วนเทอมที่ 2 จะเป็นการไบอัสกลับ (reverse bias)

ถ้า  $v_2 = V/\eta$  จะได้  $v_1 = (1 - 1/\eta)V$  จะพบว่ากระแสแปรผันแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับความต่างศักย์ ทั้งในด้านการไบอัสกลับ โดย  $\eta$  จะมีค่าเท่ากับ  $(1 + N_{D2} E_2 / N_{D1} E_1)$

#### 2.17.2.2 แบบจำลองการปลดปล่อย (emission model)

ในการสมมุติค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (X) ซึ่งใช้ในการอธิบายผลจากการทดลอง โดยใช้แบบจำลองการแพร่ข้างต้นนั้น เป็นจุดเริ่มต้นแนวความคิดของการหาแบบจำลองใหม่ๆ มาช่วยในการหาค่าอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองการปลดปล่อยก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเพอร์ล์มาน (Perlman) และ ฟุชต์ (Feucht) โดยได้มีการรวมเอาผลอันเนื่องมาจากยอดแหลมเข้ามาคิดด้วย แบบจำลองนี้เป็นการนำเอาแบบจำลองจลนศาสตร์ดั้งเดิม (classical kinetic model) มาช่วยในการประเมินค่าของกระแสปลดปล่อย (emission current) จากในแบบจำลองการแพร่ เพื่อที่จะใช้ในการขยายข้อจำกัดความของพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้น ณ บริเวณข้อบกพร่องผลึก ตัวอย่างเช่นในกรณีของรอยต่อ วิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิดพี-เอ็น ดังในรูปที่ 2.39 โดยการเคลื่อนย้ายประจุส่วนใหญ่จะเป็นอิเล็กตรอน โดยมีกระบวนการเกิดขึ้น 2 กระบวนการที่จะแสดงถึงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้า คือ กระบวนการแบบรอยต่อเอกพันธ์ ซึ่งการเกิดขึ้นของพาหะข้างน้อยที่บริเวณขอบของเขตปลอดพาหะ จะเป็นตัวจำกัดการไหลของกระแส โดยที่กระบวนการรอยต่อเอกพันธ์นี้จะเกิดในสารกึ่งตัวนำด้านชนิดพี และกระบวนการแบบรอยต่อโลหะ- สารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสนั้นจะถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำด้านชนิดเอ็น โดยกระบวนการหลังนั้น จะมีผลอย่างมากต่อลักษณะเฉพาะของการนำกระแสเมื่อมีการไบอัสกลับค่าสูงๆ



รูปที่ 2.39 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉนวนชนิด พี-เอ็น ในลักษณะไม่สมดุล

ส่วนกระบวนการแรกนั้นจะมีผลในกรณีขดแหลมมีการวางตัวอยู่ใต้แถบนำของสารชนิดพี นอกเขตปลอดพาหะซึ่งสามารถเขียนสมการเชิงวิเคราะห์ของลักษณะเฉพาะกระแสแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพี-เอ็น โดยไม่คำนึงถึงผลที่เกิดจากกระบวนการก่อเกิดและกระบวนการรวมตัว ที่ปรากฏ ณ บริเวณเขตปลอดพาหะ ได้ดังสมการที่ (2.94) คือ

$$I = I_s [\exp(qV/kT) - 1] / [1 + I_s/I_d] \quad (2.94)$$

โดยที่

$$I_s = aqN_{D1}(D_{n1}/\tau_{n1})^{1/2} \quad (2.95)$$

ซึ่งจะสมมูลกับปริมาณกระแสอิ่มตัวของอิเล็กตรอน ในสมการรอยต่อเอกพันธ์ชนิดพี-เอ็น ซึ่งเสนอโดย ชอกส์เลย์ จะได้ว่า

$$I_D = 1/2 aqX_m N_{D2} \bar{v}_{xe2} \exp[-q/kT(V_F + V)] \quad (2.96)$$

ซึ่ง  $I_D$  คือ กระแสจำกัดปลดปล่อย (emission limited current) โดยสัญลักษณ์ในสมการ (2.96) นั้น  $V$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป,  $a$  คือพื้นที่รอยต่อ,  $N_{D1}$  และ  $N_{D2}$  คือความเข้มข้นของผู้ให้ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็น  $\bar{v}_{xe2}$  มีค่าเท่ากับ  $(2kT/\pi m_n^*)^{1/2}$  โดยที่  $m_n^*$  คือค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนในสารชนิดเอ็น,  $V_F$  คือ ค่าแพ่งศักย์กันทางตรง (ดูรูปที่ 2.39)  $D_{n1}$  และ  $\tau_{n1}$  คือค่าคงที่การแพร่และค่าชั่วชีวิตของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และถ้า  $X_m$  คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งรวมผลของความไม่สมมาตรแบบดั้งเดิมเชิงมวลกันขวาง (classical

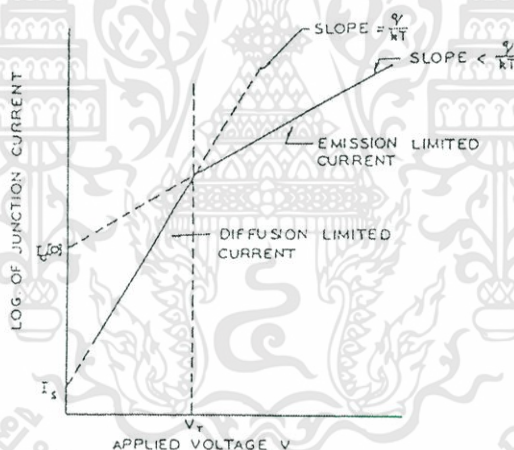
non-symmetric effect of mass barrier) เข้ากับผลของความสมมาตร อันเนื่องมาจากลักษณะตามธรรมชาติของคลื่นกระแสพาหะ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบ สมการ(2.94) สามารถเขียนได้ใหม่ ในลักษณะเดียวกันกับสมการ (2.93) ของ แอนเดอร์สัน คือ

$$I = (1/2) aqX_m N_{D2} \bar{v}_{xe2} \exp(-qK_2 V_D / kT) [\exp(qK_2 / kT) - \exp(-qK_1 V / kT)] \quad (2.97)$$

โดยที่

$K_2 = (1 + N_{D2} \epsilon_2 / N_{A1} \epsilon_1)^{-1}$  และค่าของ  $K_1 = (1 - K_2)$  จะสังเกตได้ว่าใน สมการที่ (2.97) นั้นจะต่างจากสมการ(2.94)ก็เพียงแต่การแทนที่ของเทอม  $x_m \bar{v}_{xe2} / 2$  ในเทอม  $X(D_{n1} / \tau_{n1})^{1/2}$  อย่างไรก็ตามแม้แต่สำหรับกรณี  $x = x_m = 1$  กระแสที่ได้อาจมีขนาดแตกต่างกัน

ในสมการ (2.94) นั้น จะเห็นได้ว่า กระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นจะตามอัตราส่วนระหว่าง  $I_s / I_d$  ซึ่งถ้า  $I_s \ll I_d$  พบว่า กระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามแบบจำลองของรอยต่อไดโอดเอกพันธ์แบบ พี-เอ็น แต่ในกรณีที่  $I_s \gg I_d$  ค่าที่ได้จะเป็นไปตามแบบจำลองชอตต์กีไดโอด (Schottky diode model) ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดัน ไฟฟ้า ตามหลักทฤษฎีนั้น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.40



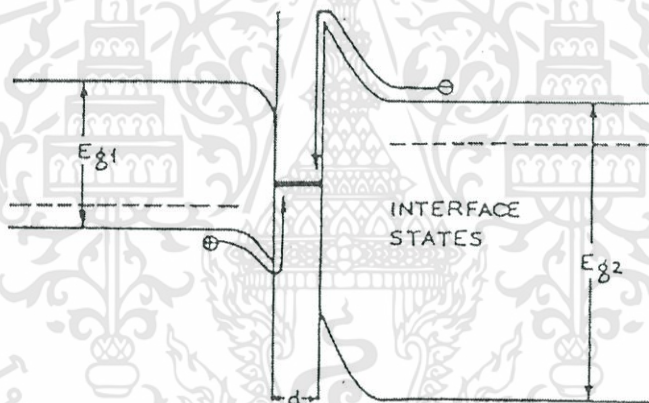
รูปที่ 2.40 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบจับปล้นชนิดพี-เอ็น

จากรูปที่ 2.40 จะสังเกตเห็นได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของกระแสที่บริเวณจุดแรงดันวิกฤติ (critical voltage :  $V_T$ ) โดยการเปลี่ยนของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรกก่อนถึงจุดแรงดันไฟฟ้าวิกฤตินั้น จะเป็นไปตามแบบการแพร่ แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่า แรงดันไฟฟ้าวิกฤติไปแล้ว ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า จะเป็นไปตามแบบปลดปล่อย

### 2.17.2.3 แบบจำลองการปลดปล่อย – การรวมตัวของพาหะ

(emission-recombination model)

แบบจำลองนี้ได้ถูกเสนอโดย โดเลกา (Dolega) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการเกิดขึ้นของชั้นบาง ๆ ที่บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อ ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนต่อโครงสร้างและจะเกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอนและโฮล ที่ข้ามกำแพงศักย์ของด้านตนเองมาพบกัน ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อ โดยกระบวนการปลดปล่อยเชิงความร้อน (thermal emission) กระบวนการรวมกันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อนี้ เป็นการบ่งชี้ว่าจะไม่มีกระบวนการเรียงกระแสเกิดขึ้น ถึงแม้ว่า บริเวณเขตปลอดพาหะ จะมีความกว้างมากกว่าชั้นบาง ๆ นี้ ในสภาวะสมดุล โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี-เอ็น ตามลักษณะแบบจำลองนี้ แสดงดังรูปที่ 2.41 ซึ่งจากแบบจำลองนี้รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น จะมีลักษณะคล้ายกับการมีรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ 2 รอยต่อ มาต่อกันอยู่โดยมีความเข้มข้นขอบเขตของกระแส พาหะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนให้



รูปที่ 2.41 แสดงถึงแบบจำลองการปลดปล่อย-รวมตัวของพาหะสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพี-เอ็น

ในการที่จะอธิบายลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้า แบบไบอัสตรงให้ง่ายต่อการเข้าใจนั้น แวนออปดรอพ (Van Opdrup) ได้เขียนสมการที่ซับซ้อนของ โดเลกา ใหม่ในรูปแบบของ

$$I = I_s [\exp(qV/\beta kT) - 1] \quad (2.98)$$

เมื่อ

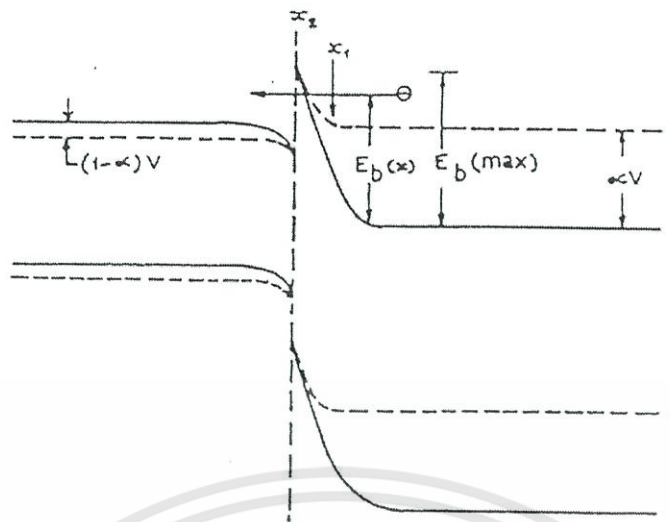
$$I_s = B \exp(-qV_D/\beta kT) \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า  $B$  คือตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และค่าของ  $(\beta)$  ในทั้งสองสมการนั้น บ่งชี้ถึงการแปรผันของอัตราส่วนของความเข้มข้นของความไม่สมบูรณ์ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด ความชันของกราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงของลักษณะเฉพาะแบบไบอัสตรงในแบบลอการิทึม จะอยู่ในช่วงระหว่าง  $q/kT$  ถึง  $q/2kT$  (ตัวอย่างเช่น  $\beta$  จะเปลี่ยนแปลงในช่วงค่าระหว่าง 1 ถึง 2) โดยค่ากระแสย้อนกลับซึ่งได้จากแบบจำลองนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลกับแรงดันไฟฟ้า เพราะความต้านทานย้อนกลับมีค่าสูงสุด เป็นที่น่าสังเกตว่าแบบจำลองนี้มีส่วนคล้ายคลึงกันกับแบบจำลองรอยต่อแบบเอกพจน์ของ ซาห์ (Sah), นอยซ์ (Noyce), และ ชอกก์เลย์ (Shockley) ยกเว้นแต่ในแบบจำลองรอยต่อเอกพจน์ที่กล่าวถึงนี้ สถานะการรวมตัว (recombination state) จะมีการกระจายอย่างเป็นระเบียบในที่ว่าง และมีค่าพลังงานไอออไนเซชันที่แน่นอน ในขณะที่แบบจำลองการปลดปล่อย - รวมตัวของพาหะ มีการกระจายตัวของชั้นพลังงานอย่างต่อเนื่อง และถูกจำกัดโดยบริเวณแคบ ๆ ณ ผิวลัสม์สรอยต่อ

#### 2.17.2.4 แบบจำลองการซุดอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (tunneling model)

แบบจำลองการซุดอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ใช้ในการอธิบายลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบลับพันชนิด พี - เอ็น นี้ ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย เรดิเกอร์ (Rediger), สตอปเพก (Stopek) และ วาร์ด (Ward) โดยมีพื้นฐานมาจากแนวความคิดของ ไพรซ์ (Price) โดยมีการเสนอว่า อิเล็กตรอนสามารถจะเคลื่อนที่ซุดอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ซึ่งอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่เป็นสารแบบมีช่องว่างพลังงานกว้างแทนที่จะข้ามกำแพงศักย์ ตามปกติ ดังในรูปที่ 2.42 แต่อย่างไร ก็ตามภายใต้สภาพการไบอัสตรงนั้น การไหลของอิเล็กตรอนจะเป็นแบบข้ามกำแพงศักย์แบบปกติ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการปลดปล่อยด้วยความร้อน หรือ จะเป็นการซุดอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ก็ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เป็นสำคัญ



รูปที่ 2.42 แสดงถึงแบบจำลองการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์โดยอาศัยโครงสร้างแถบพลังงานตามแบบของ แอนเดอร์สัน

อาศัยวิธีการประมาณค่า WKB แบบคลาสสิก และกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จากส่วนล่างของแถบนำตามกรณีในรูปที่ 2.42 สมการของความน่าจะเป็น ( $\mathcal{T}$ ) สำหรับการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ส่วนล่างของแถบการนำ ภายใต้การไบอัสตรงจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathcal{T} = \exp \left[ -2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_n^* \{E_b(x) - q\alpha V\}} / \hbar \, dx \right] \quad (2.100)$$

โดยที่  $E_b(x)$  คือความสูงของกำแพงศักย์ ณ ตำแหน่ง ( $x$ ) ใดๆ ได้ส่วนล่างของแถบนำ  $\alpha V$  คือ ส่วนของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลต่อการยกตัวขึ้นของแถบนำในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง,  $m_n^*$  คือ ค่ามวลยั้งผลของอิเล็กตรอนในสารชนิด เอ็น โดย  $q$  คือ ค่าประจุ และ  $\hbar = h/2\pi$

โดยอนุมานว่า  $E_b$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเทอม  $x$  ดังนั้นจะสามารถหาผลสำเร็จของสมการ (2.100) ได้หลายแบบ สำหรับกรณีที่ เป็นแบบเชิงเส้น เช่น กรณีที่มีสนามคงที่  $F_0$  ในช่วงเปลี่ยน, เรดิกเกอร์ (Rediker) สามารถหาผลสำเร็จโดยประมาณได้ว่า

$$\mathcal{T} \sim \exp \left[ - (4/3) (2m_n^*)^{1/2} \{E_b(\max)\}^{3/2} / \hbar F_0 \right] - \exp \left[ 2(2m_n^*)^{1/2} \{E_b(\max)\}^{1/2} q\alpha V / \hbar F_0 \right] \quad (2.101)$$

โดย  $E_b(\max)$  คือค่าแรงศักย์ที่สูงที่สุดเทียบกับส่วนล่างของแถบนำ ขณะไม่มีการไบอัสค่ากระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านค่าแรงศักย์ซึ่งหาได้จากค่าความน่าจะเป็นของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านค่าแรงศักย์ (สมการที่ 2.100) และ ฟลักซ์ (flux) ของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ ซึ่งจะพบว่าลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าภายใต้สภาวะไบอัสตรงสามารถเขียนได้เป็น

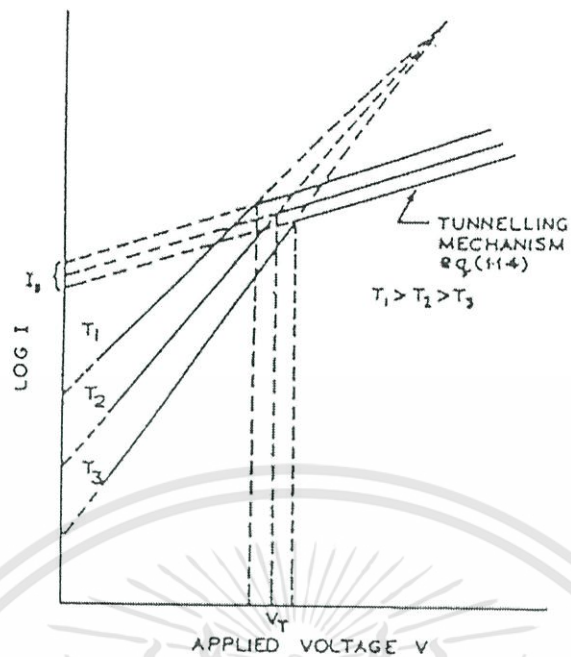
$$I = I_s(T)\exp(V/V_0) \quad (2.102)$$

โดยที่  $(V_0)$  เป็นค่าคงที่ และ  $I_s(T)$  เป็นค่ากระแสอิ่มตัวที่ขึ้นกับอุณหภูมิ จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.43 พบว่า ลักษณะเฉพาะของกระแส - แรงดันไฟฟ้า แบบไบอัสตรงนั้นจะเป็นไปตามสมการ (2.102)

จากการศึกษาต่อ ๆ มาพบว่า ค่าของ  $I_s(T)$  จะขึ้นกับเทอมของ  $\exp(T/T_0)$  ดังนั้นจากสมการ (2.102) จะสามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$I = I_{s0} \exp(T/T_0) \exp(V/V_0) \quad (2.103)$$

โดยที่จะได้ค่าของ  $I_{s0}$ ,  $T_0$  และ  $V_0$  เป็นค่าคงที่

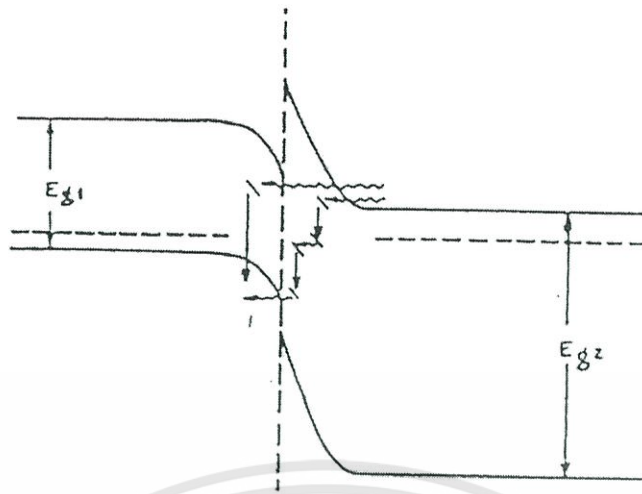


รูปที่ 2.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  จากผลการทดลองสำหรับรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากสมการข้างต้นพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิจะเป็นตัวแปรที่ไม่ขึ้นต่อกันเช่นเทอม  $\delta(\ln I)/\delta V$  จะขึ้นกับอุณหภูมิและค่าต่างๆที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแปรผันแบบเอกซ์โพเนนเชียล เช่น  $\ln I$  จะแปรผันตาม  $T$

#### 2.17.2.5 แบบจำลองการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ – การรวมตัวของพาหะ (tunneling – recombination model)

ริเบน (Reben) และ ฟุชต์ (Feucht) ได้เสนอแบบจำลองนี้ขึ้นมาโดยมีพื้นฐานจากการผสมผสานกระบวนการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์กับกระบวนการรวมตัวของพาหะ โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น เมื่อไบอัสตรง และ กระบวนการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ ทั้งขึ้นตอนเดียว และหลายขึ้นตอน

โดยในแบบจำลองนี้จะเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากแถบนำของสารกึ่งตัวนำด้านที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง (ชนิดเอ็น) ไปยังสถานะทางพลังงานที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน (interband state) ที่ยังว่างอยู่ของสารกึ่งตัวนำด้านที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่แคบกว่า (ชนิดพี) แล้วเกิดการรวมตัวกับโฮล หรือการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี ไปยังสถานะทางพลังงานที่ถูกครอบครอง (occupied state) ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอน ถ้าตำแหน่งเริ่มของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เกิดขึ้น ณ บริเวณส่วนล่างของแถบนำหรือส่วนบนของแถบวาเลนซ์ สามารถที่จะเขียนความสัมพันธ์ของกระแสไบอัสตรงได้ ดังนี้

$$I = B \exp[-\alpha(V_D - V)] \quad (2.104)$$

โดย B เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิ,  $V_D$  คือแรงดันไฟฟ้าของการแพร่  $V$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน และค่า  $\alpha$  จะเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับการคำนวณของอิเล็กตรอนในบริเวณต้องห้าม (forbidden region) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ความเข้มข้นของพาหะที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน และลักษณะที่แน่นอนของกำแพงศักย์ สำหรับการประมาณค่า  $\alpha$  ของกรณีนี้กำแพงศักย์เชิงเส้น (สนามคงที่ที่ทับตำแหน่ง) ในบริเวณช่วงเปลี่ยน และการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ส่วนมากเกิดในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ว่า

$$\alpha = (4/3\hbar)(m_n^* \varepsilon_2 / N_{D2})^{1/2} \quad (2.105)$$

โดยที่  $m_n^*, \varepsilon_2$  และ  $N_{D2}$  เป็นตัวแปรของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งต่อมาพบว่าค่าของ  $\alpha$  นอกจาก จะขึ้นกับปริมาณข้างต้นแล้ว ยังขึ้นกับผลของการเกิดกับดักประจุ (traps) ด้วย

ริเบน และ ฟุชต์ ยังได้เสนอแบบจำลองการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบซีเนอร์ (Zener) เพื่อที่จะอธิบายลักษณะของการเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของกระแสอิมิต์ย้อนกลับซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.45

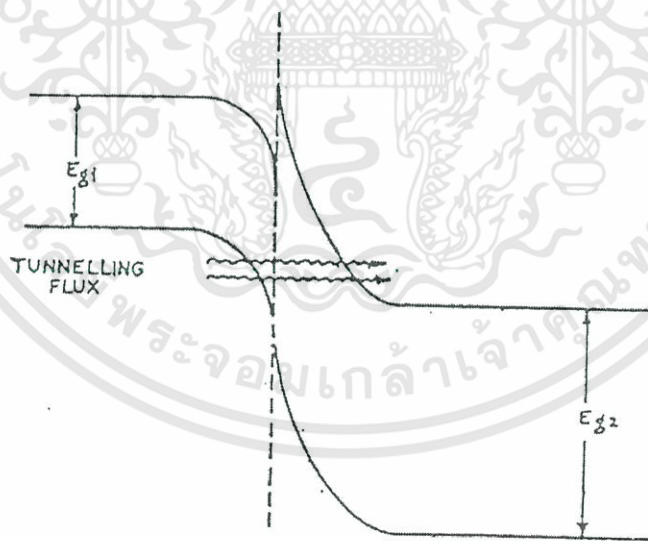
นอกจากใช้แบบจำลองนี้ร่วมกับหลักการของกำแพงศักย์แบบเชิงเส้น และการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าของกระแสอิมิต์ย้อนกลับสามารถเขียนได้เป็น

$$I = C \exp[-A(V_D - V)^{-1/2}] \quad (2.106)$$

โดยที่

$$A = (4/3\hbar)(m_n^* \varepsilon_2 / N_{D2})^{1/2} \quad (2.107)$$

$m_n^*, \varepsilon_2, N_{D2}$  และ  $E_{g2}$  เป็นตัวแปรของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 2.45 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ภายใต้การไบอัสกลับ ซึ่งแสดงกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์

### 2.17.3 สารกึ่งตัวนำคู่วิวิธพันธุ์

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำพบว่า สารกึ่งตัวนำหลายประเภท เช่น สารกึ่งตัวนำหลายประเภท เช่น สารกึ่งตัวนำจากหมู่ II-VI ซึ่งนอกจากจะถูกทำให้กลายเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นได้ โดยวิธีการเจือได้แล้ว การทำให้เป็นชนิดต่าง ๆ ยังเกิดจากผลของการชดเชยกันเอง (self-compensation) ได้อีกด้วย อีกทั้งสมบัติต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด แต่ละสาร ก็ยังแตกต่างกัน ดังนั้น การที่จะนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ ชนิดเอ็น ใด ๆ มาประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ อย่างระมัดระวัง เช่น ถ้าสารกึ่งตัวนำ Si กับ Ge ซึ่งมีความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึก (lattice constant mismatch) ประมาณ 4 % มาทำเป็นรอยต่อ พบว่า จะมีการเกิดขึ้นของอิเล็กตรอนคู่โคเดเดี่ยวแถบวาเลนซ์ ณ บริเวณรอยต่อระหว่างสารทั้งสองนั้น อีกทั้งยังมีการโค้งงอของแถบพลังงาน และการเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะข้างน้อยขึ้น ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อ ดังนั้น ลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธุ์จะขึ้นอยู่กับสถานะผิวรอยต่อเป็นสำคัญ โดยากรรอยต่อของ Si และ Ge ที่ยกมาเป็นตัวอย่าง พบว่า กำแพงศักย์ จะไม่เป็นไปตามหลักของค่าพลังงานอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี และความสัมพัทธ์กระแส – แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อจะขึ้นกับอุณหภูมิตามแบบจำลองการลอดผ่านมากกว่าที่จะเป็นการไหลข้ามกำแพงศักย์ ดังนั้นหากต้องการจะนำสารกึ่งตัวนำคู่ใดมาประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์แล้วจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ อย่าง โดยทั่วไปนั้นคู่สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้นจะต้องพิจารณาองค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

1. สารกึ่งตัวนำคู่ นั้น น่าจะต้องมีโครงสร้างทางผลึกที่เหมือนกัน และมีค่าคงที่ของผลึกที่สัมพันธ์กัน (ความไม่เข้ากันของโครงผลึกไม่ควรเกิน 0.5%)
2. สารกึ่งตัวนำคู่ นั้นจะต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิให้สัมพันธ์กันและพบว่าความหนาของแต่ละสารจะเป็นตัวแปรหนึ่งของโครงสร้างผิวสัมผัสที่จะเกิดขึ้น
3. ในการเตรียมรอยต่อ จะต้องระวังเกี่ยวกับผลของการเกิดการเจือโดยอัตโนมัติจากสารที่นำมาทำรอยต่ออีกตัวหนึ่ง และการเกิดการแพร่ข้ามของสารตัวเมื่อพบว่าการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ได้โครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ดี

### 2.17.4 การศึกษาลักษณะความจุไฟฟ้าในรอยต่อวิวิธพันธุ์

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของความจุไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์กับแรงดันไฟฟ้า พบว่าสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าของการแพร่ ( $V_D$ ) ได้ โดยถ้ารอยต่อวิวิธพันธุ์นี้สามารถหาค่าของ  $\Delta E_c$  และ  $\Delta E_v$  ได้จากการแก้สมการปัวซอง โดยให้รอยต่อที่พิจารณาเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ แบบลับพลันและการเจือของสารกึ่งตัวนำทั้งสองมีลักษณะทั่วถึงทั้งสาร ความสัมพันธ์ระหว่างความจุและแรงดันไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$C/a = \left[ \frac{qN_{D1}N_{A2}\epsilon_1\epsilon_2}{2(\epsilon_1N_{D1} + \epsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2} \left[ 1/(V_D - V_a) \right]^{1/2} \quad (2.108)$$

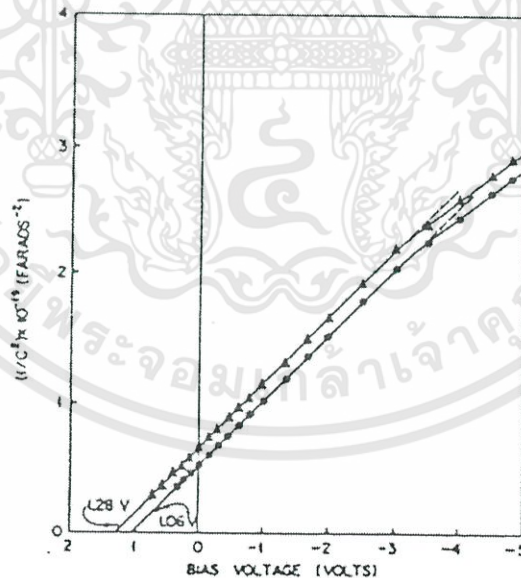
จากสมการ (2.108) จะพบว่า ค่าของ  $C^{-2}$  จะเป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน เพราะฉะนั้นจะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $C^{-2}$  กับ  $V_a$  หรือความชันของกราฟ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dC^{-2}}{dV_a} = 2(\epsilon_1 N_{D1} + \epsilon_2 N_{A2}) / (a^2 q N_{D1} N_{A1} \epsilon_1 \epsilon_2) \quad (2.109)$$

ซึ่งถ้าทราบค่าตัวแปร 3 ตัวในสมการก็สามารถหาค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งได้จากความชันของกราฟ และถ้าทำลากประมาณกราฟระหว่าง  $C^{-2}$  กับ  $V$  ไปยังแกนของ  $V$  ซึ่งให้ค่า  $C^{-2}$  เป็นศูนย์ จะได้ค่าของ  $V_D$  ดังในรูปที่ 2.46 ซึ่งถ้าทราบค่า  $V_D$  ก็จะสามารถหาค่าผลต่างของค่าอิเล็กตรอนแอฟินิตีในแถบวาเลนซ์ได้จากสมการ

$$\Delta E_v = V_{D1} + V_{D2} + \delta_{n1} + \delta_{p2} - E_{G1} = V_D + \delta_{n1} + \delta_{p2} - E_{g1} \quad (2.110)$$

และถ้าทราบค่าของ  $\Delta E_v$  ก็จะสามารถคำนวณค่าของ  $\Delta E_c$  ได้เช่นกัน ซึ่งค่า  $\Delta E_c$  ที่ได้นี้จะไม่แปรผันไปกับอุณหภูมิ แต่ค่า  $\Delta E_v$  จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องมาจากความกว้างของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิแต่อย่างใด ซึ่งรายละเอียดในส่วนของการวัดและวิเคราะห์ผล จะได้นำเสนอในบทต่อไป



รูปที่ 2.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุ-แรงดันไฟฟ้ารอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็นของ Ge-GaAs

## 2.17.5 สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์

สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าซึ่งใช้จำแนกและวิเคราะห์รอยต่อวิวิธพันธุ์คือลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า และลักษณะเฉพาะความจุ-แรงดันไฟฟ้า การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าไม่เพียงแต่จะได้ทราบข้อมูลลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและรอยต่อ เช่น รอยต่อนั้น ๆ อีกด้วย โดยที่สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้น จะขึ้นกับการก่อตัวของรอยต่อและระดับการเจือของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่นำมาสร้างเป็นรอยต่อ

### 2.17.5.1 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า

เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้ความสมดุลความร้อนของความหนาแน่นประจุเสียไป ดังนั้นในการคำนวณหาลักษณะเฉพาะ กระแส-แรงดันไฟฟ้านี้ มีข้อกำหนดสมมุติฐาน 4 ข้อ คือ

1. บริเวณรอยต่อเป็นรอยต่อแบบฉับพลัน
2. ใช้การประมาณค่าฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มี-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแมกซ์เวลล์-โบลตซ์มันน์
3. มีการฉีดของพาหะดำนั้นคือความหนาแน่นพาหะข้างน้อยที่ฉีดเข้ามาเนื่องจากสนามไฟฟ้าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสเกิดในบริเวณเขตปลอดพาหะ และกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลคงที่ตลอดทั้งบริเวณเขตปลอดพาหะ

จากสมมุติฐานทั้ง 4 ข้อ พิจารณาที่สมดุลเชิงความร้อน อิเล็กตรอนในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและโฮลในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็น

$$n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] = n_i \exp[q(\psi - \phi)/k] \quad (2.111)$$

$$p = n_i \exp[q(\phi - \psi)] \quad (2.112)$$

โดยที่

$$\psi = -E_i / q \quad \text{และ} \quad \phi = -E_F / q$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่เข้าไป ความหนาแน่นพาหะข้างน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อจะเปลี่ยนไป แต่ผลคูณของ  $p$  และ  $n$  ต้องไม่มากกว่า  $n_i^2$  ( $np < n_i^2$ ) แทนค่า  $E_F$  ทั้งของอิเล็กตรอนและโฮลเปลี่ยนไป ซึ่งกำหนดโดย

$$n = N_c \exp[-(E_c - E_{Fe})/kT] = n_i \exp[q(\psi - \phi_n)/kT] \quad (2.113)$$

$$n = N_v \exp[-(E_{Fn} - E_v)/kT] = n_i \exp[q(\phi_p - \psi)/kT] \quad (2.114)$$

โดยที่  $\phi_n$  คือ ระดับเสมือนเฟอร์มี (quasi-Fermi level) ของอิเล็กตรอน  
 $\phi_p$  คือ ระดับเสมือนเฟอร์มีของโฮล  
 นำสมการที่ (2.113) คูณกับ (114) จะได้

$$pn = n_i^2 \exp[q(\phi_p - \phi_n)/kT] \quad (2.115)$$

จะเห็นว่า สำหรับการไบอัสตรง ( $\phi_p - \phi_n > 0$ ) และ  $pn > n_i^2$  แต่เมื่อมีการไบอัสกลับจะได้ว่า  $(\phi_p - \phi_n) < 0$  และ  $pn < n_i^2$  ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างรอยต่อนี้กำหนดโดย

$$V = \phi_p - \phi_n$$

นำค่า  $V$  ไปแทนในสมการ (2.115) จะได้

$$pn = n_i^2 \exp(qV/kT) \quad (2.116)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ระยะ  $x = -x_p$  จะเป็น

$$n_p = (n_i^2 / p_p) \exp(qV/kT) = n_{po} \exp(qV/kT) \quad (2.117)$$

โดยที่  $n_{po}$  เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ขณะอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของโฮลจะเป็น

$$p_n = \exp(qV/kT) \quad (2.118)$$

จากสมการความต่อเนื่อง ที่สถานะคงตัว (steady state) และสมมุติฐานข้างต้น จะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ได้เป็น

$$J_n = qD_n (\partial n / \partial x) \quad (2.119)$$

ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นกระแสของโฮล เป็น

$$J_p = qD_p (\partial p / \partial x) \quad (2.120)$$

สำหรับความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน ที่ระยะ  $x = x_n$  จะเป็น

$$J_n = qD_n (\partial n / \partial x)_{x=x_n} = (qD_n n_{po} / L_n) (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.121)$$

และ

$$J_p = qD_p (\partial p / \partial x)_{x=x_n} = (qD_p p_{no} / L_p) (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.122)$$

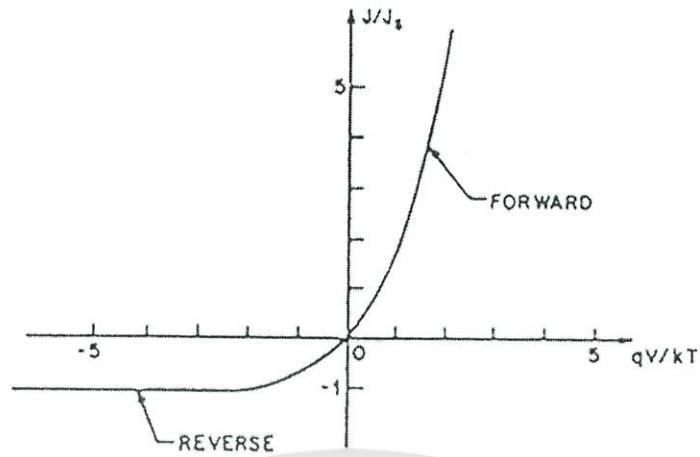
ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสสุทธิที่ผ่านรอยต่อจะเป็น

$$J = J_p + J_n = J_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.123)$$

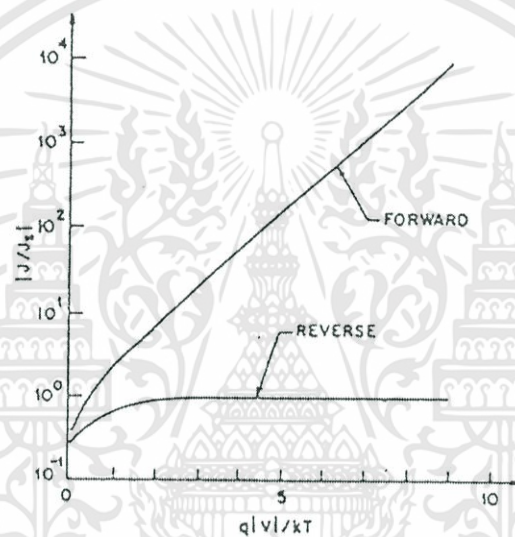
โดยที่

$$J_s = (qD_p p_{no} / L_p) + (qD_n n_{po} / L_n) \quad (2.124)$$

สมการที่ (2.123) รู้จักกันดีในชื่อสมการของชอกลีย์ (Shockley's equation) สำหรับไดโอด จะเห็นว่าเมื่อ  $V > 0$  หรือไบอัสตรงกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับค่า  $V$  แต่ในทางกลับกัน เมื่อ  $V < 0$  หรือการไบอัสกลับ ความหนาแน่นกระแสจะลดลง จนกระทั่งอิมิต์ที่ค่า  $J_s$  เมื่อเขียนกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปจะได้กราฟดังรูปที่ 2.47



(ก)



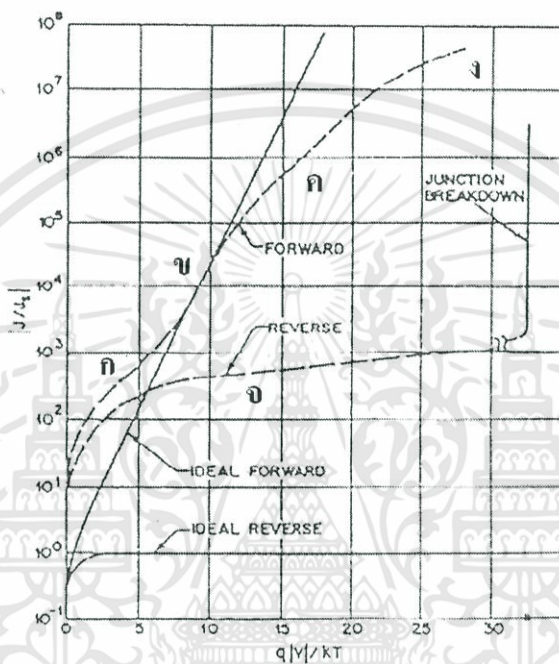
(ข)

รูปที่ 2.47 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าอุณหภูมิต่ำ  
 ก. แบบเชิงเส้น  
 ข. แบบกึ่งลอการิทึม

จากสมการของ ชอคกีเลย์ อธิบายลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อแบบ พี-เอ็น ได้เฉพาะที่มีความหนาแน่นกระแสต่ำ ๆ ส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากกราฟในอุณหภูมิต่ำอย่างมากดังรูปที่ 2.48 เนื่องจาก

1. ผลทางพื้นผิว (surface effect)
2. มีการเกิดและการรวมตัวกันของพาหะในบริเวณปลอดพาหะ

3. มีการชดเชยโมเมนต์สูงผ่านกำแพงศักย์ของพาหะระหว่างสถานะพลังงานต่าง ๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน
4. มีการฉีดของพาหะปริมาณสูง (high injection) เมื่อมีการไบอัสตรงเพียงเล็กน้อย
5. ผลจากความต้านทานแบบอนุกรม(series resistance effect)ของแผ่นฐานรองรับมีค่าสูงจากผลที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ข้อนี้ โดยปกติเมื่อการไบอัสไม่สูงมากนัก ผลที่เกิดจากการเกิดและรวมตัวกันของพาหะในบริเวณปลอดพาหะจะมากกว่าข้ออื่น ๆ



รูปที่ 2.48 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่ทำจาก Si  
 ก. เป็นกระแสที่เกิดจากกระบวนการก่อเกิดและการรวมตัวของพาหะ  
 ข. เป็นกระแสแพร่ซึม  
 ค. เป็นกระแสเนื่องจากการฉีดพาหะปริมาณสูง  
 ง. เป็นผลของความต้านทานอนุกรม  
 จ. เป็นกระแสอ้อมตัวย้อนกลับเนื่องจากกระบวนการก่อเกิดพาหะและสถานะผลของผิวรอยต่อ

จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไฟฟ้านั้น สามารถจะอธิบายถึงกลไกการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้ได้ข้อมูลของค่ากำแพงศักย์ระหว่างรอยต่อและความไม่ต่อเนื่องของ

ระดับพลังงานที่ของแถบการนำและขอบของแถบวาเลนซ์ ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่ออวิวิพพันธุ์ จึงทำให้สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะออกเป็นแบบไบอัสตรงและไบอัสกลับอีกด้วย

ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์นั้น จะเปลี่ยนไปตามแต่แบบจำลองต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

ในทางปฏิบัติ นั้น สำหรับลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสตรงสามารถเขียนได้เป็น

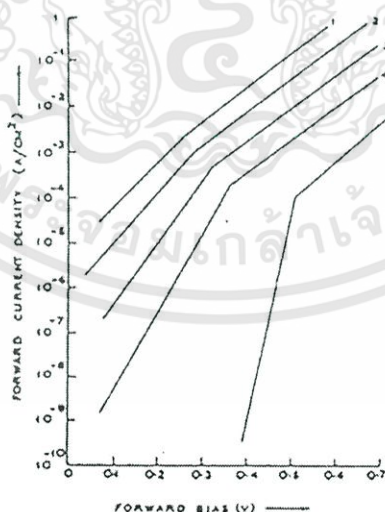
$$I \propto \exp(qV/nkT) \quad (2.125)$$

โดยที่  $n$  เป็นค่าคงที่ และเรียกว่าแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor) ของไดโอด ซึ่งจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการ (2.125) นี้ เป็นความสัมพันธ์พื้นฐานของแบบจำลองต่าง ๆ เช่น แบบจำลองการแพร่ซึม แบบจำลองการปลดปล่อย และแบบจำลองการปลดปล่อย-รวมตัวของพาหะ เป็นต้น

ในบางกรณีจะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าจะมีการแปรผันกับอุณหภูมิ ด้วย ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าแทนที่จะใช้ตามสมการ (2.125) เขียนได้เป็น

$$I \propto \exp(AV)\exp(BV) \quad (2.126)$$

โดยที่  $A$  และ  $B$  เป็นเทอมคงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเฉพาะกับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิตามลำดับ ซึ่งสมการ (2.126) นี้ จะมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการขูดขูด โมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์-การรวมตัวของพาหะ



รูปที่ 2.49 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ p-Ge/n-GaAs ขณะไบอัสตรงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากกราฟในรูป 2.49 นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า นิยมเขียนในเชิงของกราฟแบบกึ่งลอการิทึม (semilog) และค่าของตัวแปรต่าง ๆ สามารถหาได้จากกราฟกึ่งลอการิทึมนี้ กล่าวคือจากความชันของกราฟสามารถจะนำไปคำนวณค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดได้ และจุดตัดจะอยู่ในช่วง 1-2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กลไกการนำกระแสจะเป็นไปตามแบบจำลองการรวมตัวของพาหะ

ดังนั้นควรเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับผลการทดลองที่ได้จะเป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์หรือต่อวิวิธพันธุ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

### 2.17.5.2 ลักษณะเฉพาะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

การวัดค่าความจุของรอยต่อ ( $C = dQ/dV$ ) โดยเป็นฟังก์ชันกับค่าของการไบอัสย้อนกลับนั้น เป็นวิธีการทดลองที่ให้ผลที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์กับแรงดันไฟฟ้า ณ บริเวณเขตปลอดพาหะ และการกระจายของประจุในรอยต่อวิวิธพันธุ์ โดยพบว่าค่าสถานะผิวรอยต่อจะมีผลต่อการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งในบางกรณีก็จะไม่นำมาคิดด้วย

#### 2.17.5.2.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ (doping concentration)

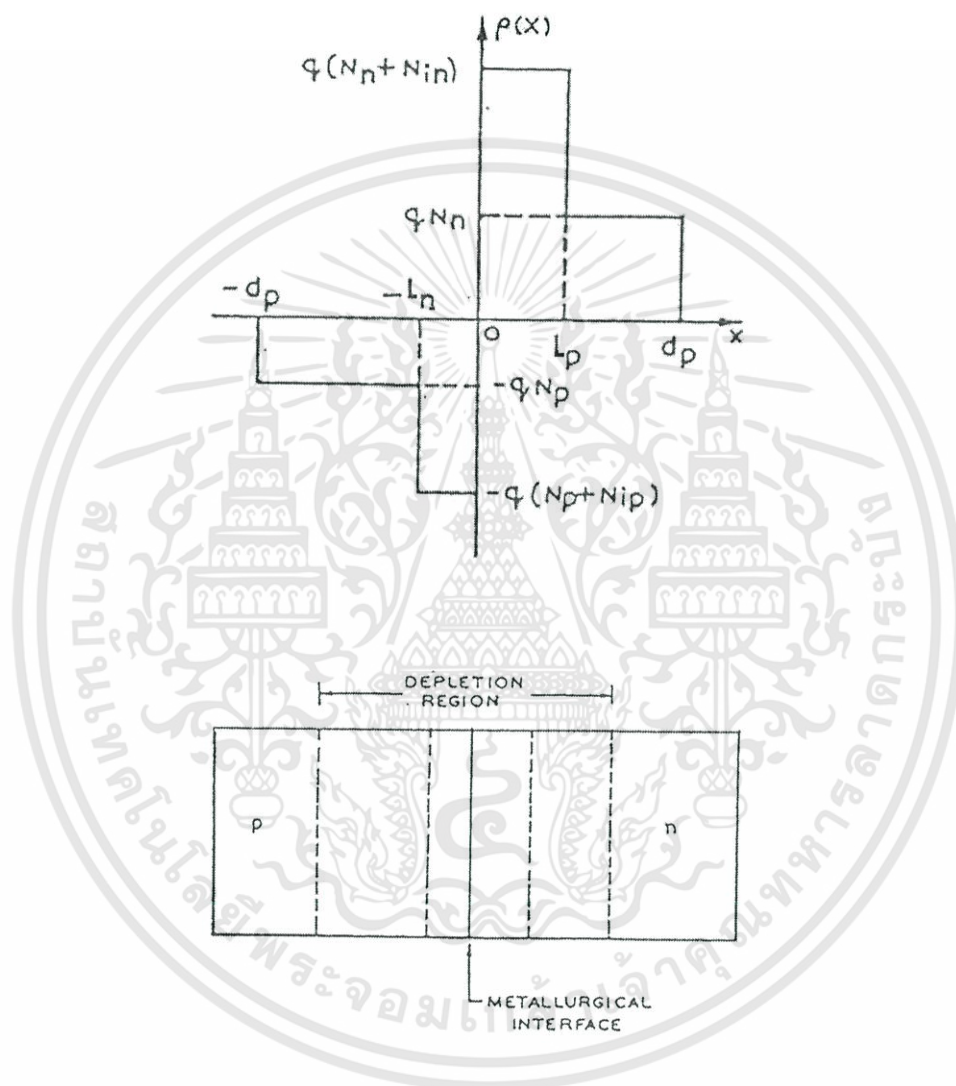
เมื่อนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดซึ่งมีลักษณะการนำไฟฟ้าต่างกันมาสัมผัสประกบเข้าเป็นรอยต่อ จะเกิดการเคลื่อนย้ายถ่ายเทประจุจากสารชนิดหนึ่งไปยังสารอีกชนิดหนึ่งจนกว่าสารทั้งสองนั้นจะมีระดับเฟอร์มิเท่ากัน การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ เป็นที่มาของการเกิดบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้น ณ บริเวณผิวรอยต่อ โดยไม่คำนึงถึงผลของสถานะผิวรอยต่อ ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดต่างกันสามารถเขียนได้ว่า

$$C = [q\epsilon_n \epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)]^{1/2} (V_D - V)^{-1/2} \quad (2.127)$$

โดยที่ ( $N_n$ ) และ ( $N_p$ ) คือ ความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้ และอะตอมผู้รับตามลำดับ ( $\epsilon_n$ ) และ ( $\epsilon_p$ ) คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และชนิด พี ตามลำดับ,  $V_D$  คือ แรงดันไฟฟ้าในตัว (built-in-junction potential:  $V$ ) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าไป และ  $q$  คือค่าของประจุ จากสมการ (2.127) นี้ พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $C^{-2}$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนย้อนกลับ  $V$  จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยถ้าทำการประมาณกราฟต่อไปตัดที่แกนของแรงดันไฟฟ้า จะสามารถบอกถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าในตัว ( $V_D$ ) ได้ นอกจากนั้นยังได้ว่า

$$C = [q\epsilon_n \epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)]^{1/2} (V_D - V - \phi_m - B_2 Q_{is}^2)^{-1/2} \quad (2.128)$$

ซึ่งจากสมการ(2.128) นี้ ถ้านำไปเขียนเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $C^2$  กับ  $V$  เหมือนในกรณีสมการ (2.127) พบว่า จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นกัน แต่จุดตัดแกนแรงดันไฟฟ้าของกราฟจากสมการ (2.128) นั้น จะได้ค่าของแรงดันไฟฟ้ายวดยิ่งในตัวปรากฏ (apparent built-in-junction voltage) ในเทอม  $(V_D - B_2 Q_{is}^2)$  แทนที่จะเป็นเพียงแรงดันไฟฟ้าในตัวดังสมการ (2.127)



รูปที่ 2.50 แสดงโครงสร้างของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น โดยมีสถานะพื้นผิวกระจาย ทั้งขอบเขตความกว้างและทั้งบริเวณประจุค้างภายในบริเวณเขตปลอดพาหะ

จากรูป 2.50 นั้น อธิบายถึงความจุของรอยต่อแบบอวิวิธพันธุ์ชนิด พี-เอ็น ซึ่งในที่นี้จะไม่คำนึงถึงผลของอิเล็กทริกไดโพล แต่มีสถานะผิวสัมผัสกระจายอยู่ทั่วทั้งบริเวณขอบเขตจำกัด  $(L_n + L_p)$

โดยที่ประจุสุทธิของสถานะผิวสัมผัสจะไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนสมการของความจุต่อหน่วยพื้นที่ของรอยต่อ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$C = [q\epsilon_n\epsilon_p N_n N_p / 2(\epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p)]^{1/2} [V_D - V - (q/2)(Y + X_2 / K)] \quad (2.129)$$

โดย  $K = \epsilon_n N_n + \epsilon_p N_p$

$$X = N_n L_n = N_p L_p$$

$$\text{และ } Y = (N_n L_n^2 / \epsilon_n) + (N_p L_p^2 / \epsilon_p)$$

จากสมการแสดงความจุของรอยต่อทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่าเราสามารถหาค่าของความเข้มข้นของการเจือได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C^{-2}$  กับ  $V$  ตามแต่กรณี แอนเดอร์สัน ยังได้อธิบายถึง ลักษณะความจุของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบเป็นขั้นตอน โดยสามารถเขียนได้ในรูปของสมการอย่างง่าย คือ

$$C = C_0 (V_D - B)^{-1/\alpha} \quad (2.130)$$

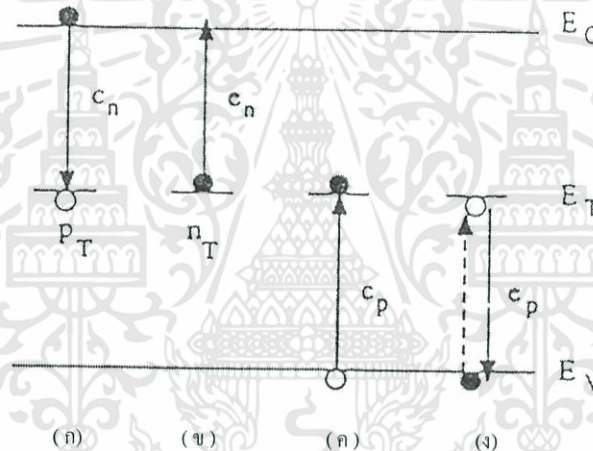
โดย  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 โดยกราฟความสัมพันธ์ของ  $C^{-2}$  กับ  $V$  จะยังคงให้ค่าของ  $V_D$  และความเข้มข้นของการเจือเช่นเดิม

#### 2.17.5.2.2 การวิเคราะห์ระดับพลังงานลึกของอะตอมของสารเจือ (deep-level impurities)

โดยปกติสารกึ่งตัวนำทุกชนิดจะมีอะตอมของสารเจืออยู่ในเสมอ ซึ่งอะตอมของสารเจืออาจทำให้เกิดระดับพลังงานตื้นของอะตอมของสารเจือ (shallow-level impurities) หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ของพาหะที่เป็นระดับพลังงานลึกของอะตอมของสารเจือ ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของค่าชีวิตของสารนั้น ๆ หรือในบางครั้งจะเป็นการเพิ่มสภาพต้านทานของชั้นแผ่นฐานรองรับ อะตอมของสารเจือ ส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยความไม่ตั้งใจในกระบวนการก่อตัวของสารกึ่งตัวนำ หรือในการประดิษฐ์เป็นรอยต่อแบบต่าง ๆ แต่อะตอมของสารเจือบางชนิดก็สามารถขจัดออกได้ในระหว่างขั้นตอนของกระบวนการประดิษฐ์

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สารกึ่งตัวนำที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยแถบนำและแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะคั่นกลางด้วยช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำนี้ถูกอะตอม

แปลกล้อมจากภายนอกเข้าไปรบกวน หรือมีข้อบกพร่องของผลึก จะมีการเกิดขึ้นของระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องในช่องว่างแถบพลังงาน แสดงดังเส้นระดับ  $E_T$  รูปที่ 2.51 ในแต่ละเส้นนั้นเป็นข้อบกพร่องผลึกซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากับ  $E_T$  ซึ่งข้อบกพร่องผลึกเช่นนี้จะเรียกว่า ศูนย์กลางการก่อกำเนิด-รวมตัว (generation-recombination center, G-R) หรือ กับดักประจุ (traps) โดยถ้าศูนย์กลางการก่อกำเนิด-รวมตัว นี้วางตัวอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานจะเรียกว่า ระดับพลังงานของอะตอมของสารเจือ (energy level impurities) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ระดับพลังงานลึกของอะตอมของสารเจือ (deep-level impurities) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของกระบวนการรวมเกิด ในกรณีที่กับดักประจุมีการครอบครองพาหะอยู่แล้ว และจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อกำเนิดหรือค่าความหนาแน่นของพาหะ มีค่าต่ำกว่าที่จุดสมดุล เช่น ในบริเวณประจุค้าง (space - charge region) ของรอยต่อแบบ พี - เอ็น เมื่อมีการไบอัสกลับ



รูปที่ 2.51 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานลึก และกลไกการจับ-ปล่อยพาหะ

โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำเช่น Si, Ge และ GaAs จะมีระดับพลังงานลึกที่มาจากอะตอมของสารเจือจำพวกโลหะ เช่น เหล็ก, ทอง และทองแดง แต่ในบางกรณี ระดับพลังงานลึกก็สามารถเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกได้ เช่นการเคลื่อน การตกตะกอนของผลึก (precipitation) การเกิดตำแหน่งว่าง (vacancies) เป็นต้น

ในรูป 2.51 นั้น จะมีกลไกขึ้น 4 รูปแบบด้วยกัน คือ (ก) เป็นกลไกการจับอิเล็กตรอน (ข) เป็นกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (ค) เป็นกลไกการจับโฮล และ (ง) เป็นกลไกการปลดปล่อยโฮล กระบวนการรวมตัวนั้น จะเกิดจาก (ก) และตามด้วย (ค) ส่วนกระบวนการก่อกำเนิด

นั้น จะเกิดจากกลไก (ข) และตามด้วยกลไก (ง) แต่ในบางครั้งจะเกิดมีกระบวนการดักจับ (trapping event) เกิดขึ้น คือ จะเกิดกลไกแบบ (ก) และตามด้วยการเกิดกลไก (ข) หรือ (ค) และจะจบลงที่กลไก (ง)

การที่อะตอมของสารเจือจะประพุดิตัวเป็นกับดักประจุ หรือเป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อเกิด-รวมตัวนั้น จะขึ้นอยู่กับระดับเฟอร์มิในช่องว่างพลังงาน, อุณหภูมิ, และความน่าจะเป็นในการจับพาหะหรือ ภาคตัดขวางของการจับพาหะ (capture cross section) ของสิ่งเจือโดยปรกติถ้าอะตอมของสารเจือ นั้นๆ มีพลังงานอยู่ในช่วงกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ก็จะเป็นศูนย์กลางของกระบวนการก่อเกิด-รวมตัว แต่ถ้าอยู่ใกล้ๆขอบของพลังงานก็จะประพุดิตัวเป็นกับดักประจุ

จากในหัวข้อที่แล้ว พบว่า สามารถที่จะหาค่าความเข้มข้นของพาหะได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $C^2$  และ  $V$  ฉะนั้น สำหรับระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ระดับพลังงานตื้น (shallow-level donors) และ ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับระดับพลังงานลึก (deep-level acceptors) จะได้ว่า

$$C^2 = k^{-2} \{ (V_{bi} - V) / (N_D - n_T(T)) \} \quad (2.131)$$

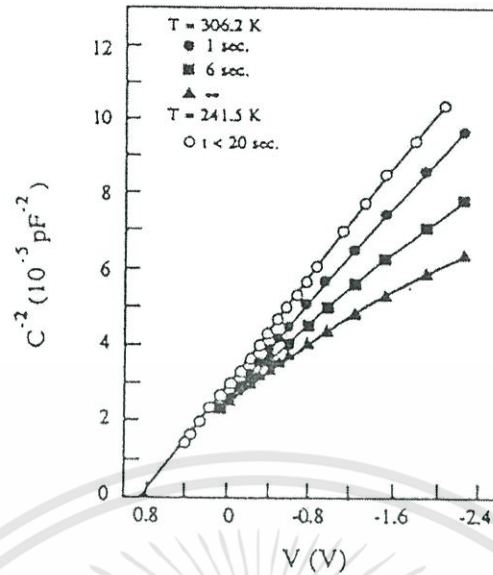
โดย  $n_T(t)$  คือประจุที่เป็นลบเมื่อมีการจับอิเล็กตรอน ซึ่งพบว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ศูนย์กลางของกระบวนการก่อเกิด-รวมตัว กลับมามีสภาพกลายนั้น จะขึ้นกับกับเวลา เพราะฉะนั้นจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  และ  $V$  ที่เวลา  $t=0$  และ  $t=\infty$  โดยให้ความชันของกราฟเขียนแทนได้เป็น

$$S(t) = -dV/d(1/C^2) \quad (2.132)$$

จะได้ว่า

$$S(\infty) - S(0) = k^2 [n_T(0) - n_T(\infty)] \quad (2.133)$$

โดย  $n_T(0) \sim N_T$  และ  $n_T(\infty) \sim 0$  สำหรับ  $e_n \gg e_p$  ฉะนั้น ผลต่างระหว่างความชันของกราฟทั้งสองเส้นจะสามารถนำไปหาค่าความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือที่อยู่ในระดับพลังงานลึกได้ ซึ่งการวัดแบบนี้เป็นการวัดในสถานะคงที่ (steady-state measurement)



รูปที่ 2.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ  $C^2$  และ  $V$  ซึ่งมีการแปรไปกับเวลาที่อุณหภูมิ 506.2 เคลวิน และ 241.5 เคลวิน

## 2.18 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่ออวิวิพพันธุ์ [ 13, 16, 34 ]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.53 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสที่ขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่ออวิวิพพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.134)$$

เมื่อ

$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.135)$$

- โดยที่
- $V$  คือ แรงดันไบอัสตรง
  - $n$  คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด
  - $J_0$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
  - $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น
  - $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์
  - $J_{00}$  คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

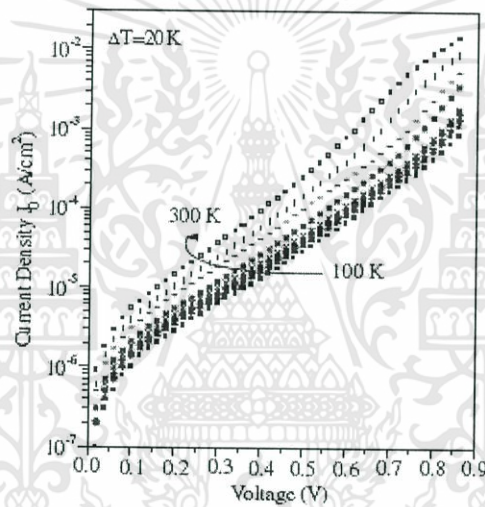
ซึ่ง  $J_{00}$  จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน ( $V_b$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_v \left[ \frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[ \frac{-qV_n}{kT} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.136)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.137)$$

เมื่อ  $S_p$  คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล,  $N_v$  ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $\phi_b^p$ ) คือกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อซึ่งแสดงในรูปที่ 2.54



รูปที่ 2.53 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของ  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า  $J_{00}$  นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิธพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่เกิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกัณฑ์ประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี และ  $\ln J_0$  จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ( $\ln J_0 \propto T^{-1}$ )

### 2.18.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอกล์เลย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือปน

จากแบบจำลองของ ชอกล์เลย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่อของไดโอด ( $n$ ) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง  $J_0$  จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น  $E_g/2$  สำหรับกรณีที่กำลังการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุณหภูมิต่อของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของกานำกระแสของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ลึกลงไปในที่บริเวณรอยต่อ

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

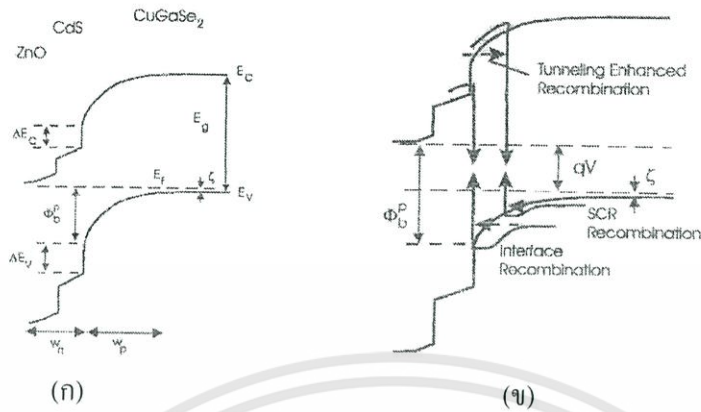
### 2.18.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.138)$$

โดยที่  $A$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ซึ่งค่าของ  $A$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่าแฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น  $\ln J_0$  จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง  $\ln J_0$  ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละ

กับศักยประจวบอย่างต่อเนื่อกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้  $J_0$  จะขึ้นกับ อุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.54 แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> และ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.134) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln(J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (2.139)$$

พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $n \ln J_0$  กับ  $1/T$  พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดการนำกระแสเกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอน โดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.140)$$

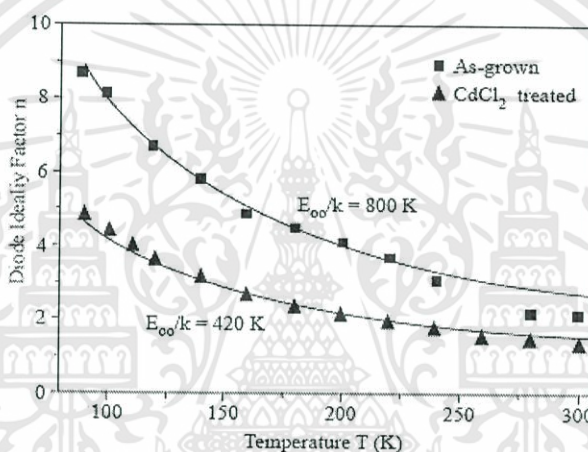
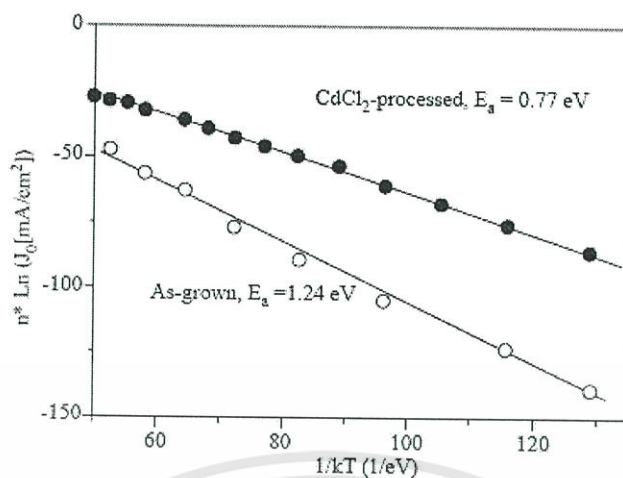
โดย  $E_{00}$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ มากน้อยแค่ไหน นิยาม  $E_{00}$  คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.141)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ  $\epsilon_s$  คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง แผลกเตอร์อุดมคติของ ไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.142)$$

ซึ่ง  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.55 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  $J_0$  และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนีสด้วย CdCl<sub>2</sub>

## 2.19 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร

[13, 16, 35]

อัตราการรวมตัวของพาหะ ( $R$ ) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \quad (2.143)$$

เมื่อ  $n^* = N_C \exp[-(E_C - E_T)/kT]$

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

ซึ่ง  $N_C$  และ  $N_V$  คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกักตักประจุ,  $n$  และ  $p$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ,  $\eta$  คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือ โฮล (electron/hole cross section:  $\gamma_{n/p}$ ) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \quad (2.144)$$

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

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

$$\Gamma = 2(3\pi)^{1/2} \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{1/2} \exp \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.145)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลา ดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A}|F(x)|^2 \quad (2.146)$$

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

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.147)$$

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

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.142) ร่วมกับสมการ (2.147) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.148)$$

ซึ่ง  $J_{00}$  จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์ชดเชยของไดโอด ( $n$ ) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*}\right) \quad (2.149)$$

จากสมการที่ (2.149) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์ชดเชยของไดโอด ( $n$ ) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ  $T^* \rightarrow \infty$  กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุนับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี  $E_{00} \rightarrow 0$

จะได้ว่า  $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$  ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ชอกส์เลย์-รีด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนี้ยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_g}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.150)$$

เมื่อ  $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง  $n$ ,  $J_{sc}$  และ  $J_{00}$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  และ  $T$  ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ  $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right)$  และจุดตัดแกน  $V_{oc}$  (เมื่อ  $T=0$  K) คือค่า  $E_g/q$  ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อโดยไม่มีกลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า  $E_g = \phi_b^p$  ซึ่ง  $\phi_b^p$  ก็คือ  $\phi_b^p$  นั่นเองเมื่อ  $\phi_b^p$  คือ กำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดูดกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ซึ่ง  $V_{oc}$  นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ชอกส์เลย์-รีด-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ในสมการ (2.150) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.139) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ )

## 2.20 อินพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน [15-16, 36]

### 2.20.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

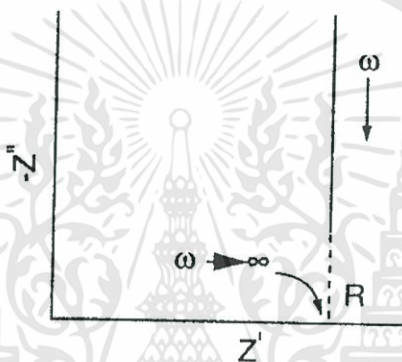
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อินพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอินพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอินพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.151)$$

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

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.152)$$

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 2.56



รูปที่ 2.56 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.20.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

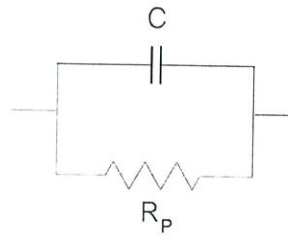
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.56 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.153)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_P$  ดังรูปที่ (2.56) ดังนั้นสมการ (2.153) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_P} + j\omega C \quad (2.154)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_P C)}{R_P} \quad (2.155)$$



รูปที่ 2.57 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $1 - j\omega R_p C$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ (2.155) จะได้

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \\ &= \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right] \\ Z_{RC} &= \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.156) \\ Z_{RC} &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) \\ &= Z' - jZ'' \end{aligned}$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.157)$$

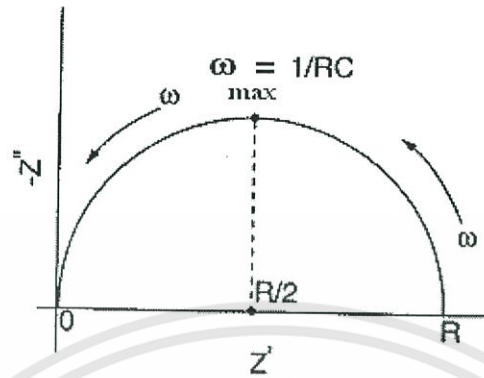
และ

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.158)$$

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

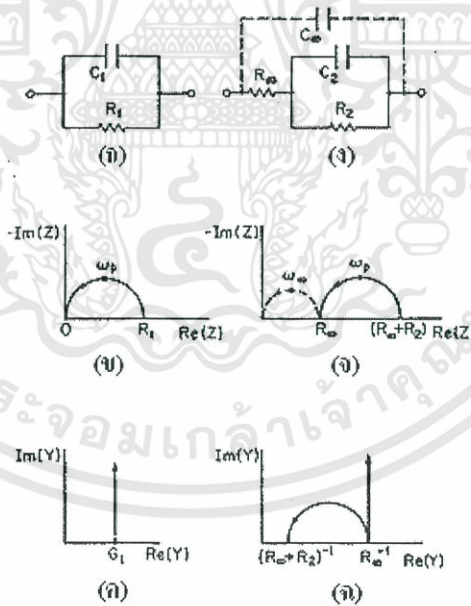
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.58



รูปที่ 2.58 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.59



รูปที่ 2.59 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{\infty}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.59 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance:  $R_b$ ) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty} C_{\infty} = R_1 C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุดคือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.59(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  s ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ(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 ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.59 (ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูป 2.59 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลา คือ  $R_{\infty} C_{\infty} \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_{\infty}$  และ  $C_{\infty}$  จะแสดงจุดไขว้ไปตามรูปที่ 2.59 (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  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรวงรูปที่ 2.59 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัทธิคือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $j\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.159)$$

กราฟของสมการที่ (2.159) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.35(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.59(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.160)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.160) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.59 (ค) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.59 (ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.161)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.162)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.59 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.20.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.59 ดังนี้คือ

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

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

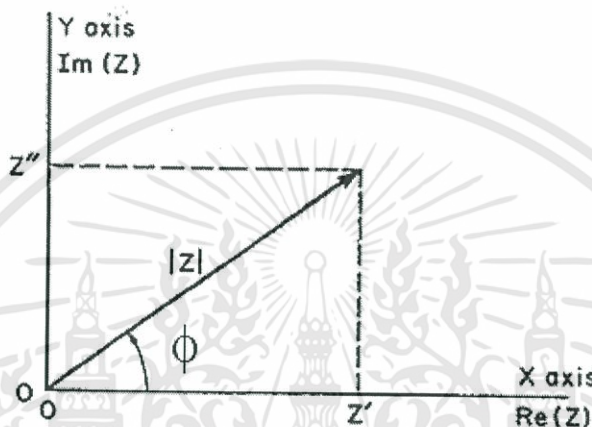
$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.163)$$

โดยที่โมดูลัสคือ  $|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$  (2.164)

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์(Euler relation)

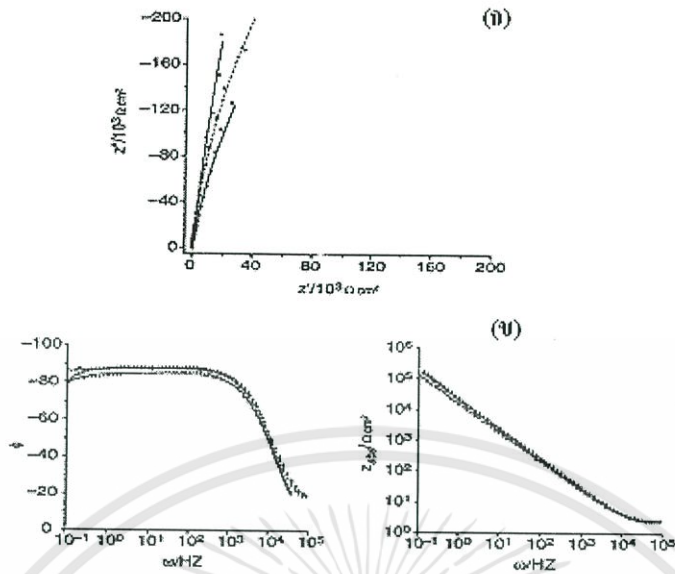
$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

ดังนั้น  $Z = |Z| \exp(j\phi)$  (2.165)



รูปที่ 2.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของ โคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90^\circ$  และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก(weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส  $\phi = -90^\circ$  กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90^\circ$  แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์( $Z$ ) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.60 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์



รูปที่ 2.61 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของโบด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

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

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{T(j\omega)^P} \quad (2.166)$$

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

$$C_{dl} = P \sqrt{\frac{T}{R_S^{(P-1)}}} \quad (2.167)$$

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

### 2.20.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [13, 16, 37]

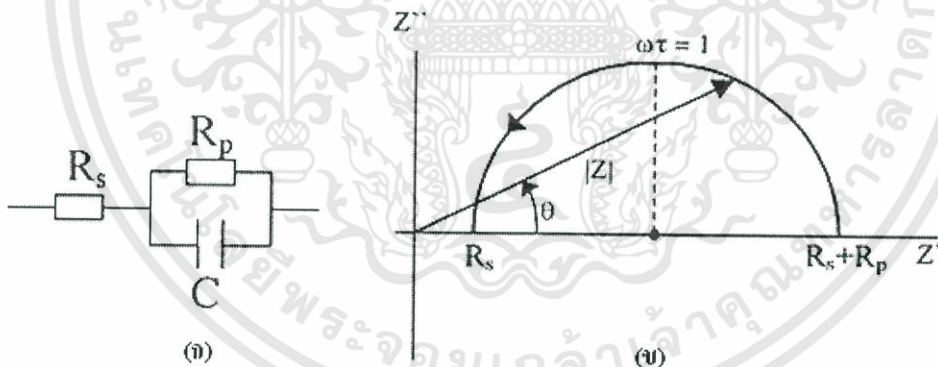
พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอย- ความต้านทานชั้นที่ และความต้านทานอนุกรมสามารถหาคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ขณะทำการวัดจะต้องป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกค่ากระแสสลับ จากนั้นอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

$$= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.168)$$

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

$G$  คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง  $G = \frac{1}{R}$  และ  $\varphi$  คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไบอัส กับกระแสสลับ วงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงดังรูปที่ 2.62 โดยที่  $R_p$  คือความต้านทานชั้นที่หรือความต้านทานขนาน (parallel resistor),  $C$  คือ ความจุของรอยต่อและ  $R_s$  คือความต้านอนุกรมของวงจร



รูปที่ 2.62 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

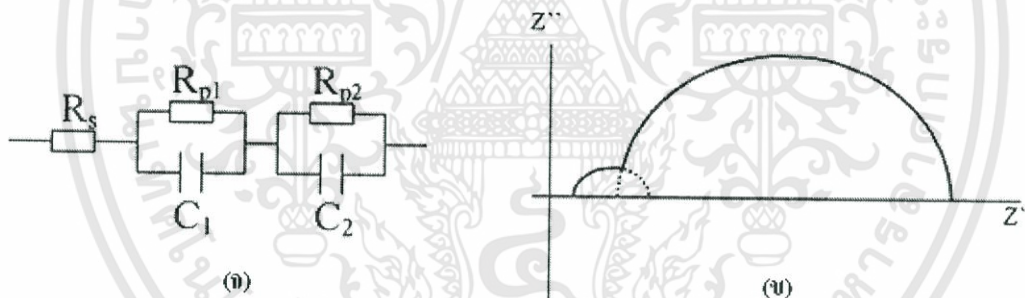
จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมจะอยู่บนแกน  $Z'$  โดยมีรัศมีเท่ากับ  $\frac{R_p}{2}$  จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่  $R_s$  และ  $R_s + R_p$  ส่วน  $Z''$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$Z'' = R_p = \frac{1}{\omega_{\max} C} \quad (2.169)$$

ค่าความจุ  $C$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.169) จากวงจรสมมูลจะมีส่วนของ  $RC$  ที่ต่อขนานกัน 1 ชุด ส่งผลให้ได้รูปครึ่งวงกลมซึ่งจะมีค่าคงตัวเวลา  $\tau$  ค่า ดังสมการ

$$\omega_{\max} = \tau^{-1} = (R_p C)^{-1} \quad (2.170)$$

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.63 (ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงในรูปที่ 2.63(ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยกที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



รูปที่ 2.63 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข)

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษา ซึ่งจะเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร  $RC$  ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรนเป็นต้น จุดศูนย์กลางของ

ครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน  $Z'$  (ดังรูปที่ 2.64(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย  $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$  ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิตีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงได้แล้วในสมการ(2.159) ดังนี้คือ

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

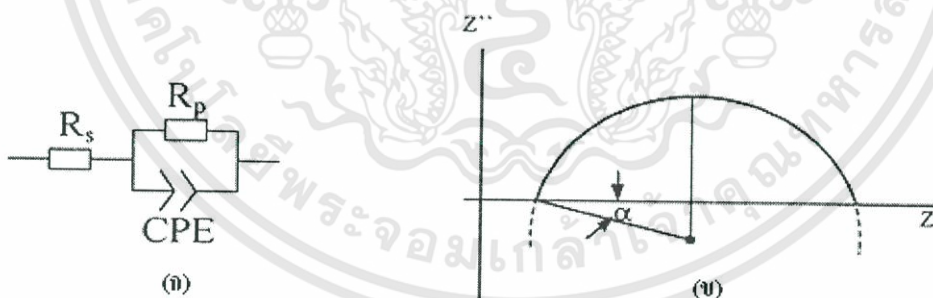
อิตีเมนต์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R,C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า P และ T ดังนั้นคือ

$$T = C^P (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-P} \quad (2.171)$$

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

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

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.64 แสดงแบบจำลองอิตีเมนต์เฟสคงตัว (ก) และกราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิตีเมนต์เฟสคงตัว (ข)

### 2.20.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี [13-14, 16, 38]

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟฟ้าสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่  $\omega$  ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.172)$$

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

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีแต่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับต้น ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริกคังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.173)$$

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

รอยต่อชอตต์ก็ก็เป็นรอยต่อที่ง่ายสุด ความจุของรอยต่อนี้เกิดขึ้นที่ย่านปลอดพาหะส่วนรอยต่อพี-เอ็นของ CdS/CdTe จะประมาณว่าเป็นรอยต่อ  $n^+ - p$  โดยความจุของรอยต่อนี้จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left( \frac{\epsilon_s q N_a}{2 V_{bi}} \right)^{-1} \quad (2.174)$$

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

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{if} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.175)$$

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  $\tau^* = \tau_0 = \frac{1}{\omega_0}$  เมื่อ  $\omega_0$  คือความถี่ของจุดเบี่ยงเบน (inflection point) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_0 = 2N_V v_{th} \sigma_p \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{kT}\right) \quad (2.176)$$

โดยที่  $N_V$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์,  $v_{th}$  คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ  $\sigma_p$  คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับโฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก  $N_V$  และ  $v_{th}$  ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.169) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.177)$$

เมื่อ  $E_T = E_V = E_a$  ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์และนิยมเรียก  $E_a$  ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด  $\omega$  มีค่าน้อยกว่า  $\omega_0$  นั่นคือ  $\omega_0$  จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั้นเอง ส่วน  $\xi_0$  เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง  $\xi_0$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม  $\xi_0$  คงยังขึ้นกับ  $E_a$  ดังความสัมพันธ์

$$\xi_{\omega} = \xi_{\omega_0} \exp\left(\frac{E_a}{E_{\omega_0}}\right) \quad (2.178)$$

เมื่อ  $\xi_{\omega_0}$  และ  $E_{\omega_0}$  คือค่าคงที่ของกลไกการดูดกลืนโมเมนต์ผ่านกำแพงศักย์ [39]

ในกรณีที่กักประจุไม่เป็นกักประจุชนิดเดียว แต่จะเป็นกักประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กักประจุ ( $N_T$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [40]

$$N_T(\omega) = c(E_{\omega}) \frac{\omega}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{c(E)}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} \quad (2.179)$$

ฟังก์ชัน  $c(E_{\omega})$  จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกักประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกักประจุ ถ้าแทนสมการ (2.178) ลงในสมการ (2.177) และเปลี่ยนตัวแปร  $E_a$  เป็น  $E_{\omega}$  จะได้ว่า

$$E_{\omega} = \frac{kTE_{\omega_0}}{E_{\omega_0} - kT} \ln\left(\frac{\xi_{\omega_0} T^2}{\omega}\right) \quad (2.180)$$

ซึ่ง  $E_{\omega}$  ของสมการที่ (2.180) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน  $E_a$  จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะกักประจุ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงที่เวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F^n$ ) หรือ ( $E_F^p$ ) จะหาได้จากความถี่ของจุดเบี่ยงเบน  $\omega_0$  สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ  $C(\omega)$  ค่าพลังงานกระตุ้นของ  $\omega_0$  จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F^n$ ) หรือ ( $E_F^p$ ) เว้นเสียแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างกักประจุที่สูงมาก จากแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากสมการ (2.173) ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  ที่สอดคล้องกับ  $\tau_D$  จะแสดงได้ดังสมการ

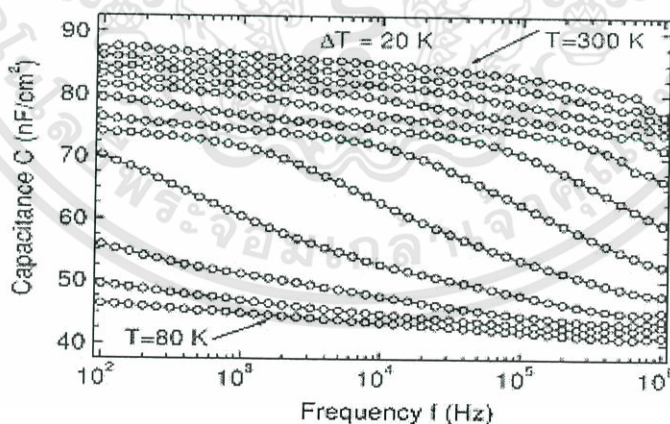
$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม  $\omega$  ที่ใช้ในการวัด  $\omega$  มีค่ามากกว่า  $\omega_D$  ( $\omega > \omega_D$ ) พาหะอิสระไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุเรขาคณิตคือ

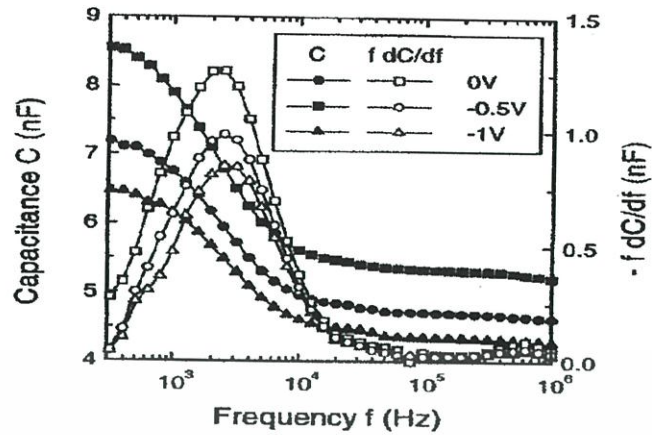
$$C_{\text{geo}} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.181)$$

เมื่อ  $d$  คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  จะมีค่าสูงกว่า  $\omega$  และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เบี่ยงเบน  $\omega_0$  สถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น [38]

1. สำหรับ  $\omega_0 < \omega < \omega_D$  เราจะวัดได้ค่า  $C_{\text{SCR}}$  แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวิน ไปเป็น 300 เคลวิน ขึ้นจากการทรานซิชันครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้นจาก  $C_{\text{SCR}}$  ไปเป็น  $C_{\text{fr}}$  ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega = \omega_0$  ตามสมการ (2.175) การทรานซิชันของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.64 ส่วนรูปที่ 2.66 จะแสดงค่า  $C$  ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชันของค่าความจุจากช่องความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  ซึ่งพีคของกราฟ  $-\frac{fdC}{df}$  จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 2.65 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80-100 เคลวิน คือ ค่า  $C_{\text{SCR}}$  แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม



รูปที่ 2.66 แสดงความจุของรอยต่อ CdS/Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัส

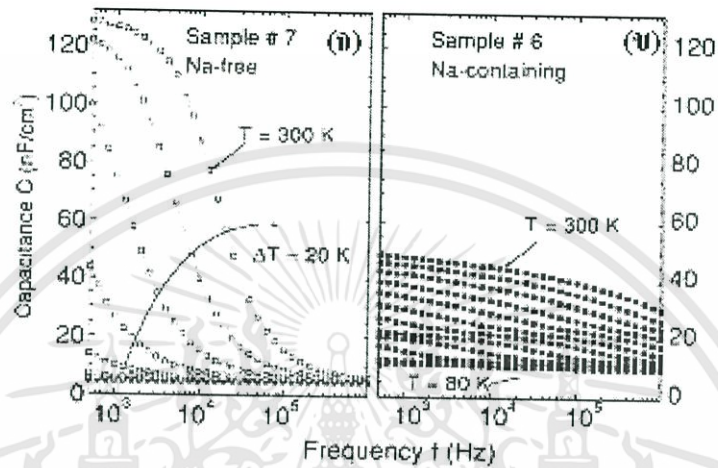
ค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ  $\frac{fdC}{df}$  ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง

2. สำหรับ  $\omega < \omega_D < \omega_0$  ในแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจะเห็นการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียว ซึ่งเกิดจากความจุเรคาวิต (C<sub>eco</sub>) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C<sub>p</sub>) ซึ่งการทรานซิชันนี้เกิดขึ้นที่  $\omega = \omega_D$  พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะ รูปที่ 2.67 แสดงการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรคาวิต (C<sub>eco</sub>) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิต่ำ/ความถี่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบขึ้นบันได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของ CuGaSe<sub>2</sub> ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทรานซิชันที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก ( $\tau_D$ ) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชันที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโซลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s} = \frac{q\mu_p}{\epsilon_s} = \frac{qN_V\mu_p}{\epsilon_s} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.188)$$

ถ้าทราบค่า  $\mu_p$  และ  $\epsilon_s$  ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของโฮล(p)ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า C<sub>p</sub> จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออนในซึ่ซึ่งก็คือมีการจับประจุ

และ การคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า [38] การทรานซิชันในรูป 2.67 (ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดโพลีแลกทริกค่อนข้างสูงอยู่ในราว  $\tau_D = 10^{-5}$  s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้  $\omega_D = \omega_0$  ดังนั้นจากการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เบี่ยงเบน ( $\omega_0$ ) ของกับดักประจุนั้นคือไม่สามารถตรวจวัดระดับพลังงานของกับดักประจุได้

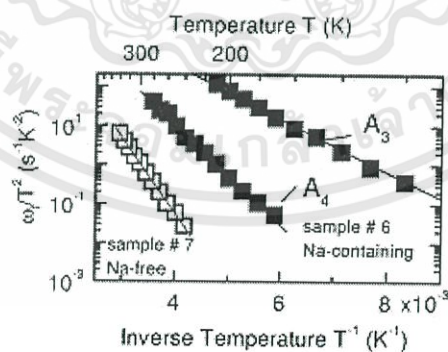


รูปที่ 2.67 แสดงสเปกตรัมความจุของ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ

ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na

ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอม Na

รูปที่ 2.68 แสดงการหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในรูปที่ 2.67 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ ได้จาก CuGaSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na ส่วน CuGaSe<sub>2</sub> ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า



รูปที่ 2.68 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย [12, 14]

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี

1. แผ่น ITO ขนาด 12×26 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. อ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้คงที่
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. เครื่องชั่งดิจิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
6. แท่นยึด
7. เทปล่อน
8. แท่งแก้ว
9. นาฬิกาจับเวลา
10. ปากคีบ
11. กระดาษลิตมัส
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)

##### 3.1.2 การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี

อุปกรณ์ประกอบด้วยดังนี้

1. ฟิล์มบาง CdS/ITO ที่ได้จากวิธีการอบสารละลายเคมีขนาดพื้นที่ 12×26 ตารางมิลลิเมตร
2. เครื่องอัลตราโซนิค
3. น้ำปอดประจุ
4. เครื่องเป่าลมร้อน

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด

#### 1. ระบบระเหิดสารในระยะประชิดประกอบด้วย

- ท่อแก้วบอโรซิลิเกตปลายปิดหนึ่งด้าน
- กล้องแก๊สไฟต์
- เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
- เครื่องวัดอุณหภูมิ
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP23
- หลอดทังสเตน 1,000 วัตต์ ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DP-50A
- ปั๊มฟักโรตารี (Rotary pump)
- เกจ พิราณี วัดความดันต่ำ

#### 2. Cds/ITO ที่ได้จากวิธีการอบสารละลายเคมีขนาดพื้นที่ 12×26 ตารางมิลลิเมตร

#### 3. สารเคมีแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99%

#### 4. หน้ากากกันไอระเหยของสารเคมี

#### 5. แวนตากรองแสง

#### 6. ภาชนะเก็บความชื้น (dessicator) ที่ใช้ใส่ตัวอย่าง

#### 7. นาฬิกาจับเวลา

### 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

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

### 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope:SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455vp โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 5,000 และ 20,000 เท่า

### 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่อง ยูวี- วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo coporation รุ่น He  $\lambda$  ios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร

### 3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า

#### 1. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงยี่ห้อ Keithley รุ่น 236

#### 2. กาวเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.2 ขั้นตอนการการสร้ารรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe [12-14]

#### 3.2.1 การเตรียมชั้นแคดเมียมซัลไฟด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นอินเดียมทินออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรองรับ มาตัดออกให้ได้ขนาดพื้นที่  $12 \times 26$  ตารางมิลลิเมตร
2. นำหน้ากามาปิดปลายด้านใดด้านหนึ่งให้มีความกว้างประมาณ 2 มิลลิเมตร
3. นำไปเสียบภาชนะเทปเลื่อน โดยมีแท่งแก้วยึดเทปเลื่อนแล้วจึงนำไปติดตั้งไว้กับเครื่อง กวนสารละลายเคมี
4. นำแผ่นฐานรองรับที่ติดตั้งกับเครื่องกวนสารละลายเคมีมาวางลงในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปลดประจุบรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางลงในอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ถึง 90 องศา และให้ปรับความเร็วในการ หมุนเครื่องกวนสารละลายเคมีให้ได้ความเร็วช้าที่สุด
5. เมื่ออุณหภูมิของน้ำปลดประจุที่อยู่ในบีกเกอร์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เทสาร แคดเมียมซัลไฟด์จำนวน 0.3847 กรัม ที่ละลายในน้ำปลดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทแอมโมเนีย 17 มิลลิลิตร เทสารไทโอยูเรียจำนวน 0.5709 กรัม ที่ละลายใน น้ำปลดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วจึงเทน้ำปลดประจุให้ท่วมแผ่นฐานรองรับ ตามลำดับ วัดค่า pH ได้ประมาณ 11.6 ใช้เวลาในการอบสารละลายเคมี 1 ชั่วโมง
6. นำแผ่นรองรับไปแช่ตะกอน (colloid) ออกด้วยน้ำปลดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 30 นาที 3 รอบ โดยเปลี่ยนน้ำปลดประจุทุกรอบ
7. อบสารละลายเคมีรอบที่ 2 โดยทำตามขั้นตอน 3-6

8. นำฟิล์มบางของสารตัวอย่างถอดหน้ากาออก เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เมื่อตัวอย่างแห้งดีแล้วจึงบรรจุในถุงซิปล็อกไว้ในโถดักความชื้นเตรียมเคลือบชั้น แคดเมียมเทลลูไรด์ต่อไป

### 3.2.2 การเตรียมชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์

1. นำกล่องแกรไฟต์ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนแล้วไปแอลนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
3. ชั่งสารแคดเมียมเทลลูไรด์ 0.05 กรัม บรรจุลงในกล่องแกรไฟต์
4. นำแผ่นฐานรองรับที่ผ่านการอบสารละลายเคมีแล้วมาปิดตรงช่องใส่สารแคดเมียมเทลลูไรด์โดยจะอยู่ห่างจากช่องใส่สารตั้งต้นเป็นระยะทาง 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และสำหรับการทำรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร
5. นำฝากล่องแกรไฟต์ประกบกันให้แน่น
6. นำกล่องแกรไฟต์เข้าสู่ระบบการระเหิดสารในระยะประชิด
7. ทำการลดความดันโดยใช้เครื่องโรตารีปั๊มให้ได้ความดันที่ประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
8. ทำการระเหิดสารแคดเมียมเทลลูไรด์ เปิดหลอดไฟทั้งสแตนด์ที่ใช้ให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการระเหิดนาน 30 นาที จึงปิดหลอดไฟที่ให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำอุปกรณ์ตัวอย่างที่เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ไปสร้างขั้วไฟฟ้า

### 3.2.3 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า

1. นำผงคาร์บอนละลายด้วยทินเนอร์ที่ใช้ละลายผงคาร์บอนโดยเฉพาะให้ได้ความหนืดตามที่ต้องการ
2. นำอุปกรณ์สารตัวอย่างที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์มาสร้างขั้วไฟฟ้าโดยป้ายคาร์บอนตรงบริเวณชั้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยให้ห่างจากขอบของฟิล์มแคดเมียมเทลลูไรด์ประมาณ 2 มิลลิเมตร ปล่อยให้แห้งเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง
3. ต่อสายไฟโดยใช้กาวเงินเชื่อมที่ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าบนฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าด้านหลังบนคาร์บอนที่ป้ายอยู่บนฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์
4. ปล่อยให้แห้ง แล้วเข้าสู่กระบวนการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

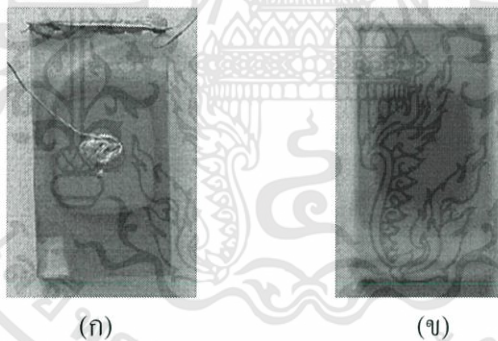
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การวัดและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา รอยต่ออวิวิพพันธุ์แบบฟิล์มบาง โดยในการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ ที่เตรียม ขึ้นนี้ ได้มีการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า ทั้งภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสง ทั้งที่ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ วัดลักษณะเฉพาะของความจุ-แรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของ รอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe และยังนำไปศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสี เอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการ วัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### 4.1 รอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

ได้มีการเตรียมรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (อินเดียมทินออกไซด์) โดยเคลือบชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS ก่อนโดยวิธีออบสารละลายเคมี (CBD) จากนั้นเคลือบชั้น แคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด (CSS) ซึ่งมีลักษณะสีเทาดำผิวหน้าเรียบ สม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายโดยใช้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450 องศาเซลเซียส โดยเลือกระยะห่าง ระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 มิลลิเมตร รอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ที่เตรียมจะได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe มีชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ CdS ที่เตรียม โดย วิธีออบสารละลายเคมี (CBD) ลงบนชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (อินเดียมทินออกไซด์) จากนั้น เคลือบชั้นแคดเมียมเทลลูไรด์ CdTe โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด (CSS) โดยใช้ อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศา เซลเซียส โดยเลือกระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะ 4 มิลลิเมตร โดย

ก. แสดงภาพด้านหลังของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

ข. แสดงภาพด้านหน้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

## 4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

### 4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์บนกระจกสไลด์เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 2.18, 2.91 และ 2.33 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2 และกรณีให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 10.88, 9.09 และ 9.46 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.3

สำหรับฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งแคดเมียมซัลไฟด์ได้เคลือบบนกระจกสไลด์ไว้ก่อนแล้ว เลือกเงื่อนไขโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 1.75, 1.82 และ 1.46 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนกรณีที่ให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 4.13, 9.09 และ 7.27 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5

สำหรับฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งแคดเมียมซัลไฟด์ได้เคลือบบนชั้นอินเดียมทินออกไซด์ไว้ก่อนแล้ว เลือกใช้เงื่อนไขโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 1.43, 2.50 และ 1.71 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.6

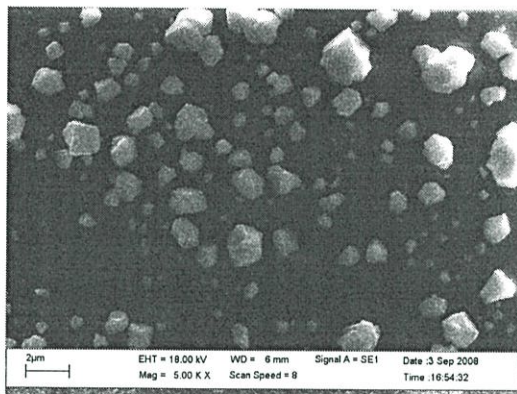
ส่วนกรณีที่ให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 6.55, 10.91 และ 8.82 ไมโครเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7

ส่วนรูปที่ 4.8 (ก) แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบนกระจกสไลด์โดยการเคลือบ 2 ครั้ง สำหรับรูปที่ 4.8 (ข) แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง ITO ที่

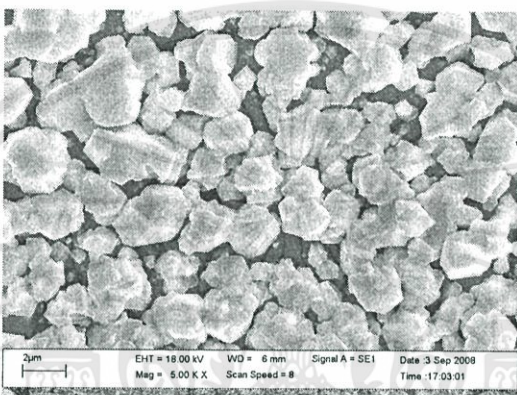
เตรียมบนกระจกใสโดยวิธี แมกนีตรอนสปีดเทอริง ด้วยคลื่นวิทยุ และรูปที่ 4.8 (ค) แสดงภาพถ่าย  
ผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีบน ITO โดยการเคลือบ 2 ครั้ง



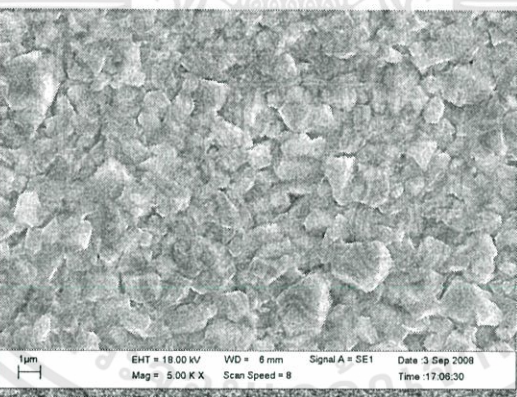
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 2 mm



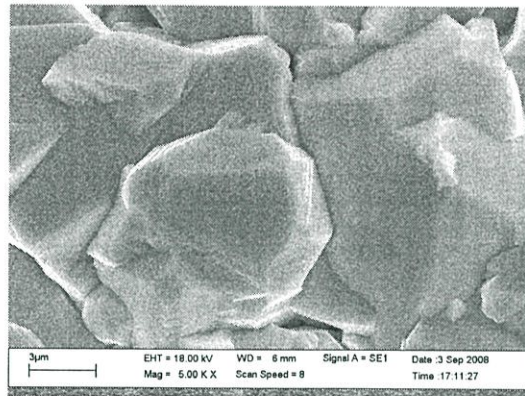
d = 4 mm



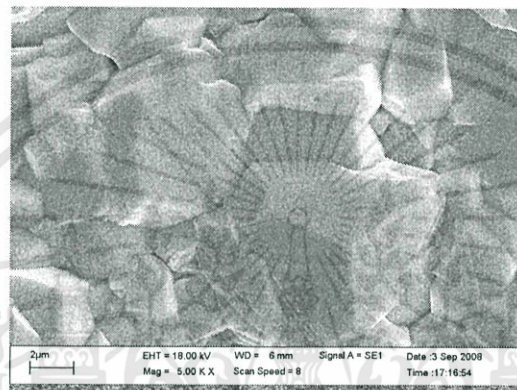
d = 8 mm

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะ  
 ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ  
 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่น  
 ฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

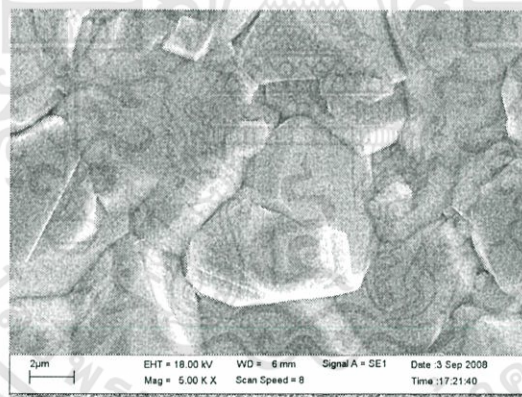
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 2 mm



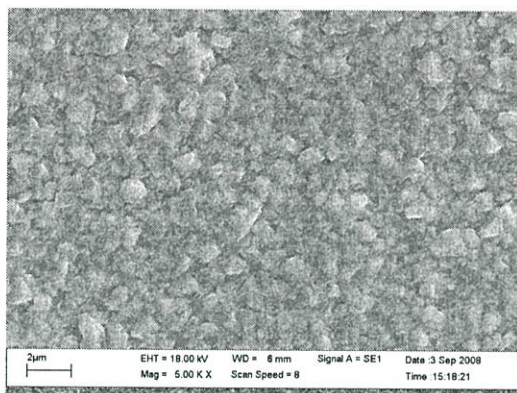
d = 4 mm



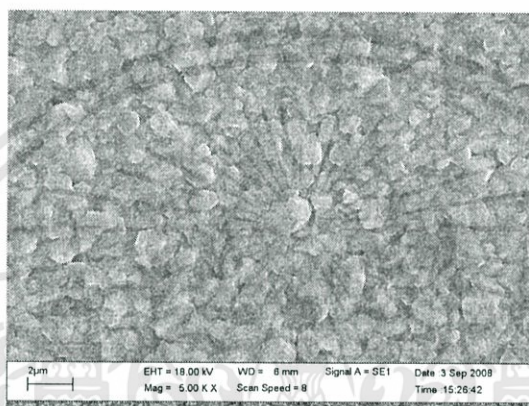
d = 8 mm

รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่น ฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 2 mm



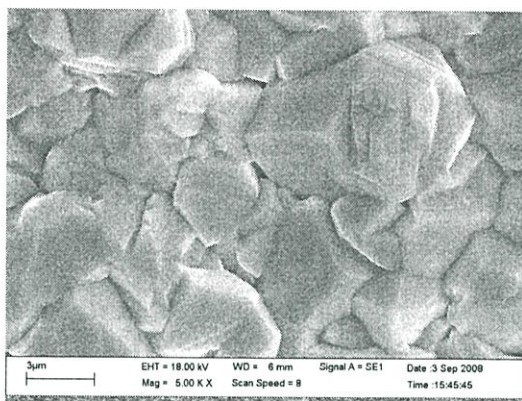
d = 4 mm



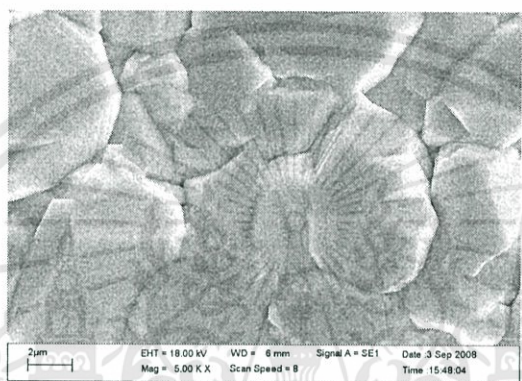
d = 8 mm

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่น ฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

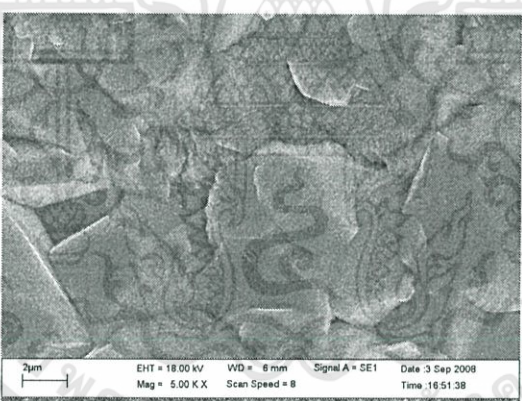
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 2 mm

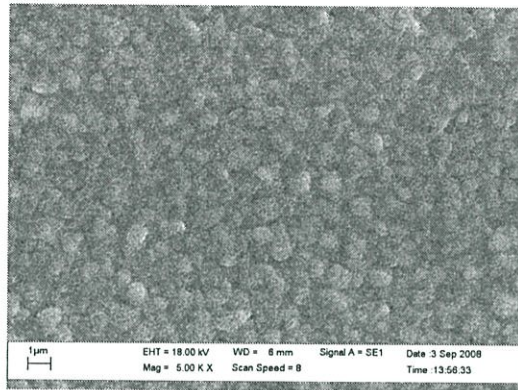


d = 4 mm

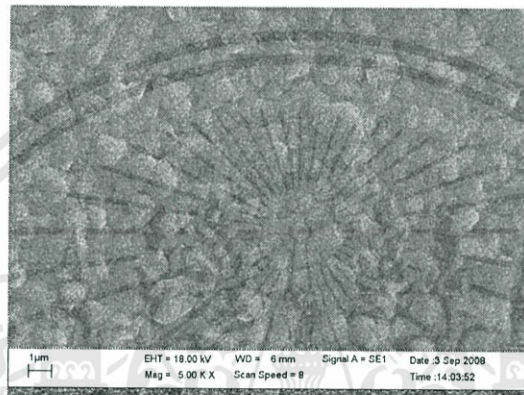


d = 8 mm

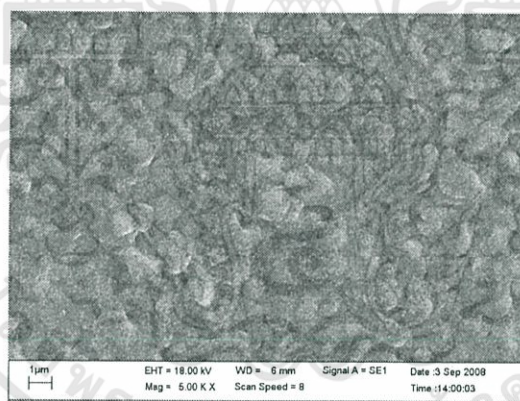
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่น ฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



$d = 2 \text{ mm}$



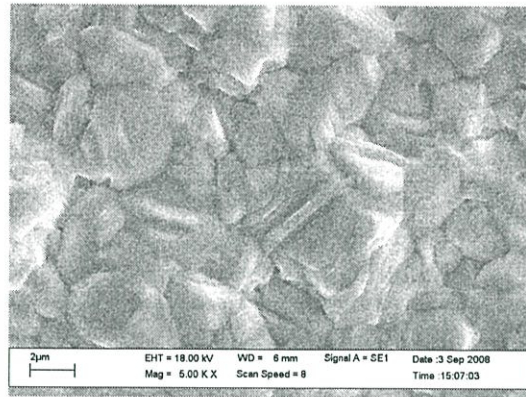
$d = 4 \text{ mm}$



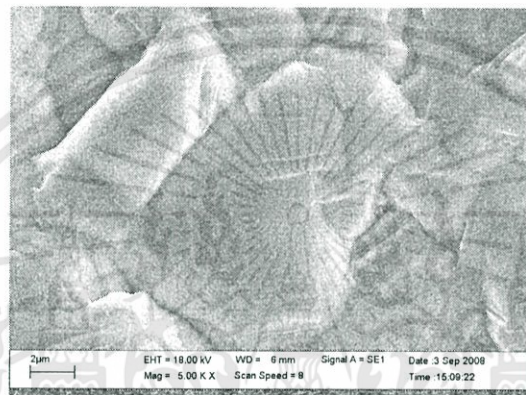
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

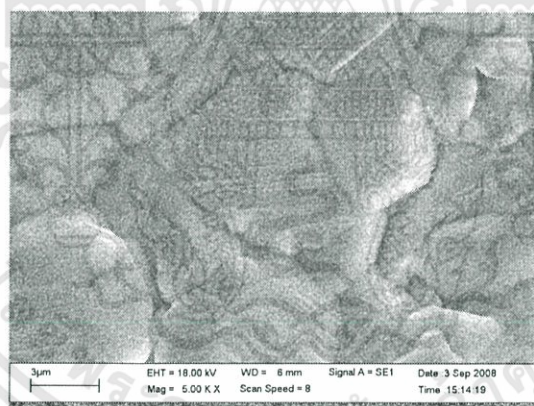
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



d = 2 mm



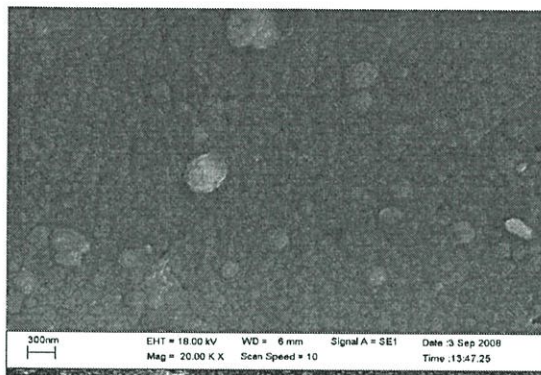
d = 4 mm



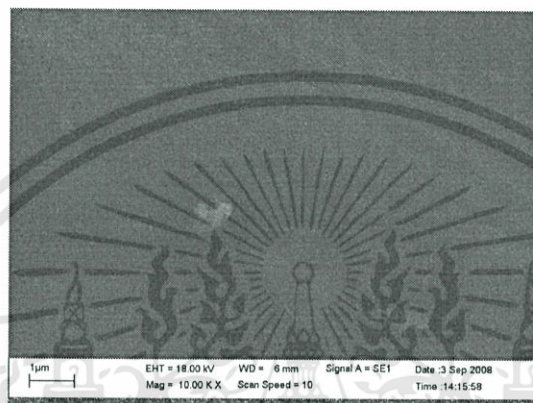
d = 8 mm

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะ  
 ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ 2, 4  
 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่น  
 ฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

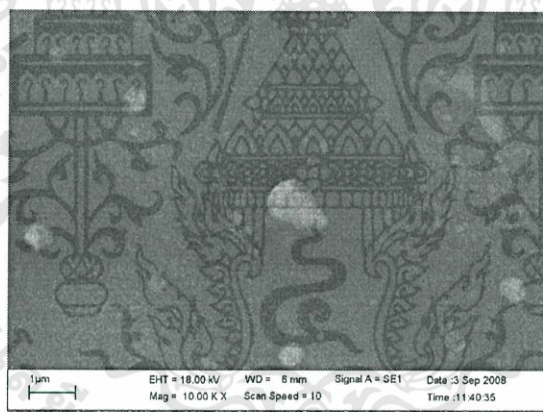
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางในกรณีต่างๆ

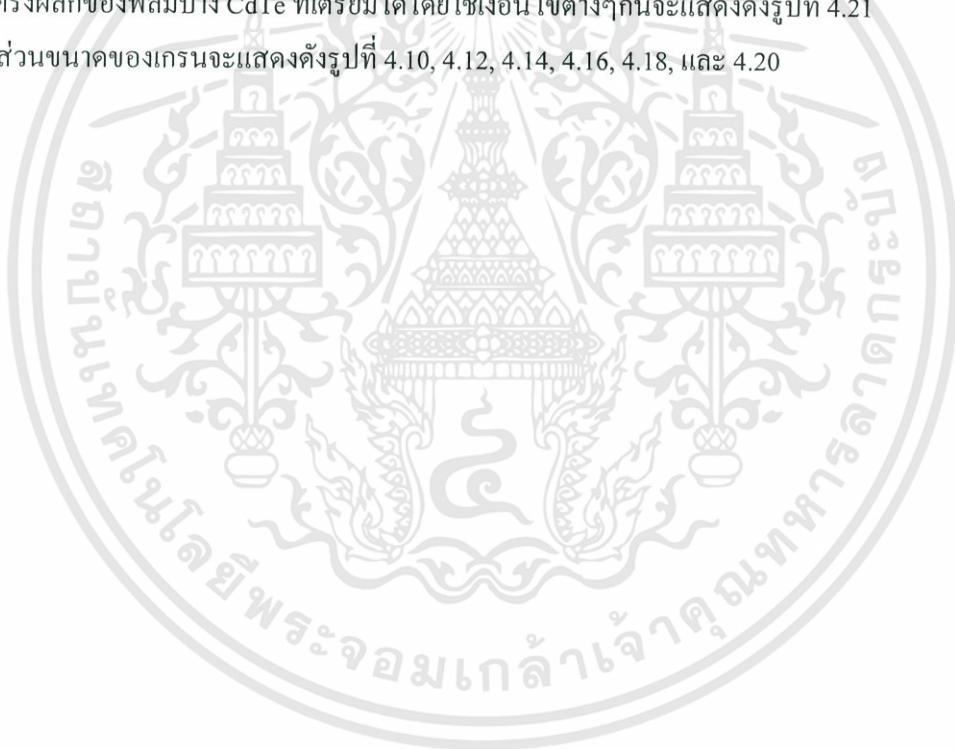
- ก. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบนกระจกสไลด์โดยการเคลือบ 2 ครั้ง
- ข. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง ITO ที่เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ
- ค. ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบน ITO โดยการเคลือบ 2 ครั้ง

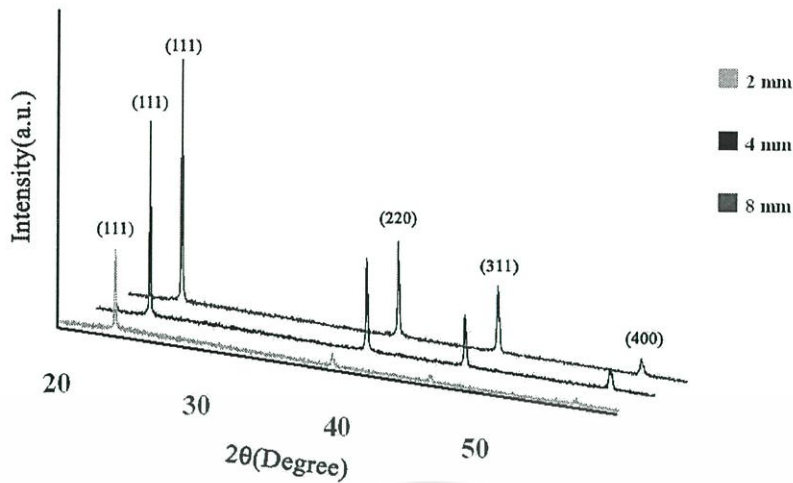
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดและรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe

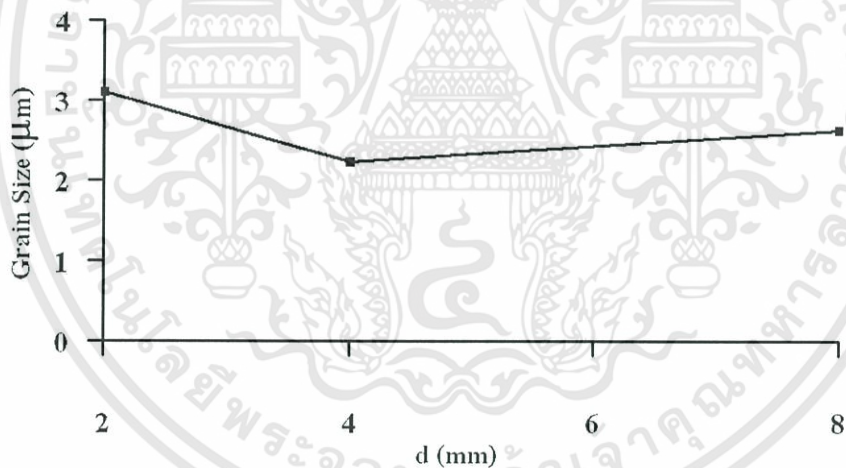
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะ  
ประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส  
ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400  
องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้น 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดย  
ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม  $2\theta \approx 23^\circ$  ระนาบ (220) ที่มุม  $2\theta \approx 39^\circ$  ระนาบ (311) ที่มุม  
 $2\theta \approx 46^\circ$  และระนาบ (400) ที่มุม  $2\theta \approx 56^\circ$  เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมา  
เทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 10-207 พบว่าระนาบการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้  
มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่า โครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบซิงค์เบลนด์  
และมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับผลึกสมบรูณ์และพบว่าระนาบการเลี้ยวเบน (111) จะปรากฏเด่นชัดที่สุด  
และความเข้มมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเพิ่มขึ้น ขนาดของ  
ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยใช้เงื่อนไขต่างๆกันจะแสดงดังรูปที่ 4.21

ส่วนขนาดของเกรนจะแสดงดังรูปที่ 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18, และ 4.20

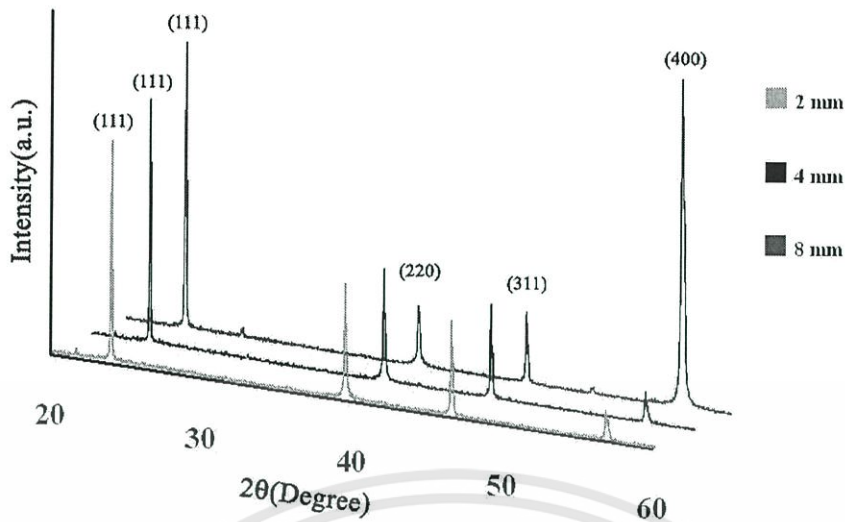




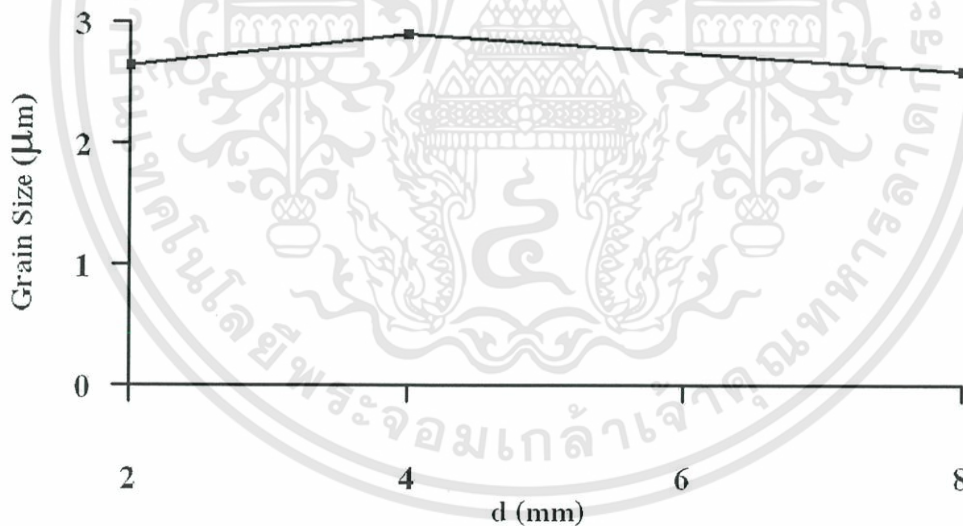
รูปที่ 4.9 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธี ระเบิดสารในระบะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



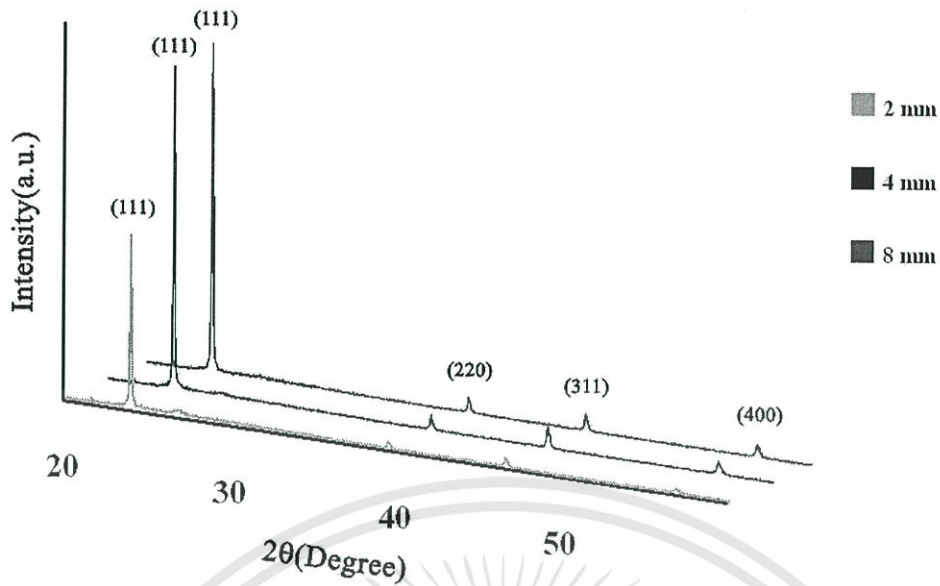
รูปที่ 4.10 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเบิดสารในระบะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่ ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



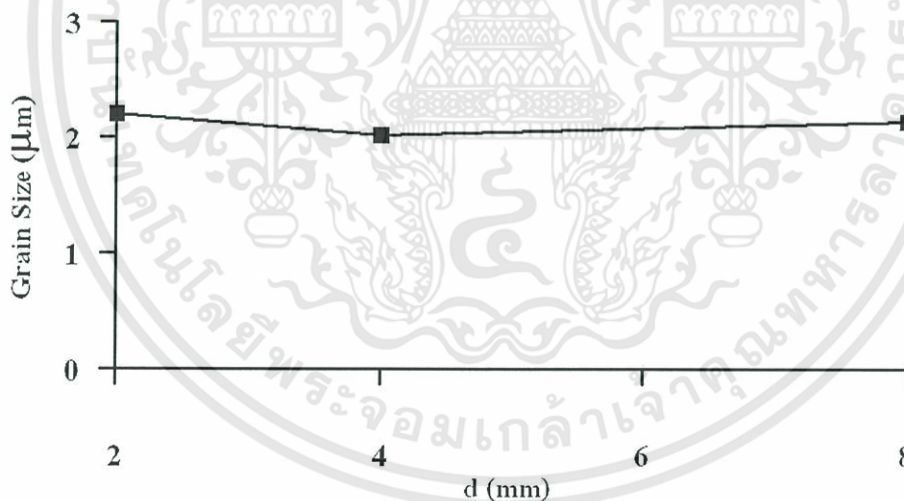
รูปที่ 4.11 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



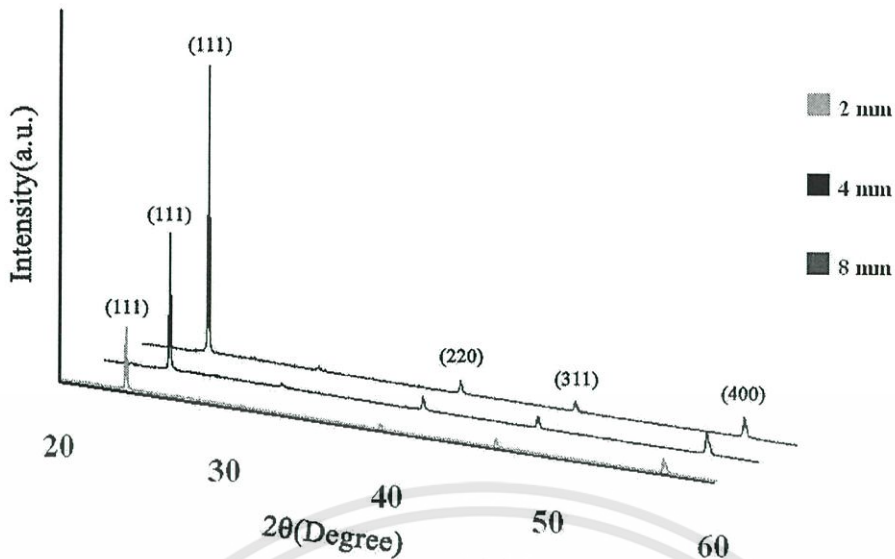
รูปที่ 4.12 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



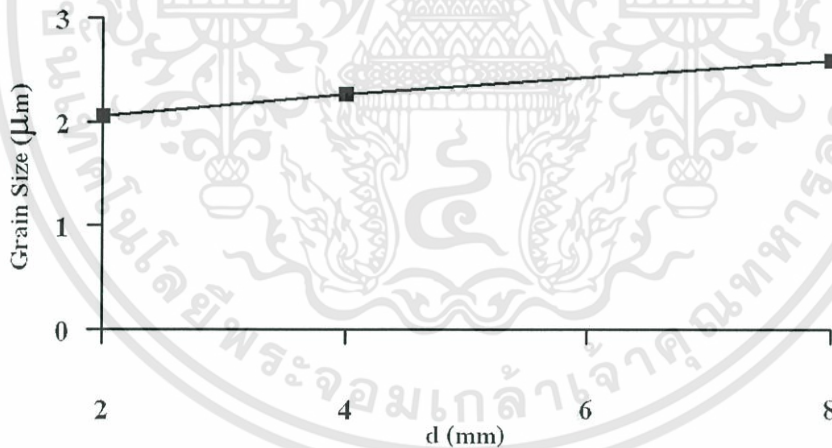
รูปที่ 4.13 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



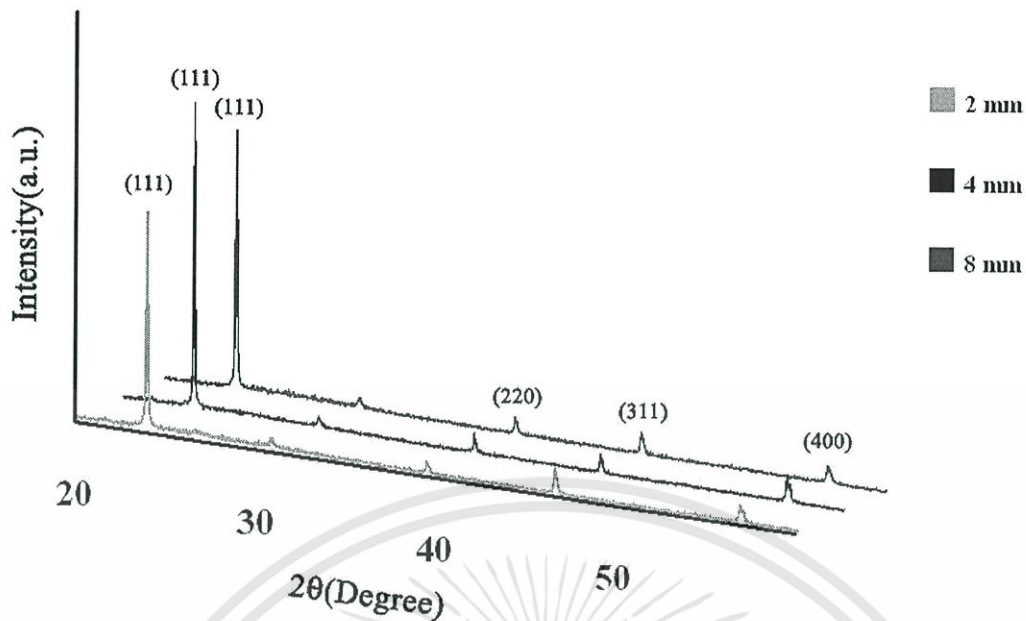
รูปที่ 4.14 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



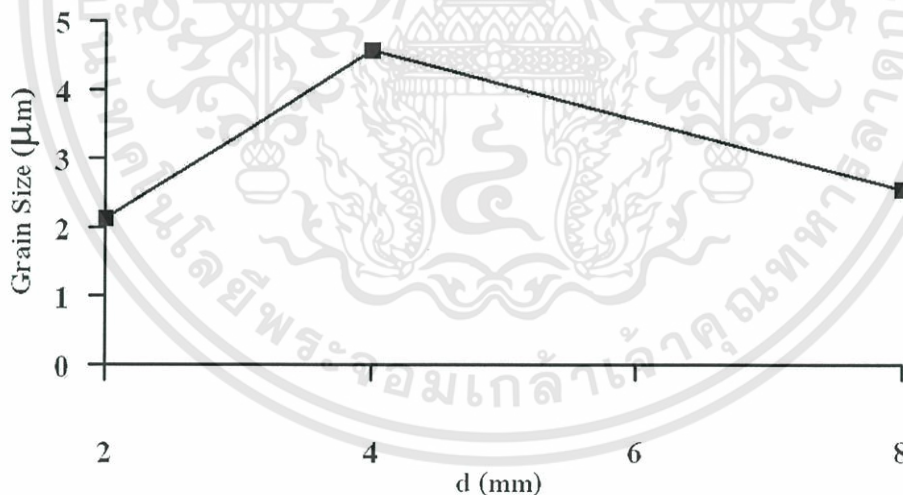
รูปที่ 4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



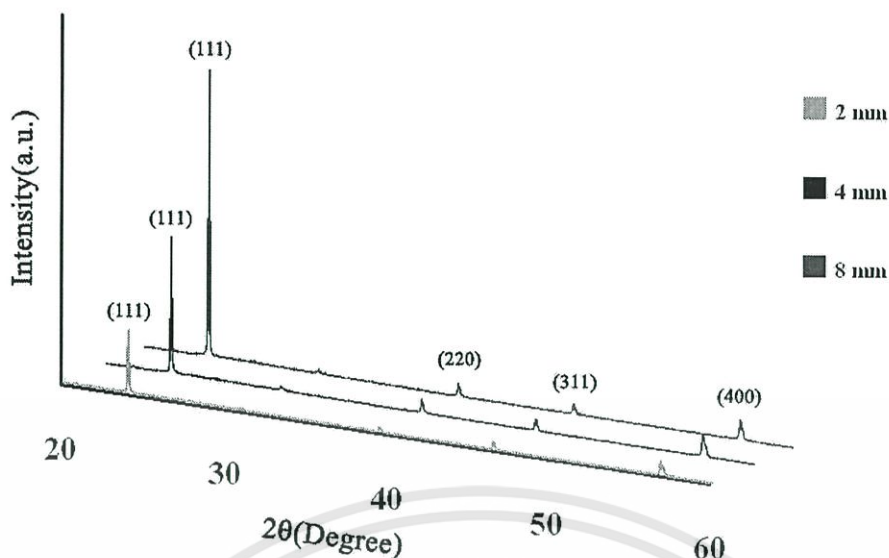
รูปที่ 4.16 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



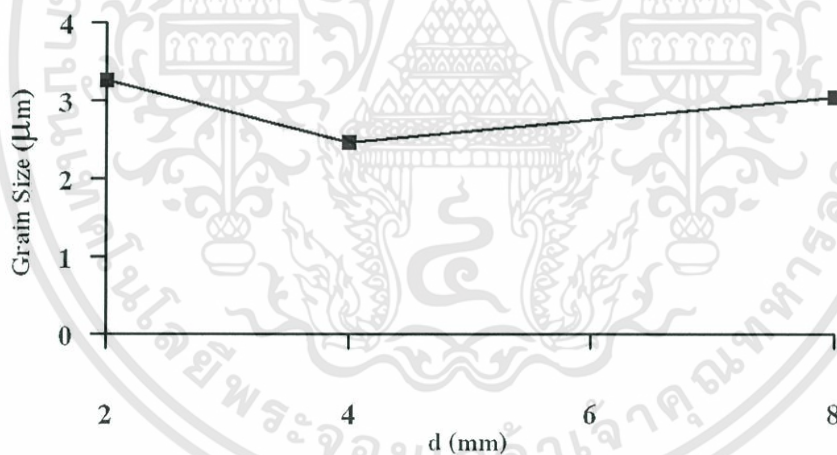
รูปที่ 4.17 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



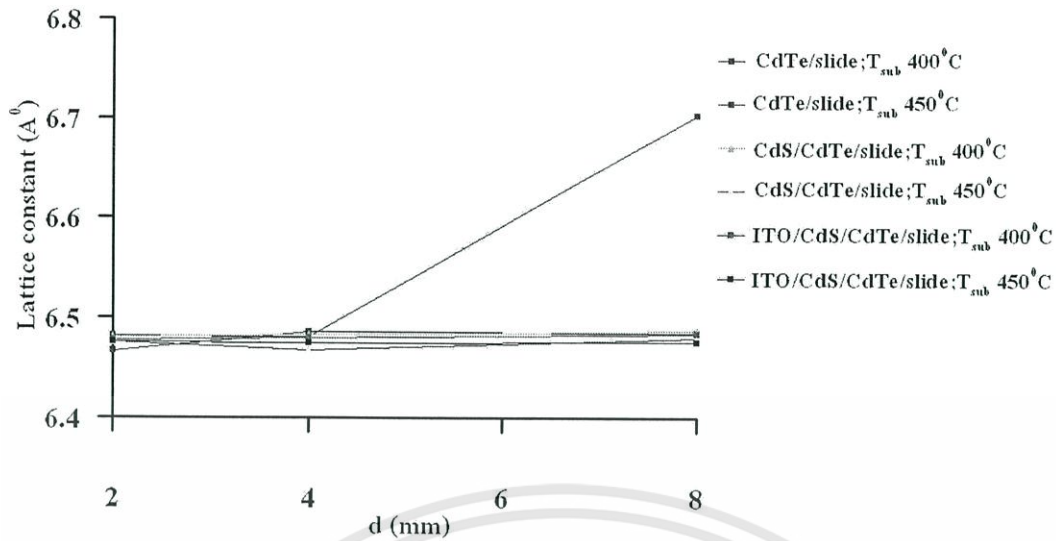
รูปที่ 4.18 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



รูปที่ 4.19 แสดงฟังก์ชันความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



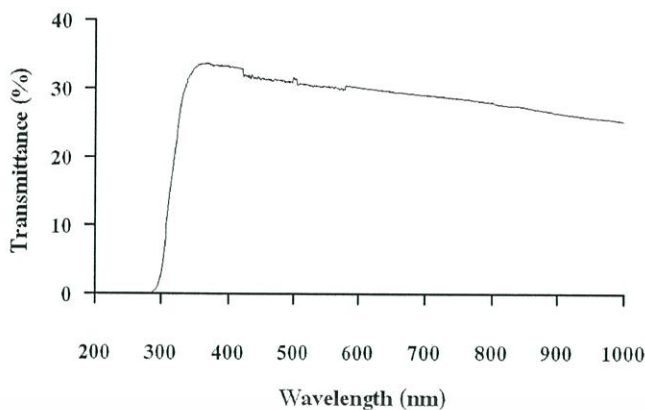
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe/CdS/ITO ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



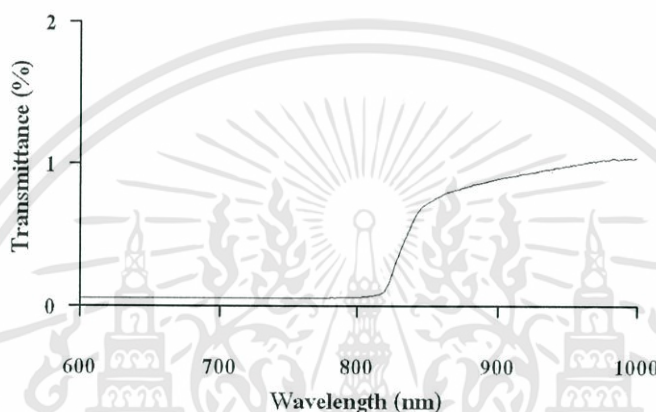
รูปที่ 4.21 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดที่มีระยะห่างและอุณหภูมิระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 500, 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400, 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

#### 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

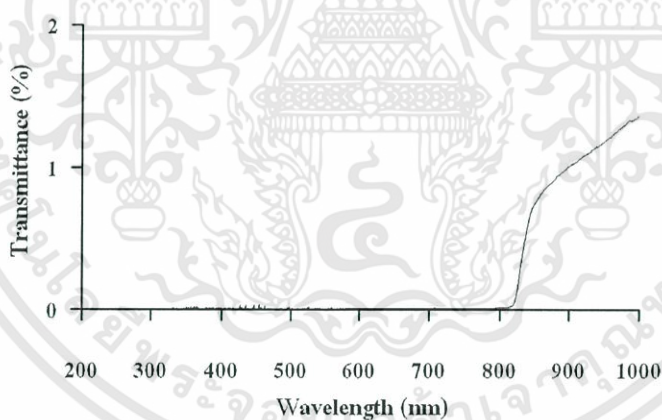
จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิดที่เคลือบบนกระจกสไลด์เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.22- 4.23 เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.24- 4.25 สำหรับฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.26- 4.27 เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.28- 4.29 สำหรับฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมทินออกไซด์เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที นาที่ ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.30- 4.31 เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก๊สเริ่มต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.32- 4.33 พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตรและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 30- 80 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยนำข้อมูลที่ได้ออกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $h\nu$  แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอนจุดที่ตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานพลังงาน ( $E_g$ ) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1



$d = 2 \text{ mm}$



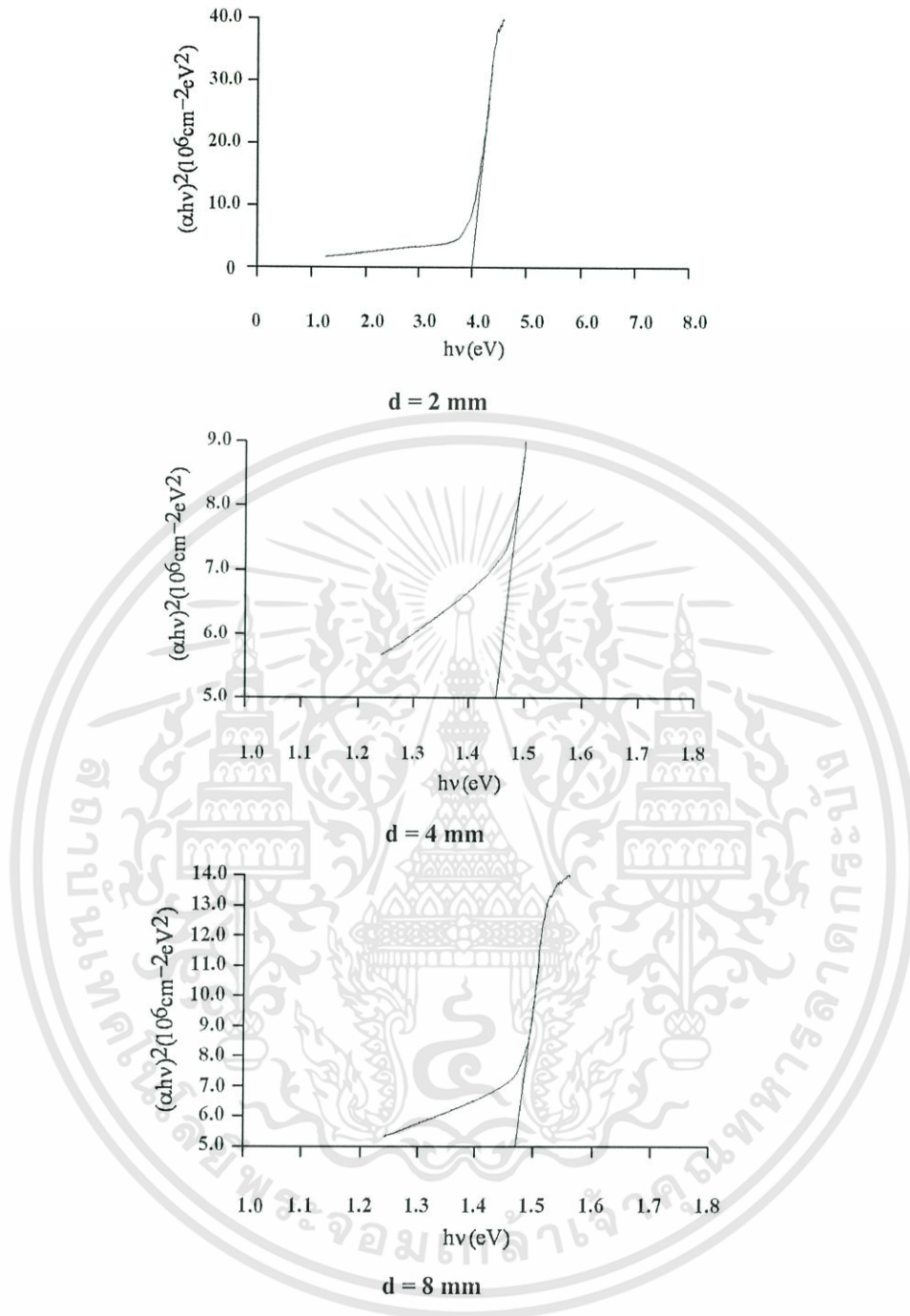
$d = 4 \text{ mm}$



$d = 8 \text{ mm}$

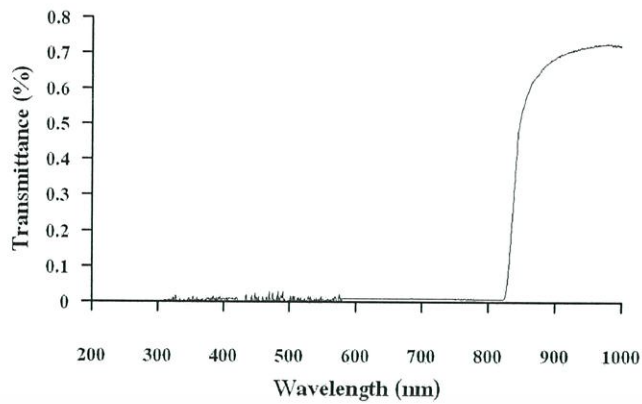
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

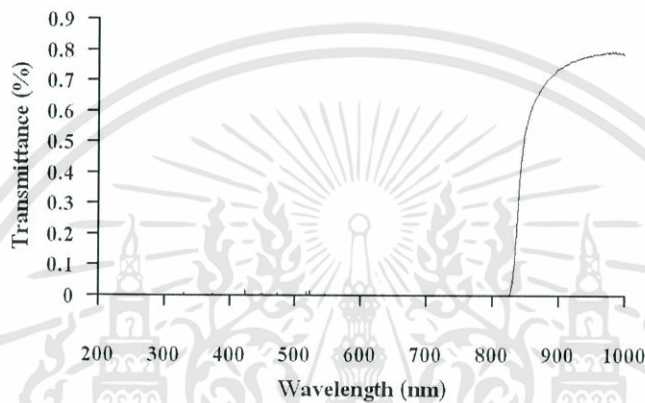


รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  फिल्मบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

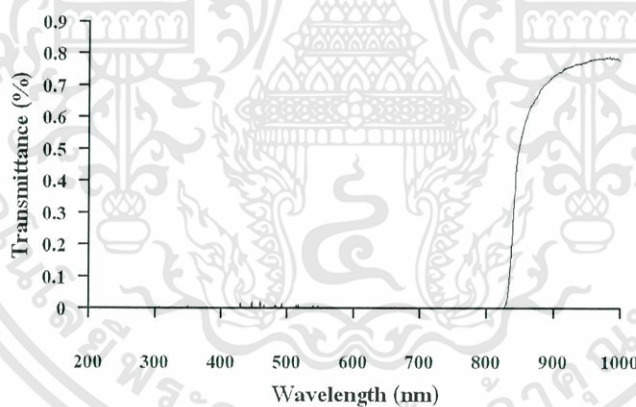
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



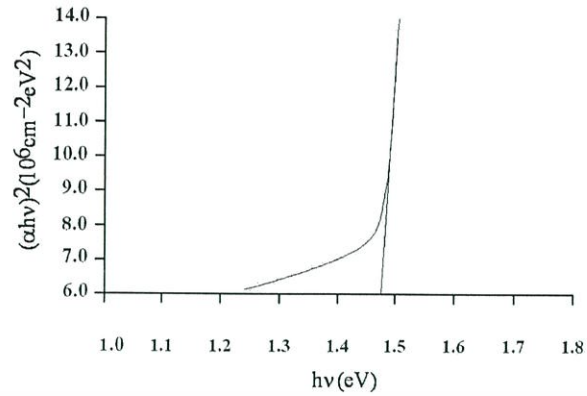
$d = 4 \text{ mm}$



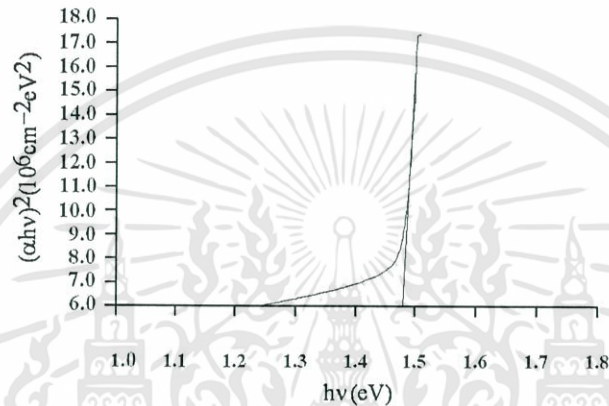
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

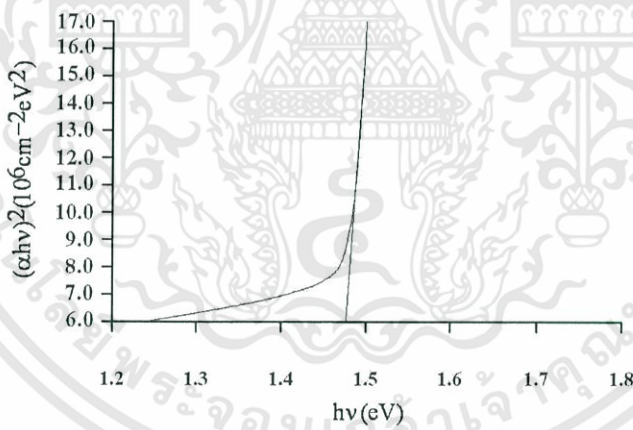
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$

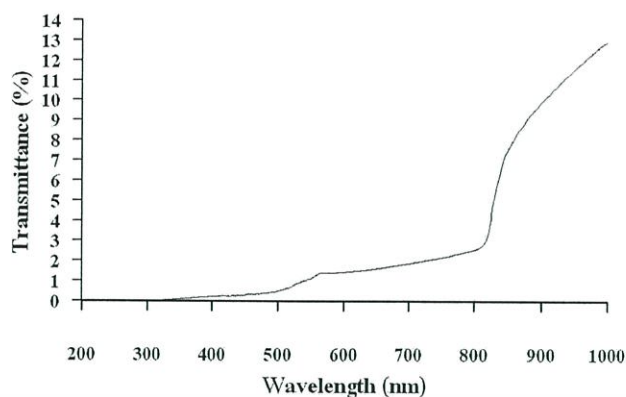


$d = 4 \text{ mm}$

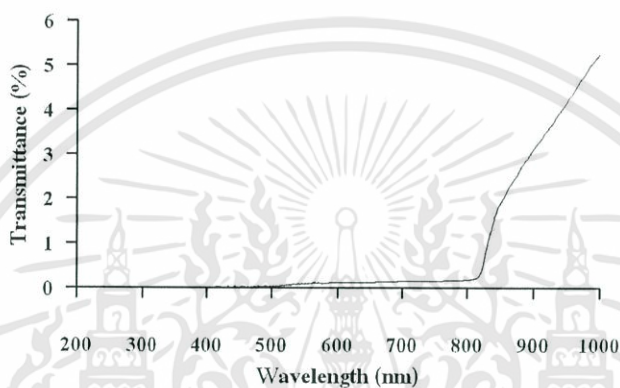


$d = 8 \text{ mm}$

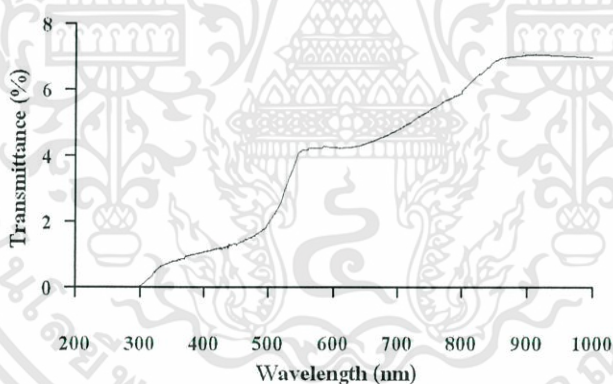
รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที



$d = 2 \text{ mm}$



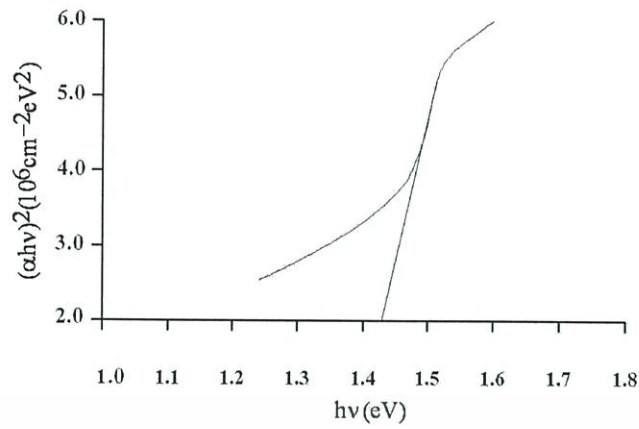
$d = 4 \text{ mm}$



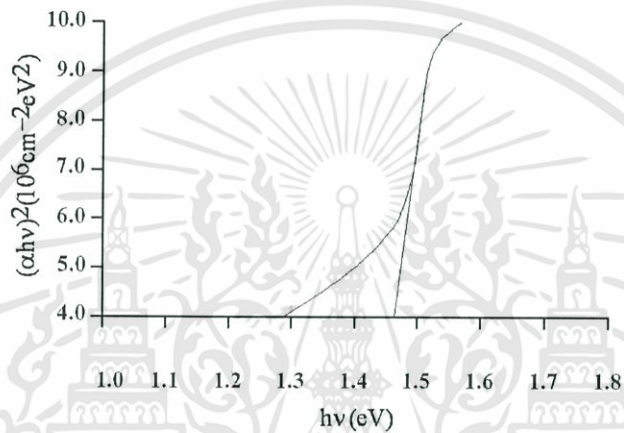
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้น เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

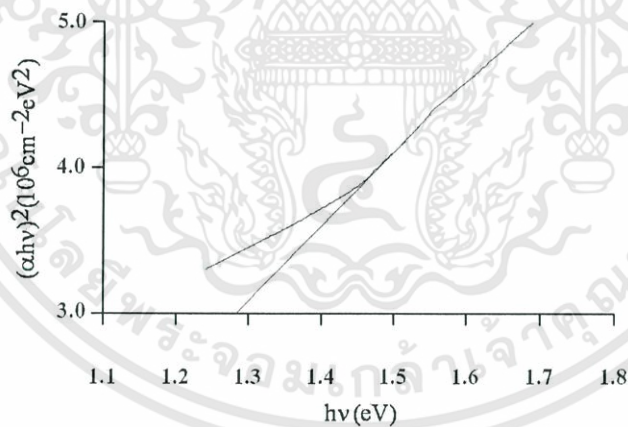
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



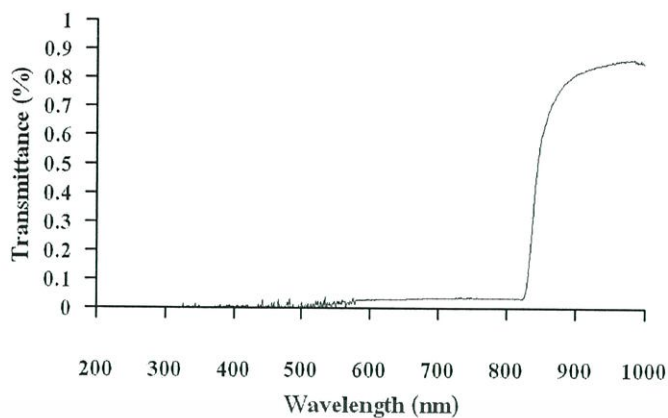
$d = 4 \text{ mm}$



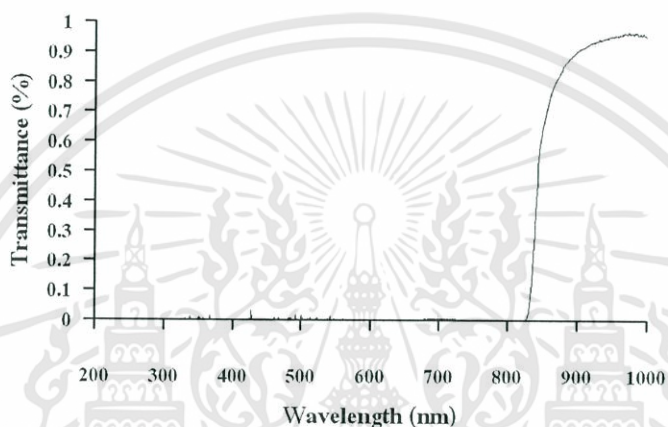
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  फिल्मบาง CdTe และ CdS ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

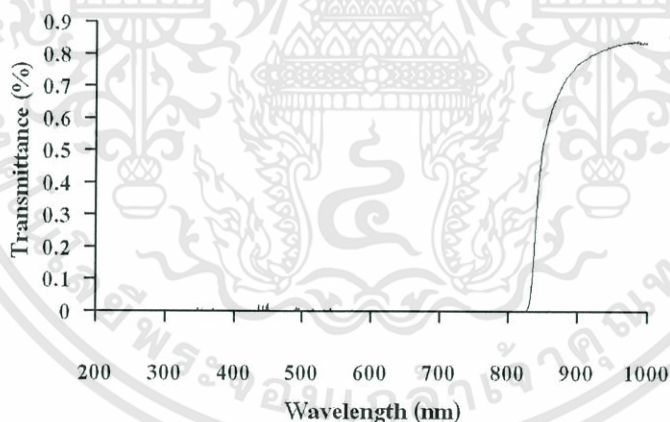
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



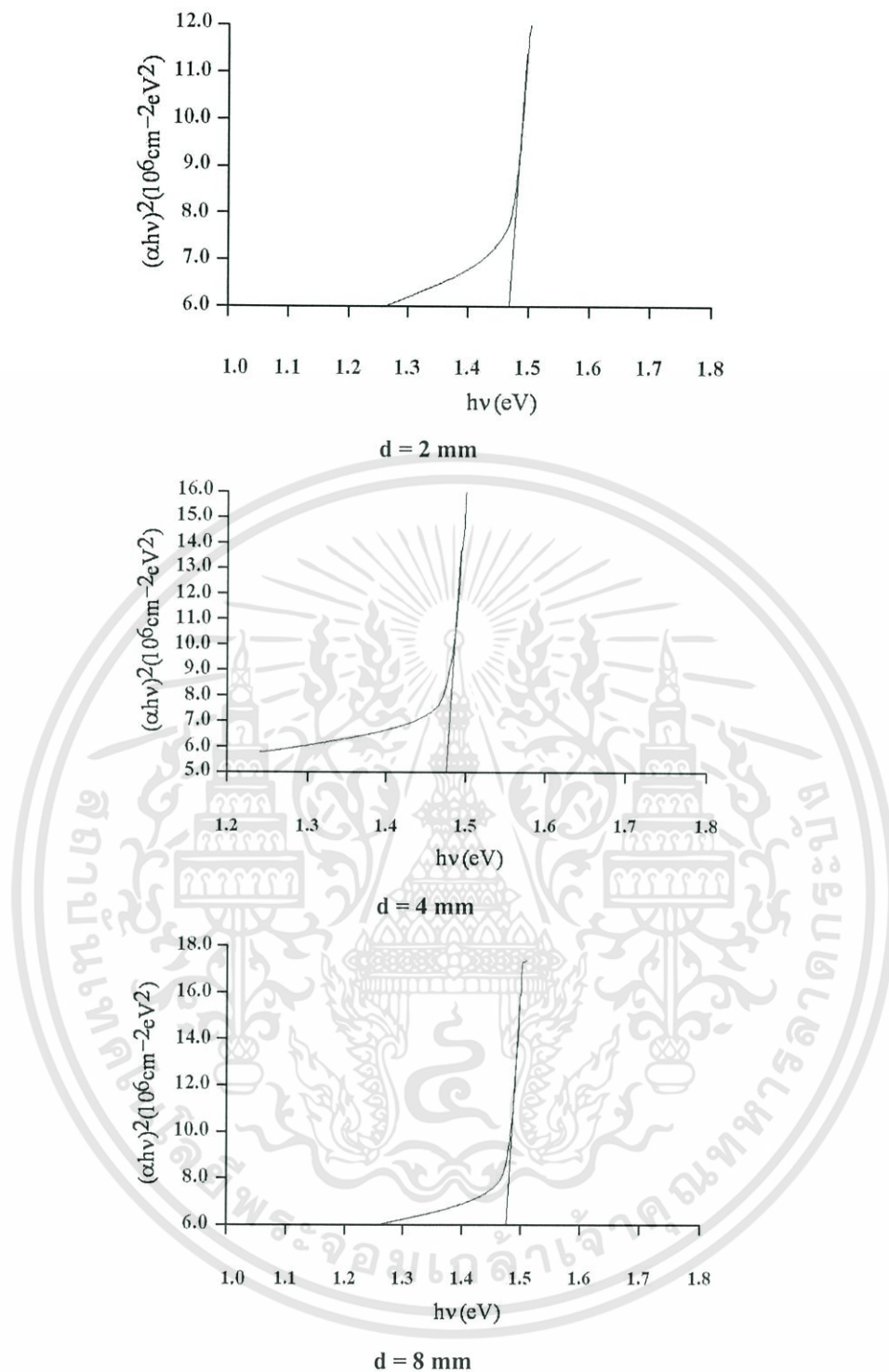
$d = 4 \text{ mm}$



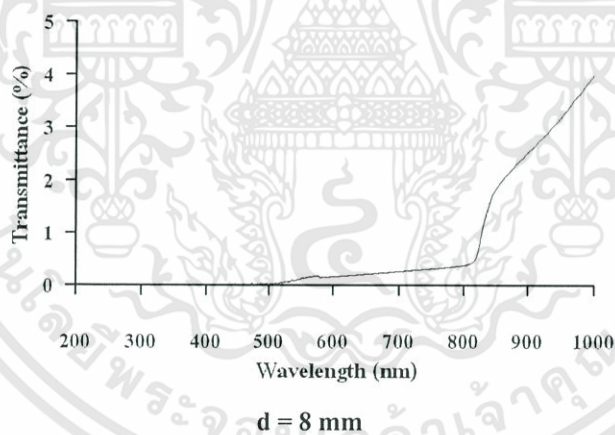
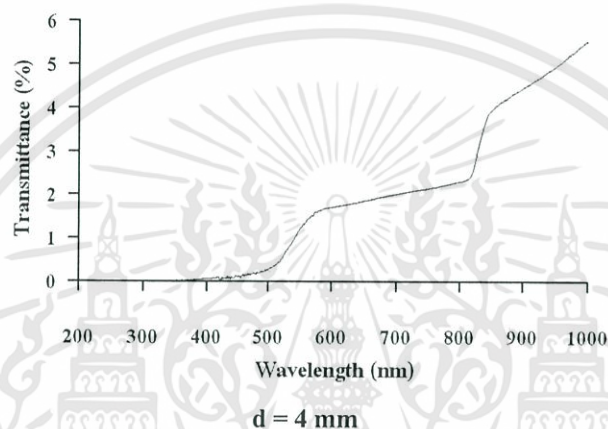
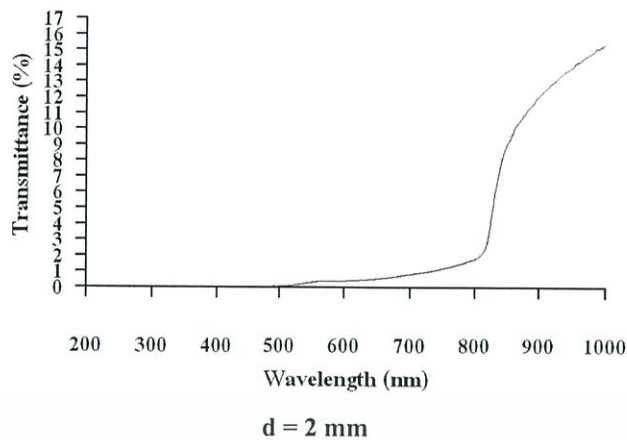
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

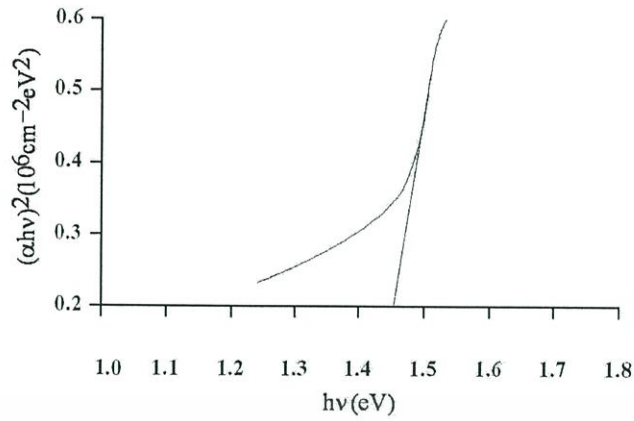


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  फिल्मบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/กระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

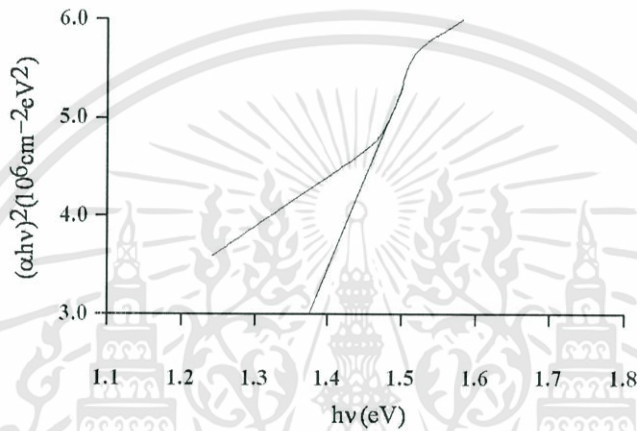


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

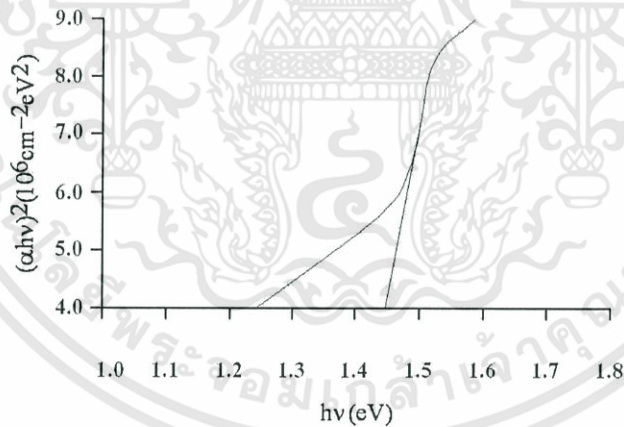
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



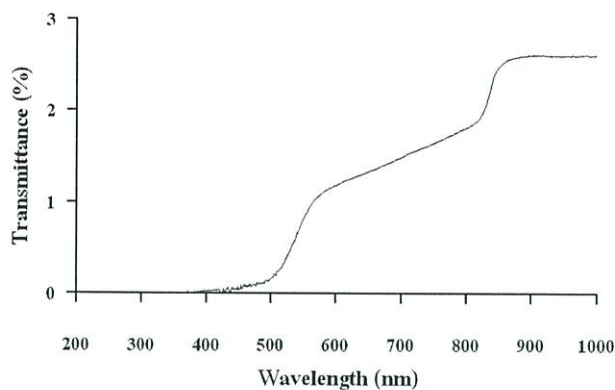
$d = 4 \text{ mm}$



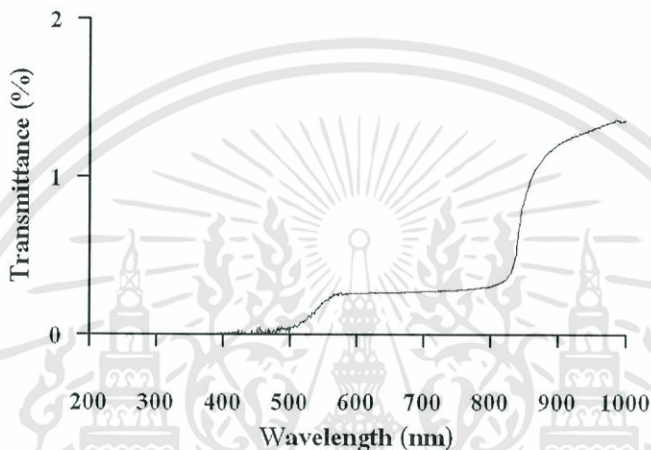
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  फिल्मบาง CdTe และ CdS ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

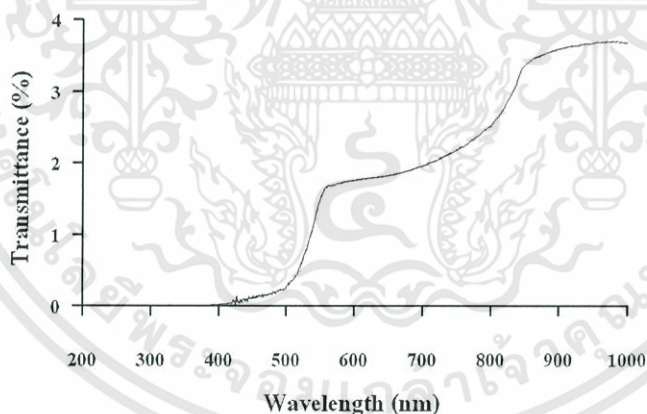
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



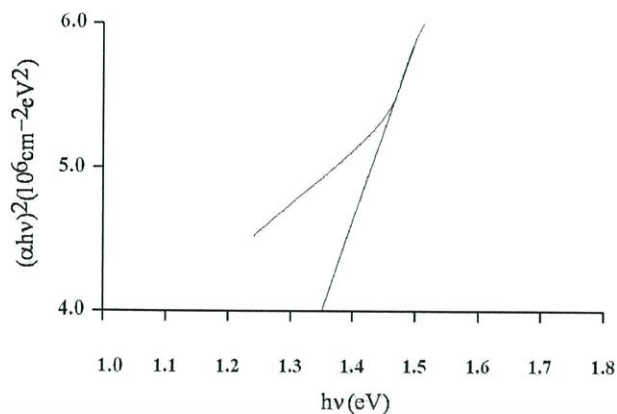
$d = 4 \text{ mm}$



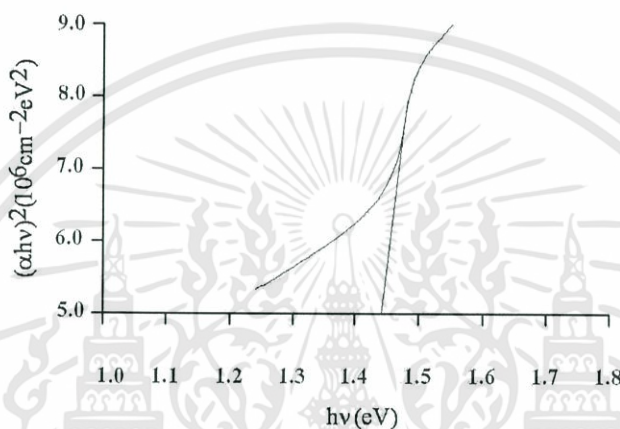
$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก๊สตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

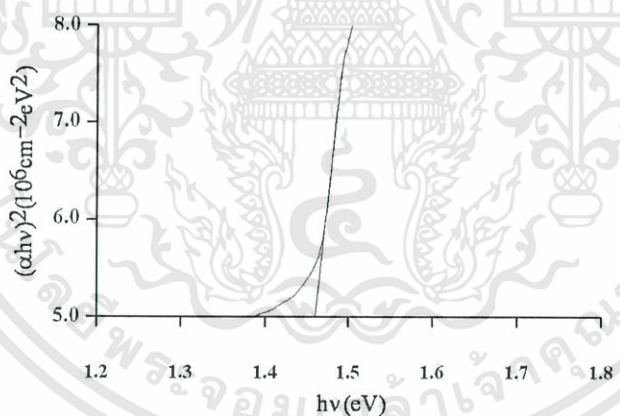
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$d = 2 \text{ mm}$



$d = 4 \text{ mm}$



$d = 8 \text{ mm}$

รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ฟิล์มบาง CdTe และ CdS ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงแผ่นฐานรองรับที่เป็น CdS/ITO/กระจกสไลด์ เท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิด โดยมีแผ่นฐานรองรับต่างชนิดกัน

Thin Films	Energy Gap (eV) With Different Source-Substrate Spacer					
	$T_{\text{source}} = 500^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{sub}} = 400^{\circ}\text{C}$			$T_{\text{source}} = 550^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{sub}} = 450^{\circ}\text{C}$		
	d=2mm	d=4mm	d=8mm	d=2mm	d=4mm	d=8mm
CdTe/ slide glass	4.00*	1.45	1.48	1.48	1.48	1.48
CdS/CdTe/ slide glass	1.42	1.47	1.28	1.48	1.48	1.48
ITO/CdS/CdTe/ slide glass	1.45	1.38	1.45	1.35	1.44	1.46

\* หมายถึง : เป็นค่า  $E_g$  ของกระจกสไลด์

#### 4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe โดยการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าทั้งขณะฉายแสงและไม่ฉายแสง วัดค่าความจุ-แรงดันไฟฟ้า ค่าความจุ-ความถี่ ได้ผลดังรูปที่ 4.34 ถึง 4.45 ผลการวัดและการวิเคราะห์หากลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ได้ผลตามตารางที่ 4.2 ถึง 4.5

จากรูปที่ 4.34 ถึง 4.36 ทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ฉายแสงโดยไบอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 80, 120, 240 และ 300 เคลวิน พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe ที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปริมาณกระแสจะเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน (thermiornic emission) แต่ค่าแฟกเตอร์อุณหคติของไดโอดจะมีค่าลดลงดังตารางที่ 4.2 จากรูปที่ 4.37 จะแสดงกราฟอาร์เรเนียสทำให้ทราบค่า พลังงานกระตุ้น ( $E_0$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.722 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากความสัมพัทธ์  $n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)$  [34] นำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.38 ทำให้ทราบค่า  $\frac{E_{00}}{k}$  มีค่าประมาณ 570 เคลวิน ซึ่งจะได้ว่า  $E_{00}$  ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.049 อิเล็กตรอนโวลต์

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เมื่อพิจารณาช่วงแรงดันไบอัสออกเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณที่ I ( $0 < V < 0.22$ ) ค่าแฟกเตอร์อุณหคติของไดโอด ( $n$ ) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 240 เคลวิน ค่า ( $n$ ) มีค่ามากกว่า 2 แสดงว่าการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวรอยต่อจะเด่นมาก สำหรับบริเวณที่ II ( $0.22 < V < 0.45$ ) เป็นย่านฉีดกระแสสูง (high injection) และค่าเลขชี้กำลัง ( $m$ ) ก็มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.1 ถึง 3.4 ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากปรากฏการณ์กระแสถูกจำกัดการไหลเนื่องจากประจุค้าง (space charge limit current:

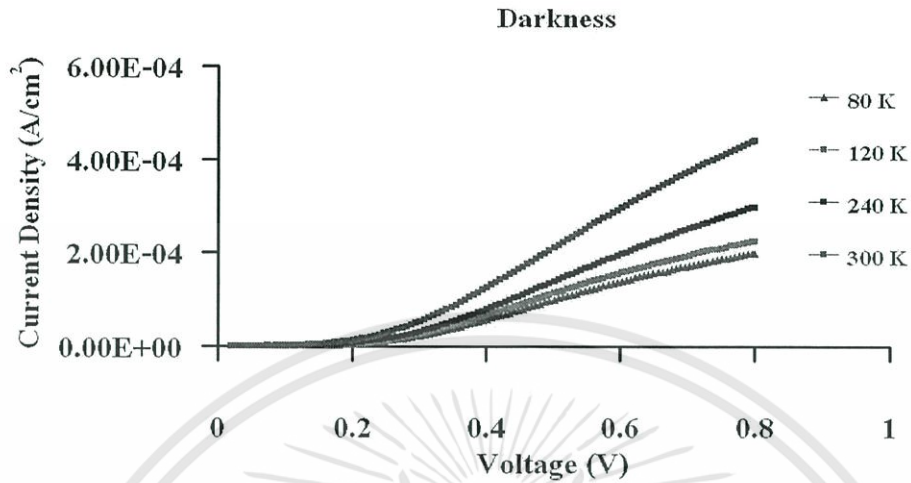
SCLC) ซึ่งประจุก้างในที่นี้เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระถูกจับโดยกับดักประจุที่มีระดับพลังงานแผ่กว้างโดยมีการแจกแจงระดับพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลส่วนบริเวณที่ III ( $0.45 < V < 0.80$ ) ค่าเลขชี้กำลัง ( $m$ ) มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.6 ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์กระแสถูกจำกัดการไหลเนื่องจากประจุก้าง สำหรับประจุก้างในที่นี้เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระถูกจับโดยกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยว

ทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100, 185, 228, 285 และ 314 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด ( $J_{sc}$ ) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.) และค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสงแต่ความต้านทานอนุกรมมีแนวโน้มลดลงดังตารางที่ 4.3 และค่า  $\frac{E_{00}}{k}$  มีค่าประมาณ 8400 เคลวิน ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งจะได้ว่า  $E_{00}$  มีค่าเท่ากับ 0.725 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์สำหรับโฮลที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะ

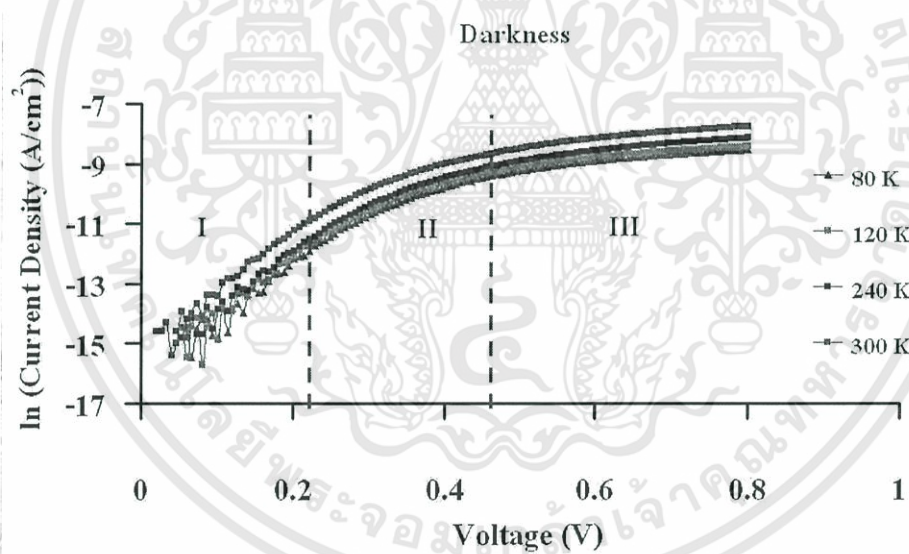
ทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรโดยไบอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 300 เคลวิน จากรูปที่ 4.39 ถึง 4.41 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกระแสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉายแสงแต่ปริมาณกระแสจะมีค่ามากกว่าเพราะอิเล็กตรอนในแถบนำมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการสร้างพาหะด้วยพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) เมื่อพิจารณาแรงดันไบอัสออกเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณที่ I ( $0 < V < 0.10$ ) ค่าแฟกเตอร์แรงดัน (A) ของกระบวนการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณที่ II ( $0.10 < V < 0.30$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งพบว่าทุกช่วงอุณหภูมิค่า ( $n$ ) มีค่ามากกว่า 2 แสดงว่าการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่บริเวณสถานะผิวรอยต่อจะเด่นมาก และเมื่อพิจารณาบริเวณที่ III ( $0.30 < V < 0.80$ ) เป็นย่านการฉีดกระแสสูง ค่าเลขชี้กำลัง ( $m$ ) มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.8 ถึง 2.4 ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์กระแสถูกจำกัดการไหลเนื่องจากประจุก้าง (SCLC) สำหรับประจุก้างในที่นี้ เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระถูกจับโดยกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวอีกระดับหนึ่งที่เพิ่มขึ้นมา

ทำการวัดค่าความจุ-ความถี่ ขณะไม่มีการฉายแสงที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.46 ซึ่งหมายความว่าพาหะอิสระเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน วัดค่าความจุ-แรงดันไฟฟ้าไบอัสแรงดัน -2 ถึง +2 โวลต์ เพื่อหาค่าแรงดันในตัว ( $\phi_j$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.3 โวลต์ ดังรูปที่ 4.47 แล้วทำการวัดค่าความจุ-ความถี่ โดยไบอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ พบว่าค่าความจุจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสตรงซึ่งหมายความว่าพาหะอิสระเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อนและทำการจำลองหาค่า

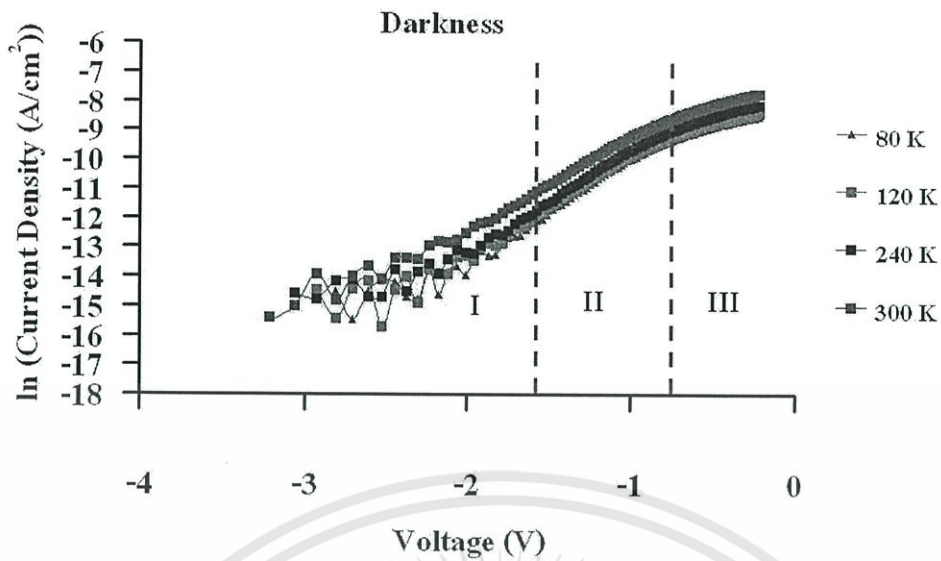
อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยไบอัสตรงแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.48 ในการคำนวณพบว่าค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานชันท์ ( $R_{sh}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อไบอัสแรงดันเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง



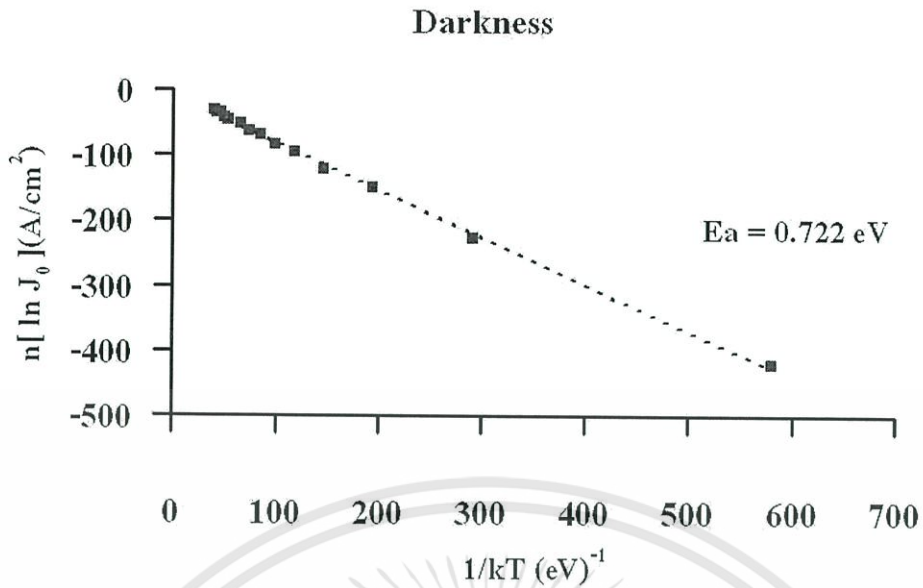
รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe ในสเกลกึ่งลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง



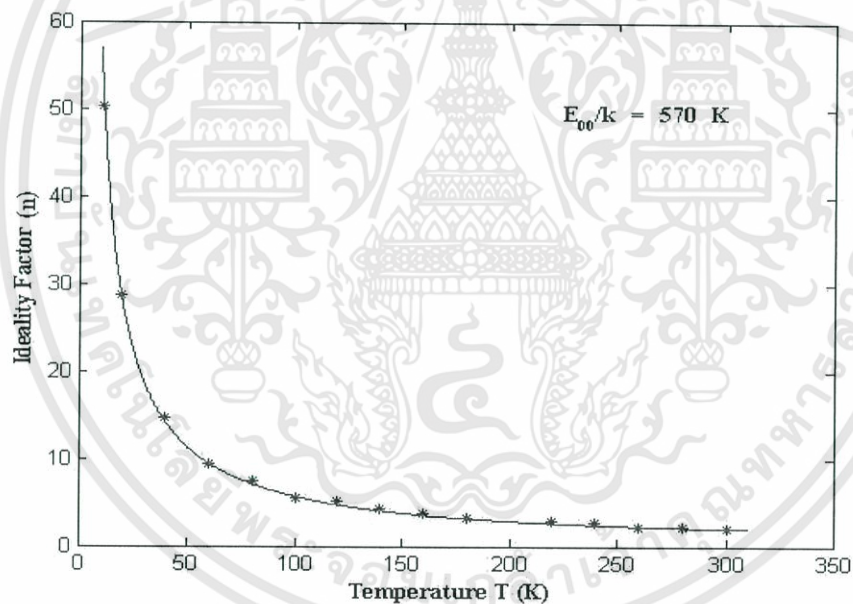
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ CdS/CdTe ในสเกลลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

T (K)	$J_0$ (A/cm <sup>2</sup> )	$q/nkT$ (V <sup>-1</sup> )	n
80	$3.60 \times 10^{-8}$	20.96	5.53
120	$1.02 \times 10^{-7}$	18.67	5.17
240	$1.60 \times 10^{-7}$	18.25	2.65
300	$2.43 \times 10^{-7}$	19.21	2.01

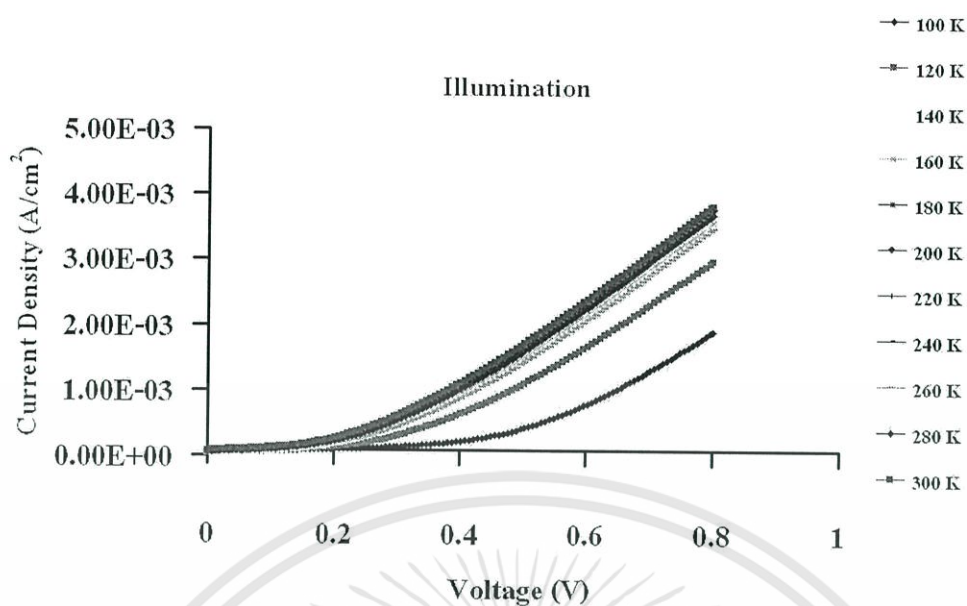


รูปที่ 4.37 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n \ln J_0$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

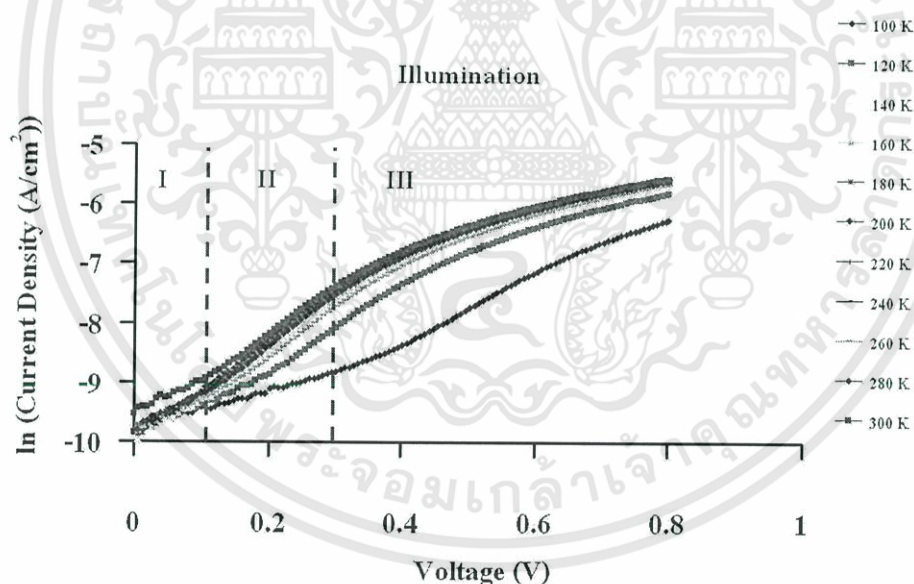


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด-อุณหภูมิของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

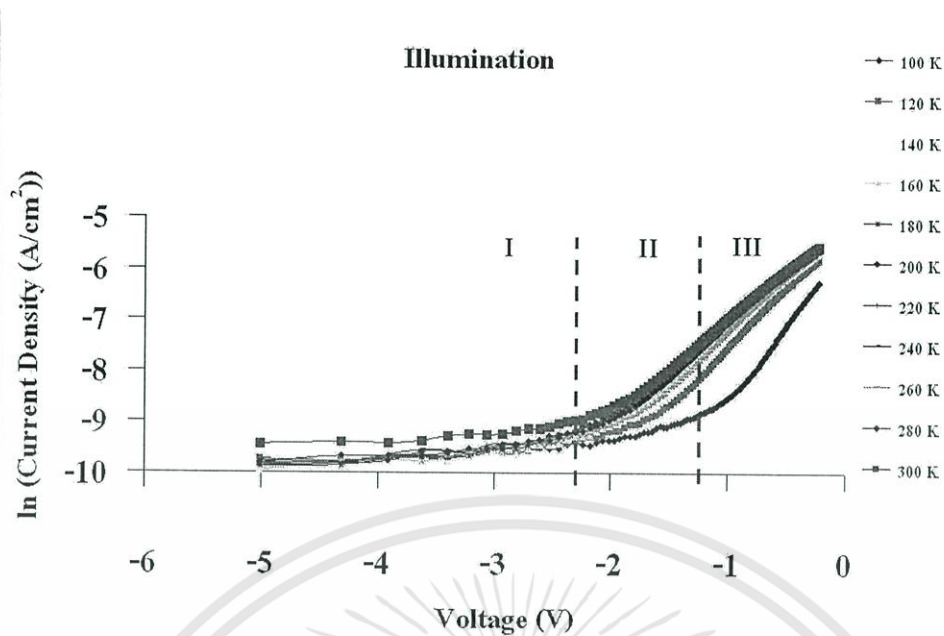
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



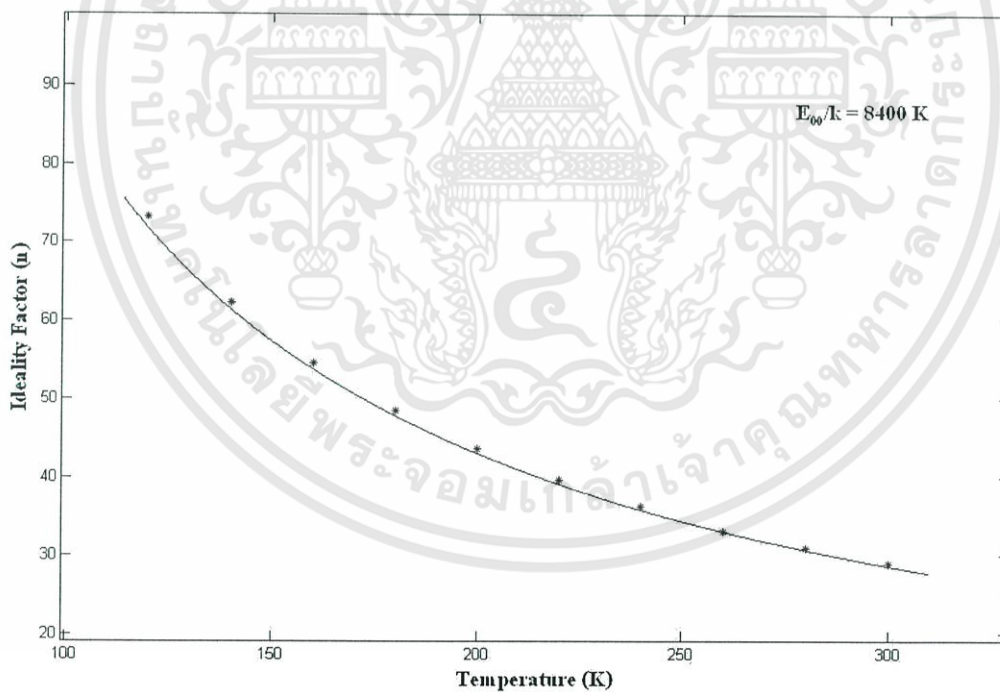
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดในวงจรสมมูลของรอยต่อ  
 วัสดุ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100  
 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดในวงจรสมมูลของรอยต่อ  
 วัสดุ CdS/CdTe ในสเกลกึ่งลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสง  
 ความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

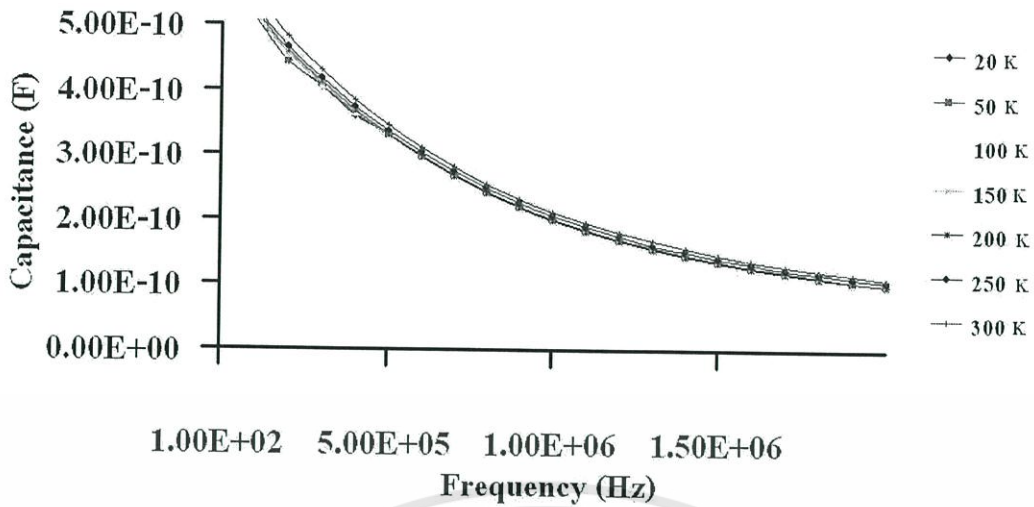


รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในสเกลลอการิทึมเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

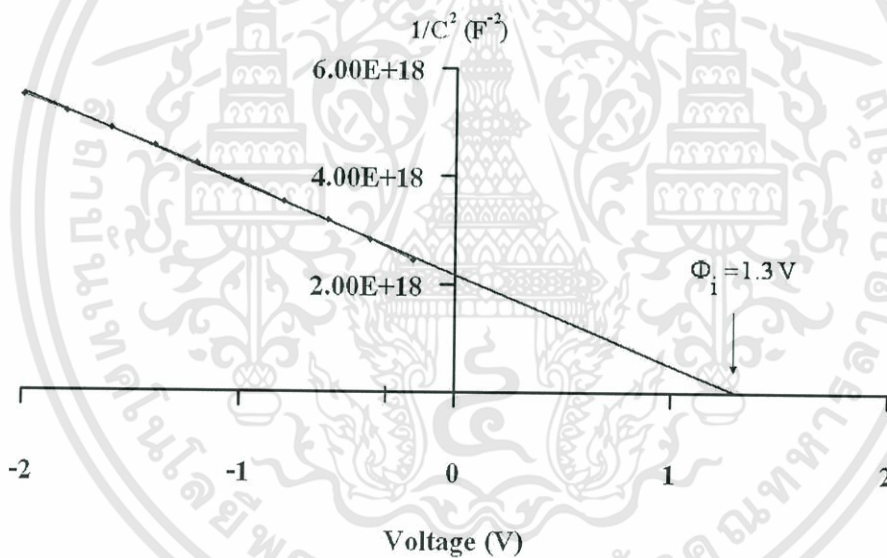


รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด-อุณหภูมิของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

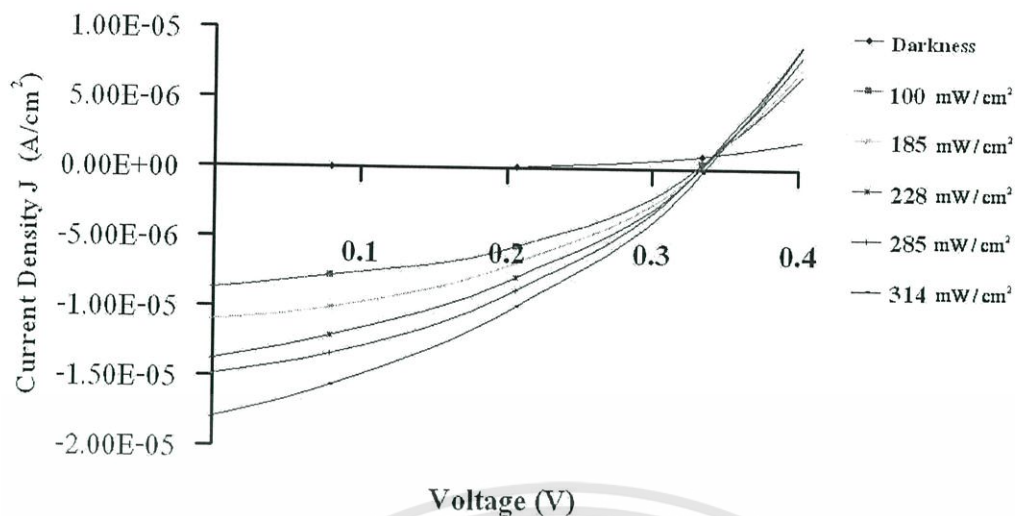
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความถี่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง



รูปที่ 4.44 แสดงค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุ-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มค่าต่างๆ

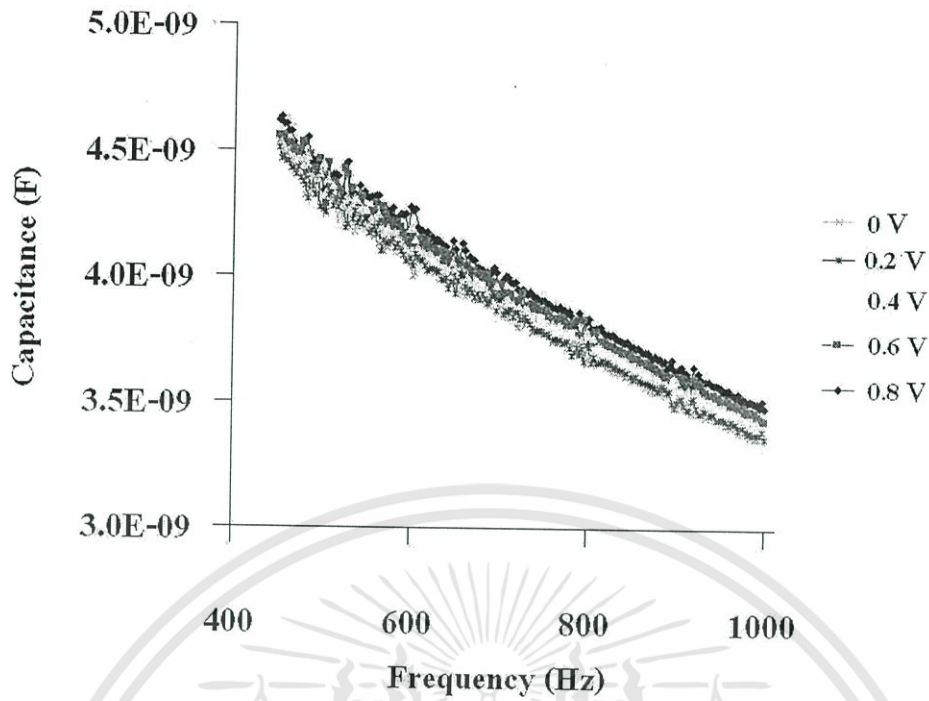
Illumination Intensity ( $\text{mW/cm}^2$ )	$J_{sc}$ ( $\times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	F.F.	$\eta$ (%)	$R_s$ ( $\times 10^4 \Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\times 10^4 \Omega$ )
100	9.50	0.330	0.205	2.57	1.20	8.77
185	11.00	0.334	0.248	2.63	1.00	1.06
228	14.00	0.334	0.258	3.05	0.89	5.30
285	15.00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

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

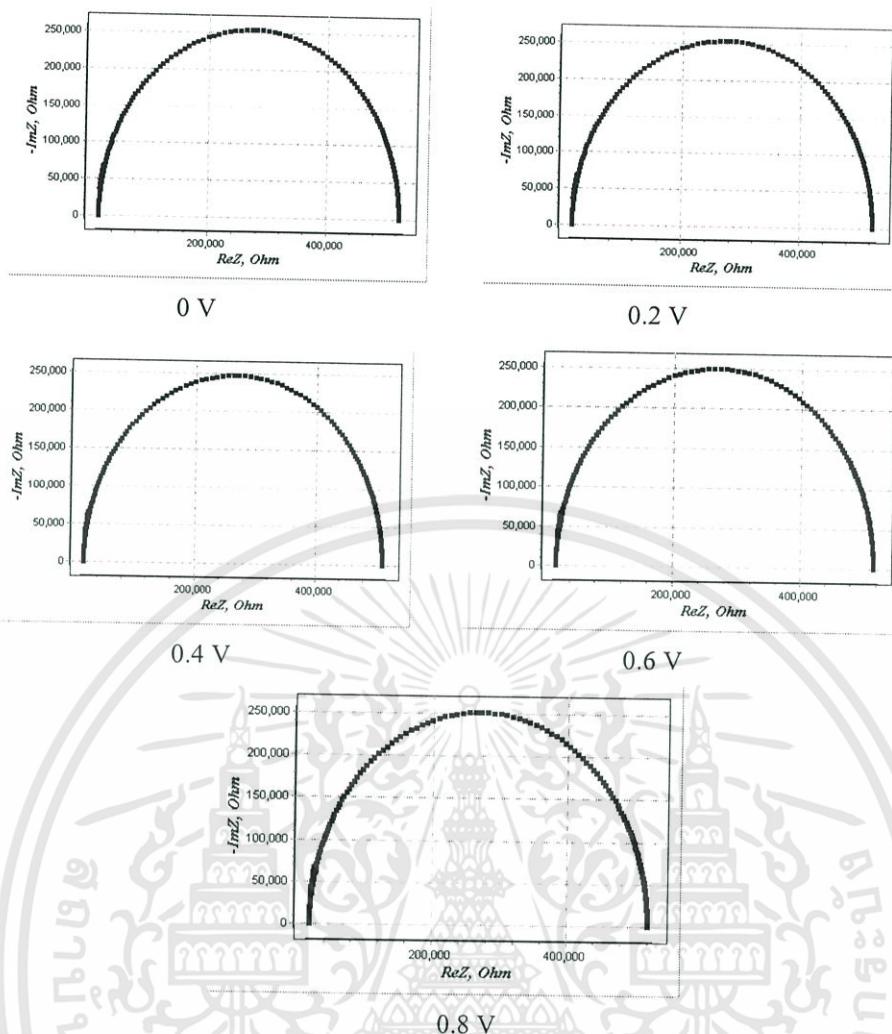
Temperature (K)	Region I ( $0 < V < 0.22$ ) Ideality Factor (n)	Region II ( $0.22 < V < 0.45$ ) Exponent Value (m)	Region III ( $0.45 < V < 0.80$ ) Exponent Value (m)
80	7.50	3.41	1.58
120	4.65	3.37	1.58
240	2.53	3.35	1.56
300	1.82	3.10	1.52

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้การฉายแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

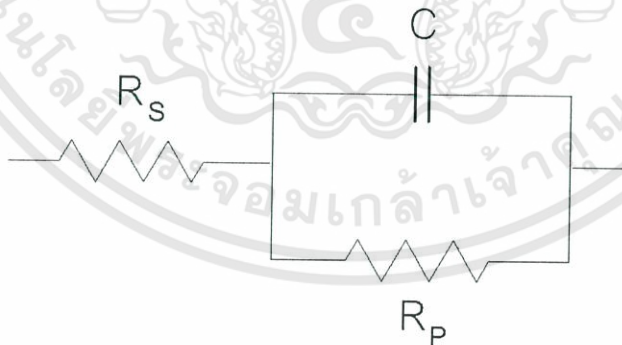
Temperature (K)	Region I ( $0 < V < 0.10$ ) Voltage Factor (A)	Region II ( $0.10 < V < 0.30$ ) Ideality Factor (n)	Region III ( $0.30 < V < 0.80$ ) Exponent Value (m)
100	6.66	9.25	2.36
120	6.65	9.16	2.31
140	6.63	9.15	2.00
160	6.62	9.10	1.97
180	6.59	9.09	1.91
200	6.58	9.06	1.89
220	6.51	8.96	1.88
240	6.26	8.95	1.88
260	6.15	8.81	1.84
280	6.01	8.33	1.84
300	5.25	8.28	1.83



รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.47 แสดงการจำลองค่า อิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

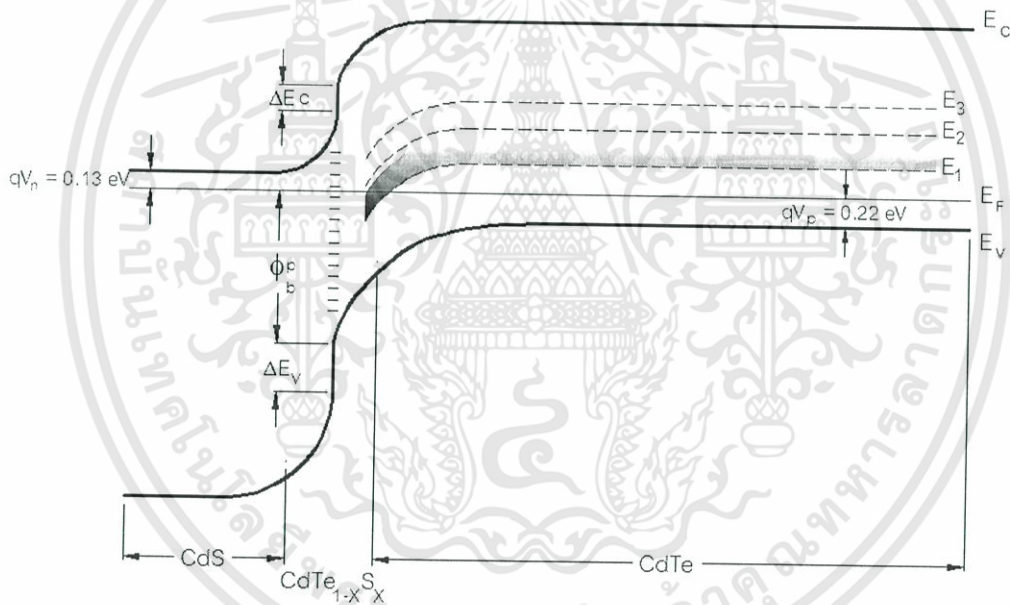


รูปที่ 4.48 แสดงวงจรที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

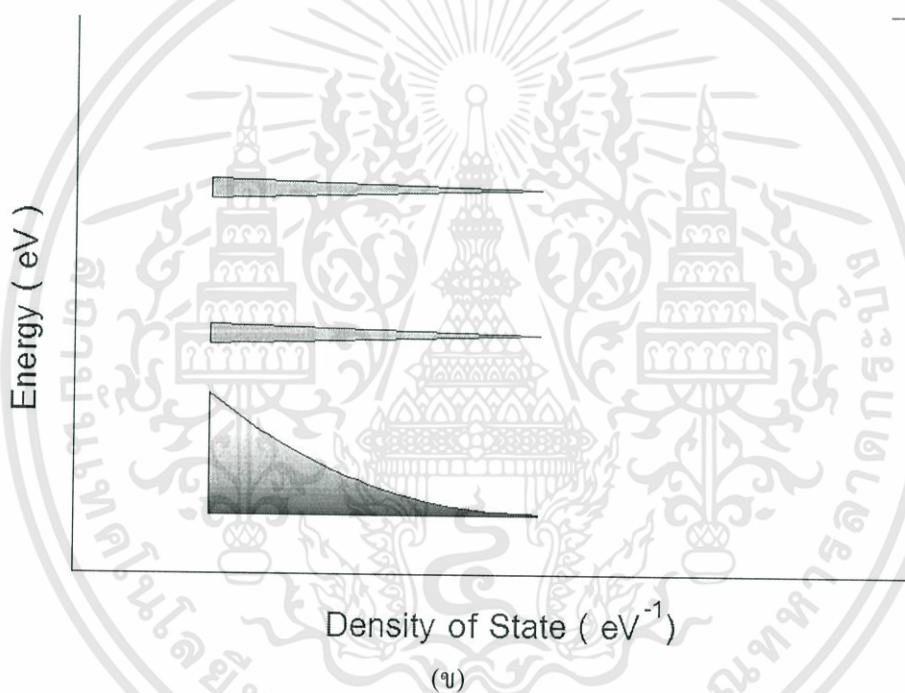
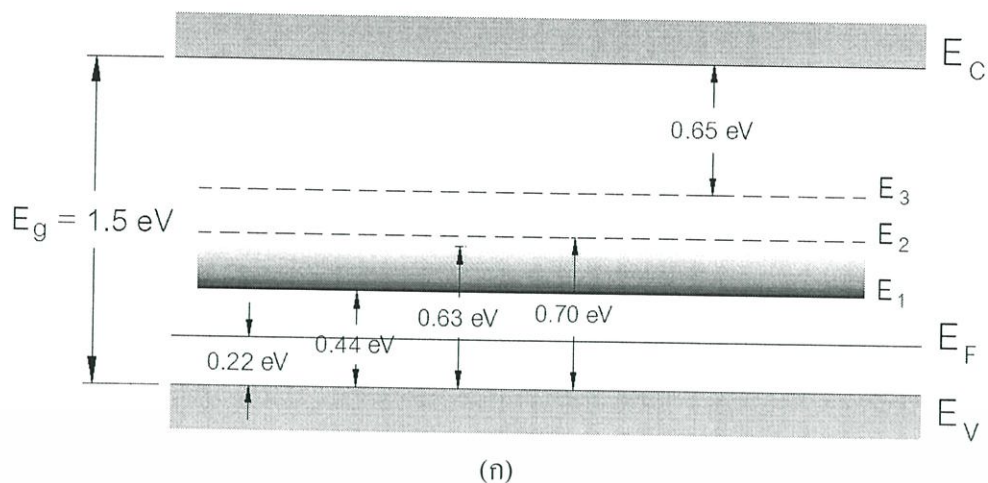
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่างๆ

Bias Voltage (V)	$R_s (10^4 \Omega)$	$R_{sh} (10^5 \Omega)$	$f_{max} (Hz)$
0.0	1.75	4.93	64.50
0.2	1.74	4.90	66.90
0.4	1.71	4.87	66.92
0.6	1.70	4.85	66.94
0.8	1.67	4.82	66.98



รูปที่ 4.49 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อ CdS/CdTe ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นถึงสถานะพลังงานที่ผิวรอยต่อของกัณฑ์ประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและกัณฑ์ประจุนิโคตอมผู้รับและกัณฑ์ประจุนิโคตอมผู้ให้



รูปที่ 4.50 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของฟิล์มบางที่มีกับดักประจุ CdTe อยู่

ก. แสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่มีค่าต่างๆที่ปรากฏอยู่ในเนื้อฟิล์มบาง CdTe

ข. แสดงความหนาแน่นของสถานะพลังงานของกับดักประจุในข้อ (ก)

รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เกิดจากการเคลือบฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดลงบนฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อะตอมของธาตุ S จะแพร่เข้าไปในเนื้อสาร CdTe ส่วนอะตอมของธาตุ Te จะแพร่เข้าไปในเนื้อสาร CdS เกิดเป็นชั้นของอัลลอยด์ของสารประกอบ  $CdTe_{1-x}S_x$  ซึ่งมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น [13,41] ดังนั้นรอยต่อพี-เอ็น ที่แท้จริงคือ  $n-CdTe_{1-x}S_x/p-CdTe$  ซึ่งจะเลื่อนเข้าไปในเนื้อสาร CdTe [13,42] ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนจะไม่มีการไบอัส ระดับพลังงานเฟอร์มิในเนื้อฟิล์มบาง CdS และ CdTe จะมีค่าเท่ากับ 0.13 และ 0.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [13,43] ตรงบริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะเกิดความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงาน ทั้งแถบนำและแถบวาเลนซ์กล่าวคือ  $\Delta E_c$  และ  $\Delta E_v$  จะเป็นความไม่ต่อเนื่องของแถบนำและแถบวาเลนซ์ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.49 จากความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงานนี้จะก่อให้เกิดสถานะผิวรอยต่อ (surface state) ขึ้น ซึ่งสถานะผิวรอยต่อนี้จะประพืดตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล โดย  $\phi_p^0$  คือ กำแพงศักย์ของโฮลที่เกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ จากการทดลองพบว่า  $\phi_p^0$  มีค่าเท่ากับ 0.77 อิเล็กตรอนโวลต์ [44,45]

จากการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ขณะยังไม่มีการฉายแสง ที่แรงดันไบอัสตรงในช่วง 0 ถึง 0.22 โวลต์ อิเล็กตรอนและโฮลจะรวมตัวกันที่บริเวณสถานะผิวรอยต่อ (interface state) โดยกลไกการขุดคูมอโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ช่วยเสริมการรวมตัว (tunneling enhanced recombination) [44,45] แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสตรงให้อยู่ในช่วง 0.22 ถึง 0.45 โวลต์โดยประมาณ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) จะเกิดขึ้น กล่าวคืออิเล็กตรอนที่ไหลข้ามรอยต่อพี-เอ็น จะถูกจับโดยกับดักประจุในเนื้อสาร CdTe ซึ่งกับดักประจุนี้มีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential distribution traps) ดังแสดงในรูปที่ 4.50 ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากข้อบกพร่องผลึกของ CdTe (native defects) เอง อันได้แก่ประเภทแวนแคนซี, อินเตอร์สติเชียล เช่น  $V_{Cd}$ ,  $Te_i$ ,  $Te_{Cd}$  รวมทั้งข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ  $V_{Cd} - Te_i$  หรือ  $V_{Cd} - V_{Te}$  เป็นต้น [13,46-48]

ข้อบกพร่องผลึกชนิดแคดเมียมแวนแคนซีโดดเดี่ยว (isolated  $V_{Cd}$ ) จะมีระดับพลังงานอยู่ที่  $E_v + 0.43$  อิเล็กตรอนโวลต์ [49,50] ซึ่งใกล้เคียงกับระดับพลังงาน  $E_v + 0.50$  อิเล็กตรอนโวลต์ ที่นักวิจัยบางกลุ่มได้รายงานไว้ [13,47] ส่วนระดับพลังงานของข้อบกพร่องผลึกชนิด  $Te_i$  จะอยู่ที่  $E_v + 0.63$  อิเล็กตรอนโวลต์ [13,46,49] แต่เนื่องจากข้อบกพร่องผลึกของ CdTe ทั้งชนิดแวนแคนซีและอินเตอร์สติเชียลเหล่านี้มีอันตรกิริยาต่อกันเกิดเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ  $V_{Cd} - Te_i$  เป็นต้น จึงส่งผลให้ระดับพลังงานของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้กระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลอยู่ในช่วง  $E_v + 0.44$  อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง  $E_v + 0.63$  อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับเบอเกลแมนและคณะ (Burgelman, M. and et al.) [51] ได้รายงานไว้ว่าระดับพลังงานอยู่ในช่วง  $E_v + 0.4$  อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง  $E_v + 1.0$  อิเล็กตรอนโวลต์

สำหรับแรงดันไบอัสตรงในช่วง 0.45 ถึง 0.80 โวลต์ อิเล็กตรอนที่ไหลข้ามรอยต่อพี-เอ็นจะถูกจับโดยกักประจุอิเล็กตรอน  $E_2$  กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ซึ่งเป็นไปตามกฎของไชล์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพี-เอ็นจะถูกจับที่กักประจุซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่  $E_v + 0.70$  อิเล็กตรอนโวลต์ โดยประมาณ เชื่อว่ากักประจุชนิดนี้เกิดจากข้อบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cd}^{2-}$  ซึ่งสอดคล้องกับระดับพลังงาน  $E_v + 0.74$  อิเล็กตรอนโวลต์ [13,46,48,49] และ  $E_v - 0.73 \pm 0.22$  อิเล็กตรอนโวลต์ [13,52] ที่ได้มีการรายงานไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.49 และ 4.50

ส่วนกักประจุ  $E_3$  ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ที่  $E_c - 0.65$  อิเล็กตรอนโวลต์ (หรือ  $E_v + 0.85$  อิเล็กตรอนโวลต์) จะปรากฏให้เห็นเมื่อทำการวัด กระแส-แรงดันไฟฟ้า ขณะไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0.30 ถึง 0.80 โวลต์ แรงดันวงจรเปิด (open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ที่เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนแรงดันไบอัสตรงให้กับรอยต่อพี-เอ็น [52] ระดับพลังงานเฟอร์มิในเนื้อสาร CdTe สามารถที่จะเลื่อนสูงขึ้นได้ตามขนาดของแรงดันไบอัสตรง ( $V_a$ ) โดยจะไปอยู่ที่ระดับพลังงาน ( $qV_n + qV_a + qV_{oc}$ ) จากการทดลองพบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสเป็น 0.30 โวลต์ แล้วระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นถึงระดับพลังงานกักประจุ  $E_3$  แสดงว่าระดับพลังงานเฟอร์มิขณะนั้นอยู่ที่ระดับพลังงาน ( $qV_n + qV_a + qV_{oc}$ ) ซึ่ง  $qV_n$ ,  $qV_a$  และ  $qV_{oc}$  จะมีค่า 0.22, 0.30 และ 0.33 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับนั้นคือประมาณว่าระดับพลังงาน  $E_3$  มีค่าเท่ากับ  $E_c + 0.85$  อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับสารกึ่งตัวนำ CdTe มีช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ประมาณ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นอาจจะเขียนใหม่ได้ว่าระดับพลังงาน  $E_3$  มีค่าเท่ากับ  $E_c - 0.65$  อิเล็กตรอนโวลต์ สอดคล้องกับระดับพลังงานของ  $Cd_i^{2-}$  ซึ่งได้มีผลรายงานไว้ว่าอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_c - 0.64$  อิเล็กตรอนโวลต์ [13,49,50] ดังนั้นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดการไหลโดยประจุค้าง (SCLC) เนื่องจากกักประจุ  $E_3$  จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law)

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ [13,53]

$$J = kV^m \quad (4.1)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือสามารถเขียนอยู่ในสมการลอการิทึมดังนี้

$$\ln J = m \ln V + \ln k \quad (4.2)$$

ซึ่ง  $m$  คือ ความชันของกราฟและ  $m$  มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในกรณีที่  $m > 2$  จะหมายความว่ากักประจุมีระดับพลังงานที่ต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เลมเพิร์ต และมาร์ก (Lempert and Mark) ได้แจกแจงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของสมการที่ (4.1) ไว้อย่างละเอียดดังนี้ คือ [13,53-54]

$$J = \frac{e\mu N_v}{d^{2\ell+1}} \left( \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{eP_0 k T_t} \right)^\ell V^{\ell+1} \quad (4.3)$$

โดยที่  $m = \ell + 1$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก,  $\varepsilon_0$  คือ สภาพยอมของสุญญากาศ,  $e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน,  $\mu$  คือ สภาพคล่องของพาหะ,  $N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์,  $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง ส่วนพารามิเตอร์  $\ell$  จะสัมพันธ์กับ  $T_t$  ดังนี้ คือ

$$\ell = \frac{T_t}{T} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $T_t$  คือ ลักษณะเฉพาะของอุณหภูมิ (characteristic temperature) ของการแจกแจงกับดักประจุแบบเอกซ์โพเนนเชียล และ  $T$  คือ อุณหภูมิของการทดลอง นอกจากนี้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของกับดักประจุยังแสดงได้ถึงความสัมพันธ์

$$N_t = P_0 k T_t \quad (4.5)$$

เมื่อ  $P_0$  คือ ความหนาแน่นของกับดักประจุต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน ที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ ดังนั้นลักษณะการแจกแจงของกับดักประจุแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์นี้คือ

$$P(E) = P_0 \exp(-E/k T_t) \quad (4.6)$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่าพลังงานที่อยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์

สำหรับกรณี  $m = 1.5$  กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของไซค์-แลงมัวร์ ดังนี้ คือ [13,55]

$$J = \frac{4\varepsilon\varepsilon_0}{9d^2} \left( \frac{2e}{m^*} \right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{3}{2}} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่าง,  $m^*$  คือ มวลยังผลของพาหะ ตามกฎของไซค์-แลงมัวร์ มีดังนี้กับดักประจุจะมีระดับพลังงานเป็นแบบระดับพลังงานเดี่ยว (single level)

ส่วนกรณี  $m = 2$  กลไกการนำไฟฟ้าชนิดจำกัดกระแสโดยประจุค้างที่สัมพันธ์กับกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวและความหนาแน่นของกับดักประจุน้อยกว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) ดังนี้ คือ [13,53,55]

$$J = \left(\frac{9}{8}\right) \frac{\epsilon\epsilon_0\mu V^2}{d^3} \quad (4.8)$$

แต่ถ้าความหนาแน่นของกับดักประจุมิค่าไม่ต่ำมากนัก สมการที่ (4.8) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$J = \left(\frac{9}{8}\right) \frac{\epsilon\epsilon_0\Theta\mu V^2}{d^3} \quad (4.9)$$

$$\text{โดย } \Theta = \frac{N_v}{N_t} \exp\left(\frac{-E_t}{kT}\right)$$

เมื่อ  $\Theta$  คือ อัตราส่วนของอิเล็กตรอนอิสระต่ออิเล็กตรอนที่ถูกจับที่กับดักประจุ ถ้า  $\Theta \ll 1$  แสดงว่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกจับโดยกับดักประจุมิค่ามากกว่าปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่ฉีดเข้ามาในเนื้อสาร ภายใต้แรงดันไบอัสตรง แรงดันไฟฟ้าบางส่วนจะตกคร่อมความต้านอนุกรม ( $R_s$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนแรงดันไบอัสตกคร่อมรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe จะลดเหลือ ( $V - IR_s$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดเป็นดังนี้คือ [13,56-57]

$$J = J_0 \exp\left[\frac{q(V - JAR_s)}{nkT}\right] - 1 \quad (4.10)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe และ  $V$  คือแรงดันไบอัส สมการจะกลายเป็น

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) + JAR_s \quad (4.11)$$

แทนค่า  $J_0 = A * T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right)$  ลงในสมการที่ 4.11 จะได้

$$V = JAR_s + n\phi_b + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J}{A * T^2}\right) \quad (4.12)$$

จากการหาอนุพันธ์ของ  $V$  เทียบกับ  $J$  ในสมการ (4.12) จะได้ว่า

$$\frac{dV}{dJ} = AR_s + \frac{1}{J} \left(\frac{nkT}{q}\right) \quad (4.13)$$

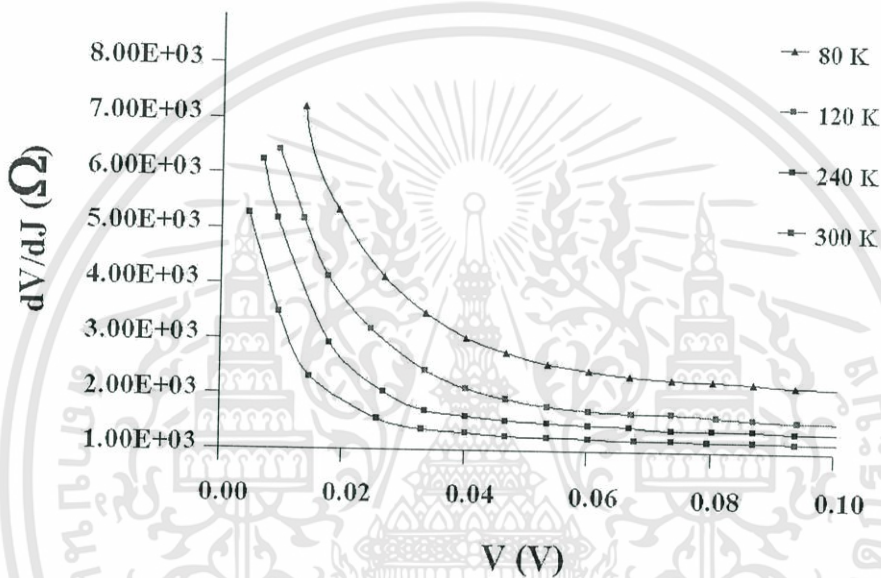
กำหนดให้  $R_J = \frac{dV}{dJ} =$  ความต้านทานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า

ภายใต้แรงดันไบอัสตรง จะมีการฉีดกระแสอิเล็กตรอนและโฮลเข้าสู่เขตปลอดพาหะส่งผลให้ความต้านทานของรอยต่อวิวิธพันธุ์มีค่าลดลงสู่ค่าอิ่มตัว  $R_s$  เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

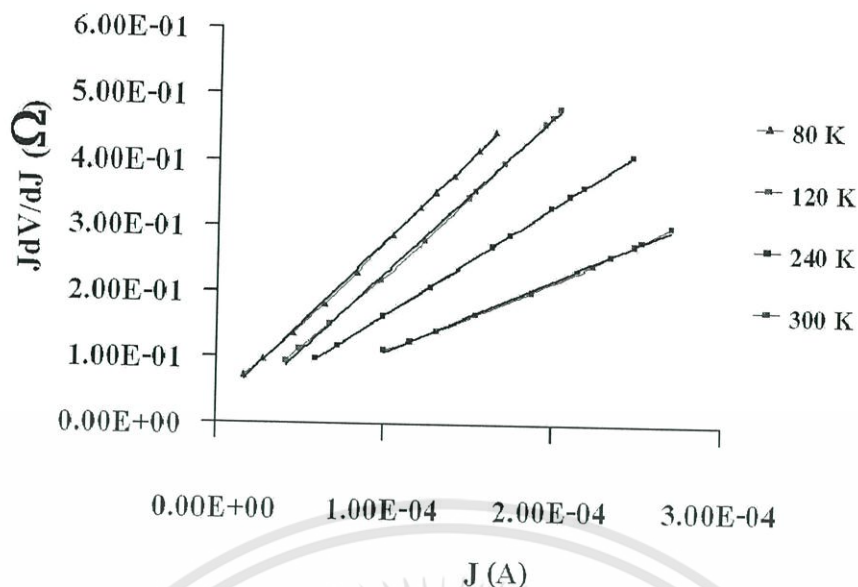
จากสมการ (4.13) เขียนใหม่ได้เป็น

$$J \frac{dV}{dJ} = AR_s J + \frac{nkT}{q} \quad (4.14)$$

ซึ่งค่า  $R_s$  สามารถได้จากความชันของสมการที่ (4.14) เมื่ออุณหภูมิลดลง  $R_s$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง



รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $JdV/dJ$  กับ  $J$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

ตารางที่ 4.7 แสดงความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง

Temperature (K)	Junction Resistance ( $\Omega$ )
80	$3.25 \times 10^3$
120	$2.97 \times 10^3$
240	$2.04 \times 10^3$
300	$1.26 \times 10^3$

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบาง การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไปของผลการศึกษาฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดนี้ใช้สารตั้งต้นแบบผงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะสีเทาดำ เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าอยู่ในช่วง 1.45-1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ นั่นคือฟิล์มบางดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและส่งผ่านแสงมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 800 นาโนเมตร เป็นต้นไป

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม  $2\theta \approx 23^\circ$  ระนาบ (220) ที่มุม  $2\theta \approx 39^\circ$  ระนาบ (311) ที่มุม  $2\theta \approx 46^\circ$  และ ระนาบ (400) ที่มุม  $2\theta \approx 56^\circ$  โดยความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (111) มีค่าสูงสุดเมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 10-207 พบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีโครงสร้างผลึกแบบ ซิงค์เบลนด์ หน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิกค่าคงที่ของโครงผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับสูงขึ้น

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ บนกระจกสไลด์เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 2.18, 2.91 และ 2.33 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 10.88, 9.09 และ 9.46 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe มีค่าอยู่ระหว่าง 1.45- 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์

## ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมทินออกไซด์

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนทินออกไซด์และกระจกสไลด์โดยวิธีออบสารละลายเคมี มีลักษณะสีเหลืองส้มมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.40 อิเล็กตรอน โวลต์ ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ดูคลิ่นแสงในย่านตามองเห็นและส่งผ่านแสงในย่าน 500 นาโนเมตร เป็นต้นไป และอินเดียมทินออกไซด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.20 อิเล็กตรอน โวลต์ส่งผ่านแสงในย่าน 380 นาโนเมตร เป็นต้นไปเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมทินออกไซด์แล้วทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร โดยปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม  $2\theta \approx 23^\circ$  ระนาบ (220) ที่มุม  $2\theta \approx 39^\circ$  ระนาบ (311) ที่มุม  $2\theta \approx 46^\circ$  และระนาบ (400) ที่มุม  $2\theta \approx 56^\circ$  เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 10-207 พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์โดยระนาบการเลี้ยว (111) จะปรากฏเด่นชัดที่สุด

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างผลึกระดับมหภาคคือดูผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์บนกระจกสไลด์เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 1.43, 2.50 และ 1.71 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที และอุณหภูมิแก่สารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเคลือบนาน 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 2, 4 และ 8 มิลลิเมตร เกรนมีขนาดประมาณ 6.55, 10.91 และ 8.82 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe มีค่าอยู่ประมาณ 1.28 ถึง 1.48 อิเล็กตรอน โวลต์

## สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe โดยไม่ฉายแสงที่แปรตามอุณหภูมิทำการวัดโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 0.80 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 80, 120, 240 และ 300 เคลวิน จากรูปที่ 4.34 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกระแส-แรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย อันเป็นผลมาจากกระบวนการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน

นำค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นามาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.35 พบว่าค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่แปรตามอุณหภูมิในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.30 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 80, 120, 240 และ

300 เคลวิน ค่าแฟกเตอร์ดูดมคคิของไดโอด (n) ที่ได้มีค่าเท่ากับ 5.53, 5.17, 2.65 และ 2.01 ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ  $3.60 \times 10^{-8}$ ,  $1.02 \times 10^{-7}$ ,  $1.60 \times 10^{-7}$  และ  $2.43 \times 10^{-7}$  แอมแปร์ ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าแฟกเตอร์ดูดมคคิของไดโอด (n) มีค่าลดลง จากรูปที่ 4.36 คำนวนหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) มีค่าเท่ากับ 0.722 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่านี้คือค่าแฟกซ์ของโพลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ

ทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 ถึง 314 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 2.57 ถึง 4.43 เปอร์เซ็นต์ และพลังงาน  $E_{00}$  มีค่าเท่ากับ 0.725 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับความสูงของค่าแฟกซ์กับความสูงของค่าแฟกซ์สำหรับโพลที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะ และจากการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยไบอัสตรงด้วยแรงดัน 0 ถึง 0.8 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 300 เคลวิน บริเวณที่ I อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า ( $0 < V < 0.10$ ) กลไกการนำกระแสคือ กระบวนการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านค่าแฟกซ์โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วนบริเวณที่ II อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า ( $0.10 < V < 0.30$ ) กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านค่าแฟกซ์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่บริเวณสถานะผิวรอยต่อจะโดดเด่น สำหรับบริเวณที่ III อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า ( $0.30 < V < 0.80$ ) เป็นย่านฉีดกระแสสูง กลไกการนำกระแสจะเป็นชนิดกระแสถูกจำกัดด้วยประจุค้าง

ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อความถี่โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0 ถึง 0.8 โวลต์ จากรูปที่ 4.44 พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นค่าความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อความถี่ ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแรงดันในตัว (built in potential  $\phi_b$ ) ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 1.3 โวลต์ ทำการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยไบอัสตรงด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.8 โวลต์ โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.48 ในการคำนวณพบว่าค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อไบอัสแรงดันเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.6 จากรูปที่ 4.49 ถึง 4.50 สรุประดับพลังงานของกัปดักประจุของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีดังนี้

- $E_1$  เป็นระดับพลังงานของกัปดักประจุที่แผ่กว้าง โดยมีการแจกแจงระดับพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยขอบล่างสุดอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_v + 0.44$  อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในเนื้อสารของ CdTe เกิดจากขอบกพร่องผลึกที่เกิดขึ้นเองเช่น  $V_{Cd}$ ,  $Te_i$  อะตอมของ Te ที่สะสมที่ขอบของเกรน หรือ  $Te_{Cd}$  เชิงซ้อนและการคัปปลิงระหว่าง  $V_{Cd}-Te_i$ ,  $V_{Cd}-V_{Te}$  เป็นต้น

- $E_2$  เป็นกัปดักประจุของอะตอมผู้รับซึ่งเกิดจากขอบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cd}^{2-}$  จะมีระดับพลังงานอยู่ที่  $E_v + 0.70$  อิเล็กตรอน โวลต์

- $E_3$  เป็นกัปดักประจุของอะตอมผู้ให้ซึ่งเกิดจากขอบกพร่องผลึกชนิด  $Cd_i^{2+}$  จะมีระดับพลังงานอยู่ที่  $E_c - 0.65$  อิเล็กตรอน โวลต์

## ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์ในหลายด้านๆคือ ความพยายามและอดทนในการศึกษาค้นคว้ากับผลงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ห้องวิจัย PMRL สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงซึ่งเรามีข้อจำกัดในด้านระบบคือ ความดันต่ำระบบสามารถทำได้ในระดับ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์และอุณหภูมิของระบบสามารถรองรับได้ไม่เกิน 600 องศาเซลเซียสซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบที่ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด ทำการเตรียมที่ความดันที่ต่ำกว่าและอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามหาข้อมูลจนได้สมมติฐานว่าระบบของเราน่าจะสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจึงทดลองเตรียมฟิล์มบางโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสปรากฏว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ ผู้วิจัยจึงสร้างขอบเขตของงานวิจัยคือ ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งระบบก็สามารถศึกษาที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ต่ำสุดเท่ากับ 400 องศาเซลเซียสจึงทำให้ผู้วิจัยศึกษาที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และเคลือบบนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมทินออกไซด์เพื่อสร้างเป็นรอยต่ออวิวิพันท์ CdS/CdTe ต่ำสุดเท่ากับ 400 และ 450 องศาเซลเซียสจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การหาค่าคงที่ของโครงผลึกและขนาดของเกรนจากค่า FWHM ของพีคการเลี้ยวเบนระนาบ (111)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน จากการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความต้านทานกระแส-แรงดันไฟฟ้า ชนิดของรอยต่ออวิวิพันท์ CdS /CdTe โดยเลือกเงื่อนไขอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 450 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสารตั้งต้น 550 องศาเซลเซียสสร้างเป็นรอยต่ออวิวิพันท์ CdS/CdTe ในแต่ละช่วงแรงดันไบอัสซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน การคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง ระดับพลังงานต่างๆที่พบในฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยมีความเหมาะสมมากในกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความโดดเด่นมากโดยเฉพาะฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในด้านขนาดของเกรนที่โตใช้เวลาเพียง 30 นาทีในการเคลือบฟิล์มเพื่อให้ความหนา

ในระดับ 5-10 ไมโครเมตรและปัจจุบันเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /CdTe

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /CdTe ในการเตรียมฟิล์มบางและการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เราพบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการวิจัย ซึ่งได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้ลุล่วงไปด้วยความสำเร็จ ซึ่งปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหามีดังนี้

1. ปัญหาในการติดตั้งระบบผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะผู้ติดตั้งระบบควรศึกษาการติดตั้งอย่างละเอียดทุกครั้งที่ติดตั้งระบบต้องมีสมาธิในการทำงาน และลองติดตั้งก่อนการทำงานจริงจนให้เกิดความชำนาญ เพราะในขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงต้องใช้ความระมัดระวังในการติดตั้งและใช้เวลาให้น้อยที่สุดเพราะผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดนี้ถ้ามีความชำนาญในการติดตั้งและทำงานอย่างต่อเนื่อง จะใช้เวลาน้อยมากและได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี โดยตรวจสอบขั้นต้นคือมองด้วยตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มบางมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเป็นมันวาวจากนั้นดูรายละเอียดสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีจุดสีดำหรือรูพรุนเกิดขึ้น

2. ในขั้นตอนการสูบลอากาศออกจากระบบครั้งแรกที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์จะใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือมากกว่าก็ไม่สามารถทำได้ตามต้องการ ผู้วิจัยมีแนวทางการแก้ไขปัญหาหลังจากสูบลอากาศออกจากระบบประมาณ 15 นาทีจะทำกาให้อุณหภูมิแก่ระบบเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาทีหลังจากนั้นปิดระบบการให้อุณหภูมิ ระบบก็จะทำการสูบลอากาศออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว

3. หลังจากใช้งานระบบระเหิดสารในระยะประชิด ที่ชั่วหลอดทั้งสแตนเลสเกิดออกไซด์ต้องคอยทำความสะอาดก่อนการใช้งานระบบทุกครั้งเพื่อให้ระบบทางไฟฟ้าสมบูรณ์และยังสามารถยืดอายุการทำงานของหลอดทั้งสแตนเลสได้ด้วย

4. ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ควรขังสารให้มีความเที่ยงตรงมากที่สุด รักษาอุณหภูมิของการก่อเกิดปฏิกิริยาให้คงที่และรักษาระดับสารละลายตลอดระยะเวลาเคลือบฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์

5. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอโดยกาวเงินที่ใช้นั้นต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาการแพร่อย่างรวดเร็วของกาวเงินในเนื้อฟิล์มบาง

6. เนื่องจากการแพร่ของอะตอมของกาวเงินส่งผลให้รอยต่อวิวิธพันธุ์เสื่อมสภาพผู้วิจัยจึงใช้กาวคาร์บอนเคลือบก่อนขึ้นกาวเงินเพื่อลดอัตราการแพร่ของอะตอมของกาวเงิน

7. ควบคุมความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยการแอนนีกัล CdTe ในบรรยากาศ CdCl<sub>2</sub> และพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้มีสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Moller H.J. **Semiconductors for Solar Cells**. Boston : Artech House. 1993.
- [2] Acevedo A.M. “Can We Improve the Record Efficiency of CdS/CdTe Solar Cells?”  
**Solar Energy Materials&Solar cells**. vol. 90. 2006. pp. 2213-2220.
- [3] Bosio A.,Rome N.,Mazzamuto S. and Canevari V. “Polycrystalline CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications” **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**. vol. 2006. pp. 247-279.
- [4] Wu X. “High-Efficiency Polycrystalline CdTe Thin-Film Solar Cells” **Solar Energy**. vol. 77. 2004. pp. 803-814.
- [5] Dharmadasa. I.M. “Latest Development in CdTe ,CuInGaSe<sub>2</sub> and GaAs/AlGaAs Thin Film PV Solar Cell” **Current Applied Physics**. 2009 (In Press)
- [6] Rose. D. Powell. R. Jayamaha. U. and Maltby. M. “Advance in Performance and High Throughput Manufacturing of Thin Film CdS/CdTe Modules ” 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2002. pp. 555-558.
- [7] Ullal. H.S. Zweibel. K. and Von Roedern. B.G. “Polycrystalline Thin Film Photovoltaic Technologies : From the Laboratory to Commercialization” 28<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2000. pp. 418-423.
- [8] Sze S.M. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2nd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2002.
- [9] จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [10] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [11] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีโนเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

- [12] งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [13] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ฉัฐพร พรหมรส. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [14] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ฉัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [15] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [16] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [17] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley & Sons. 2005.
- [18] อุดลย์ หาญวังม่วง. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [19] สุกฤษฎี เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [20] จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [21] Ignatowicz S. and Kobendza A. **Semiconducting Thin Films of  $A^{II}B^{VI}$  Compounds**. Warsaw : PWN-POLISH SCIENTIFIC. 1990.

- [22] Abrikosov N.Kh., Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. **Semiconducting II-VI,IV-VI, and V-VI Compounds.** New York : PLENUM PRESS. 1969.
- [23] Ray B. **II-VI Compounds.** Oxford : PERGAMON PRESS. 1969.
- [24] Adachi S. **Properties of Group-IV,III-V and II-VI Semiconductors.** West Sussex : John Wiley&Sons. 2005.
- [25] Anthony T., Fahrenbruch A. and Bube R. "Growth of CdTe Films by Close-Spaced Vapor Transport" **J. Vac. Sci. Technol.** 1984. pp. 1296-1302.
- [26] Perrier G., Philippe R. and Dodelet J.P. "Growth of Semiconductors by the Close-Spaced Vapor Transport Technique : A review" **J. Mater. Res.** 1988. pp. 1031-1042.
- [27] Ohring M. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure.** 2nd ed. San Diego : ACADEMIC PRESS. 2002.
- [28] Fahrenbruch A.L. and Bube R.H. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion.** New York : ACADEMIC PRESS. 1983.
- [29] Ferekides C.S.,Marinskiy D.,Viswanathan V.,Tetali B.,Palekis V.,Selvaraj P. and Morel D.L. "High Efficiency CSS CdTe Solar Cells" **Thin Solid Films.** 2000. pp. 520-526.
- [30] Seth A.,Lush G.B.,McClure J.C.,Singh V.P. and Flood D. "Growth and Characterization of CdTe by Close Spaced Sublimation on Metal Substrates" **Solar Energy Materials&Solar cells.** vol. 59. 1999. pp. 35-49.
- [31] สุกกณิศ ตุงคสมิต. "ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ CuInSe<sub>2</sub>/CdS ชนิดฟิล์มบาง" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [32] Miles, A.G., and Feuch,D.L. **Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junction.** Academic Press. Inc. New York. 1972.
- [33] Sharma BL. and Purohit R.K. **Semiconductor Heterojunctions.** Pergamon Press Ltd. New York. pp.1-37. 1974.
- [34] Bayhan Habibe A. Sertap Kavasoglu A.S. "Tunneling Enhanced Recombination in Polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Heterojunction Solar Cell " **Solid-State Electronics.** vol. 49. 2005. pp. 991-996.

- [35] Nadenan V., Rau. U., Jasenek A. and Schock H.W. “Electric Properties of CuGaSe<sub>2</sub> – Based Heterojunction Solar Cells : Part I Transport Analysis” **J. Appl Phys.** vol.87. 2000. pp. 584-593.
- [36] Barsoukov E. and Macdonald J.R. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application.** 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2005.
- [37] Friesen G., Ozsar M.E. and Dunlop E.D. “Impedance Model for CdTe Solar Cells Exhibiting Constant Phase Element Behavior” **Thin Solid Films.** vol. 361-362. 2000. pp. 303-308.
- [38] Jasennek A., Rau U., Nadenau V. and Schock H.W. “Electronic Properties of CuGaSe<sub>2</sub>-Based Heterojunction Solar Cells Part II Detect Spectroscopy” **J. Appl. Phys.** vol. 87. 2000. pp. 594-602.
- [39] Herberholz R., Igalson M., and Schock H.W. “Distinction Between Bulk and Interface State in CuInSe<sub>2</sub>/CdS/ZnO by Space Charge Spectroscopy” **J. Appl. Phys.** vol. 83. 1998. pp. 318-325.
- [40] Walter T., Herberlz, R., Muller C. and Schock H.W. “Determination of Defect Distributions from Admittance Measurements and Application to Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Based Heterojunctions” **J. Appl. Phys.** vol.80. 1996. pp. 4411-4420.
- [41] Agostinelli G., Batzner D.L. and Burgelman M. “A Theoretical Model for the Front Region of Cadmium Telluride Solar Cells” **Thin Solid Films.** vol. 431-432. 2003. pp. 407-413.
- [42] Bosio A., Romeo N., Podesta A., Mazzamuto S. and Canevari V. “Why CuInGaSe<sub>2</sub> and CdTe Polycrystalline Thin Film Solar Cells are More Efficient than the Corresponding Single Crystal?” **Cryst. Res. Technology.** vol. 40. No. 10-11. pp. 1048-1053.
- [43] Rakhshani A.E. “Heterojunction Properties of Electrodeposited CdTe/CdS Solar Cells” **J. Appl. Phys.** vol. 90. No.8. 2001. pp. 4265-4271.
- [44] Bayhan H. and Kavasoglu “Tunneling Enhanced Recombination in Polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ge)Se<sub>2</sub> Heterojunction Solar Cells” **Solid-State Electronics.** vol. 49. 2005. pp. 991-996.
- [45] Bayhan H. and Kavasoglu “Tunneling Enhanced Recombination in Polycrystalline CdS/CdTe Solar Cells” **Turk. J. Phys.** vol. 30. 2006. pp. 109-114.

- [46] Mathew X., Mathews N.R., Sebastian P.J and Flores E.O. “Deep Levels in the Band Gap of CdTe Films Electrodeposited From an Acidic Bath-PICTS Analysis” **Sol. Energy Mater. Sol. Cells.** vol. 81. 2004. pp. 397-405.
- [47] Babentsov V.N. “Detects with Deep Donor and Acceptor Levels in Nanocrystals of CdTe and CdSe” **Semicond. Phy. Quantum Electron. Optoelectron.** vol. 9. 2006. pp. 94-98.
- [48] Kim M.D., Kong T.W. and Kim T.W. “Hydrogenation Behavior of Deep Levels in Nominally Undoped p-CdTe Epilayers Grown by Molecular Beam Epitaxy” **Solid State Commun.** vol. 99. no.2. 1996. pp. 117-121.
- [49] Mathew X. “Photo-Induced Current Transient Spectroscopic Study of the Trap in CdTe ” **Sol. Energy Mater. Sol.** vol. 76. 2003. pp. 225-242.
- [50] Castaldini A., Cavalliri A., Fraboni B., Fernandez P. and Piqueras J. “Deep Energy Levels in CdTe and CdZnTe” **J. Appl. Phys.** vol. 83. no.4. 1998. pp. 2121- 2126.
- [51] Burgelman M., Nollet P. and Degrave S. “Electronic Behavior of Thin-Film CdTe Solar Cells” **Appl. Phys. A.** vol. 59. 1999. pp. 149-153.
- [52] Dharmadasa I.M., Bunning J.D., Samantilleke A.P. and Sheh T. “Effects of Multi-Defects at Metal/Semiconductor Interfaces on Electrical Properties and Their Influence on Stability and Lifetime of Thin Film Solar Cells” **Sol. Energy Mater. Sol. Cells.** vol. 86. 2005. pp. 373-384.
- [53] Lampert M.A. and Mark P. **Current Injection in Solids.** Academic Press. New York. 1970.
- [54] Yakuphanoglu F., Tugluoglu N. and Karadeniz S. “Space Charge-Limited Conduction in Ag/p-Si Schottky Diode” **Physica B.** vol. 392. 2002. pp. 188-191.
- [55] Tan J. H. and Anderson W.A. “Current Transport in Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells Comparing Mesa Diodes to the Full Cell” **Sol. Energy Mater. Sol. Cells.** vol. 77. 2003. pp. 283-292.
- [56] Schroder D.K. “Semiconductor Material and Device Characterization” John Wiley & Sons. Inc York. 1990.
- [57] Ghosh B. “Electrical Contacts for II-VI Semiconducting Device” **Microelectric Engineering,** 2009. (In Press).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 10-207		Raduatuib = 1.540598					Quality : Deleted				
Cd Te		<i>2th</i>	<i>I</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>					
Cadmium Tellurium		23.772	100	1	1	1					
		39.312	80	2	2	0					
		46.535	70	3	1	1					
		56.783	20	4	0	0					
		62.493	40	3	3	1					
		71.154	50	4	2	2					
		76.228	40	5	1	1					
		84.559	40	4	4	0					
<i>Lattice</i> : Face-centered cubic		89.620	70								
<i>S.G.</i> : F-43m (216)		97.443	70	6	2	0					
<i>a</i> = 6.49000		102.458	50								
<i>Z</i> = 4											
<i>Mol. Weight</i> = 240.01											
<i>Volume [CD]</i> = 273.36											
<i>Dx</i> = 5.832											
DELETED AND REJECTED BY : Delete : Post parcel January 7,1964 (for Set 15).											
*Private Communication, Primary reference : Vaughan, D., Battelle Memorial Inst., Coulmbus, OH, USA. *Z.Phys. Chem., volume 124, page 277, (1926) unit cell aste : Zachariasen.											
<i>Radiation</i> : FeK $\alpha$ 1		<i>Filter</i> : Beta									
<i>Lambda</i> : 1.93600		<i>d-sp</i> : Not given									
<i>SS/FOM</i> : F9= 3(0.1880,14)											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

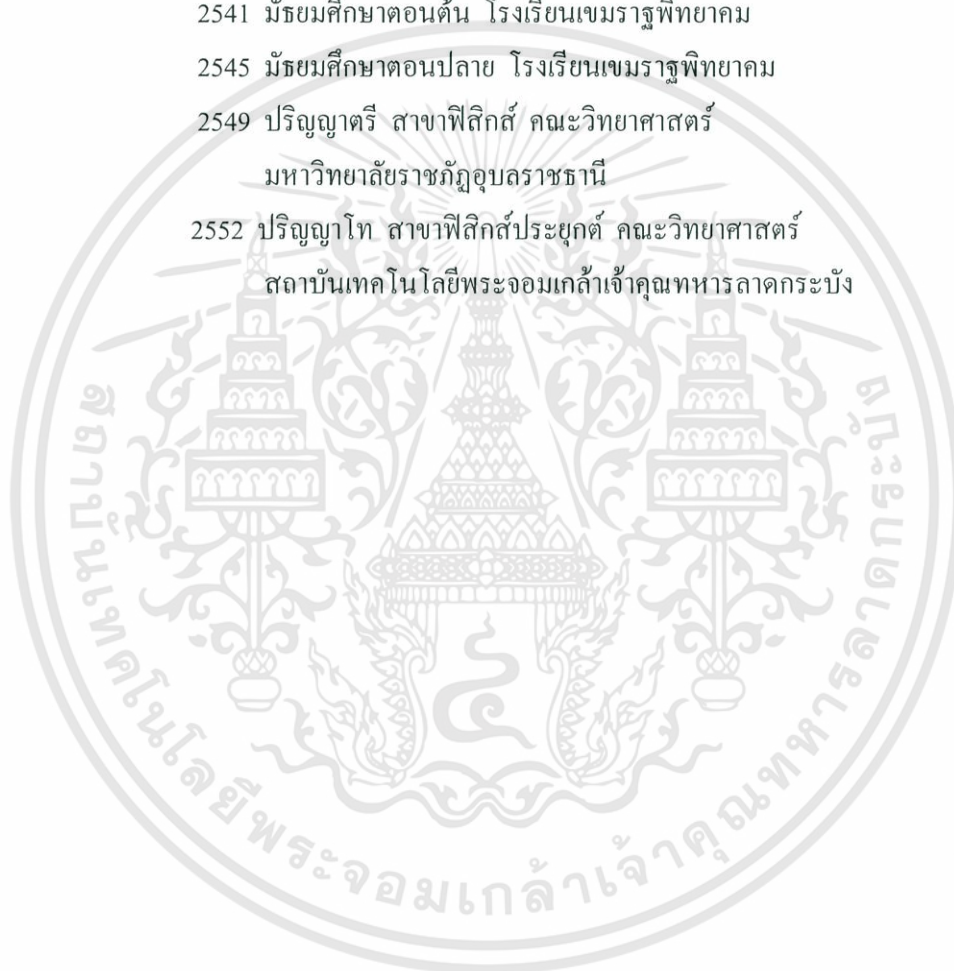
# ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 75-1546		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
CdS		2 $\theta$	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		26.505	100	1	1	1
		30.699	22	2	0	0
		43.969	47	2	2	0
		52.076	33	3	1	1
		54.579	5	2	2	2
		63.932	6	4	0	0
		70.468	11	3	3	1
		72.585	5	4	2	0
		80.842	10	4	2	2
		86.902	7	5	1	1
Lattice : Face-centered cubic	Mol. weight = 144.47					
S.G. : F-43m (216)	Volume (CD) = 197.14					
a = 5.82000	Dx = 4.868					
Z = 4	V <sub>cor</sub> = 14.05					
ICSD COLLECTION CODE : 031075 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Z. Kristalloz., Kristallozom., Kristallozys., Kristallochem., volume 62, page 260, (1925) :						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเอกชัย วิลามาศ
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤษภาคม 2525
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลประจำจังหวัดสุรินทร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	30 / 82 หมู่ 5 ตำบลท่าวาสกรี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000
การศึกษา	2532 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านปากแซง 2541 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเขมรราชูพิทยาคม 2545 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเขมรราชูพิทยาคม 2549 ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี 2552 ปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้