

กระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการอบเคลือบสารเคมี



นางสาวไปรมา ดิษฐสมบุรณ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-538-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธี
การอาบเคลือบสารเคมี

โดย

นางสาวไปรมา ดิษฐสมบุญ

ภาควิชา

ฟิสิกส์


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยุธยา

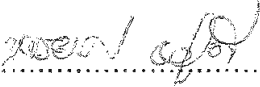
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ไพธิพิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยุธยา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล)

ไปรมา ดิษฐสมบุญ : กระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี. (ELECTRICAL CONDUCTION PROCESS THROUGH CHEMICAL-BATH-DEPOSITION THIN FILMS OF CADMIUM SULFIDE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ขจรยศ อยุดี , 155 หน้า. ISBN 974-346-538-3.

ได้เตรียมและศึกษากระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางCdS ที่เตรียมโดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมีฟิล์มบางCdSที่เตรียมขึ้นอยู่ในรูปของโครงสร้าง Au/CdS/Au Au/CdS/ZnO(AI) Mo/CdS/Au Mo/CdS/ZnO(AI) Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(AI) ผลจากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของโครงสร้างทั้ง 6 แบบดังกล่าวนี้ พบว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางCdS และรอยต่อที่เกี่ยวข้องของโครงสร้าง Au/CdS/Au Au/CdS/ZnO(AI) และ Mo/CdS/Au มีรูปแบบการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก สำหรับโครงสร้าง Mo/CdS/ZnO(AI) ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีทั้งที่เป็นแบบโอห์มมิกและไม่เป็นโอห์มมิก (Non-Ohmic) สำหรับโครงสร้างCu(In,Ga)Se₂/CdS/Auและ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(AI) ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบ Rectifying อย่างชัดเจน กล่าวคือโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ทั้งสองแบบมีลักษณะเป็นไดโอด จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางCdS ในแนวตั้งฉากกับฟิล์มเป็นการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อ Au/CdS ก็เป็นแบบโอห์มมิกอย่างเด่นชัด เช่นเดียวกัน ในขณะที่การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อ Mo/CdS และ CdS/ZnO(AI) เป็นแบบ Non-Ohmic และรอยต่อ Cu(In,Ga)Se₂/CdS เป็นแบบ Rectifying ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของทั้งสามโครงสร้างร่วมกัน สามารถนำมาเขียนลักษณะแถบพลังงานที่น่าจะเป็นไปได้สำหรับโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟิล์มบางของ CdS และรอยต่อที่เกี่ยวข้อง กล่าวโดยสรุปค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางCdS ที่วัดในแนวตั้งฉากมีค่าอยู่ในช่วง 10²-10³ (Ω-cm) และมีรูปแบบการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก ในขณะที่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดในแนวระนาบจะมีค่าประมาณ 10⁶ (Ω-cm) สมบัติของฟิล์มบางCdS ที่ได้จะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางอย่างมาก

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิตไปรมา ดิษฐสมบุญ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาสมพงษ์ ฉัตรภรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วมขจรยศ อยุดี

407 23208 23 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: CONDUCTION / CHEMICAL-BATH-DEPOSITION / CdS / THIN FILMS / HETEROJUNCTION

PRAIMA DISTHASOMBOON : ELECTRICAL CONDUCTION PROCESS THROUGH CHEMICAL-BATH-DEPOSITION THIN FILMS OF CADMIUM SULFIDE . THESIS ADVISOR : ASSIST PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN, THESIS COADVISOR : ASSIST PROF. KAJORN YOD YOODER, Ph.D., 155 pp. ISBN 974-346-538-3.

The electrical conduction process through CdS thin films prepared by the chemical bath deposition technique was studied in six different device structures, i.e., Au/CdS/Au, Au/CdS/ZnO(Al), Mo/CdS/Au, Mo/CdS/ZnO(Al), Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au and Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(Al). The results of I-V characteristic measurements of these structures at room temperature indicated that the electrical conduction process through CdS thin films and related junctions of the structures Au/CdS/Au, Au/CdS/ZnO(Al) and Mo/CdS/Au are ohmic and those of Mo/CdS/ZnO(Al) are both ohmic and non-ohmic. The I-V characteristics of Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au and Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(Al) are obviously rectifying type or diode characteristics. From the I-V analysis of these structures it was also concluded that the electrical conduction process through CdS thin films measured across the plane is ohmic, as is that of the Au/CdS junction, whereas those of Mo/CdS and CdS/ZnO(Al) are of non-ohmic type and those of Cu(In,Ga)Se₂/CdS are of rectifying type. The resulting analysis can be used to draw the energy band diagram for structures consisting of CdS and related junctions. The CdS thin film resistance measured across the films is in the range of 10^2 - 10^3 ohm-cm whereas that measured in the plane of the films is approximately 10^6 ohm-cm. The properties of CdS thin films depend greatly on parameters used in the deposition process.

Department Physics
Field of study Physics
Academic year 2000

Student's signature ... *Paima Disthasomboon* ...
Advisor's signature ... *Somphong Chatraphorn* ...
Co-advisor's signature ... *Kajorn Yod Yooder* ...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของผู้ช่วยศาสตราจารย์
สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยุดี ที่ได้ให้คำแนะนำ และควบคุมการ
วิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ และ อาจารย์ชาญวิทย์ จิตทรยุทธการที่ได้
ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือต่างๆ ในการทำ
วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ถาวร พงศ์วงษ์ชา นิสิตปริญญาโทมหาบัณฑิตที่ให้ความ
ช่วยเหลือด้านการเตรียมฟิล์มบาง Mo และ ZnO(Al) และ คุณวรรณ แดงงาม เจ้าหน้าที่ห้อง
ปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ในการช่วยเหลือด้านการเตรียมเครื่องมือ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจตลอดมาจน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1.บทนำ	1
2.สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	3
กระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์.....	3
1.การนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก.....	4
2.การนำไฟฟ้าแบบ Space-charge-limited current.....	4
3.รอยต่อพี-เอ็น และ รอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำ	17
รอยต่อพีเอ็น.....	17
1.รอยต่อในสภาวะสมดุล	17
2.รอยต่อในขณะไบแอสย้อนกลับ	29
3.รอยต่อในขณะไบแอสไปหน้า	30
รอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำ	31
1.ชอตต์กีแบเรีย (Schottky Barriers)	31
2.ผิวสัมผัสแบบRectifying	35
3.ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก	37
4.รอยต่อวิวิธพันธุ์	40
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดแอนไอโซแบบจับพันธ	40
1.แบบจำลองการแพร่	40
2.แบบจำลองการปลดปล่อย	45
3.แบบจำลองการปลดปล่อย-การรวมตัว	48
4.แบบจำลองการทะลุผ่าน	49
5.แบบจำลองการทะลุผ่าน-การรวมตัว	52

บทที่

4. รอยต่อวิวิธพันธุ์ (ต่อ)	
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดไอโซแบบจับปล้น	54
1. แบบจำลองการปลดปล่อย	55
2. แบบจำลองการแพร่	56
3. แบบจำลองไดโอด Schottky คู่	57
ลักษณะของแถบพลังงาน	59
ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์.....	66
5. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี	73
วิธีการอาบเคลือบด้วยสารเคมี	73
ตัวแปรที่มีบทบาทต่อการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	75
ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	78
6. วิธีการทดลองและผลการทดลอง	82
การเตรียมโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย	82
การวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์	85
ผลการทดลอง	86
วิเคราะห์ผลการทดลอง	121
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	128
รายการอ้างอิง	131
ภาคผนวก	134
ประวัติผู้เขียน.....	138

4.1. แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงาน เมื่อขณะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n เมื่อ $E_{gp} < E_{gn}$	60
4.2 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงาน เมื่อขณะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n เมื่อ $E_{gn1} < E_{gn2}$	63
5.1 แสดงเงื่อนไขที่สำคัญในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ แบบต่างๆ	78
6.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน พลังงาน และอิเล็กทรอนิกส์พินดี ของสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้	86

2.1	แสดงการกระจายของความต่างศักย์ตลอดแท่งฉนวน	7
2.2	แสดงการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าตามกฎของโอห์มไปสู่ กฎของ Mott-Gurney	10
2.3	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำ ที่มีกับดักประจุ	14
3.1	แสดงรอยต่อชั้น (a) บริเวณใกล้ๆ รอยต่อก่อนที่พาหะจะเกิด การแพร่ซึม (b) การไหลของอิเล็กตรอนและโฮล และ (c) การกระจายของ ไอออนสารเจือและพาหะอิสระในสภาวะสมดุล	18
3.2	แสดงบริเวณรอยต่อเชิงโลหะกรรม	19
3.3	แสดงรอยต่อพี-เอ็นแบบจัมปลันในสภาวะสมดุลความร้อน (a) การกระจายประจุ (b) การกระจายของสนามไฟฟ้า (c) ศักย์ที่แปรผัน กับระยะทาง เมื่อ V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (d) แผนภาพแถบพลังงาน	20
3.4	แสดงระดับพลังงานของรอยต่อ p-n ที่สภาวะสมดุล	24
3.5	แสดงแผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อ p-n	30
3.6	แสดงแผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการไบแอสไปหน้าแก่รอยต่อ p-n	31
3.7	แสดงผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (a) ก่อนทำ ผิวสัมผัส (b) หลังทำผิวสัมผัส	33
3.8	แสดงผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี (a) ก่อนทำ ผิวสัมผัส (b) หลังทำผิวสัมผัส	33
3.9	ผลของสถานะที่ผิวต่อผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (ก) ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีโลหะ และ (ข) ผลของโลหะ ต่อการโค้งงอของแถบพลังงานบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ	35
3.10	แสดงไดโอดชอตตีแบเรีย (a) ภายใต้สภาวะไบแอสไปหน้า (a) ภายใต้สภาวะไบแอสย้อนกลับ (c) ลักษณะสมบัติ กระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า	37

3.11	แสดงผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ	
	(a) แถบพลังงานก่อนการทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดย $\phi_m < \phi_s$ และ (b) ภายหลังทำผิวสัมผัส (c) แถบพลังงานก่อนการทำผิวสัมผัส ระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดย $\phi_m < \phi_s$ และ (d) ภายหลังทำผิวสัมผัส	38
4.1	แสดงลักษณะของแถบพลังงาน (a) ก่อนการเกิดรูปแบบของรอยต่อ	
	วิวิธพันธุ์แบบจับพลงันและ (b) หลังการเกิดรูปแบบของรอยต่อ	
	วิวิธพันธุ์แบบจับพลงัน	41
4.2	แสดงแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบจับพลงันที่เปลี่ยนไป	
	จากเมื่อยังไม่มีการไบแอส (เส้นทึบ) และภายใต้การไบแอสตรง (เส้นประ)	44
4.3	แสดงแถบพลังงานเมื่ออยู่ในสภาวะไม่สมดุลของรอยต่อ	
	วิวิธพันธุ์ p-n แบบจับพลงัน	45
4.4	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อเมื่อมีผล	
	ของการปลดปล่อย	47
4.5	แสดงขบวนการปลดปล่อย-การรวมตัวของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n	48
4.6	แสดงแบบจำลองการทะลุผ่านที่เกิดขึ้นในแถบพลังงาน Anderson.....	49
4.7	ผลจากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของ $\ln I$ กับความต่างศักย์	
	ที่ทำการไบแอสของรอยต่อ p-n ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	51
4.8	แสดงแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบจับพลงันเมื่อมี	
	การไบแอสตรงโดยมีขบวนการทะลุผ่าน-ขบวนการเกิด	
	เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ	53
4.9	แสดงแถบพลังงานของรอยต่อจับพลงัน p-n ภายใต้การไบแอสกลับ	
	แสดงให้เห็นถึงขบวนการทะลุผ่าน	54
4.10	แสดงแผนภาพแถบพลังงานในสภาวะสมดุลของรอยต่อ	
	วิวิธพันธุ์ n-n แบบจับพลงัน	55

4.11	แสดงแผนภาพแถบพลังงานรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n ก่อนและหลัง ขณะสมดุล เมื่อมีสถานะตรรกะรอยต่อ	58
4.12	แสดงแผนภาพแถบพลังงานรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n ภายใต้การไบแอส แสดงวิธีการเกิดกระแสที่เป็นไปได้ 2 วิธี	58
4.13	แสดงแถบพลังงานเมื่อมีผลของสถานะรอยต่อ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n เมื่อประจุของสถานะที่รอยต่อเป็น (+) และ ลบ (-)	62
4.14	แสดงแถบพลังงานเมื่อมีผลของสถานะรอยต่อ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n เมื่อประจุของสถานะที่รอยต่อเป็นลบ (-)	65
4.15	แสดงแถบพลังงานและการกระจายของพาหะภายใต้เงื่อนไข การไบแอสตรงและไบแอสกลับ	69
4.16	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ	71
5.1	แสดงการรอสารละลายทั้ง 3 ชนิด	79
5.2	แสดงตัวกวนสาร (Stirrer) ที่ใช้ในการกวนสารละลาย	80
5.3	แสดงวิธีการอาบเคลือบสารเคมี.....	81
6.1	แสดงระบบวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุม ด้วยคอมพิวเตอร์	85
6.2	แสดงแผ่นตัวอย่างของโครงสร้าง SLG/CdS ขนาด 1 cm X 1 cm	87
6.3	แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au	89
6.4	แสดงโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au ในแนวระนาบ	89
6.5	แสดงกราฟกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au ในแถวที่ 4 ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12	90
6.6	แสดงกราฟความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au ในแถวที่ 4 ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12	90
6.7	แสดงกราฟกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au ในแถวที่ 5 ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12	91

6.8	แสดงกราฟความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au ในแถวที่ 5 ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12	91
6.9	แสดงภาพประกอบการคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ฟิล์มบาง CdS ในโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au	92
6.10	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 182 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 5	95
6.11	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 240 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 6	96
6.12	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 224 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 7	97
6.13	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 256 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 12	98
6.14	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 130 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 16	99
6.15	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 19 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 18	99
6.16	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 18 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S1TLM	100

6.17	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 10 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S2TLM	100
6.18	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 34 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG1	102
6.19	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 22 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG2	102
6.20	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 73 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG3	103
6.21	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 40 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG4	104
6.22	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 37 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG5	104
6.23	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 32 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG6	105
6.24	แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 30 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG7	105
6.25	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 18 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S1TLA	106

6.26	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 10 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S2TLA	107
6.27	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS/Au จากจำนวน 56 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48	109
6.28	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS(1)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48	110
6.29	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS75/CdS(1)/Au จากจำนวน 30 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS75	111
6.30	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS42/CdS(1)/Au จากจำนวน 19 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS42	112
6.31	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS(2)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48	112
6.32	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS(5)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48	113
6.33	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS4 และ CIGS21	115
6.34	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS25 และ CIGS26	115

6.35	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS29 และ CIGS30	116
6.36	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS31 และ CIGS32	116
6.37	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS33 และ CIGS35	117
6.38	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS36 และ CIGS37	117
6.39	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS38 และ CIGS39	118
6.40	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS42 และ CIGS46	118
6.41	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48	119
6.42	แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS50 (a) ไม่มีผลของการไขว้กัน (b) มีผลของการไขว้กัน	119

6.43	แสดงการเปรียบเทียบเทียบลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS42/CdS/Au และ SLG/Mo/CIGS42/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au (กรณีไม่ฉายแสง (Dark) และฉายแสง (Light))	120
6.44	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่ 1	123
6.45	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่ 2	124
6.46	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่1	125
6.47	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่2	126
6.48	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se ₂ /CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au.....	127
ก.	แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบวัตต์ I-V	136
ข.	แสดงการจัดวาง Sample	136
ค.	แสดงระบบจริงที่ใช้วัตต์ I - V	137

บทที่ 1

บทนำ

โครงสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ ที่มีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นส่วนประกอบ จัดว่าเป็นโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำ ที่ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี CdS ทำหน้าที่เป็นชั้นกันชน (Buffer layer) ระหว่างชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer) และชั้นหน้าต่าง (Window layer) ชั้นดูดกลืนแสงที่ประสบความสำเร็จในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำร่วมกับแคดเมียมซัลไฟด์ ได้แก่ CdTe และ Cu(In,Ga)Se₂ สำหรับเหตุผลที่นำแคดเมียมซัลไฟด์มาทำหน้าที่เป็นชั้นกันชน เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพที่ดี วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ วิธีการอบเคลือบด้วยสารเคมี (Chemical Bath Deposition, CBD)

สมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของฟิล์มบาง CdS เป็นเรื่องที่น่าสนใจศึกษา จากการศึกษาการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยแบบความร้อน (Thermal Evaporation) ที่อยู่ในโครงสร้างแบบประกบด้วยสารชนิดเดียวกัน Au/CdS/Au¹ ภายหลังจากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าลักษณะการนำไฟฟ้าภายใน CdS มี 2 แบบ คือ เมื่อให้ความต่างศักย์ต่ำ การนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม และเมื่อให้ความต่างศักย์สูง การนำไฟฟ้าเป็นแบบ space-charge-limited current จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้มีประเด็นที่จะสนับสนุนว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ภายได้โครงสร้างที่ถูกประกบด้วยสารที่มีระดับพลังงาน work function ที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดของ Mo/CdS/ZnO(AI), Au/CdS/ZnO(AI) และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(AI) เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจศึกษา เพราะผลที่ได้รับจากการศึกษากระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบเคลือบสารเคมีในโครงสร้างทั้ง 3 แบบนี้ จะทำให้ทราบถึงบทบาทของ CdS ภายในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยมี Cu(In,Ga)Se₂ เป็นชั้นดูดกลืนแสง และ ZnO(AI) เป็นชั้นหน้าต่าง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการอบเคลือบสารเคมี ที่อยู่ในโครงสร้างแบบที่ถูกระงับด้วยสารที่มีระดับพลังงาน work function ที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดของ Mo/CdS/ZnO(AI), Au/CdS/ZnO(AI) และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(AI)

ขั้นตอนของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการนำไฟฟ้าแบบต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำ
2. ทดลองและปรับปรุงวิธีการอบเคลือบสารเคมี
3. ศึกษาการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ในโครงสร้าง Mo/CdS/ZnO(AI), Au/CdS/ZnO(AI) และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(AI) จากลักษณะเฉพาะ กระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า
4. วิเคราะห์ผลการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางCdS ของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้มีทั้งหมด 7 บท โดยเริ่มจากสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการระเหยแบบความร้อน ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดเอกพันธ์ และรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ บทที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบต่างๆ บทที่ 5 กล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีการอบเคลือบสารเคมี บทที่ 6 กล่าวถึง วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง และบทที่ 7 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายได้สรุปผลการทดลอง

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่อยู่หมู่ II-VI แต่เนื่องจากมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงมากเมื่อวัดในแนวระนาบ(In plane) คืออยู่ในช่วงประมาณ $10^8 - 10^{12}$ ohm-cm จึงอาจกล่าวได้ว่าแคดเมียมซัลไฟด์มีค่านำไฟฟ้าที่จัดได้ว่าใกล้เคียงกับฉนวน² มีโครงสร้างผลึก^{3,4} 2 แบบ คือ Cubic zinc sulfide structure (Zincblende) และ Hexagonal zinc sulfide structure (Wurtzite) ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม แคดเมียมซัลไฟด์มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ช่องว่างแถบพลังงาน 2.42 eV ที่อุณหภูมิห้อง มีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นแบบ n-type การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์นี้ ได้มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลายมาช้านานแล้ว ซึ่งกระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) ที่มีผู้วิจัยศึกษาก่อนหน้านี้ที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว² (Single crystals) และฟิล์มบาง(Thin film)ที่เตรียมโดยวิธีระเหยแบบความร้อน¹

กระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์

กระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว² ที่มีความหนาประมาณ 5×10^5 อังสตรอม โดยนำอินเดียม (In) มาใช้ทำขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ และกระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยแบบความร้อน¹ ที่มีความหนาประมาณ 2.5×10^4 อังสตรอม โดยถูกประกบด้วยทอง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ทั้งสองด้าน(สาเหตุที่นำทองมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าเนื่องจากพบว่าทองมีเสถียรภาพและเป็นขั้วโอห์มมิกที่ดี¹) จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ พบว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าของแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบางตามที่กล่าวข้างต้น จะมีการนำไฟฟ้าใน 2 แบบ คือ ที่ความต่างศักย์ต่ำจะมีการนำไฟฟ้าเป็นแบบโอห์มมิก และที่ความต่างศักย์สูงจะมีการนำไฟฟ้าเป็นแบบ Space-charge-limited current

1. การนำไฟฟ้าแบบโหม้มิก

การนำไฟฟ้าแบบโหม้มิก สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของโหม้ม คือ

$$J = qn_0\mu \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

- เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแส
 q คือ ประจุไฟฟ้า
 n_0 คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำที่สภาวะสมดุล
 μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน
 V คือ ความต่างศักย์ที่ให้
 d คือ ความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

โดยสมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระที่สภาวะสมดุลสามารถเขียนอยู่ในรูปของ

$$n_0 = N_c \exp[-(E_c - E_{F_0})/kT] \quad (2.2)$$

- เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นสถานะยังผล (Effective density of states) ในแถบนำ
 $E_c - E_{F_0}$ คือ ระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างระดับเฟอร์มิกับขอบของแถบนำ
 k คือ ค่าคงที่โบลซ์มานน์

2. การนำไฟฟ้าแบบ Space-charge-limited current ⁵

การมีอยู่จริงของ Space-charge-limited current ในสารกึ่งตัวนำ เป็นสิ่งที่ฝ่าฝืนกับหลักความเป็นกลางของประจุ จากที่ทราบกันว่า เมื่อมีความพยายามที่จะรวบรวมความเป็นกลางของประจุในสารกึ่งตัวนำ พบว่าระยะเวลาที่ประจุปริภูมิ(Space-charge) จะลดลงจากค่าเริ่มต้นจนเป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (Dielectric relaxation time) ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\tau_R = \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ ε คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ

และยังพบว่าความหนาแน่นประจุปริภูมิที่ถูกสร้างขึ้นจากการฉีดกระแสหรือโดยวิธีการอื่นใดก็ตามเข้าไปภายในสารกึ่งตัวนำ จะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล คือ

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \quad (2.4)$$

จากสมการ(2.3) จะได้ว่าเวลาการผ่อนคลาย(Relaxation time) เพิ่มขึ้นเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกรณีของฉนวนจริงๆ เวลาการผ่อนคลาย จะมีค่ามากเป็นอนันต์ เป็นการยืนยันว่าประจุปริภูมิที่เกิดจากการฉีดพาหะเข้าไปนั้นจะไม่ถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จากข้อสรุปข้างต้นไม่เป็นเรื่องที่น่าประหลาด เนื่องจากเวลาผ่อนคลายของประจุที่เกิดจากการฉีดพาหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นอย่างปกติโดยการเคลื่อนย้ายของพาหะความร้อน (Thermal carriers) แต่ในกรณีที่กล่าวข้างต้นนี้จะถือว่าไม่มีพาหะความร้อนอยู่ในฉนวน

2.1 Space-Charge-Limited Current ในฉนวน และ กฎของ Mott-Gurney⁵

เมื่อพิจารณาผลจากการฉีดพาหะเข้าไปในวัสดุที่เป็นฉนวนอย่างแท้จริง (Perfect insulator) โดยวัสดุที่เป็นฉนวนนี้มีลักษณะเป็นแท่งยาว พื้นที่ภาคตัดขวางด้านหนึ่งมี Metallic injection contact และอีกด้านหนึ่งมี Metallic collecting contact ขั้วสัมผัส (Contact) ทั้งสองอาจจะเป็นขั้วสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) หรือ Injecting contact อาจจะเป็น Forward biased junction และ Collecting contact อาจจะเป็น Reverse biased junction

เพื่อความสะดวกต่อการทำความเข้าใจ สมมติว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ทั้งหมด V_d ตกคร่อมขั้วสัมผัสจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมแท่งฉนวน โดยที่สมมติว่าความยาวของแท่งฉนวน (L) ยาวมากเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของชั้นปลดพาหะ (Depletion layers) หรือชั้นโอห์มมิก (Ohmic layers) ที่ขั้วสัมผัสแบบโลหะ

จากเงื่อนไขข้างต้น เมื่อพิจารณาการฉีดอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำหรือฉีดโฮลเข้าสู่แถบวาเลนซ์ จะพบว่าปรากฏการณ์ทั้งสองจะไม่เกี่ยวข้องกัน ดังนั้นสามารถพิจารณาแค่เพียงปรากฏการณ์ใดปรากฏการณ์หนึ่งก็พอ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการฉีดอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำ

การฉีดพาหะเข้าสู่ฉนวนอาจจะถูกพิจารณาเหมือนกับกรณีการฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดเข้าสู่ระบบสุญญากาศ เช่นเดียวกับระบบวาล์วเทอร์มิออนิก ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่มีการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปกับโฮล เพราะถือว่าไม่มีโฮลอยู่ในฉนวน

ความต่างศักย์และความหนาแน่นประจุ ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวนมีความสัมพันธ์กับสมการของปัวซง (Poisson) คือ

$$\left(\frac{d^2V(x)}{dx^2}\right) = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (2.5)$$

โดยที่ความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวน คือ

$$J = -\mu\rho(x)\left(\frac{dV(x)}{dx}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ

J คือ ความหนาแน่นกระแส (ในที่นี้จะมีค่าคงที่เนื่องจากไม่มีการรวมตัวกันของพาหะและภาคตัดขวางของแท่งฉนวนมีความสม่ำเสมอ)

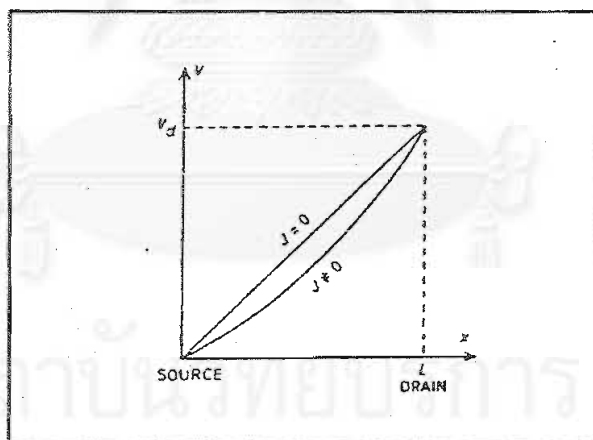
จากสมการ (2.5) และ (2.6) จะได้

$$\left(\frac{d^2V}{dx^2}\right) = \left(\frac{1}{\epsilon\mu}\right) \frac{J}{\left(\frac{dV}{dx}\right)} \quad (2.7)$$

อินทิเกรตสมการ (2.7) จะได้

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 = \left(\frac{2J}{\epsilon\mu}\right) x + E_0^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ E_0 คือ ค่าของ (dV/dx) ที่จุดกำเนิดของ x ภายใต้เงื่อนไข Space-charge-limited จะได้ E_0 มีค่าเป็นศูนย์นั่นคือความเข้มไฟฟ้า (Electric intensity) ที่แหล่งกำเนิดมีค่าเป็นศูนย์ จากข้อสรุปข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของความต่างศักย์ตลอดแท่งฉนวน⁵

จากสมการ (2.8) สิ่งแรกที่จะพิจารณา คือ ถ้า J ไม่เป็นศูนย์ จะได้ว่า (dV/dx) เป็น monotonic increasing function ของ x สมมติว่ามีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมการฉีดอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ฉนวนเมื่อไม่มีการฉีดอิเล็กตรอน J จะมีค่าเป็นศูนย์ จาก

สมการ (2.8) แสดงว่า (dV/dx) เท่ากับค่า E_0 ที่ทุกๆ ตำแหน่ง ซึ่งค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากค่าศูนย์ ณ แหล่งกำเนิดไปจนถึงค่า V_d ที่ตำแหน่งปลายสุด (drain) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไป จะได้ว่าค่า J ไม่เป็นศูนย์ และจากสมการ (2.8) ซึ่งให้เห็นว่า (dV/dx) จะเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งปลายสุด (drain) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกระแสเป็นศูนย์ เพราะ (dV/dx) เป็นฟังก์ชัน monotonic increasing ของ x ดังนั้นจะได้ว่า (dV/dx) ที่แหล่งกำเนิดจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่กระแสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การเพิ่มขึ้นของการฉีดกระแสจะทำให้ E_0 มีค่าเป็นศูนย์ ในที่สุด กล่าวคือกระแสที่ฉีดเข้าไปนี้เป็น space-charge-limited และผลจากการเพิ่มขึ้นของการฉีดกระแสมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขัดขวาง ณ แหล่งกำเนิด สนามไฟฟ้าขัดขวางนี้จะยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกระแสจนถึงจุดที่ E_0 มีค่าเป็นศูนย์ โดยกระแสนี้ถูกเรียกว่า injection-limited สิ่งที่จะพิจารณาตามมาก็คือเมื่อสมมติเงื่อนไขว่า กระแสที่ฉีดเข้าไปไม่ใช่ injection-limited และให้ E_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าขั้วสัมผัสที่ฉีดกระแสทุกๆ จุดไม่ใช่สาเหตุของการจำกัดการฉีดกระแส ในทางปฏิบัติพบว่าอิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปในแถบนำด้วยพลังงานศักย์ค่าหนึ่ง โดยในกรณีนี้จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขัดขวางจำนวนเล็กน้อยขึ้นที่แหล่งกำเนิดและจุดที่ความเข้มไฟฟ้าเป็นศูนย์จะปรากฏเป็นระยะทางสั้นๆ จากแหล่งกำเนิด ความยาวยั้งผล (Effective length) จะมีบทบาทน้อยกว่าความยาวจริง จากเงื่อนไขข้างต้น เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.8) จะได้ว่า

$$V(x) = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\sqrt{\frac{2J}{\epsilon\mu}}\right) x^{3/2} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) จะได้ว่า $V(0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อ x คือความยาว (L) จะได้ว่า $V(x)$ เป็นความต่างศักย์ V_d (Drain voltage) ของแท่งฉนวน ซึ่งจะให้ความหนาแน่นกระแส คือ

$$J = \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu}{L^3}\right) V_d^2 \quad (2.10)$$

สมการนี้เป็นที่รู้จักกันดีว่ากฎของ Mott-Gurney ซึ่งคล้ายคลึงกับกฎของเทอร์มิออนิกของ Child-Langmuir จากที่กล่าวมาอาจจะสรุปได้ว่า space-charge-limited current ในฉนวนมีค่าแปรตามความต่างศักย์ยกกำลังสอง V_d^2 ซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของแหล่งกำเนิดแท่งยาว (drain) และรูปทรงของฉนวน

2.2 Space-Charge-Limited Current ในสารกึ่งตัวนำสมบุรณ์

การพิจารณาสารกึ่งตัวนำสมบุรณ์ (Perfect Semi-conductor) จำเป็นต้องมี การสมมติเงื่อนไขว่า ภายในสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นของพาหะกำเนิดความร้อน (n_T , thermally generated carriers) แต่ไม่มีกับดักพาหะ (Carrier traps) และไม่มีปรากฏการณ์ การรวมตัวของพาหะเกิดขึ้น

เพื่อเป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจ จะสมมติว่าพาหะความร้อน (Thermal carriers) คือ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำ หรือเป็นโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ผลลัพธ์ที่ได้ จากการพิจารณาพาหะความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้ จะสามารถนำมาขยายผลเพื่อพิจารณา กรณีที่พาหะความร้อนคืออิเล็กตรอนในแถบนำกับโฮลในแถบวาเลนซ์

เมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ต่ำ (low drain voltage) V_d การนำไฟฟ้า ที่พบจะเป็นการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic conduction) โดยที่ความหนาแน่นกระแสโอห์มมิก คือ

$$J = \left(\frac{q\mu n_T}{L} \right) V_d \quad (2.11)$$

เมื่อ

n_T คือ ความหนาแน่นพาหะความร้อน

V_d/L คือ ความเข้มไฟฟ้าปกติ (Uniform electric intensity) ใน

แท่งสารกึ่งตัวนำสมบุรณ์ที่ไม่มีประจุปริภูมิ

ที่ความต่างศักย์สูง (higher drain voltage) การนำไฟฟ้าจะเป็นแบบ space-charge-limitation โดยที่ความหนาแน่นกระแสจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ ยกกำลังสอง V_d^2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากกฎของโอห์มเข้าสู่กฎของ Mott-Gurney จะปรากฏเมื่อ ความหนาแน่นกระแสจากกฎทั้งสองมีค่าเท่ากันโดยประมาณ จากสมการ (2.10) และ (2.11) จะได้ ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลง V_T (Transition voltage) คือ

$$\left(\frac{\epsilon\mu}{L^3}\right)V_T^2 \cong \left(\frac{qn_T}{L}\right)V_T \quad (2.12)$$

หรือ

$$V_T \cong \left(\frac{qn_T L^2}{\epsilon}\right) \quad (2.13)$$

ที่ความต่างศักย์นี้ เวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะของแท่งสารกึ่งตัวนำยาว มีค่าประมาณ

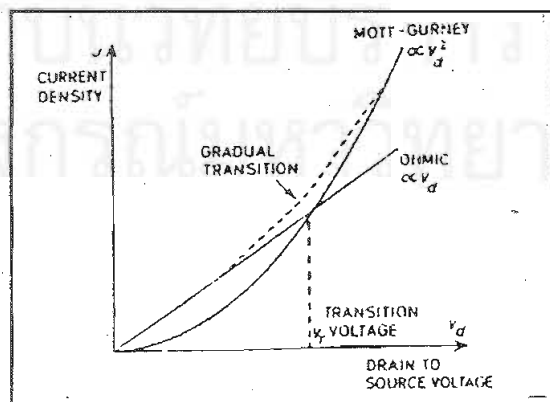
$$t_{Tr} \cong \frac{L}{\mu(V_T/L)} = \left(\frac{L^2}{\mu V_T}\right) \quad (2.14)$$

แทนค่า V_T จากสมการ (2.13) ลงใน (2.14) จะได้

$$t_{Tr} \cong \left(\frac{\epsilon}{qn_T}\right) = \left(\frac{\epsilon}{\sigma}\right) \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.15) จะได้ว่าเวลาการเปลี่ยนแปลง (Transit time) มีค่าโดยประมาณเท่ากับเวลาผ่อนคลายไดโอิเล็กทริก นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากกฎของโอห์มสู่กฎของ Mott-Gurney จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะมีค่าโดยประมาณเท่ากับเวลาผ่อนคลายไดโอิเล็กทริก

จากข้อความข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่า ประจุปริภูมิจะเกิดขึ้นได้เมื่อเวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะที่ฉีดเข้าไปสั้นกว่าเวลาที่พาหะจะเกิดการผ่อนคลายโดยพาหะความร้อน ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าตามกฎของโอห์มไปสู่กฎของ Mott-Gurney ⁵

จากรูปที่ 2.2 มีจุดที่น่าสนใจอีกจุดหนึ่ง คือ ที่ความต่างศักย์ V_T จากกฎของ Mott-Gurney ตามสมการที่ (2.10) เมื่อแทนค่า V_T ลงไปในสมการที่ (2.10) นี้ จะได้ค่าความหนาแน่นกระแส คือ

$$J \cong \left(\frac{\epsilon \mu}{L^3} \right) V_T^2 = \left(\frac{\mu}{\epsilon} \right) q^2 n_T L \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.15) และ (2.16) สามารถนำมาหาจำนวนประจุภายในแท่งสารกึ่งตัวนำได้ โดยคูณความหนาแน่นกระแสกับค่าของเวลาการเปลี่ยนแปลง จะได้ว่า

$$Jt_{Tr} = Q \cong qn_T L \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้ว่าความหนาแน่นพาหะที่ฉีดเข้าไปจะสนับสนุน Space-charge-limited current ที่ความต่างศักย์ V_T อาจเปรียบเทียบได้เท่ากับ ความหนาแน่นพาหะความร้อน n_T โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นพาหะความร้อนไม่พอเพียงพอต่อการผ่อนคลายของพาหะที่ถูกฉีด

2.3 ผลของกับดักประจุ

การปรากฏของกับดักประจุ (Traps) ในสารกึ่งตัวนำและฉนวน สามารถสังเกตได้จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำและฉนวน กับดักประจุจะมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการรวมตัวกัน (Recombination) และ ชนิดที่ไม่มีการรวมตัวกัน (Non-recombination) ซึ่งชนิดที่ไม่มีการรวมตัวกันจะปรากฏเฉพาะในฉนวนเนื่องจากภายในฉนวนจะมีพาหะเพียงชนิดเดียวที่แสดงตัวออกมา ในการพิจารณาจะสมมติเงื่อนไขว่ามีเพียงแต่ อิเล็กตรอนในแถบนำที่แสดงตัวออกมา โดยที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ คือ

$$n = N_c \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \quad (2.18)$$

เมื่อ E_{Fn} คือ ค่าพลังงานเฟอร์มิสำหรับเงื่อนไขที่ไม่สมดุล (Non - equilibrium)

N_c คือ ความหนาแน่นสถานะยังผล (Effective density of states) ในแถบนำ

และความหนาแน่นของกักตุนที่เข้าครอบครองในแต่ละระดับพลังงาน คือ

$$n_t = \frac{N_t}{\left[1 + \exp\left(\frac{E_t - E_{Fn}}{kT}\right)\right]} \quad (2.19)$$

เมื่อ N_t คือความหนาแน่นของกักตุนประจุโดยที่กักตุนประจุทั้งหมดถูกสมมติว่าอยู่ที่ระดับพลังงานคงที่ค่าหนึ่งในที่นี้ คือ E_t และจะไม่คำนึงถึง spin degeneracy factor (2) ด้วย เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.18) และ (2.19) จะได้ว่าสมการที่ (2.18) ตามฟิลิสิกส์แบบฉบับ คือ ค่าที่เกิดจากการประมาณด้วยฟังก์ชันเฟอร์มิ (Fermi function) แต่ในที่นี้จำเป็นต้องพิจารณาสมการที่ (2.19) ซึ่งเป็นสมการเต็มรูปแบบของฟังก์ชันเฟอร์มิ เพราะในสมการที่ (2.18) ค่า n ต้องน้อยกว่า N_c มาก ขณะที่สมการที่ (2.19) ค่า n_t จะใกล้เคียงกับ N_t และในสมการนี้จะใช้สมมติฐาน quasi-equilibrium ในการประมาณ โดยที่ E_{Fn} คือระดับเฟอร์มิยังผลที่กักตุนประจุเข้าครอบครอง เหตุผลข้างต้นนี้เป็นสิ่งกำหนดเงื่อนไขความหนาแน่นพาหะที่ไม่ทำให้สมบัติของกักตุนประจุเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่สั้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาเฉลี่ยที่พาหะถูกจับไว้

เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} ต่ำกว่าระดับพลังงาน E_t มากกว่า $3kT$ กักตุนประจุที่อยู่ในระดับพลังงาน E_t จะถูกจัดว่าเป็นกักตุนประจุแบบตื้น (shallow traps) ค่าประมาณฟังก์ชันเฟอร์มิจะเขียนอยู่ในรูป

$$n_i = N_i \exp\left[-\left(\frac{E_i - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.18) สามารถที่จะนิยามค่า θ ขึ้นมาได้ คือ

$$\theta = \left(\frac{n}{n + n_T}\right) = \left[\frac{N_c}{N_c + N_i \exp\left(\frac{E_c - E_i}{kT}\right)}\right] \quad (2.21)$$

โดยค่าของ θ สำหรับกับดักประจุแบบตันที่อุณหภูมิใดๆ จะขึ้นกับความหนาแน่นของกับดักประจุ (N_i) และความลึกของระดับพลังงานของกับดักประจุ ($E_c - E_i$) เมื่อ $N_i \exp[(E_c - E_i)/kT]$ มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_c จะพบว่าค่า θ จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งหลายๆ ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ N_i มีค่ามาก หรือเมื่อ E_i ต่ำกว่า E_c พอสมควร หรือเงื่อนไขข้างต้นเกิดขึ้นพร้อมกัน และขณะที่ θ มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหลายๆนั้น อิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเกือบทั้งหมดจะเข้าสู่กับดักประจุ จะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เข้าสู่แถบนำและแสดงผลเหมือนกับพาหะประจุ และค่าความหนาแน่นกระแสแบบ space-charge-limited ที่ความต่างศักย์ต่างๆ จะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุ เรียกเซตของกับดักประจุกับค่า θ น้อยๆว่า dominant set (θ_s) โดยที่เซตนี้จะตอบสนองต่อค่าสูงสุดของ $N_i \exp[(E_c - E_i)/kT]$

เพราะเหตุว่าเศษส่วนน้อยของพาหะที่ถูกฉีดที่มีค่าพอเหมาะสำหรับแถบนำคือ dominant set ของ traps (θ_s) ดังนั้นจะทำให้ค่ากระแสแบบ space-charge-limited ในสมการที่(2.10) ลดลงด้วยเศษส่วนน้อยนี้ ซึ่งจะได้ความหนาแน่นกระแสแบบ space-charge-limited คือ

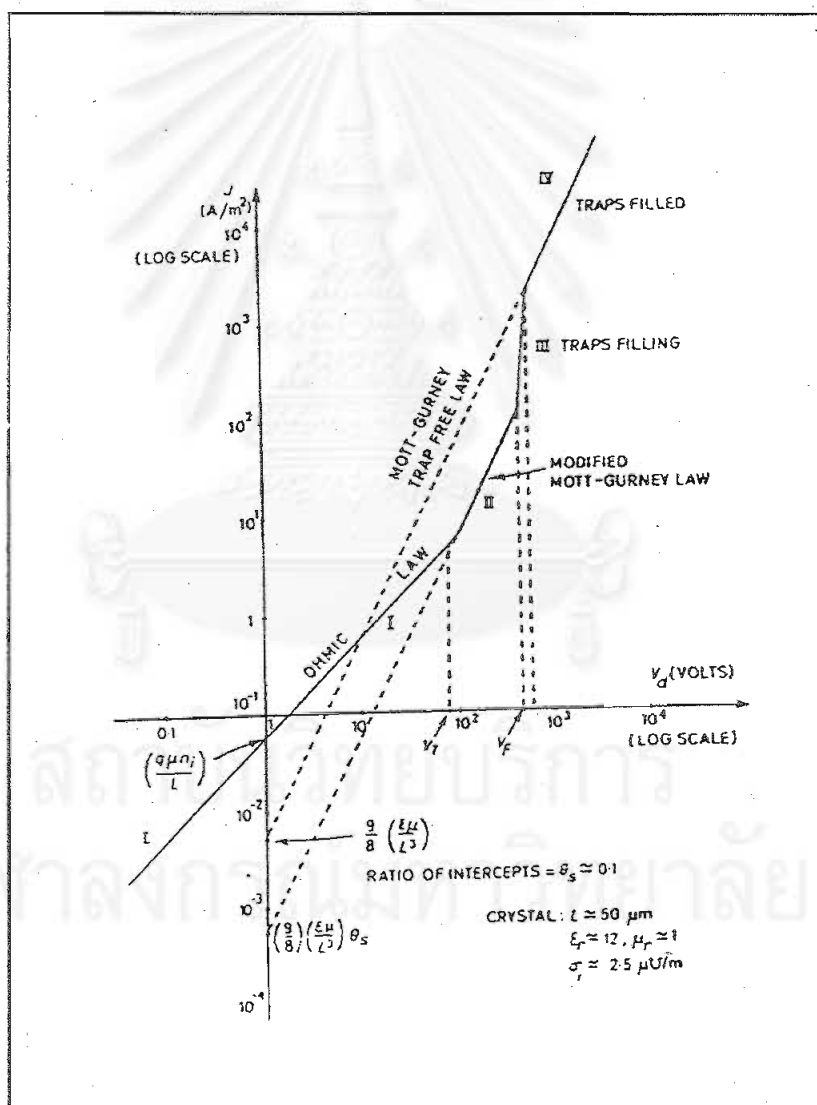
$$J = \theta_s \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu}{L^3}\right) V_d^2 \quad (2.22)$$

จากที่กล่าวมาแล้วเมื่อมีผลจากพาหะความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าแบบโหม้มิกสู่การนำไฟฟ้าแบบ space-charge-limited จะปรากฏที่ความต่างศักย์

ดังแสดงในสมการที่ (2.13) เมื่อมีผลของ dominant set ของ traps (θ_s) ความต่างศักย์ V_T จะอยู่ในรูปของ

$$V_T \cong \left(\frac{qn_r L^2}{\theta_s \epsilon} \right) \tag{2.23}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับผลของกับดักประจุต่อการนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำสามารถนำมาสรุป และแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำที่มีกับดักประจุ⁵

ในรูปที่ 2.3 จะสมมติว่าความหนาแน่นของกับดักประจุ (N_t) มีค่าประมาณ 10^{20} traps ต่อลูกบาศก์เมตร โดยให้กับดักประจุหนึ่งตัวสำหรับทุกๆ 10^7 โครงผลึกไอออน (ions lattice) นั่นคือ (N_t / N_c) จะมีค่าอยู่ในระดับ 10^7

เมื่อ ($E_c - E_t$) มีค่า 0.54 eV ที่อุณหภูมิห้องและ kT มีค่าประมาณ 0.03 eV จากสมการ(2.21) จะได้ว่า θ มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.03 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ N_t จะส่งผลต่อค่า θ และสองเท่าของ ($E_c - E_t$) จะทำให้ θ มีค่าลดลงประมาณ 10^{-10}

จากเหตุผลข้างต้นทำให้ได้ว่าเมื่อระดับ dominant shallow traps อยู่ลึก การนำไฟฟ้าแบบ space-charge-limited current จะไม่ถูกนำมาพิจารณา และพบว่าค่า transition voltage (V_t) ในสมการ (2.23) จะสูงมาก อาจจะมีถึงหนึ่งร้อยโวลต์สำหรับผลึกที่หนา 50 ไมครอน หรือหนามากกว่านี้ เว้นเสียแต่ว่า n_t มีค่าน้อยมากๆ ผลที่เกิดจากการที่ dominant shallow traps อยู่ลึก จะตอบสนองต่อความต้านทานโอห์มมิกที่สูงมาก

ในอีกด้านหนึ่ง เมื่อ N_t มีค่าเท่าเดิม แต่ ($E_c - E_t$) มีค่า 0.27 eV ซึ่งลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง จะทำให้ค่า θ มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่หนึ่งจนถึงหนึ่งในสี่ของหนึ่งพันส่วน ซึ่งในกรณีนี้ การนำไฟฟ้าจะใกล้เคียงกับกฎของ Mott-Gurney

จากสมการ (2.19) เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} อยู่เหนือระดับพลังงาน E_t มากกว่า $3kT$ จะได้ว่า

$$n_t \cong N_t \quad (2.24)$$

จากสมการ(2.24) จะได้ว่ากับดักประจุเกือบทุกตัวอยู่ในสภาพเต็ม ซึ่งกับดักประจุเหล่านี้จะเปรียบเสมือนกับกับดักประจุลึก (Deep traps) และค่า θ สำหรับกรณีนี้จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง โดยไม่คำนึงถึงความหนาแน่นของกับดักประจุ (N_t) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_c โดยที่กับดักประจุลึกเหล่านี้จะไม่มีอิทธิพลต่อ space-charge-limited currents ในทุกๆ จุด

การแบ่งชั้นระหว่าง shallow traps และ deep trap นั้น ไม่มีความแน่นอน แต่ค่อนข้างขึ้นอยู่กับระดับที่ฉีดพาหะ (Injection level) เมื่อระดับที่ฉีดพาหะยกกระดับขึ้น และระดับ

กึ่งพลังงานเฟอร์มิ (E_{F_n}) ยกกระดับขึ้น เหนือกว่าระดับพลังงาน E_i อยู่ $3kT$ ซึ่งจะได้ว่า
กับดักประจุทุกตัวจับพาหะไว้เต็ม และเปลี่ยนจาก shallow trap ไปสู่ deep trap

เมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์สำหรับแท่งฉนวนที่ประกอบด้วยเซตเดี่ยวของ shallow trap ที่สภาวะสมดุล ในระยะเริ่มแรกที่มีความต่างศักย์ต่ำ (V_d) ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์จะเป็นแบบเชิงเส้น ตอบสนองต่อการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก ดังแสดงในแถบที่ I ในรูปที่ 3 ซึ่งเขียนอยู่ในสเกลของล็อกการิทึม

การนำไฟฟ้าแบบ space-charge-limited current ซึ่งปรับปรุงมาจากกฎของ Mott-Gurney ตามสมการ (2.22) จะเริ่มต้นเมื่อ V_d เพิ่มขึ้นจนถึง shallow trap transition voltage (V_T) ตามสมการ (2.23) ซึ่งการนำไฟฟ้าในช่วงนี้คือ แถบที่ II ในรูปที่ 3 โดยในช่วงนี้จะมี injected carriers จำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เข้าสู่แถบนำ ส่วนที่เหลือจะเข้าสู่กับดักประจุระดับกึ่งพลังงานเฟอร์มิจะเคลื่อนย้ายไปสู่ระดับพลังงาน trap (E_i) เมื่อประจุเพียงพอที่จะถูกฉีดเข้าไปในแท่งฉนวนเพื่อที่จะทำให้กับดักประจุเต็ม การนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของ Mott-Gurney ตามสมการ (2.10) ดังแสดงในแถบที่ IV ในรูปที่ 2.3 การประมาณค่าของความต่างศักย์ของการเปลี่ยนแปลงในช่วงสุดท้าย สามารถหาได้ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความจุ (Capacitance) ต่อหนึ่งหน่วยภาคตัดขวางของแท่งฉนวนอยู่ในรูปของ (ϵ/L) และ (qN_0L) คือ ประจุที่ต้องการในการเติมกับดักประจุให้เต็มต่อหนึ่งหน่วยภาคตัดขวางของแท่งฉนวน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความจุประจุได้ คือ

$$V_F \cong \left(\frac{Q_F}{C} \right) \cong \left(\frac{qN_0L^2}{\epsilon} \right) \quad (2.25)$$

ค่าความต่างศักย์ V_F เป็นค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการเติมกับดักประจุให้เต็ม เมื่อกับดักประจุถูกเติมจนเต็ม ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่ยกตัวสูงขึ้นอย่างฉับพลันจะปรากฏ ดังแสดงในแถบที่ III ในรูปที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะนี้จะรวมเป็นหนึ่งเดียวกับกรณี trap-free law ดังแสดงในแถบที่ 4 ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

กรณีสุดท้าย ถ้าความต่างศักย์ V_T เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมากกว่า V_F ซึ่งเหมือนกับกรณี ที่ 0 มีค่าน้อยๆ ส่งผลให้ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ในแถบที่ 2 ไม่เกิดขึ้น และ ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงจากแถบที่ I ไปยังแถบที่ III

รอยต่อพี-เอ็น และ รอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

รอยต่อพีเอ็น ^{5,6,7,8,9}

รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) ชนิดรอยต่อเอกพันธ์ (Homojunction) คือ บริเวณที่ชนิดของสารเจือเปลี่ยนจากสารที่เป็นสารเอ็น (หรือสารเอ็นเป็นสารพี) โดยที่โครงสร้างของโครงผลึกไม่ถูกรบกวน และโดยทั่วไปรอยต่อพี-เอ็น จัดว่าเป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำทุกชนิด

1. รอยต่อในสภาวะสมดุล

เมื่อพิจารณารอยต่อในสภาวะสมดุลดังรูปที่ 3.1(a) แสดงอะตอมสารเจือที่สามารถให้พาหะแต่ละชนิดซึ่งอยู่ที่แต่ละด้านของรอยต่อได้ โดยในขณะนี้สภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้ายังคงเกิดทุกหนทุกแห่งในเนื้อสาร ดังนั้น ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในเนื้อสารสามารถเขียนสมการได้เป็น

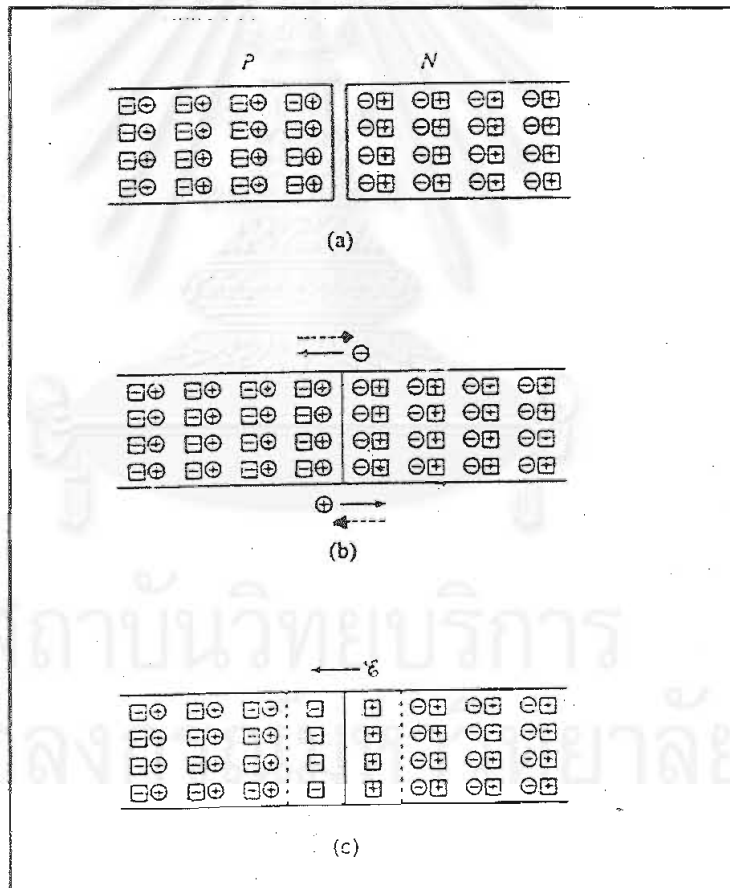
$$N_D^+ + p = N_A^- + n \tag{3.1}$$

เมื่อ

- N_D^+, N_A^- คือ ความหนาแน่นไอออนสารเจือผู้ให้และไอออนสารเจือผู้รับ
- n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสภาวะสมดุล
- p คือ ความหนาแน่นของโฮลในสภาวะสมดุล

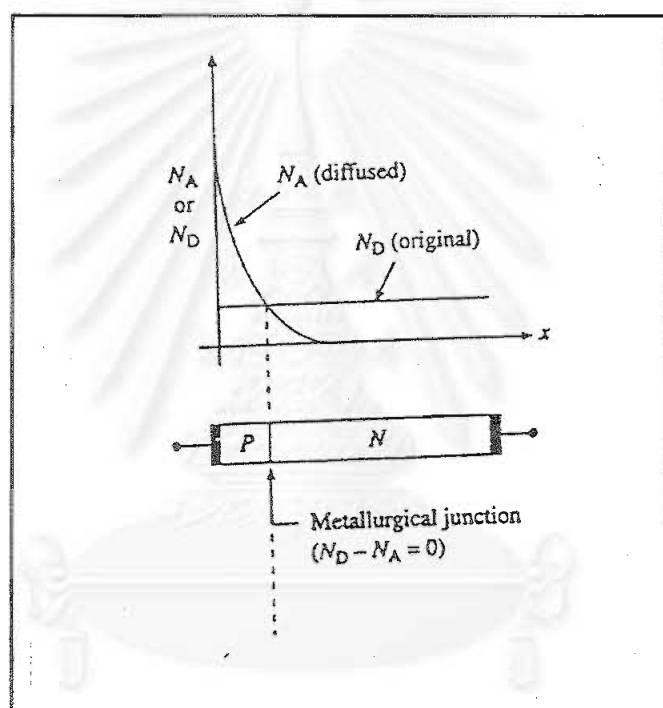
ทั้งนี้พบว่าสถานการณ์ ดังกล่าวข้างต้นไม่อาจเป็นจริงได้ เนื่องจากในด้านเอ็นซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมาก จะสามารถแพร่ช้ิมไปยังด้านพีซึ่งมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยกว่าได้ ส่วนโฮลในด้านพีก็จะแพร่ช้ิมมายังด้านเอ็น จึงทำให้เกิดกระแสแพร่ช้ิมไหลชั่วขณะอันเกิดจากพาหะทั้งสอง ดังแสดงการแพร่ช้ิมของอิเล็กตรอนและโฮลด้วยเส้นทึบในรูปที่ 3.1(b) การแพร่ช้ิมของพาหะเหล่านี้ทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้านั้นคือ ทางด้านเอ็นสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้แสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมี

ประจุบวกของไอออนตัวให้ออกทิ้งไว้ สำหรับทางด้านพีจะมีประจุลบของไอออนตัวรับถูกทิ้งไว้ จึงทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าข้ามรอยต่อ ซึ่งด้านการแพร่ซึมของพาหะข้างมากไม่ให้ไหลต่อไปอีก และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าตามสมการ $\xi(x) = -dV(x)/dx$ ($\xi(x)$ คือ สนามไฟฟ้า และ $V(x)$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า) ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อจะทำให้เกิดกระแสพัดพาไหล ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะมีค่าเท่ากับกระแสแพร่ซึมอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ความเข้มข้นพาหะแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน การพัดพาของพาหะแสดงด้วยเส้นประดังแสดงในรูปที่ 3.2 (b) ดังนั้นกระแสรวมจึงเป็นศูนย์เหมือนอย่างที่ดีควรเป็นในสภาวะสมดุลและสำหรับพาหะแต่ละชนิด จะต้องมีการเคลื่อนที่ที่เกิดจาก 2 ส่วน คือ การแพร่ซึมและการพัดพาซึ่งกระแส 2 ส่วนนี้ จะต้องมีการชดเชยซึ่งกันและกันจนเป็นศูนย์ที่สภาวะสมดุลเทอร์โมไดนามิก



รูปที่ 3.1 รอยต่อชั้น (a) บริเวณใกล้ๆ รอยต่อก่อนที่พาหะจะเกิดการแพร่ซึม \oplus โฮล \ominus ไอออนตัวรับ \oplus อิเล็กตรอน \ominus ไอออนตัวให้ออก (b) การไหลของอิเล็กตรอนและโฮล ----- การพัดพา ——— การแพร่ซึม และ (c) การกระจายของไอออนสารเจือ และพาหะอิสระในสภาวะสมดุล⁹

ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีบริเวณที่เป็นรอยต่อเชิงโลหะกรรม (Metallurgical junction) ซึ่งเป็นบริเวณที่ $N_D - N_A = 0$ (เมื่อ N_D คือ ความหนาแน่นสารเจือผู้ให้ และ N_A คือ ความหนาแน่นสารเจือผู้รับ) เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 บริเวณดังกล่าวต้องมีสนามไฟฟ้าภายในขณะสมดุล และเป็นบริเวณที่ปลอดพาหะที่เคลื่อนที่ได้ เนื่องจากถูกสนามไฟฟ้ากวาดออกไปและเรียกบริเวณนี้ว่า เขตปลอดพาหะหรือชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (Space-charge region) เนื่องจากมีประจุสุทธิของไอออนสารเจือดังแสดงในรูปที่ 3.1 (c)



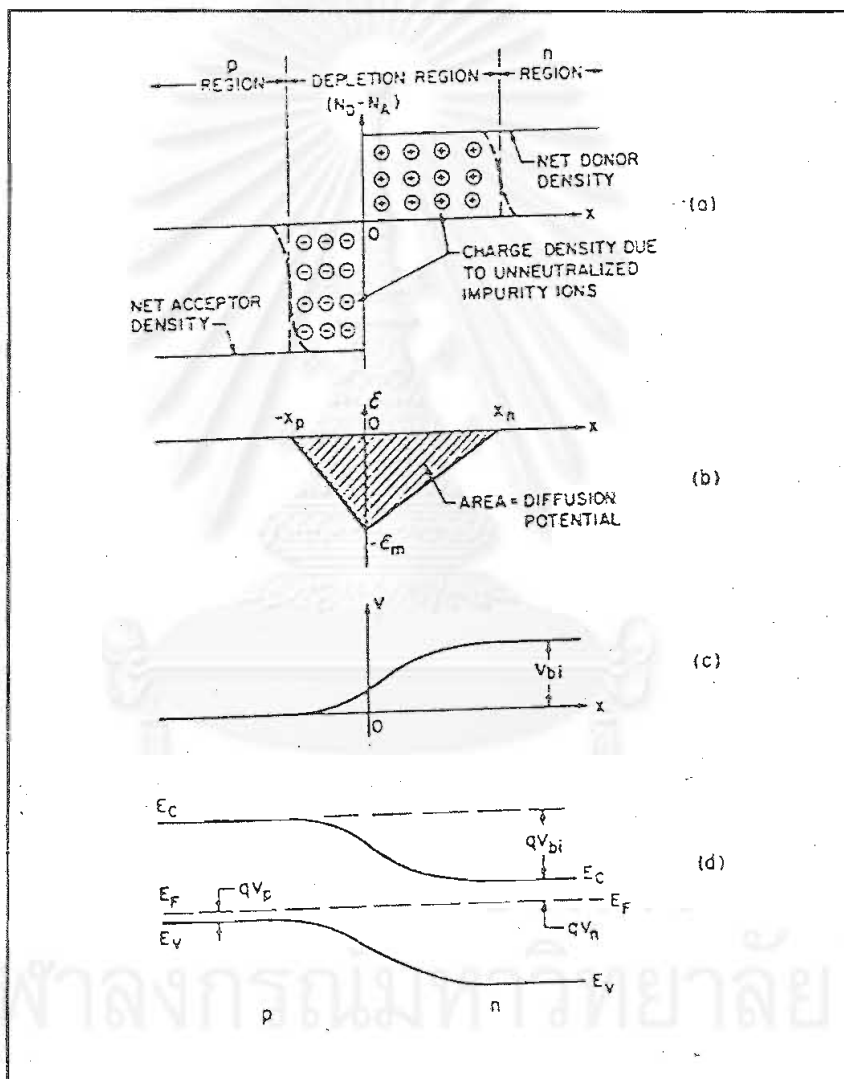
รูปที่ 3.2 บริเวณรอยต่อเชิงโลหะกรรม (Metallurgical junction) ⁹

เขตปลอดพาหะ

เขตปลอดพาหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด คือ รอยต่อแบบฉับพลัน (Abrupt junction) และ รอยต่อแบบลาด (Linearly graded junction) แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเขตปลอดพาหะของรอยต่อแบบฉับพลัน

เขตปลอดพาหะของรอยต่อแบบฉับพลัน

รอยต่อแบบฉับพลันเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารเจือปนในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันจากสารเจือปนผู้รับ N_A ไปยังสารเจือปนผู้ให้ N_D ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (a)



รูปที่ 3.3 รอยต่อพี-เอ็นแบบฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน (a) การกระจายประจุ (เส้นประแสดงหางของการกระจายของพาหะข้างมาก) (b) การกระจายของสนามไฟฟ้า (c) ศักย์ที่แปรผันกับระยะทาง เมื่อ V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (d) แผนภาพแถบพลังงาน⁶

จากรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณารอยต่อในขณะสมดุลความร้อน (ไม่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ รอยต่อและไม่มีการไหลของกระแสเกิดขึ้น) ร่วมกับสมการที่แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิใน สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$E_{Fn} = E_{Fin} + kT \ln \frac{n_{no}}{n_i} \quad (3.2)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$E_{Fp} = E_{Fip} - kT \ln \frac{p_{po}}{n_i} \quad (3.3)$$

เมื่อ

E_{Fn}, E_{Fip} คือ ตำแหน่งของ E_F ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ชนิดเอ็น และ ชนิดพี ตามลำดับ ซึ่งอยู่ประมาณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน

E_{Fn}, E_{Fp} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ตามลำดับ

n_i คือ ความเข้มข้นอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์

n_{no} คือ จำนวนอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในขณะสมดุลความร้อน มีค่าประมาณ N_D

p_{po} คือ จำนวนโฮลทางด้านพีในขณะสมดุลความร้อน มีค่าประมาณ N_A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการ (3.2) และ (3.3) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ N_D และ N_A ได้คือ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$E_{Fn} = E_{Fin} + kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (3.4)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$E_{Fp} = E_{Fip} - kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (3.5)$$

และร่วมกับสมการการขนส่งใน 1 มิติ คือ

$$J_n = q\mu_n n \xi(x) + qD_n \frac{dn}{dx} = q\mu_n \left(n \xi + \frac{kT}{q} \frac{\partial n}{\partial x} \right) \quad (3.6)$$

$$J_p = q\mu_p p \xi(x) - qD_p \frac{dp}{dx} = q\mu_p \left(p \xi - \frac{kT}{q} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3.7)$$

โดยเทอมแรกของสมการ (3.6) และ (3.7) เป็นความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อน (Drift current density) และเทอมที่สองเป็นความหนาแน่นกระแสแพร่ซึม (Diffusion current density)

เมื่อ

J_n, J_p คือ ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

μ_n, μ_p คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

D_n, D_p คือ ค่าคงที่การแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}, \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$$

ξ คือ สนามไฟฟ้า $\left(\xi = \frac{1}{q} \frac{dE_F}{dx} \right)$

จากสมการ (3.2) และ (3.6) ภายใต้สถานะสมดุลอุณหภูมิจะได้ว่า

$$J_n = 0 = q\mu_n \left(n\xi + \frac{kT}{q} \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \mu_n n \frac{\partial E_F}{\partial x} \quad (3.8)$$

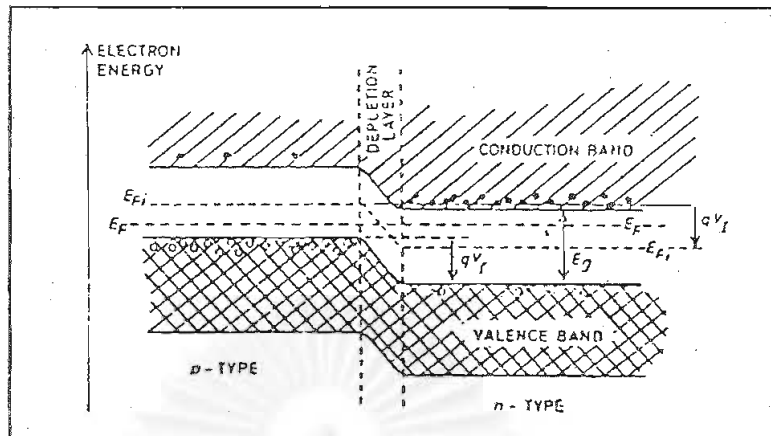
หรือ

$$\frac{\partial E_F}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

ในการทำงานเดียวกันจะได้

$$J_p = 0 = \mu_p p \frac{\partial E_F}{\partial x} \quad (3.10)$$

จากเงื่อนไขกระแสสุทธิที่ไหลมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่าระดับเฟอร์มิจะต้องมีค่าเท่ากันตลอดทั้งเนื้อสารดังแสดงในสมการ(3.9) และ (3.10) ก่อให้เกิดการโค้งงอของแถบนำและแถบวาเลนซ์ในบริเวณใกล้ๆรอยต่อ ซึ่งลักษณะนี้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระดับพลังงานของรอยต่อ p-n ที่สภาวะสมดุล⁵

จากผลของการโค้งงอของแถบพลังงานในช่วงดีพลีชันนี้ถูกนิยามเป็นผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in potential: V_{bi}) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (b), (c) และ (d) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการ

$$qV_{bi} = E_g - (qV_n + qV_p) \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$qV_n = E_{Cn} - E_{Fn} = kT \ln \frac{N_c}{n_{no}} \quad \text{สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น}$$

โดย E_{Cn} คือ ขอบล่างสุดของแถบนำพลังงาน

N_c คือ ความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบนำพลังงาน

$$qV_p = E_{Fp} - E_{Vp} = kT \ln \frac{N_v}{P_{po}} \quad \text{สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี}$$

โดย E_{Vp} คือ ขอบล่างสุดของแถบวาเลนซ์

N_v คือ ความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบวาเลนซ์

$$E_g = kT \ln \left(\frac{N_c N_v}{n_i^2} \right) \quad \text{สำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์}$$

แทนค่า qV_n , qV_p และ E_g ลงในสมการ (3.11) จะได้

$$qV_{bi} = kT \ln \left(\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \right) \cong kT \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (3.12)$$

ดังนั้น

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \right) \cong \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (3.13)$$

ซึ่งค่า V_{bi} ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นพาหะข้างมากในทั้งสองด้านของรอยต่อที่สภาวะสมดุล. $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$ จะได้ V_{bi} มีค่าเท่ากับ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (3.14)$$

ในสภาวะสมดุลความร้อนพบว่าสนามไฟฟ้าในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral regions) (บริเวณที่อยู่ไกลออกไปจากรอยต่อ) ของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์สรุปได้ว่าประจุบวกทั้งหมดผ่านบริเวณปลอดพาหะทางด้านเอ็น เท่ากับประจุลบที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะทางด้านพี

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (3.15)$$

เมื่อ x_n คือ ตำแหน่งปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะที่สภาวะสมดุล ทางด้านเอ็น

x_p คือ ตำแหน่งปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะที่สภาวะสมดุล ทางด้านพี

จากสมการปัวส์ซองสำหรับ 1 มิติ จะได้ว่า

$$-\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$V(x)$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

$\rho(x)$ คือ ความหนาแน่นประจุภายในสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ

$$\rho(x) = q(p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x))$$

ϵ_s คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้น

$$-\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \frac{q}{\epsilon_s} [p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x)] \quad (3.17)$$

หรือ

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{q}{\epsilon_s} N_D \quad \text{สำหรับ } 0 < x \leq x_n \quad (3.17a)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_A \quad \text{สำหรับ } -x_p \leq x < 0 \quad (3.17b)$$

จากสมการ(3.17a) และ (3.17b)สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.3 (b) ได้โดยการอินทิเกรตสมการ (3.17a) และ (3.17b)

จากรูป 3.3 (b) เมื่อนำช่วยในการอินทิเกรตสมการ (3.17a) จะได้

$$\int_{\xi(x)}^0 d\xi' = \frac{q}{\epsilon_s} N_D \int_x^{x_n} dx'$$

$$-\xi(x) = \frac{q}{\epsilon_s} N_D (x_n - x) \quad \text{สำหรับ } 0 < x \leq x_n \quad (3.18a)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่ออินทิเกรตสมการ (3.17b) จะได้

$$\int_{\xi(x)}^{\xi(x)} d\xi' = -\frac{q}{\epsilon_s} N_A \int_{x_p}^x dx'$$

$$\xi(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} N_A (x + x_p) \quad \text{สำหรับ } -x_p \leq x < 0 \quad (3.18b)$$

เมื่อ ξ_m คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่ง $x = 0$ จะได้ว่า

$$|\xi_m| = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s} = \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s} \quad (3.19)$$

จากสมการ (3.16) เมื่ออินทิเกรตสมการนี้หนึ่งครั้ง จะได้ว่า $\xi = -dV/dx$ สามารถหาค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้า $V(x)$ และค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} ตามรูปที่ 3.3 (c) ได้ดังนี้

$$\xi(x) = -dV/dx = \begin{cases} \frac{qN_A}{\epsilon_s} (x_p + x) & \text{สำหรับ } -x_p \leq x < 0 \\ \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x_n - x) & \text{สำหรับ } 0 < x \leq x_n \end{cases} \quad (3.20a)$$

$$\xi(x) = -dV/dx = \begin{cases} \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x_n - x) & \text{สำหรับ } 0 < x \leq x_n \end{cases} \quad (3.20b)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตเมื่อพิจารณาจากรูป 3.3 (c) จะได้ว่า

$$V = 0 \quad \text{ที่} \quad x = -x_p$$

$$V = V_{bi} \quad \text{ที่} \quad x = x_n$$

เมื่อใช้หลักการแยกตัวแปรและทำการอินทิเกรตสมการ (3.20a) จากขอบของบริเวณปลอดพาหะ ถึงตำแหน่ง x ใดๆ ของบริเวณปลอดพาหะทางด้านพี จะได้ว่า

$$\int_0^{V(x)} dV = \int_{-x_p}^x \frac{qN_A}{\epsilon_s} (x_p + x') dx' \quad (3.21)$$

หรือ

$$V(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x_p + x)^2 \quad \text{สำหรับ} \quad -x_p \leq x < 0 \quad (3.22)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับทางด้านเอ็น จะได้

$$\int_{V(x)}^{V_{bi}} dV = \int_x^{x_n} \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x_n - x') dx' \quad (3.23)$$

หรือ

$$V(x) = V_{bi} - \frac{qN_D}{2\epsilon_s} (x_n - x)^2 \quad \text{สำหรับ} \quad 0 < x \leq x_n \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.22) และ (3.24) ที่ตำแหน่ง $x = 0$ จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน คือ

$$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_p^2 + \frac{qN_D}{2\epsilon_s} x_n^2 \quad (3.25)$$

และจากสมการ (3.25) และ (3.15) สามารถหาค่า x_n ได้ดังนี้

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} V_{bi} \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหาค่า x_p ได้ดังนี้

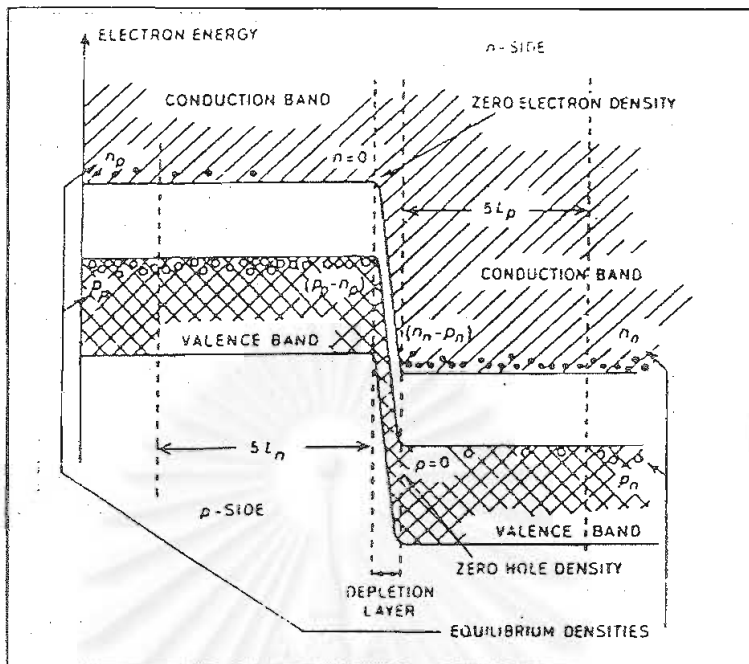
$$x_p = \frac{N_D x_n}{N_A} = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} V_{bi} \right]^{1/2} \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.26) และ (3.27) สามารถหาค่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งสองด้านของรอยต่อแบบจับพลัน W ได้จาก $x_n + x_p$

$$W = x_n + x_p = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

2. รอยต่อในขณะไบแอสย้อนกลับ

การไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) คือ การป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก V_E แก่รอยต่อ แล้วส่งผลให้ศักย์ขวางกัน (Potential barrier) ภายในเพิ่มขึ้นเป็น $V_t = V_{bi} + V_E$ อันเนื่องจากการแยกของระดับเฟอร์มิและจะได้ว่า ความกว้างของเขตปลอดพาหะและค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการไบแอสย้อนกลับจะเป็นการสกัดกั้นการแพร่ซึมของพาหะข้างมาก ส่งผลให้กระแสแพร่ซึม (เทอมที่สองของสมการ (3.6) และ (3.7)) มีค่าเป็นศูนย์ แต่สำหรับส่วนประกอบกระแสลอยเลื่อนอันเนื่องมาจากพาหะข้างน้อยซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับการแพร่ซึมจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าในสภาวะสมดุล



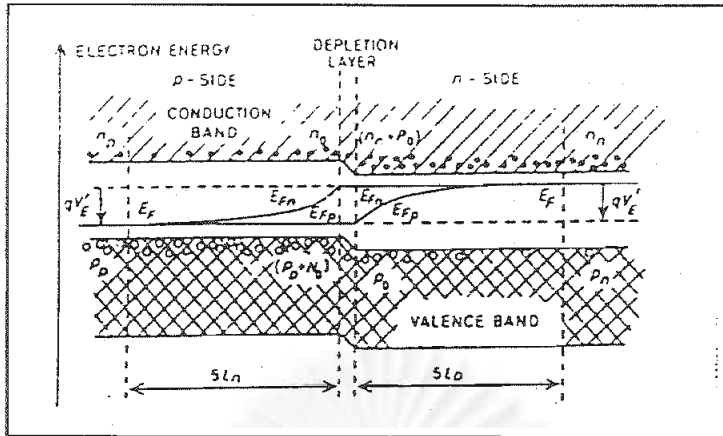
รูปที่ 3.5 แผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อ p-n⁵

ดังนั้นค่า J_n และ J_p ในสมการ (3.6) และ (3.7) จึงมีค่าไม่เท่าศูนย์เหมือนอย่างในสถานะสมดุลอีกต่อไป และแต่ละสมการจะมีเฉพาะส่วนของกระแสลอยเลื่อนเท่านั้น โดยที่กระแสส่วนนี้จะแปรตามความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย ด้วยเหตุนี้ในสถานะการไบแอสย้อนกลับ จึงมีกระแสสุทธิไหลในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเรียกว่ากระแสรั่ว (Leakage current)

3. รอยต่อในขณะไบแอสไปหน้า

การไบแอสไปข้างหน้า (Forward bias) คือ การบ่อนความต่างศักย์ไฟฟ้า V_E ที่มีขั้วตรงข้ามกับศักย์ขวางกั้นภายใน (ขั้วบวกเข้าทางด้านพีและขั้วลบเข้าทางด้านเอ็น) แก่รอยต่อ และจะได้ว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะและค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่รอยต่อจะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.6 ทำให้ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อจะลดลงเหลือ

$$V_t = V_{bi} - V_E$$



รูปที่ 3.6 แผนภาพระดับพลังงานเมื่อมีการไบแอสไปหน้าแก่รอยต่อ p-n⁵

ในสภาวะการไบแอสไปข้างหน้า แม้ว่าศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} จะลดลงเพียงเล็กน้อยอันเนื่องจาก V'_E ก็ตาม แต่สามารถก่อให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกระแสลอยเลื่อนและกระแสแพร่ซึม โดยขณะที่กระแสลอยเลื่อนกำลังลดลงนั้น กระแสแพร่ซึมยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้กระแสสุทธิที่ไหลเป็นกระแสแพร่ซึมอันเนื่องจากพาหะข้างมาก และกระแสนี้จะมีค่าตรงข้ามกับกระแสรั่ว

รอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ^{5,7,8}

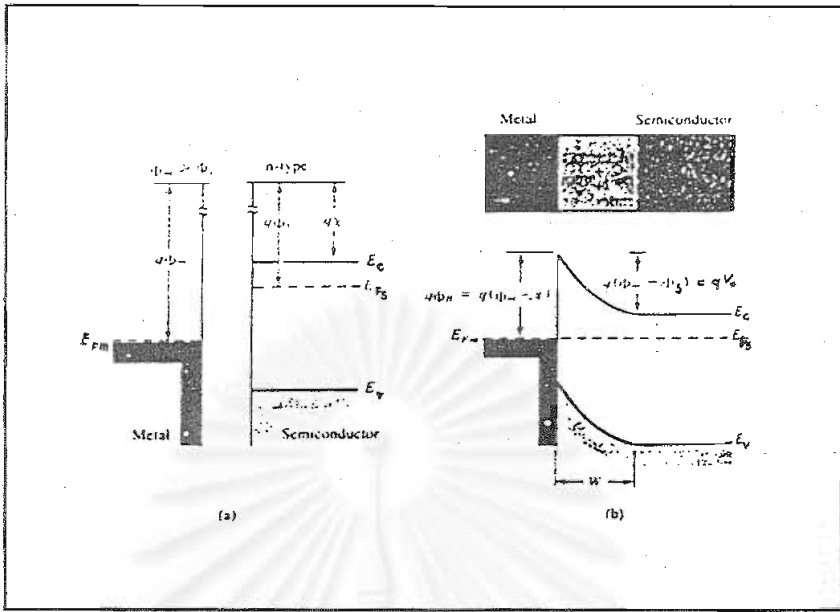
1. ซอตต์กีแบเรีย (Schottky Barriers)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า หากนำวัสดุ 2 ชนิดมาเชื่อมต่อกัน โดยปกติระดับเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองจะปรับตัวให้อยู่ในแนวระดับเดียวกัน หลังจากที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกันเรียบร้อยแล้ว สำหรับโลหะพบว่าโดยปกติระดับเฟอร์มิจะอยู่ประมาณกลางๆ ของแถบนำ และความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามรูปแบบการกระจายของ Fermi-Dirac ดังนั้นในแถบนำจึงมีจำนวนอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยที่มีพลังงานสูงกว่า E_F ได้ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคิดว่า E_F เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนพวกที่มีค่าพลังงานสูงที่สุดในโลหะ และการที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถหลุดออกจากโลหะได้ จะต้องให้พลังงานแก่โลหะอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ ϕ_m ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันงาน (Work function) ค่าพลังงานนี้ คือ ความแตกต่างระหว่างระดับสุญญากาศ (Vacuum level) และระดับเฟอร์มิของสาร

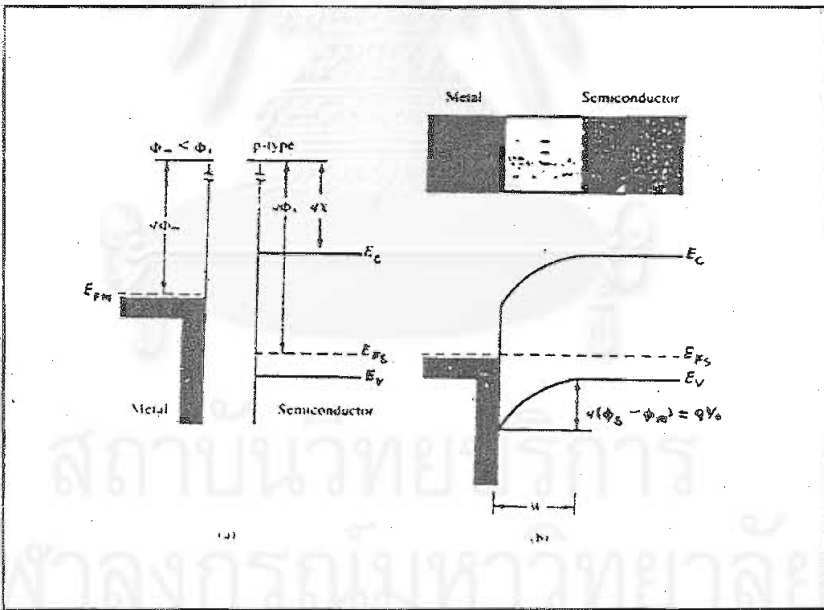
ในสารกึ่งตัวนำก็เช่นกัน หากต้องการให้อิเล็กตรอนหลุดจากเนื้อสารก็ต้องมีการให้พลังงานอย่างน้อยที่สุดค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากระดับ E_F ในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในแถบต้องห้ามที่ซึ่งไม่สามารถมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติมักใช้ปริมาณที่มีความหมายมากกว่าซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity, χ) แทนค่าฟังก์ชันงานในสารกึ่งตัวนำ และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี คือ พลังงานที่ต้องให้แก่สารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้อิเล็กตรอนที่กั้นของแถบนำสามารถหลุดออกจากเนื้อสารได้ รูปที่ 3.7(a) และ 3.8 (a) แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และแผนภูมิแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก่อนทำรอยต่อ ตามลำดับ โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อนำโลหะมาต่อกับสารกึ่งตัวนำ โดยที่ฟังก์ชันงานของวัสดุทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากวัสดุที่มีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าไปยังวัสดุที่มีฟังก์ชันงานมากกว่า จนในที่สุด ณ สภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิในวัสดุทั้งสองจะจัดเรียงอยู่ในระดับเดียวกัน และขณะเดียวกันจะมีการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง โดยที่ความต่างศักย์นี้จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ รูปที่ 3.7 (b) และ 3.8 (b) แสดงแผนภาพแถบพลังงานระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และแผนภาพแถบพลังงานระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี หลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 ผิวนำสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (a) ก่อนทำผิวนำสัมผัส (b) หลังทำผิวนำสัมผัส⁷



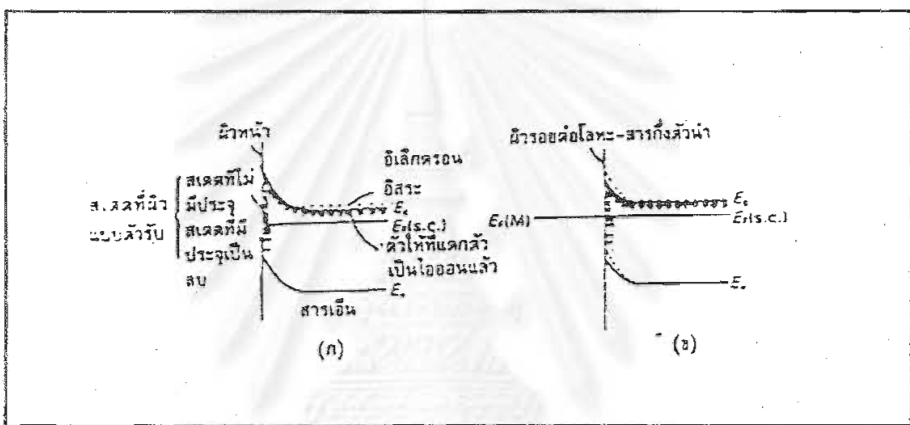
รูปที่ 3.8 ผิวนำสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี (a) ก่อนทำผิวนำสัมผัส (b) หลังทำผิวนำสัมผัส⁷

ในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำ ทำให้การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ทำให้ด้านโลหะมีประจุลบเพิ่มขึ้น สำหรับด้านสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้มีการสะสมของไอออนตัวให้ซึ่งเป็นประจุบวกที่เคลื่อนที่ไม่ได้ อยู่ภายในเขตปลอดพาหะที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสด้านเอ็น ลักษณะนี้ทำให้ระยะทางจาก E_C ถึง E_F ภายในสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณใกล้ผิวสัมผัสเกิดการโค้งงอ ซึ่งเป็นไปตามสมการ $n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b) และกำแพงศักย์ที่สร้างขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำจะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

เมื่อผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำเอ็นเข้าสู่สภาวะสมดุล ความต่างศักย์จะมีค่า $\phi_m - \phi_s$ และเขตปลอดพาหะจะไม่ขยายอีกต่อไปเนื่องจากไม่มีพาหะสุทธิไหลข้ามรอยต่อ ดังนั้นขณะนี้อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะข้ามไปในโลหะได้ต้องปีนข้ามกำแพงพลังงานศักย์ที่สูงเท่ากับความแตกต่างของฟังก์ชันงานของสารทั้งสอง และอิเล็กตรอนในด้านโลหะจะสามารถข้ามมายังด้านสารกึ่งตัวนำได้ต้องเอาชนะกำแพงพลังงานศักย์ที่มีความสูงเท่ากับ $q\phi_B = q\phi_m - \chi$ ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ชอตตี (Schottky) โดยปรากฏการณ์ Schottky นี้ จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และกรณีที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ในทางปฏิบัติ พฤติกรรมของปรากฏการณ์ Schottky ส่วนใหญ่จะแตกต่างจากรูปลักษณะแบบง่าย ๆ ตามที่กล่าวไปแล้ว เนื่องจากมีผลของความหนาแน่นสถานะที่ผิว (Surface state) ที่สูงเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสถานะเหล่านี้จะพบที่ผิวหน้าของผลึกเสมอ อันเนื่องมาจากความไม่ต่อเนื่องของผลึก (Crystal discontinuity) ลักษณะนี้จะทำให้เกิดสถานะยินยอมที่มีพลังงานอยู่ในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จากผลการทดลองพบว่าสถานะที่ผิวจะมีความหนาแน่นมากแถมๆกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และประจุอันเนื่องมาจากสถานะเหล่านี้จะบังคับให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ อยู่แฉกกลางๆ ของช่องว่างพลังงานที่บริเวณผิวหน้าสาร นั่นคือ สถานะเหล่านี้จะทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำแม้ว่าจะไม่มีโลหะมาทำผิวสัมผัสอยู่ด้วยก็ตาม และรูปที่ 3.9 (ก) แสดงผลของสถานะเหล่านี้บนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีการทำผิวสัมผัสกับวัสดุใดๆ สถานะ

ที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีอิเล็กตรอนอยู่ ในขณะที่สถานะที่เหนือขึ้นไปจะเป็นสถานะว่าง เมื่อนำโลหะมาทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งของแถบพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยอันเนื่องจากการปรับของระดับพลังงานเฟอร์มิระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันไม่มากนักในกรณีนี้ เมื่อเทียบกับการทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีผลของสถานะที่ผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง รูปที่ 3.9 (ข) แสดงแถบพลังงานในขณะสมดุลระหว่างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีผลของสถานะที่ผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลของสถานะที่ผิวที่ปรากฏจะช่วยลดผลของฟังก์ชันงานของโลหะที่มีต่อการโค้งงอของแถบพลังงานลง โดยที่ชนิดและความหนาแน่นสถานะที่ผิวจะขึ้นกับการจัดเตรียมที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำโดยปกติ



รูปที่ 3.9 ผลของสถานะที่ผิวต่อผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ(ก)ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีโลหะ และ(ข)ผลของโลหะต่อการโค้งงอของแถบพลังงานบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ⁸

ทั้งนี้รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดผิวสัมผัส 2 แบบ คือ ผิวสัมผัสแบบ Rectifying และ ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

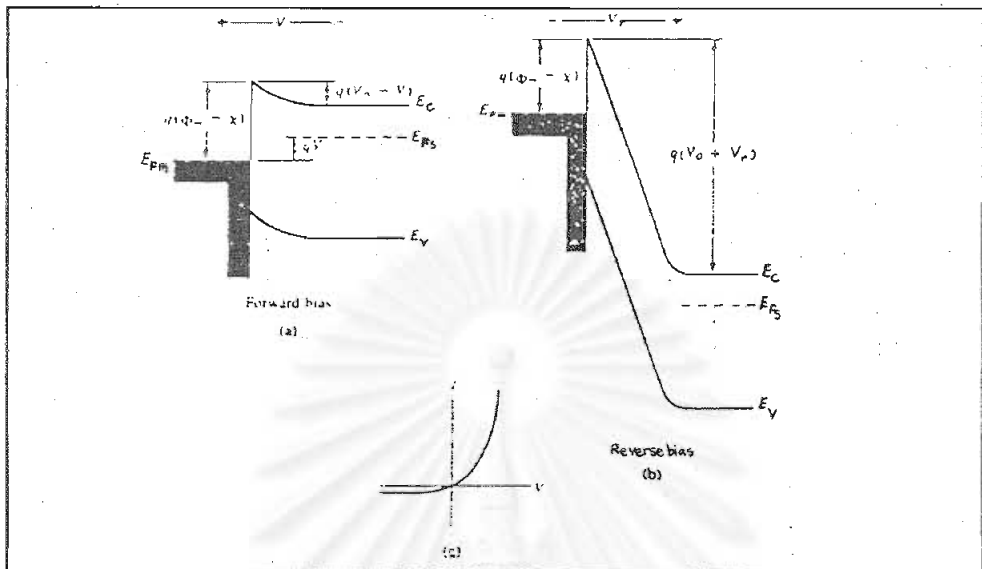
2. ผิวสัมผัสแบบ Rectifying

ผิวสัมผัสแบบ Rectifying เกิดขึ้นจากการทำรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำ และรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำ

ดังแสดงในหัวข้อที่ 1 เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ V_r ให้แก่รอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (โดยที่ด้านเอ็นมีศักย์สูงกว่า) จะทำให้กำแพงศักย์ทางด้านเอ็นถูกยัดลงมาเมื่อเทียบกับทางโลหะดังแสดงในรูปที่ 3.10 (b) ดังนั้นอิเล็กตรอนในแถบนำจะป็นข้ามกำแพงพลังงานศักย์เพื่อเข้าไปในโลหะได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนข้ามกำแพงศักย์นี้ไป ในทางตรงข้าม อิเล็กตรอนในโลหะยังคงเห็นกำแพงพลังงานศักย์ที่จะป็นข้ามเพื่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำด้วยความสูง $q\phi_B$ คงเดิม ยังผลให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะสมดุล ดังนั้นจึงเกิดกระแสรั่วข้ามรอยต่อในปริมาณเล็กน้อยและกระแสนี้จะขึ้นกับ $q\phi_B$ แต่ไม่ขึ้นกับ V_r เหมือนอย่างเช่นในกรณีรอยต่อพี-เอ็น

การป้อนไบแอสไปข้างหน้าให้แก่รอยต่อ ด้วยศักย์ไฟฟ้า V ให้กับผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ก็คือด้านเอ็นให้ศักย์เป็นลบ) จะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำลดลง ยังผลให้พาหะข้างมาก (อิเล็กตรอน) สามารถเคลื่อนข้ามกำแพงพลังงานศักย์ไปยังโลหะได้ง่ายขึ้น และกระแสอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนส่วนนี้จะมีค่ามาก สำหรับอิเล็กตรอนในโลหะยังต้องเอาชนะกำแพงพลังงานศักย์ $q\phi_B$ เท่าเดิม เพื่อจะเข้ามาในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ด้วยเหตุนี้ จึงมีกระแสสุทธิไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในโลหะในปริมาณสูง รูปที่ 3.10 (a) แสดงแถบพลังงานในขณะไบแอสไปหน้าของผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และรูปที่ 3.10 (c) แสดงลักษณะสมบัติกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของผิวสัมผัสดังกล่าว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



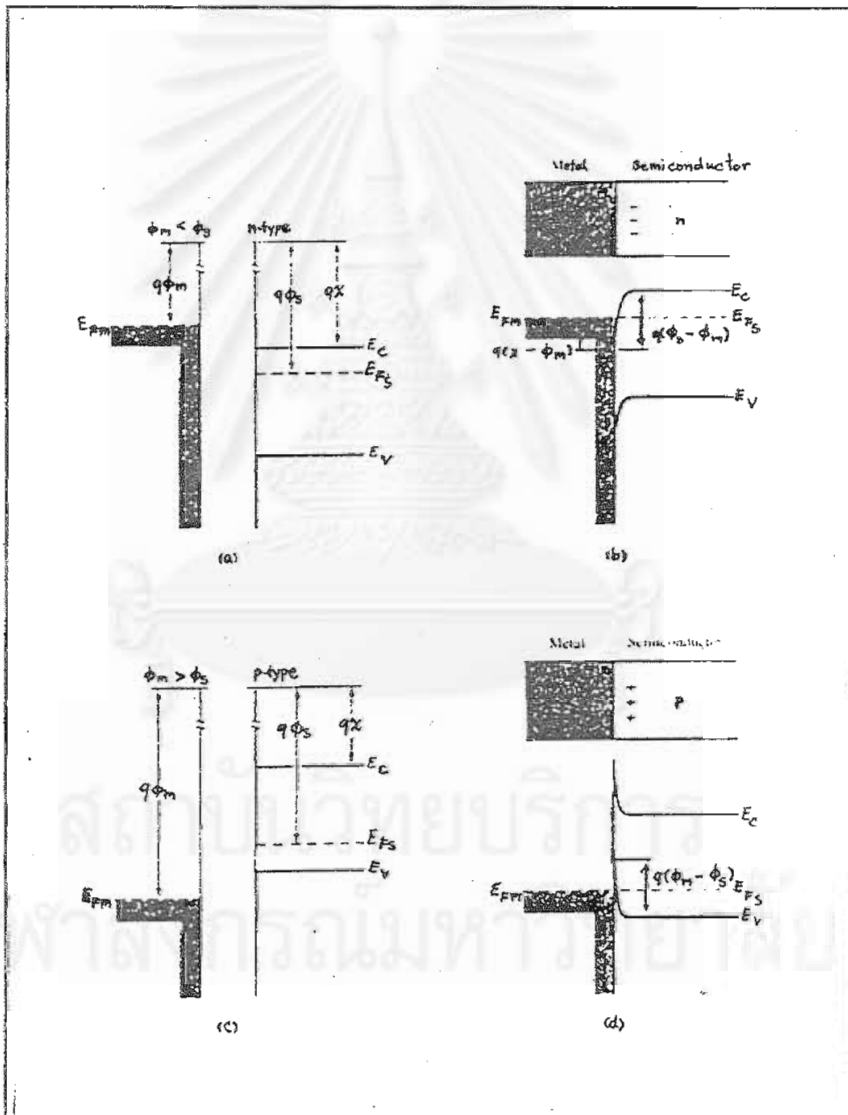
รูปที่ 3.10 ไดโอดขอตติ์กัแบบเรีย (a) ภายใต้สภาวะไบแอสไปหน้า (b) ภายใต้สภาวะไบแอสย้อนกลับ (c) ลักษณะสมบัติกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า⁷

3. ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก

ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกเกิดขึ้นจากการทำรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำ และการทำรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะจะสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยที่ผิวสัมผัสชนิดนี้จะยอมให้กระแสไหลผ่านผิวสัมผัสได้ดีพอๆ กันทั้งสองทิศทาง นอกจากนี้ผิวสัมผัสดังกล่าวควรมีความต้านทานต่ำด้วย

เมื่อพิจารณาการรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (a) และรูปที่ 3.11 (b) พบว่าอิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ เพื่อทำให้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจัดตัวอยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งในกรณีนี้ศักย์ขวางกั้นการไหลของอิเล็กตรอนจะน้อยมากดังนั้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยแก่รอยต่ออิเล็กตรอนจะสามารถไหลข้ามจากโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำได้ และเมื่อพิจารณาการรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (c) พบว่าระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่ต่ำกว่าระดับ E_V ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะมีพลังงานสูงพอ

ที่จะเคลื่อนเข้ามาในโลหะ หรือกล่าวในลักษณะการขนส่งของโฮล โฮลจะแพร่เข้ามาจากโลหะมายังแถบวาเลนซ์ของสารพี เพื่อทำให้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจัดตัวอยู่ในระดับเดียวกัน และในสภาวะสมดุล สารพีจะได้รับโฮลเพิ่มทำให้บริเวณใกล้ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความเป็นพีมากขึ้น ซึ่งเป็นการสะสมของพาหะข้างมาก (Hole accumulation) จากรูปที่ 3.11(d) จะเห็นว่าไม่มีกำแพงพลังงานศักย์สำหรับโฮล เพื่อที่จะเอาชนะ ดังนั้นจึงทำให้ผิวสัมผัสมีความต้านทานต่ำ และกระแสจะไหลได้ดีพอๆ กัน ทั้งสองทิศทางซึ่งเป็นลักษณะของผิวสัมผัสโอห์มมิก



รูปที่ 3.11 ผิวสัมผัสโอห์มมิกระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (a) แถบพลังงานก่อนการทำผิวสัมผัส ระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดย $\phi_m < \phi_s$ และ (b) ภายหลังการทำผิวสัมผัส (c) แถบพลังงานก่อนการทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดย $\phi_m > \phi_s$ และ (d) ภายหลังการทำผิวสัมผัส⁷

รอยต่อวิวิธพันธุ์

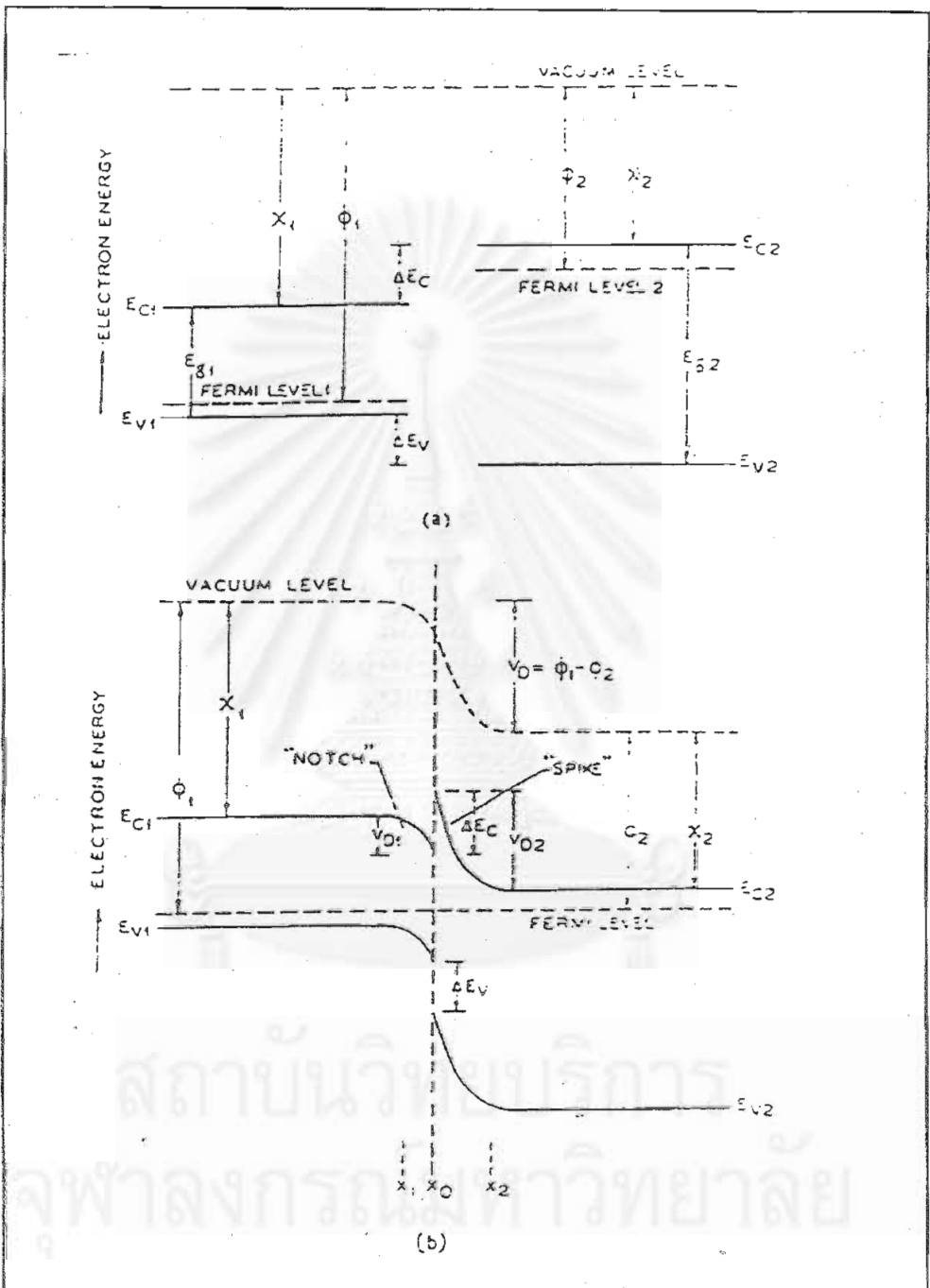
รอยต่อวิวิธพันธุ์(Heterojunction) คือ รอยต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่มีขนาดของแถบพลังงานว่างต่างกัน โดยเมื่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองมีชนิดของการนำไฟฟ้าที่เป็นชนิดเดียวกันจะเรียกว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดไอโซ (Isotype Heterojunction) และจะเรียกว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดแอนไอโซ (Anisotype Heterojunction) เมื่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองมีชนิดของการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน⁶

รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดแอนไอโซแบบฉับพลัน¹⁰

รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดนี้ จะเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n-p และ p-n ซึ่งต่างเป็นอุปกรณ์ที่คล้ายกับรอยต่อเอกพันธุ์ n-p หรือ p-n แต่ลักษณะของการอธิบายด้วยแบบจำลองของรอยต่อเอกพันธุ์นั้นไม่สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรอยต่อวิวิธพันธุ์ได้ เพราะเนื่องจากว่า ในกรณีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ นั้นสมบัติต่างๆที่รอยต่อ (Interface) จะมีความแตกต่างกัน สมบัติต่างๆ เหล่านี้ได้แก่ แถบพลังงานว่าง (Band gap) ระดับพลังงานแถบนำและแถบวาเลนซ์ ค่าเวริกฟังก์ชันที่แตกต่างกัน และสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้นในรอยต่อวิวิธพันธุ์ยังขึ้นกับวิธีการที่ใช้ในการเตรียมรอยต่อด้วย ดังนั้นในส่วนของหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาแบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดแอนไอโซแบบฉับพลันดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองการแพร่ (Diffusion model)

แบบจำลองนี้ได้คิดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย R.L Anderson¹⁰ และต่อมาได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ โดยการตัดผลของโดโพลและสถานะรอยต่อ (Interface-state) ออกไป ลักษณะของแถบพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารกึ่งตัวนำสองชนิด p และ n มาประกบต่อกัน แสดงดังรูปที่ a และ b



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของแถบพลังงาน (a) ก่อนการเกิดรูปแบบของรอยต่ออวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันและ (b) หลังการเกิดรูปแบบของรอยต่ออวิวิธพันธุ์แบบฉับพลัน¹⁰

แถบพลังงานที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะที่เรียกว่า Spike และ Notch เกิดขึ้นที่ขอบของแถบนำพลังงานบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด เมื่อค่าอิเล็กตรอนอัมฟินีตี้ของสารกึ่งตัวนำชนิด p มากกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิด n ($x_p > x_n$) ในกรณีนี้เนื่องจากว่าสารกึ่งตัวนำสองชนิดนี้มีแถบพลังงานว่าง (E_g), ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ), ค่าอิเล็กตรอนอัมฟินีตี้ (x) และค่าเวร็กฟังก์ชัน (ϕ) ที่ไม่เท่ากัน จากการสังเกตในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าความแตกต่างของแถบนำพลังงาน (ΔE_g) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของค่าอิเล็กตรอนอัมฟินีตี้ของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง ชนิดของรอยต่อวิวิธพันธุ์นี้จะมีชั้นของดีพลีชันเกิดขึ้นทั้งสองด้านของรอยต่อและเนื่องจากการตัดผลของสถานะรอยต่อออกไปในแบบจำลองนี้จึงทำให้ช่วงดีพลีชันที่เกิดขึ้นนี้มีประจุเกิดขึ้นในจำนวนที่เท่ากันทั้งสองด้านแต่มีประจุตรงกันข้าม ค่าศักย์ก่อกั้นภายในทั้งหมด (total built-in voltage V_D) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าเวร็กฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง ($\phi_p - \phi_n$) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของศักย์ก่อกั้นภายในของทั้งสองด้านนั้น คือ

$$V_D = V_{Dp} + V_{Dn}$$

เมื่อ x_0 เป็นตำแหน่งของรอยต่อตามรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของรอยต่อกับระยะในช่วงดีพลีชันทั้งสองด้านสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลัน ซึ่งได้จากการแก้สมการปัวซงของของรอยต่อเอกพันธุ์ จะเป็นดังสมการ

$$(x_0 - x_p) = \sqrt{\frac{2 N_A \epsilon_n \epsilon_p V_D}{q N_D (\epsilon_p N_A + \epsilon_n N_D)}} \quad (4.1)$$

และ

$$(x_n - x_0) = \sqrt{\frac{2 N_D \epsilon_n \epsilon_p V_D}{q N_A (\epsilon_p N_A + \epsilon_n N_D)}} \quad (4.2)$$

- เมื่อ q คือ ประจุ
 ϵ_n, ϵ_p คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p
 N_A คือ ความเข้มข้นของพาหะผู้รับในสารกึ่งตัวนำชนิดพี
 N_D คือ ความเข้มข้นของพาหะผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ก่อกำเนิดภายใน V_{Dn} และ V_{Dp} ของแต่ละสารกึ่งตัวนำ จะเป็นดังสมการ

$$\frac{V_{Dp}}{V_{Dn}} = \frac{N_D \epsilon_n}{N_A \epsilon_p} \quad (4.3)$$

และค่าความจุของช่วงดีพลีชัน เป็นดังสมการ

$$C_{pn} = \sqrt{\left(\frac{aqN_A N_D \epsilon_p \epsilon_n}{2(\epsilon_p N_A + \epsilon_n N_D)} \cdot \frac{1}{V_D} \right)} \quad (4.4)$$

เมื่อมีการไบแอสความต่างศักย์ V เข้าไปตกคร่อมรอยต่อ ดังนั้นจะได้ว่าสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเขียนได้ในรูปแบบใหม่โดยการแทน V_D ด้วย $(V_D - V)$ และแทน V_{Dp} กับ V_{Dn} ด้วย $(V_{Dp} - V_p)$ กับ $(V_{Dn} - V_n)$ เมื่อ $V = V_p + V_n$

ในแบบจำลองของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n นี้ เนื่องจากแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่รอยต่อมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นกระแสที่ผ่านรอยต่อทั้งกระแสอิเล็กตรอนและโฮลจะเป็นขบวนการแพร่(Diffusion) และพาหะที่นำกระแสอิเล็กตรอนจะมีมากกว่ากระแสโฮล เพราะวากำแพงกันอิเล็กตรอนจะต่ำกว่ากำแพงกันโฮล

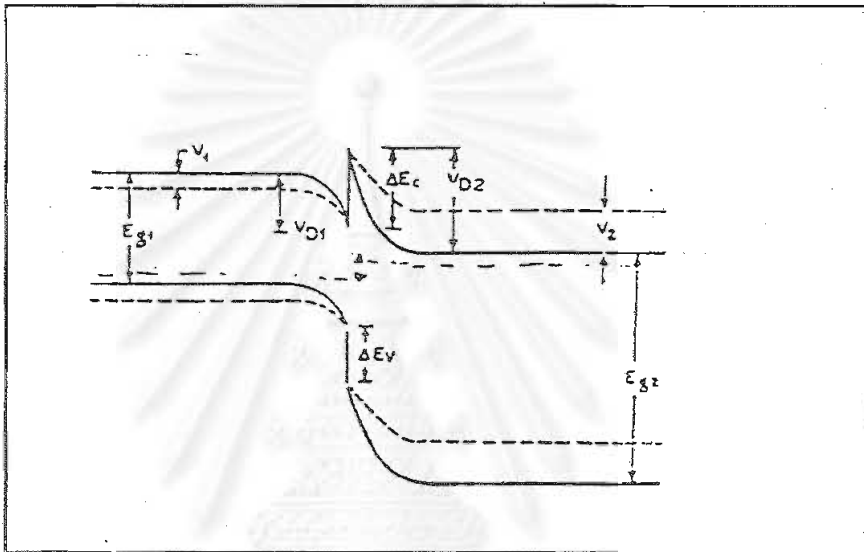
เมื่อไม่คำนึงถึงกระแสที่เกิดจากขบวนการการเกิดและขบวนการรวมตัว จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส-ความต่างศักย์เป็นดังสมการ

$$I = A \exp\left(-\frac{qV_{Dn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_p}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_p}{kT}\right) \right] \quad (4.5)$$

เมื่อ V_p และ V_n เป็นส่วนของศักย์ไบแอสที่ตกคร่อมด้านสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ดังรูปที่ 4.2

$$A = aqXN_D \left(\frac{D_{np}}{\tau_{np}} \right)^{1/2}$$

- เมื่อ X คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ
 a คือ พื้นที่ของรอยต่อ
 D_{np} คือ ค่าคงที่ของการแพร่ผ่านของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p
 τ_{np} คือ ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p



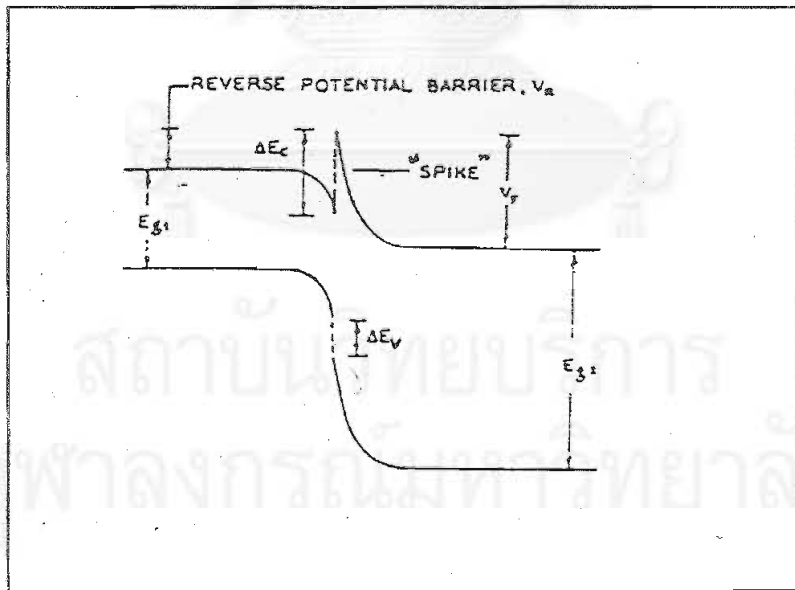
รูปที่ 4.2 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p - n แบบฉับพลันที่เปลี่ยนไปจากเมื่อยังไม่มี การไบแอส (เส้นทึบ) และภายใต้การไบแอสตรง (เส้นประ)¹⁰

จากเทอมแรกในสมการที่ 4.5 เป็นส่วนของการไบแอสตรงและเทอมที่สองแสดงถึงความสัมพันธ์ของการไบแอสกลับ ถ้า $V_n = V/\eta$ แล้ว $V_p = (1 - 1/\eta)V$ และค่ากระแสที่แปรไปตามค่าเอกซ์โปเนนเชียลของศักย์ที่ไบแอสทั้งไบแอสตรงและไบแอสกลับ

แบบจำลองนี้สามารถนำไปอธิบายถึงลักษณะแถบพลังงานที่เกิดขึ้นสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ได้ แต่จากการทดลองพบว่าลักษณะกระแสที่เกิดขึ้นจริงๆ นั้นน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการ ซึ่งการที่ความสัมพันธ์ของกระแสขึ้นกับความต่างศักย์และอุณหภูมิดังที่อธิบายในสมการที่ 4.5 นั้นไม่เพียงพอ อาจต้องนำผลจากปรากฏการณ์อื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

2. แบบจำลองการปลดปล่อย (Emission model)

แบบจำลองนี้เป็นการนำแบบจำลองพลังงานจลน์แบบคลาสสิกพร้อมกับแบบจำลองการแพร่ เพื่อนำมาใช้ในการหาค่ากระแสที่ปลดปล่อยออกมา และพาหะข้างน้อยที่อยู่ในช่วงดีฟิสิชัน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบฉับพลันดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อการขนส่งประจุส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นหลัก ขบวนการที่แตกต่างกันสองชนิดที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะกระแส-ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นคือ ในรอยต่อแบบเอกพันธ์เมื่อพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นที่ขอบของดีฟิสิชันเป็นตัวจำกัดการไหลของกระแส และในรอยต่อของโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีกำแพงศักย์บนด้าน n ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ เป็นตัวจำกัดการไหลของกระแส โดยขบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับอย่างมากเกิดขึ้นที่รอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.3 ขณะที่ขบวนการจำกัดกระแสโดยพาหะข้างน้อยในรอยต่อแบบเอกพันธ์นั้นจะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อ spike อยู่ต่ำกว่าขอบของแถบนำพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด p ภายนอกบริเวณดีฟิสิชัน



รูปที่ 4.3 แสดงแถบพลังงานเมื่ออยู่ในสภาวะไม่สมดุลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบฉับพลัน ¹⁰

ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ โดยไม่คำนึงถึงขบวนการ
การเกิด-การรวมตัวกันของประจุที่เกิดขึ้นภายในช่วงดีพลีชันตามรูปที่ 4.3 จะได้ความสัมพันธ์ดัง
สมการ

$$I = \frac{I_s [\exp(qV/kT) - 1]}{(1 + I_s/I_d)} \quad (4.6)$$

เมื่อ

$$I_s = aqN_{Dp} \left(\frac{D_{np}}{\tau_{np}} \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

I_s คือค่ากระแสอิ่มตัวสำหรับรอยต่อเอกพันธ์ p-n และ

$$I_d = \frac{1}{2} aqX_m N_{Dn} \bar{v}_n \exp \left[-\frac{q}{kT} (V_F + V) \right] \quad (4.8)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสจำกัดที่ปลดปล่อยออกมา

V คือ ความต่างศักย์ที่ไบแอสเข้าไป

a คือ พื้นที่ของรอยต่อ

N_{Dp}, N_{Dn} คือ พาหะผู้ให้ที่อยู่ในด้าน p และ n

V_F คือ กำแพงศักย์ตามรูปที่ 4.3

D_{np} คือ ค่าคงที่การแพร่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

τ_{np} คือ ค่าช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

X_m คือ สัมประสิทธิ์ การทะลุผ่านที่เป็นผลรวมตัวกันของแบบคลาสสิกกับแบบการแพร่

m_n^* คือ ค่ามวลยั้งผลของอิเล็กตรอนทางด้าน

$\bar{v} = \sqrt{2kT / \pi m_n^*}$ คือ ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเอ็น

สมการที่ 4.6 สามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปที่คล้ายกับสมการที่เป็นขบวนการแพร่แบบ 4.5 ได้ดังนี้

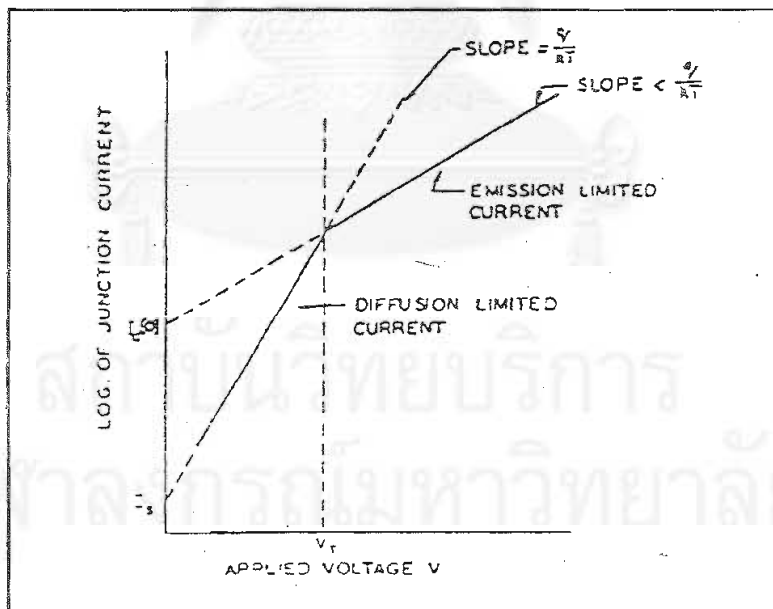
$$I = \frac{1}{2} a q X_m N_{Dn} \bar{v}_n \exp(-qK_n V_D / kT) \cdot [\exp(qK_n V / kT) - \exp(-qK_p V / kT)] \quad (4.9)$$

เมื่อ

$$K_n = (1 + N_{Dn} \epsilon_n / N_A \epsilon_p)^{-1}$$

$$K_p = (1 - K_n)$$

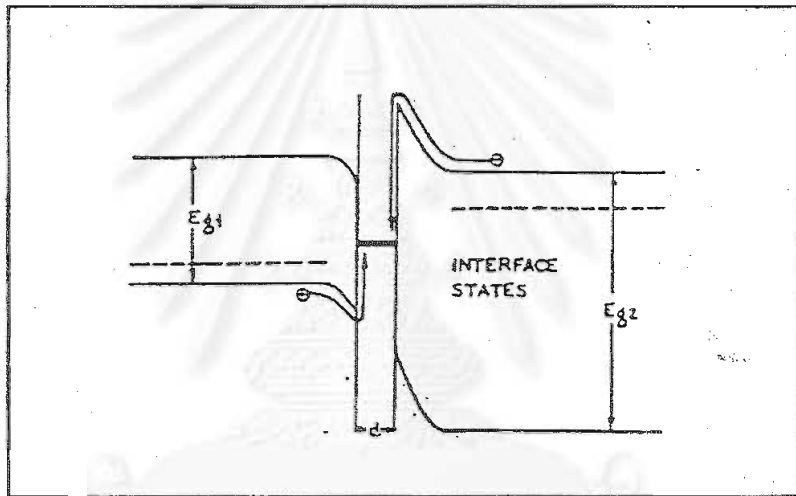
สำหรับในสมการที่ 4.6 จะพบว่าวิธีของการปฏิบัติการของกระแสที่ได้ จะถูกกำหนดโดยอัตราส่วน I_s/I_0 ถ้า $I_s \ll I_0$ แล้วกระแสทั้งหมดจะเป็นไปตามการนำกระแสแบบไดโอดรอยต่อเอกพันธ์ อธิบายโดย Shockley แต่ถ้า $I_s \gg I_0$ ก็จะตรงกับทฤษฎีของไดโอดที่มีขบวนการปลดปล่อย อธิบายโดย Schottky ลักษณะกระแส-ความต่างศักย์ที่มีผลของการปลดปล่อยแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลทำให้ค่ากระแสลดลงที่ค่าศักย์วิกฤต (V_T) ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อเมื่อมีผลของการปลดปล่อย¹⁰

3. แบบจำลองการปลดปล่อย-การรวมตัว (Emission-recombination model)

แบบจำลองนี้เสนอโดย U.Dolega¹⁰ ซึ่งอาศัยสมมติฐานที่ว่าด้วยชั้นบางๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อมีผลอย่างรุนแรงต่อแลตติสและการรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลจะไหลข้ามกำแพงศักย์เข้าหารอยต่อได้ด้วยการปลดปล่อยเนื่องจากความร้อน แอมป์พลังงานในสภาวะสมดุลสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบจับพลังที่อธิบายแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งคล้ายกับรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำสองชั้นมาประกบกันเป็นอนุกรมโดยการนำกระแสขึ้นกับศักย์ที่ไบแอส



รูปที่ 4.5 แสดงขบวนการปลดปล่อย-การรวมตัวของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n¹⁰

ลักษณะของกระแส-ความต่างศักย์ในด้านไบแอสตรงที่ได้จากแบบจำลองนี้จะแสดงดังสมการ

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.10)$$

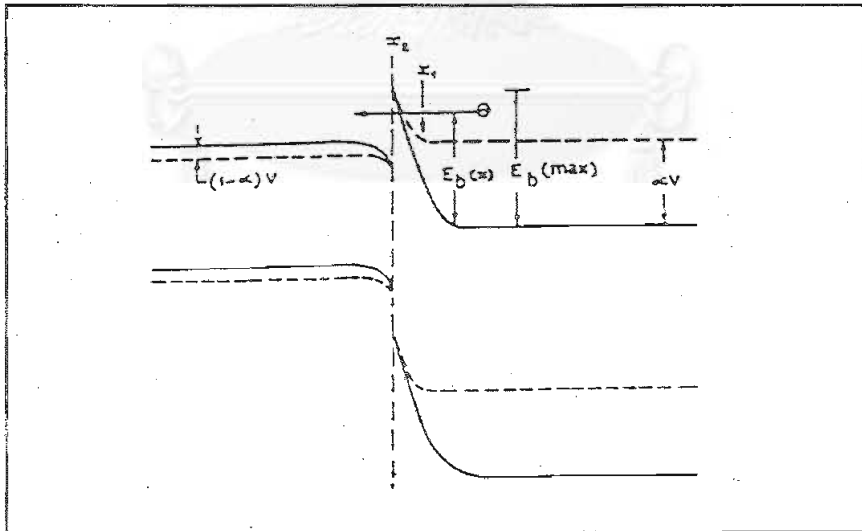
โดยที่

$$I_s = B \exp\left(-\frac{qV_D}{nkT}\right) \quad (4.11)$$

เมื่อ B ขึ้นกับอุณหภูมิและค่าของ k ในสมการขึ้นกับอัตราส่วนของความหนาแน่นของความไม่สมบูรณ์ในสารกึ่งตัวนำทั้งสอง ค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงไบแอสตรงจะอยู่ระหว่าง q/kT และ $q/2kT$ (นั่นคือค่า n จะมีค่าระหว่าง 1 และ 2) เมื่อใช้แบบจำลองนี้อธิบายกระแสทางด้านการไบแอสกลับพบว่าค่ากระแสเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลกับค่าของความต่างศักย์ แต่ความต้านทานขณะไบแอสกลับมีค่าสูงสุด

4. แบบจำลองการทะลุผ่าน (Tunnelling model)

การใช้ขบวนการทะลุผ่านในการอธิบายลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์นี้เสนอโดย R.H. Rediker, S. Stopek และ J.H.R. Ward โดยอาศัยพื้นฐานในการพิจารณาให้อิเล็กตรอนต้องสามารถข้ามหรือทะลุผ่านกำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีแถบพลังงานว่างแบบกว้างได้ โดยการไหลของประจุอาจไหลจากด้าน n ไปสู่ด้าน p หรือจากด้าน p ไปสู่ด้าน n แสดงดังรูปที่ 4.6 การไหลของอิเล็กตรอนภายใต้การไบแอสนี้ทั้งที่เป็นผลจากการปลดปล่อยความร้อนหรือผลจากการทะลุผ่านกำแพงศักย์จะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองการทะลุผ่านที่เกิดขึ้นในแถบพลังงานของ Anderson ¹⁰

จากการประมาณด้วยวิธีการแบบคลาสสิก WKB approximation และมีการทะลุผ่านจากด้านล่างสุดของแถบนำพลังงาน สำหรับในกรณีที่แสดงดังในรูปที่ 4.6 การทะลุผ่านของอิเล็กตรอนที่เป็นไปได้ที่ด้านล่างของแถบพลังงานเมื่อมีการไบแอสตรงจะเป็นดังสมการ

$$T = \exp \left[-2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{[2m_n^* \{E_0(x) - q\alpha V\}]^{1/2}}{\hbar} dx \right] \quad (4.12)$$

เมื่อ $E_0(x)$ เป็นความสูงของกำแพงศักย์ที่จุด x ใดๆ ที่เหนือระดับของแถบนำพลังงาน และ αV เป็นส่วนของความต่างศักย์ที่ไบแอสให้ซึ่งเป็นผลให้แถบนำพลังงานของสารกึ่งตัวนำเอ็นสูงขึ้น, m_n^* เป็นมวลยั้งผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อ $E_0(x)$ เป็นฟังก์ชันของ x ซึ่งจะให้คำตอบของสมการที่ 4.12 ได้หลายคำตอบสำหรับกรณีเชิงเส้น (เช่น ค่าของสนาม F_0 มีค่าคงที่ในช่วงการส่งผ่าน) Rediker และคณะได้ทำการประมาณค่าคำตอบของสมการนี้ได้ดังนี้ คือ

$$T \approx \exp \left[-\frac{4}{3} (2m_n^*)^{1/2} \frac{\{E_0(\max)\}^{3/2}}{\hbar F_0} \right] \cdot \exp \left[2(2m_n^*)^{1/2} \frac{\{E_0(\max)\}^{1/2}}{\hbar F_0} q\alpha V \right] \quad (4.13)$$

เมื่อ $E_0(\max)$ เป็นค่าสูงสุดของกำแพงศักย์เทียบกับขอบล่างของแถบนำเมื่อไม่มีการไบแอส กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาและคล้ายกับที่วิเคราะห์โดย Van Ruyven

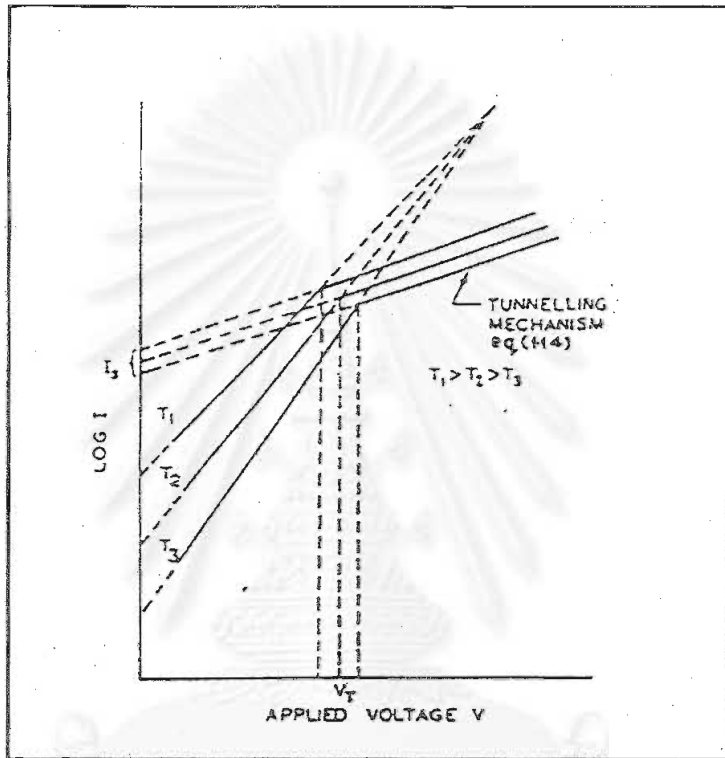
กระแสที่เกิดจากขบวนการทะลุผ่านนี้มีค่าเท่ากับผลคูณของค่าความเป็นไปได้ของการทะลุผ่านจากสมการที่ 4.12 กับค่าฟลักซ์ของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ ดังนั้นในแบบจำลองนี้เมื่อมีขบวนการทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ใหญ่มากๆ ก็จะมีการปลดปล่อยความร้อนออกมาเหนือกำแพงศักย์ ในกรณีทั่วไปสำหรับลักษณะกระแส-ความต่างศักย์เมื่อมีการไบแอสตรง จะได้สมการ

$$I = I_s(T) \exp(V/V_0) \quad (4.14)$$

เมื่อ V_0 เป็นค่าคงที่และ $I_s(T)$ เป็นฟังก์ชันเพิ่มค่าตามอุณหภูมิอย่างช้าๆ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าของ $I_s(T)$ เป็นสัดส่วนกับ $\exp(T/T_0)$ ดังนั้นสมการที่ 4.14 จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$I = I_{\infty} \exp(T/T_0) \exp(V/V_0) \quad (4.15)$$

เมื่อ I_{∞} , T_0 และ V_0 เป็นค่าคงที่



รูปที่ 4.7 ผลจากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของ $\ln I$ กับความต่างศักย์ที่ทำการไบแอสของรอยต่อ p-n ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน¹⁰

จากสมการดังกล่าวข้างต้นเป็นสิ่งที่บอถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อมและอุณหภูมิ ว่าเป็นฟังก์ชันที่แยกจากกันได้ นั่นคือ $\frac{\delta(\ln I)}{\delta V}$ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และค่ากระแสขึ้นกับอุณหภูมิแบบเอกซโปเนนเชียล ($\ln I \propto T$)

5. แบบจำลองการทะลุผ่าน-การรวมตัว (Tunnelling-recombination model)

A.R. Riben และ D.L. Feucht¹⁰ ได้เสนอแบบจำลองที่อาศัยพื้นฐานขบวนการทะลุผ่านแถบพลังงาน (band-to-band tunnelling) ร่วมกันกับขบวนการการรวมตัว โดยขบวนการที่เกี่ยวข้องต่างๆ ในแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งในแบบจำลองนี้แสดงถึงการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนจากแถบนำพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างไปยังสถานะที่อยู่ระหว่างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่า จากนั้นเกิดการรวมตัวเข้ากับโฮล หรือการทะลุผ่านของโฮลจากสารกึ่งตัวนำพีไปยัง occupied states ในแถบนำของสารกึ่งตัวนำชนิด n และจากนั้นเกิดการรวมตัวเข้ากับอิเล็กตรอน (ในกรณีไบแอสกลับ) ถ้ามีการทะลุผ่านที่ด้านล่างของแถบนำพลังงานหรือด้านบนของแถบวาเลนซ์แล้วขบวนการเหล่านี้จะนำไปสู่ในรูปของความสัมพันธ์ของกระแสไบแอสดตรง จะแสดงดังนี้

$$I = B \exp[-\alpha(V_D - V)] \quad (4.16)$$

เมื่อ B เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ V และ T, V_D เป็นความต่างศักย์การแพร่, V เป็นความต่างศักย์ที่ไบแอสให้กับระบบและ α จะขึ้นกับค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนในบริเวณต้องห้าม (Forbidden region), ค่าคงที่ได้ิเล็กตริก, ความเข้มข้นของพาหะในสภาวะสมดุลและรูปแบบที่แน่นอนของกำแพงศักย์ที่กั้น, สำหรับการประมาณค่าของกำแพงศักย์จึงเส้น (เมื่อสนามมีค่าคงที่กับตำแหน่ง) ในบริเวณเคลื่อนย้าย (Transition region) และการทะลุผ่านส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\alpha = \frac{4}{3\hbar} \left(\frac{m_n^* \epsilon_n}{N_{Dn}} \right)^{1/2} \quad (4.17)$$

เมื่อ m_n^* , ϵ_n และ N_{Dn} เป็นค่าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เนื่องจากขบวนการทะลุผ่านมีหลายขั้นตอนที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทำให้ค่าของ α ที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทดลองที่ไม่สอดคล้องกันนัก ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงผลของสถานะต่างๆ ที่กระจายอยู่ด้วย ซึ่งสถานะเหล่านี้ก็คือกับดักประจุ (Trap) นั้นเอง

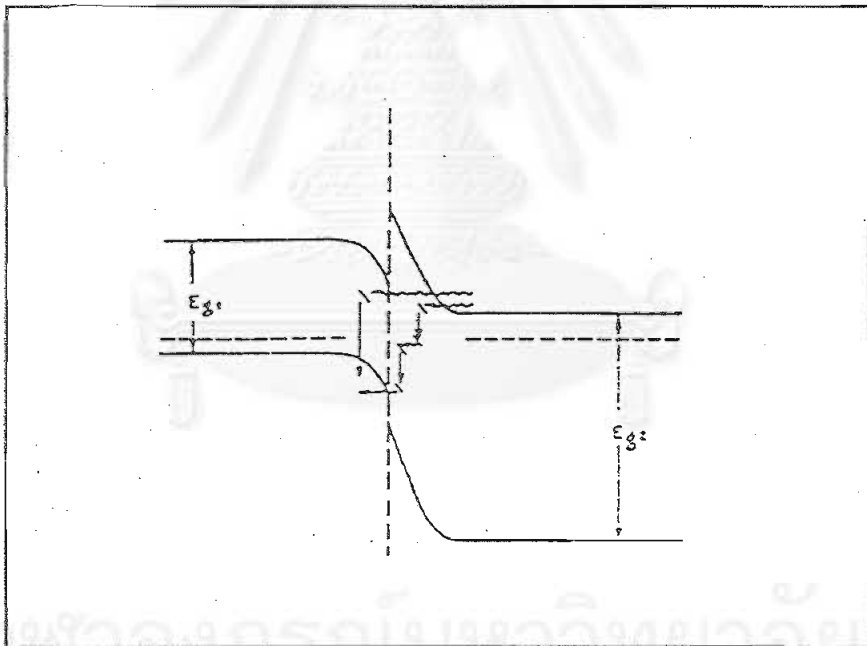
Riden และ Feucht ได้เสนอแบบจำลองการทะลุผ่าน Zener ขึ้น(แสดงดังรูป 4.9) เพื่ออธิบายพฤติกรรมกระแสของกระแสไบแอสกลับเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์และอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองนี้ร่วมกับหลักการของกำแพงศักย์เชิงเส้นและขบวนการทะลุผ่านในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ความสัมพันธ์กระแสขณะไบแอสกลับอยู่ในรูป

$$I = C \exp[-A(V_D - V)^{-1/2}] \quad (4.18)$$

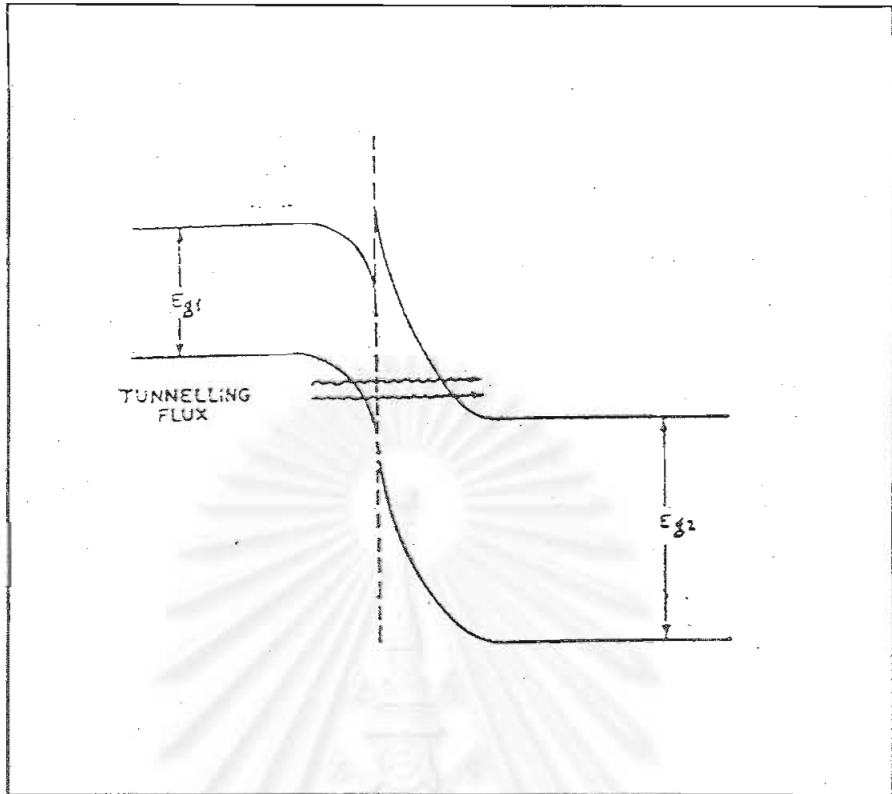
เมื่อ

$$A = \frac{4}{3\hbar} \left(\frac{m_n^* \epsilon_2}{N_{D2}} \right)^{1/2} E_{g2}^{3/2}$$

เมื่อ $m_n^*, \epsilon_2, N_{D2}$ และ E_{g2} หมายถึงค่าของสารกึ่งตัวนำเอ็น



รูปที่ 4.8 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n แบบฉับพลันเมื่อมีการไบแอสตรงโดยมีขบวนการทะลุผ่าน-ขบวนการเกิด เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ¹⁰



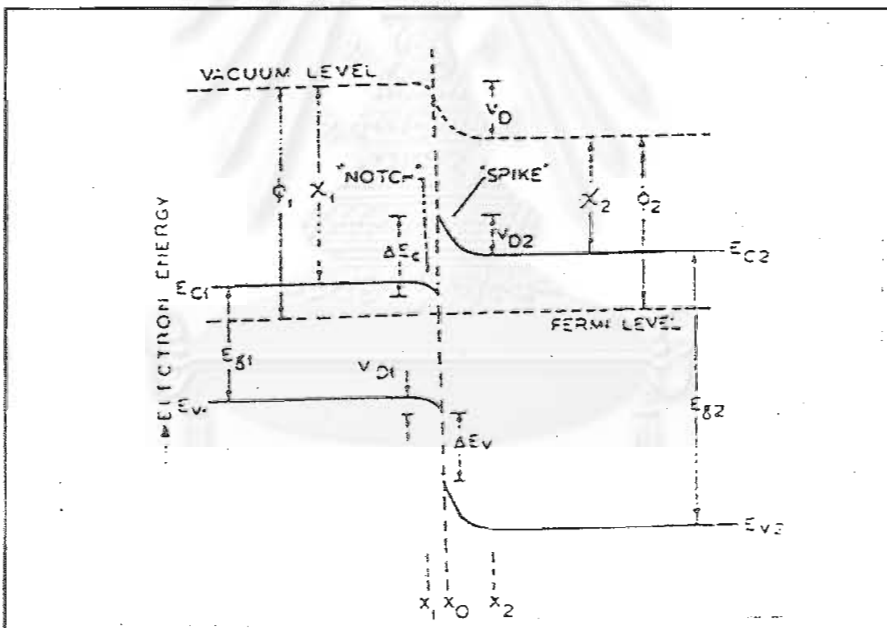
รูปที่ 4.9 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อจังก์ชัน p-n ภายใต้การไบแอสกลับแสดงให้เห็นถึง
ขบวนการทะลุผ่าน¹⁰

รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดไอโซแบบจังก์ชัน¹⁰

รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดนี้ เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n-n และ p-p โดยการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในรอยต่อของสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดจากรอยต่อชนิดนี้ เป็นผลจากพาหะข้างมาก (Majority carrier) คล้ายกับไดโอดชอตตี (Schottky diodes) ในการอธิบายการเกิดกระแสไฟฟ้าจะมีแบบจำลองที่สำคัญอยู่ 3 แบบ คือ แบบจำลองการปลดปล่อย (Emission model) แบบจำลองการแพร่ (Diffusion model) และแบบจำลองไดโอด Schottky คู่ (Double-Schottky diode model)

1. แบบจำลองการปลดปล่อย

Anderson¹⁰ เป็นผู้เสนอแบบนี้ขึ้นมาโดยแบบจำลองนี้จะไม่คำนึงถึงสถานะรอยต่อ (Interface states) รอยต่อชนิดนี้เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีชนิดของการนำไฟฟ้าที่เหมือนกันมาเชื่อมต่อกันอย่างสนิท รูปที่ 4.10 แสดงแถบพลังงานในขณะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธ์ n-n แบบฉับพลัน ที่มี spike และ notch เกิดขึ้นที่ขอบของแถบนำ ณ ตำแหน่งตรงรอยต่อ ในกรณีนี้ $\chi_1 > \chi_2$ และ $E_{g1} < E_{g2}$ โดยมีชั้นปลดปล่อยเกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าและมีชั้นสะสมประจุ (Accumulation layer) ซึ่งมีความกว้างน้อยกว่าชั้นปลดปล่อย ในสารกึ่งตัวนำที่อยู่อีกด้านหนึ่ง ความต่างศักย์จะมาจากสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่าเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 4.10 แผนภาพแถบพลังงานในสภาวะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธ์ n-n แบบฉับพลัน¹⁰

ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{D2} และ V_{D1} ในสารกึ่งตัวนำแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นดังสมการ

$$V_{D2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \frac{N_{D1}}{N_{D2}} \left[\frac{kT}{q} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{D1}}{kT}\right) - 1 \right\} - V_{D1} \right] \quad (4.19)$$

เมื่อ $V_D = V_{D1} + V_{D2}$

ϵ_1, ϵ_2 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ 1 และ 2 ตามลำดับ

N_{D1}, N_{D2} คือ ความเข้มข้นของพาหะผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำ 1 และ 2 ตามลำดับ

a คือ พื้นที่ของรอยต่อ

และความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นดังสมการ

$$I = B \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) \right] \quad (4.20)$$

เมื่อ

$V = V_1 + V_2$ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้

$$B \text{ เป็นค่าคงที่} = aqXN_{D2} (kT / 2\pi m_n^*)^{1/2}$$

X คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนตรงรอยต่อของสารทั้งสอง

m_n^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า

2. แบบจำลองการแพร่

Kumar¹⁰ ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับรอยต่อ
 วัสดุพินท์ n-n แบบฉับพลัน ดังสมการ

$$I = A \left[\frac{N_{D1}}{N_{D2}} \exp\left(\frac{qV_{D1}}{kT}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) \right\} + \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - 1 \right\} \right] \quad (4.21)$$

เมื่อ

$$A = (\mu k T N_{D2} / L_m)$$

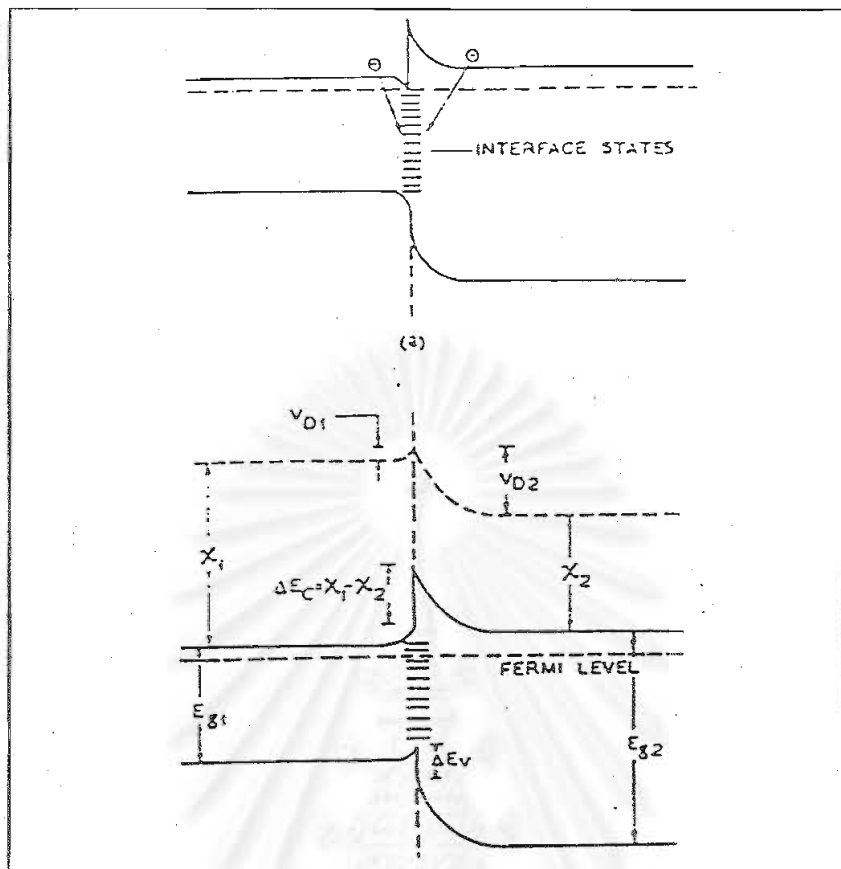
μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ 2

L_m คือ พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปกับ V และ T อย่างไม่มากนัก

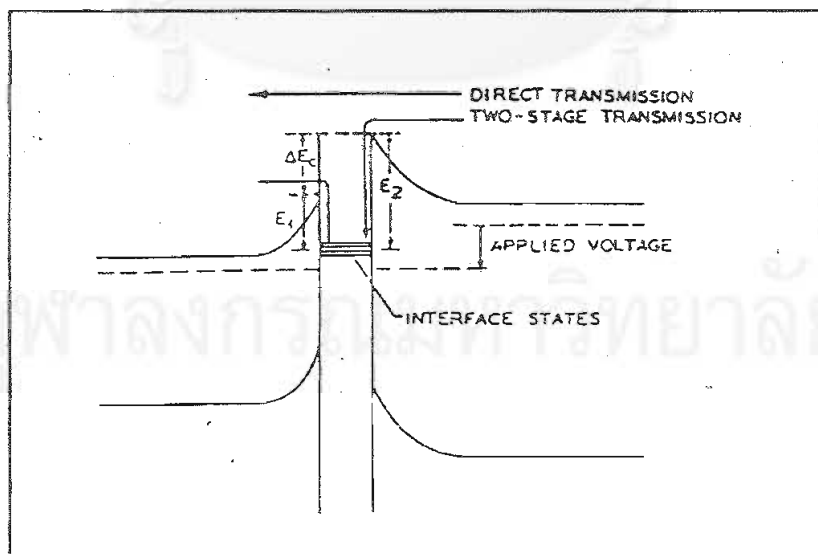
3. แบบจำลองไดโอด Schottky คู่

Oldham และ Milnes¹⁰ เป็นผู้เสนอแบบจำลองนี้ขึ้นมาโดยมีเงื่อนไขว่า มีข้อบกพร่อง (Defect) และ interfacial dislocation ทำให้เกิดสถานะตรงรอยต่อ (Interface states) การจับพาหะของสถานะตรงรอยต่อจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะอยู่ทั้งสองด้านของชั้นรอยต่อบางๆ ซึ่งก็จะเหมือนกับไดโอด 2 ตัวที่ด้านหลังประกบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 กระแสจะเกิดขึ้นโดย 2 วิธี คือ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนผ่านด้านบนของบริเวณศักย์ขวางกันโดยสถานะรอยต่อไม่ได้จับอิเล็กตรอนไว้ และอีกวิธีเป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเหนือศักย์ขวางกันด้านที่ 1 (มีช่องว่างพลังงานสูงกว่า) แล้วจับอิเล็กตรอนด้วยสถานะตรงรอยต่อ หลังจากนั้นจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนอีกครั้งผ่าน ศักย์ขวางกันด้านที่ 2 (มีช่องว่างพลังงานต่ำกว่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n ก่อนและหลังขณะสมดุล เมื่อมีสถานะตรงรอยต่อ¹⁰



รูปที่ 4.12 แผนภาพแถบพลังงานรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n ภายใต้การไบแอส แสดงวิถีการเกิดกระแสที่เป็นไปได้ 2 วิธี¹⁰

ลักษณะสมบัติของกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นดังสมการ

$$I = \frac{2I_{s1}I_{s2} \sinh(qV/2kT)}{I_{s2} \exp(qV/2kT) + I_{s1} \exp(-qV/2kT)} \quad (4.22)$$

เมื่อ

I_{s1} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด 1

I_{s2} คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด 2

ลักษณะของแถบพลังงาน (Band profiles)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบว่า ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์มีบทบาทสำคัญทำให้เข้าใจถึงกลไกการขนส่งที่เกิดขึ้น โดยหลักการพื้นฐานแล้วลักษณะของแถบพลังงานนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิลเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ_n, χ_p), ความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน (E_{gn}, E_{gp}) และ ค่าเวิร์กฟังก์ชัน (ϕ_n, ϕ_p) ของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง รูปแบบของแถบพลังงานรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เป็นไปได้เสนอโดย Anderson ซึ่งแถบพลังงานแบบต่างๆ ไม่คำนึงถึงสถานะรอยต่อ และแบบจำลองเหล่านี้จะใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาในรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบอื่นๆ ต่อไป

ลักษณะของแถบพลังงานที่จะแสดงในที่นี้จะเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n และ n-n โดยรอยต่อแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของแถบพลังงานแตกต่างกัน 4 ลักษณะ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามเงื่อนไขที่แตกต่างกันไป และจะแสดงลักษณะแผนภาพของแถบพลังงานที่มีผลจากสถานะรอยต่อ ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับประจุสุทธิของสถานะรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ เพื่อประโยชน์ต่อการพิจารณาเปรียบเทียบ

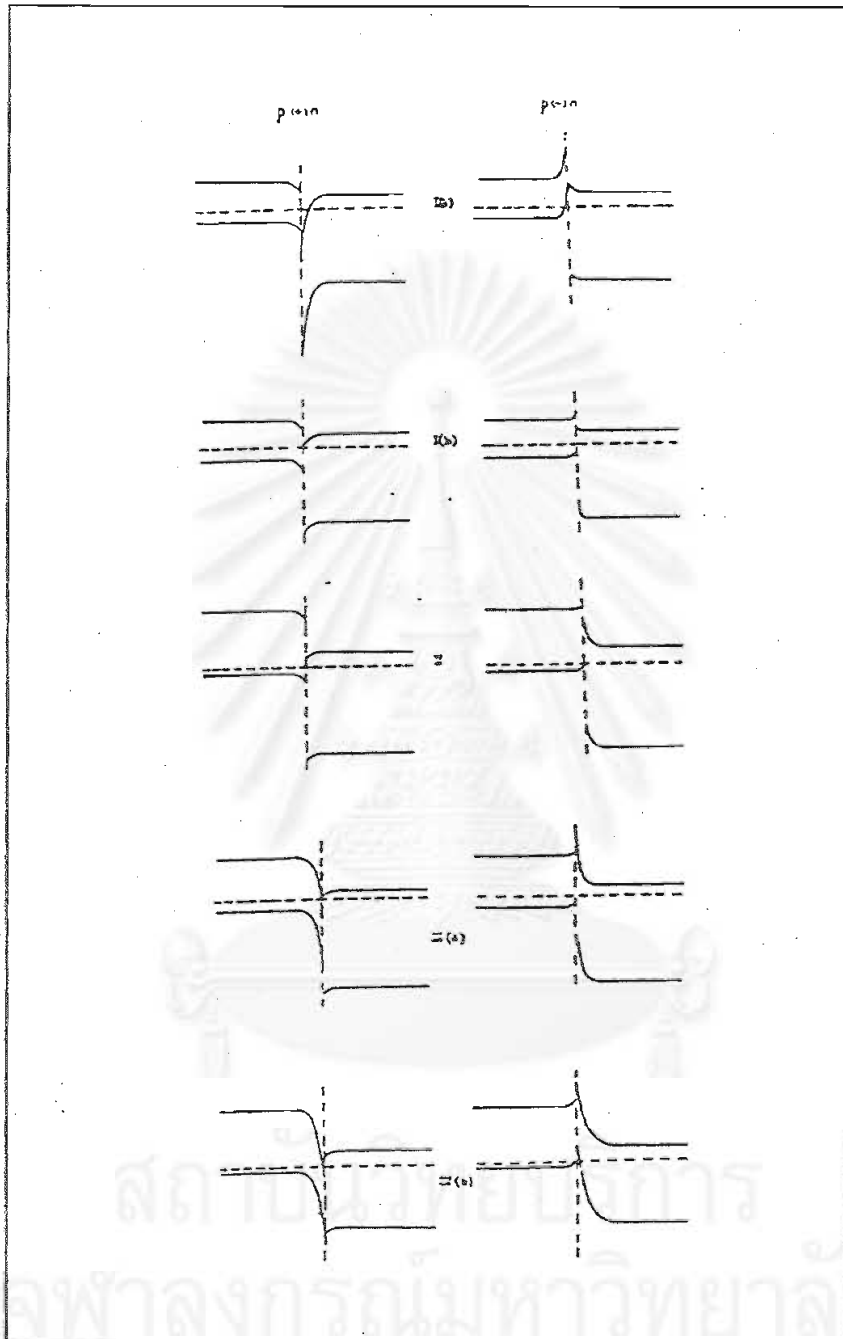
ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงานเมื่อขณะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n¹⁰ เมื่อ $E_{gp} < E_{gn}$

Case	Conditions	Current-voltage relation	Equilibrium energy band profile
I	$\chi_1 < \chi_2$ $\phi_1 < \phi_2$	(a) $\chi_2 > \chi_1 + E_{g1}$ $I = A \exp \left[-\frac{q(\Delta E_c - V_{D2})}{kT} \right]$ $\times \left[\exp \left(\frac{qV_2}{kT} \right) - \exp \left(-\frac{qV_1}{kT} \right) \right]$ where $V_D = V_{D1} + V_{D2}$ $V = V_1 - V_2$ $\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1$ $A = aqXN_{D2} \left(\frac{D_{n1}}{\tau_{n1}} \right)^{1/2}$	
		(b) $\chi_2 < \chi_1 + E_{g1}$ The expression for I is the same as in (a)	
II	$\chi_1 < \chi_2 < \chi_1 + E_{g1}$ $\phi_1 > \phi_2$	$I = A \exp \left[-\frac{q(\Delta E_c + V_D)}{kT} \right]$ $\times \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$ where the expressions for ΔE_c , V_D , V and A are the same as in case I	
III	$\chi_1 > \chi_2$ $\phi_1 > \phi_2$ $\chi_1 - E_{g1} < \chi_2 - E_{g2}$	(a) $V_{D1} > \Delta E_c$ $I = A \exp \left[-\frac{q(V_D - \Delta E_c)}{kT} \right]$ $\times \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$ where $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$ and V_D , V and A are the same as in case I. Under forward bias when $V_{D1} - V_1 < \Delta E_c$	
		$I = A \exp \left[-\frac{qV_{D2}}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_2}{kT} \right) - \exp \left(-\frac{qV_1}{kT} \right) \right]$	

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงานเมื่อขณะสมดุล
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n¹⁰ เมื่อ $E_{sp} < E_{gn}$ (ต่อ)


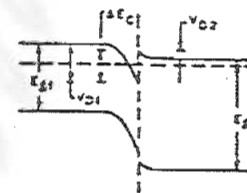
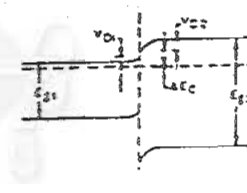

Case	Conditions	Current-voltage relation	Equilibrium energy band profile
III (cont.)		<p>(b) $V_{D1} < \Delta E_c$</p> $I = A \exp\left[-\frac{qV_{D2}}{kT}\right] \left[\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) \right]$ <p>where the expressions for ΔE_c, V_D, V and A are the same as in case III(a). Under reverse bias when $V_{D1} + V_1 > \Delta E_c$</p> $I = A \exp\left[-\frac{q(V_D - \Delta E_c)}{kT}\right] \times \left[\exp\left(-\frac{q V }{kT}\right) - 1 \right]$	
IV	$x_1 > x_2$ $x_1 < x_2 + E_{g2}$ $< x_1 + E_{g1}$	<p>(a) $V_{D1} > \Delta E_c$</p> <p>The expression for I is the same as in case III(a)</p> <p>(b) $V_{D1} < \Delta E_c$</p> <p>The expression for I is the same as in case III(b)</p>	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



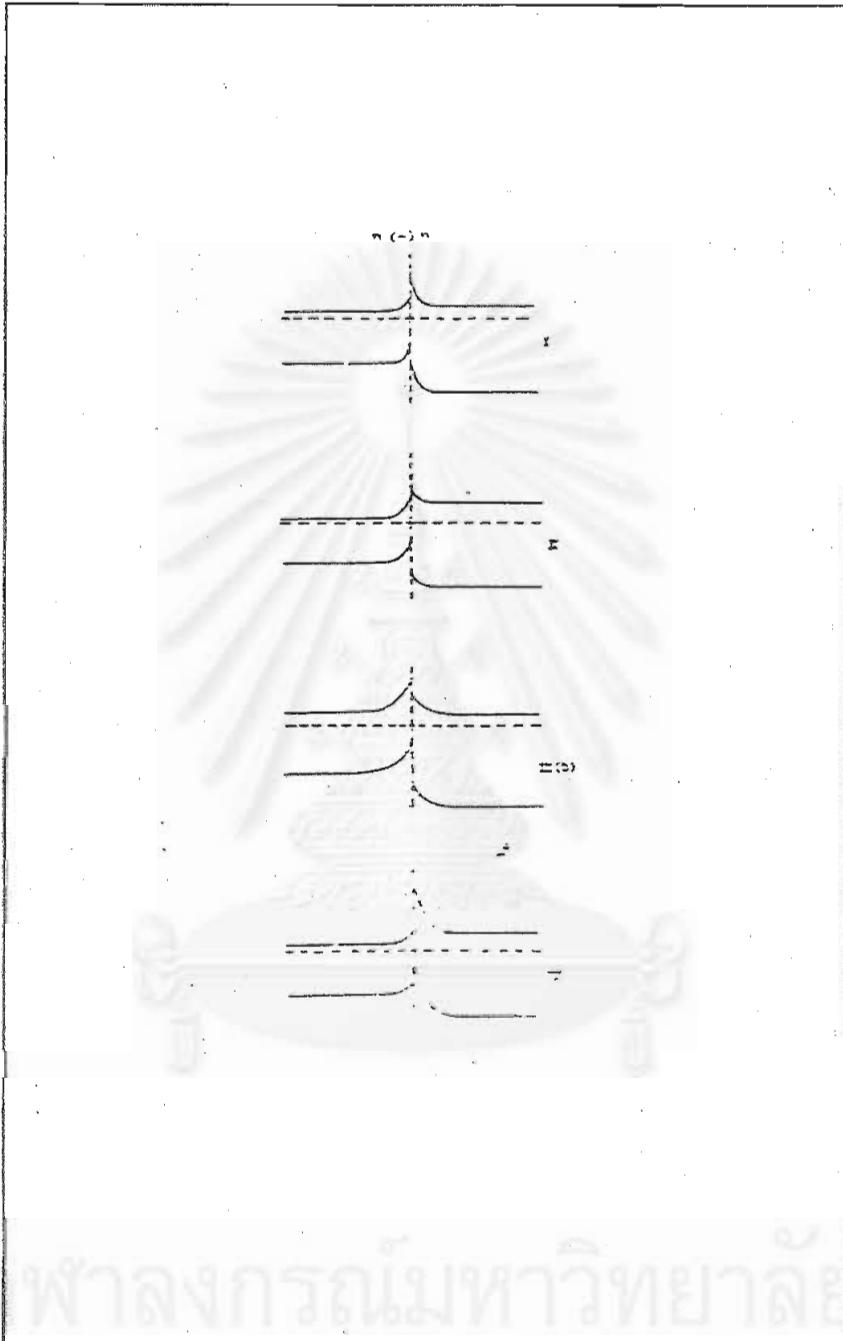
รูปที่ 4.13 แสดงแถบพลังงานเมื่อมีผลของสถานะรอยต่อ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-n เมื่อ ประจุของสถานะที่รอยต่อเป็นบวก (+) และ ลบ (-) ¹⁰

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงานเมื่อขณะสมดุล
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n¹⁰ เมื่อ $E_{g1} < E_{g2}$

Case	Conditions	Current-voltage relation	Equilibrium energy band profile
I	$\chi_1 > \chi_2$ $\phi_1 > \phi_2$ $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$	(a) $V_{D1} < \Delta E_c$ $I = B \exp\left[-\frac{qV_{D2}}{kT}\right] \times \left[\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_1}{kT}\right) \right]$ where [refer to eqn. (1.26)] $V_D = V_{D1} + V_{D2}$ $V = V_1 - V_2$ $B = aqXN_{D2} \left(\frac{kT}{2\pi m_0}\right)^{3/2}$	 <p>For forward bias smaller band gap +ive</p>  <p>For forward bias smaller band gap +ive</p>
		(b) $V_{D1} > \Delta E_c$ $I = B \exp\left[-\frac{q(V_D - \Delta E_c)}{kT}\right] \times \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$ where $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$ and V_D , V and B are the same as in (a)	
II	$\chi_1 > \chi_2$ $\phi_1 < \phi_2$ $\chi_1 - E_{g1} < \chi_2 - E_{g2}$	$I = B \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$ where the expressions for B and V are the same as in case I	 <p>For forward bias larger band gap +ive</p>
III	$\chi_1 < \chi_2$ $\phi_1 < \phi_2$ $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2$	(a) $V_{D2} > \Delta E_c$ $I = B \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$ where the expressions for B and V are the same as in case I Under forward bias when $V_{D2} - V_2 < \Delta E_c$ $I = B \exp\left[-\frac{q(\Delta E_c - V_{D2})}{kT}\right] \times \left[\exp\left(\frac{qV_1}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{qV_2}{kT}\right) \right]$ where $\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1$ and the expressions for B , V_D and V are the same as above	 <p>For forward bias larger band gap +ive</p>

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกี่ยวข้องในแถบพลังงานเมื่อขณะสมดุลของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-n¹⁰ เมื่อ $E_{g1} < E_{g2}$ (ต่อ)

Case	Conditions	Current-voltage relation	Equilibrium energy band profile
III (cont.)		<p>(b) $V_{D2} < \Delta E_s$</p> $I = B \exp \left[-\frac{q(\Delta E_s - V_{D2})}{kT} \right]$ $\times \left[\exp \left(\frac{qV_1}{kT} \right) - \exp \left(-\frac{qV_2}{kT} \right) \right]$ <p>where $\Delta E_s = \chi_2 - \chi_1$ and the expressions for B, V_D and V are the same as in case I</p>	<p>For forward bias larger band gap +ive</p>
IV	$\chi_1 > \chi_2$ $\phi_2 > \phi_1$ $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$	<p>The expression for I is the same as in case I(a)</p>	<p>For forward bias smaller band gap +ive</p>



รูปที่ 4.14 แสดงแถบพลังงานเมื่อมีผลของสถานะรอยต่อ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $n-n$ เมื่อ
ประจุของสถานะที่รอยต่อเป็นลบ $(-)^{10}$

ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์

1. รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดแอนไอโซ

ผลจากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดนี้ จะทำให้เราทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและรอยต่อ ชนิดของรอยต่อและค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างรอยต่อนั้น โดยลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ในอุดมคตินั้นจะมีลักษณะเป็นไปตามข้อสมมติฐาน 4 ข้อ^{6,10} คือ

1. บริเวณรอยต่อเป็นแบบจับพลัน กล่าวคือ ค่าศักย์ก่อกั้นภายในและศักย์ที่ไบแอสเข้าไปจะอยู่ในชั้นของไดโพลด้วยขอบเขตแบบจับพลัน และที่บริเวณนอกเขตนั้นสารกึ่งตัวนำจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. เป็นไปตามการประมาณของโบลซ์มานน์ ตลอดทั่วทั้งช่วงดีพลีชันจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของโบลซ์มานน์
3. ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยที่ฉีดเข้ามาเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสเกิดขึ้นในบริเวณดีพลีชันและกระแสอิเล็กตรอนและโฮลคงที่ ตลอดบริเวณดีพลีชัน

เมื่อพิจารณาตามความสัมพันธ์ของโบลซ์มานน์ที่สมดุลความร้อน

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \equiv n_i \exp\left[\frac{q(\psi - \phi)}{kT}\right] \quad (4.23a)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \equiv n_i \exp\left[\frac{q(\phi - \psi)}{kT}\right] \quad (4.23b)$$

เมื่อ ψ, ϕ เป็นศักย์ที่สอดคล้องกับระดับพลังงานเฟอร์มิอินทรินสิกและระดับพลังงานเฟอร์มิ โดย $\psi \equiv -E_i / q$, $\phi \equiv -E_F / q$ ที่สมดุลทางความร้อน ค่าของผลคูณ pn จากสมการที่ (4.23a) และ (4.23b) จะมีค่าเท่ากับ n_i^2 และเมื่อมีการไบอัสศักย์ใส่เข้าไปในระบบ

จะทำให้ความหนาแน่นพาหะข้างน้อยของทั้งสองด้านมีการเปลี่ยนแปลงไป และค่าของผลคูณ pn จากสมการข้างต้นจะมีค่าไม่มากกว่า n_i^2 ซึ่งเราจะได้ดังสมการ

$$n \equiv n_i \exp\left[\frac{q(\psi - \phi_n)}{kT}\right] \quad (4.24a)$$

$$p \equiv n_i \exp\left[\frac{q(\phi_p - \psi)}{kT}\right] \quad (4.24b)$$

เมื่อ $q\phi_n, q\phi_p$ เป็นระดับกึ่งพลังงานเฟอร์มิ (Quasi-Fermi levels) สำหรับ อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ จากสมการที่ (4.24a) และ (4.24b) จะได้

$$\phi_n \equiv \psi - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \quad (4.25a)$$

$$\phi_p \equiv \psi + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (4.25b)$$

ดังนั้น ผลคูณ pn จึงเป็น

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{q(\phi_p - \phi_n)}{kT}\right) \quad (4.26)$$

สำหรับการไบแอสตรง $\phi_p - \phi_n > 0$ และ $pn > n_i^2$

สำหรับการไบแอสกลับ $\phi_p - \phi_n < 0$ และ $pn < n_i^2$

จากสมการความหนาแน่นกระแส $J_n = q\mu_n(n\xi + \frac{kT}{q}\nabla n)$ เมื่อ $\xi = -\nabla\psi$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n n(-\nabla\psi) + q\mu_n \frac{kT}{q} \left[\frac{qn}{kT} (\nabla\psi - \nabla\phi_n) \right] \\ &= -q\mu_n n \nabla\phi_n \end{aligned} \quad (4.27)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$J_p = -q\mu_p n \nabla \phi_p \quad (4.28)$$

จากสมการ (4.27) และ (4.28) ณ ขณะสมดุลจะได้ว่า $\phi_n = \phi_p =$ ค่าคงที่ ดังนั้น

$$J_n = J_p = 0$$

ลักษณะของศักย์และความเข้มข้นของพาหะของรอยต่อ p-n ขณะไบแอสตรงและไบแอสกลับแสดงดังรูปที่ 4.15 ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างรอยต่อนี้กำหนดโดย

$$V = \phi_p - \phi_n \quad (4.29)$$

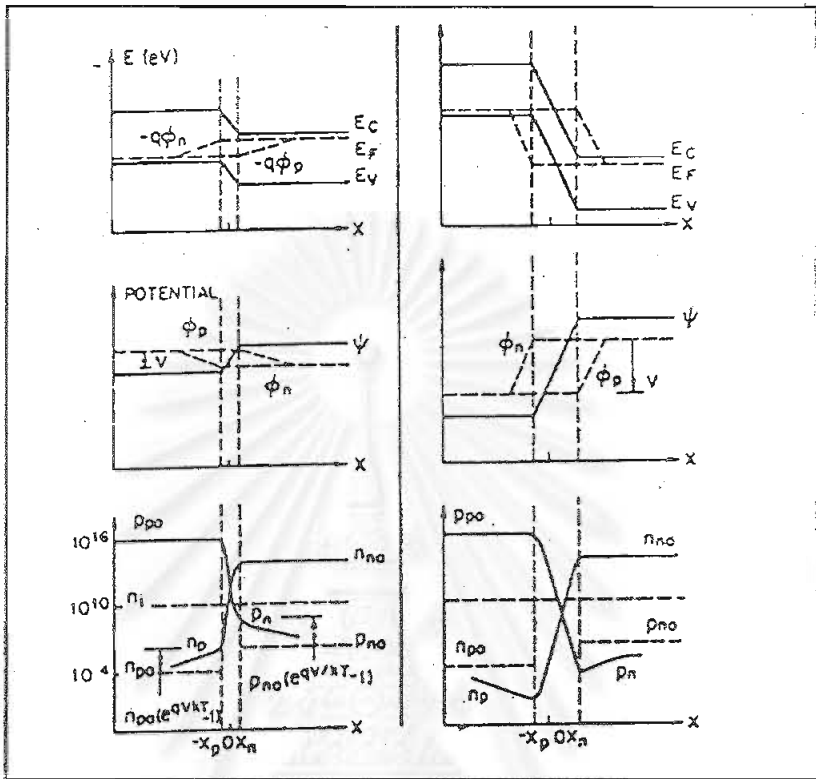
จากสมการที่ (4.26) และ (4.29) จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบเขตของบริเวณดีพลีชันบนด้านที่ ($x = -x_p$)

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (4.30)$$

เมื่อ n_{po} คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สมดุลบนด้าน p และทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของโฮลจะเป็น

$$p_n = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (4.31)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 แถบพลังงานและการกระจายของพาหะภายใต้เงื่อนไขการไบแอสตรงและไบแอสกลับ ¹⁰

เนื่องจากสมมติฐานข้อที่ 3 ที่ว่า $p_n \ll n_n \approx n_{no}$ ในสารกึ่งตัวนำชนิด n จะได้ว่า

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} = 0 \quad (4.32)$$

ในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าหรือบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการที่ (4.32) จะมีรูปเป็น

$$\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (4.33)$$

คำตอบของสมการที่ (4.33) โดยมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นตามสมการที่ (4.31) และ $p_n(x = \infty) = p_{no}$

$$p_n - p_{no} = p_{no} (e^{qV/kT} - 1) e^{-(x-x_0)/L_p} \quad (4.34)$$

เมื่อ

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p} \quad (4.35)$$

และที่ $x = x_n$, ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนจะเป็น

$$J_p = -qD_p \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_{x_n} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} (e^{qV/kT} - 1) \quad (4.36)$$

ในทำนองเดียวกัน

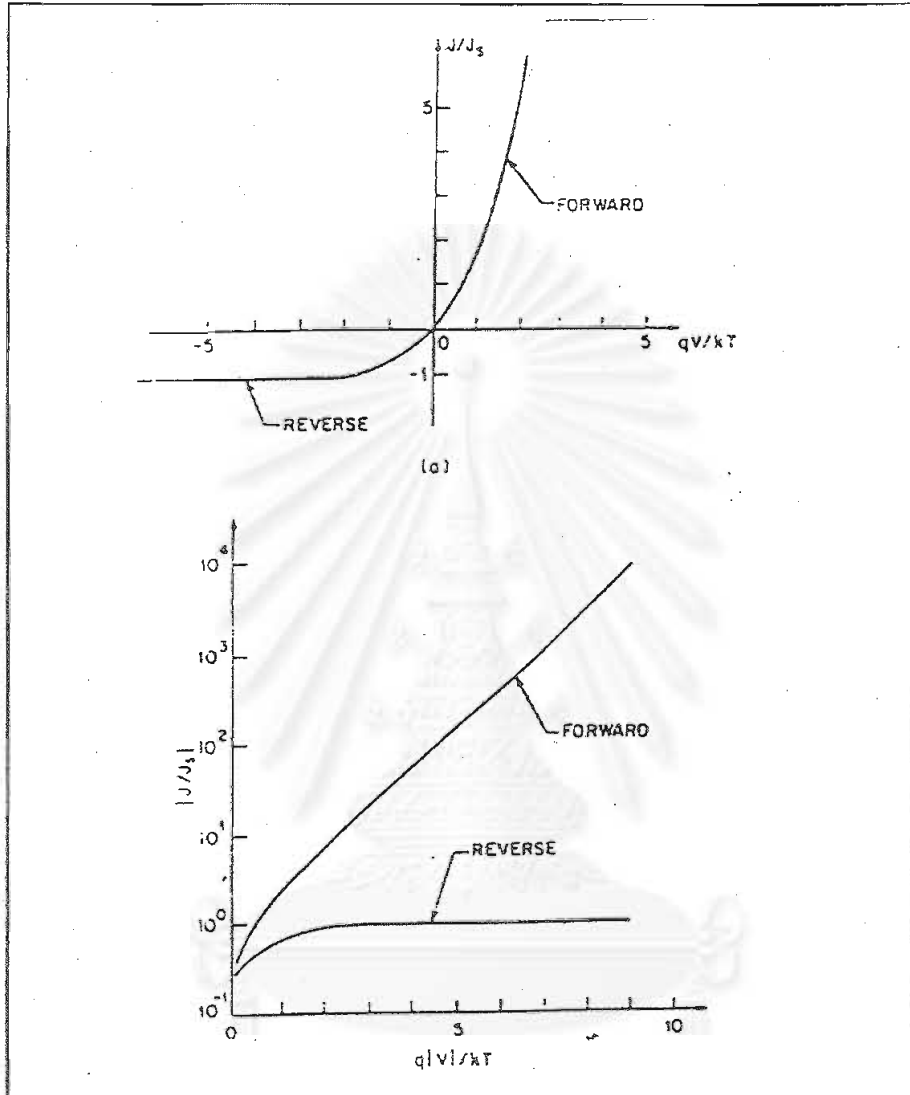
$$J_n = qD_n \left. \frac{\partial n_p}{\partial x} \right|_{-x_p} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} (e^{qV/kT} - 1) \quad (4.37)$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิที่ผ่านรอยต่อที่เป็นผลรวมของสมการที่ (4.36) และ (4.37)

$$J = J_p + J_n = J_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (4.38)$$

$$J_s \equiv \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \quad (4.39)$$

สมการที่ (4.39) เป็นที่รู้จักกันดี เรียกว่าสมการช็อคเลย์ (Shockley equation) สำหรับไดโอดในอุดมคติ ความสัมพันธ์ของกระแส-ความต่างศักย์แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าขณะเมื่อไบแอสตรงกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับค่า V และเมื่อไบแอสกลับความหนาแน่นกระแสจะลดลง จนกระทั่งอิมิตัวที่ค่า $J = -J_s$



รูปที่ 4.16 ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าในอุณหภูมิต่างกัน¹⁰

2. รอยต่อวิธีพันธุชนิดไอโซ ¹⁰

ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อวิธีพันธุชนิดไอโซ จะแตกต่างกับลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อวิธีพันธุชนิดแอนไอโซ โดยลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อวิธีพันธุชนิดนี้ จะขึ้นอย่างมากกับความเข้มข้นสารเจือผู้ให้ที่อยู่ในทั้งสองข้างของรอยต่อและการแสดงผลของสถานะรอยต่อ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการอาบเคลือบด้วยสารเคมี

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS)นั้น มีวิธีการที่ใช้ในการเตรียมอยู่หลายวิธีการ¹¹ อาทิ การระเหยความร้อนในสุญญากาศ, sputtering, CVD, spray deposition, electrodeposition, screen printing และการอาบเคลือบด้วยสารเคมี (Chemical bath deposition, CBD) ซึ่งวิธีCBDเป็นวิธีการที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางCdSที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมฟิล์มและสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ¹² ไม่เกิน 100 °C นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางCdS ที่เตรียมโดยวิธีการCBD มีข้อได้เปรียบดังต่อไปนี้¹³ คือ

(1) ฟิล์มบาง CdS ที่ได้จะปกคลุมผิวหน้าที่ขรุขระของชั้นดุกดกั้นแสงได้ทั้งหมด ซึ่งชั้นดุกดกั้นแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Cu(In,Ga)Se₂ โดยความบางของฟิล์มบางCdS ที่น้อยที่สุดที่สามารถปกคลุมผิวหน้าของชั้นดุกดกั้นแสงได้ทั้งหมด มีค่าอยู่ที่ประมาณ 10 nm

(2) ฟิล์มบางCdS สามารถป้องกันการทำลายผิวหน้าและปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อชั้นดุกดกั้นแสงในขั้นตอนของการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) ด้วยวิธี Sputtering

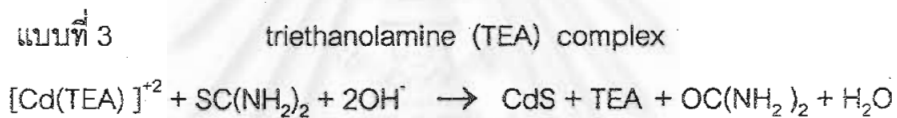
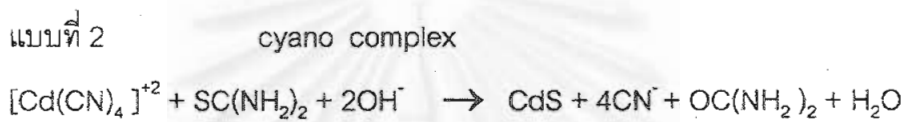
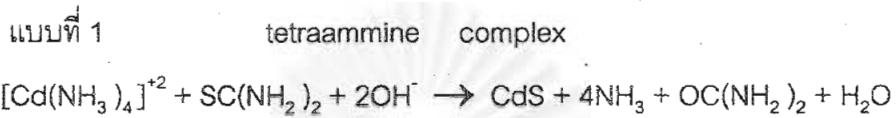
(3) ในกระบวนการการเตรียมฟิล์มบางCdS โดยวิธีCBD จะกำจัดออกไซด์ตามธรรมชาติ (Natural oxide)จากผิวหน้าของฟิล์มบางCu(In,Ga)Se₂ ทำให้มีการสร้างประจุบวกบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางและผลที่เกิดขึ้นตามมาคือ การกลับกันของชนิดการนำไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของ CdS /Cu(In,Ga)Se₂

(4) แคดเมียมไอออนCd²⁺ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการCBD จะช่วยกำจัดธาตุ Se ในฟิล์มบางCu(In,Ga)Se₂ โดย Cd²⁺ จะรวมตัวกันกับ Se โดยอยู่ในรูปของ CdSe

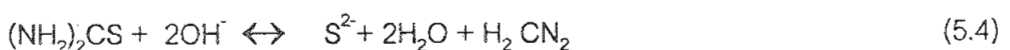
วิธีการอาบเคลือบด้วยสารเคมี (Chemical bath deposition, CBD)

วิธีการของ CBD คือ วิธีการที่จุ่มแผ่นรองรับ (Substrate) ลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือของแคดเมียม เช่น CdSO₄, CdCl₂, C₄H₆CdO₄, CdI₂ เป็นต้น ร่วมกับไทโอยูเรีย(SC(NH₂)₂) ซึ่งจะแตกตัวให้อิออนของซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่ำที่ไม่เกิน100°C ในสารละลายที่มีความเป็นเบส pH> 9 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางCdS เกิดจากการรวมตัวกันของCd²⁺ ที่แตกตัวมาจากเกลือของแคดเมียมซึ่งอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนและS²⁻ ที่แตกตัวมาจากไทโอยูเรียในสารละลายอย่างช้าๆ การเคลือบเป็นฟิล์มบางของCdS จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของ

Cd^{2+} และ S^{2-} มากเกินกว่าค่าผลิตภัณฑ์ของการละลายของ CdS (Solubility Product; K_{sp}) ซึ่งค่า K_{sp} ของ CdS ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีค่าประมาณ 1.4×10^{-29} จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Cd^{2+} กับ S^{2-} เกิดเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ เนื่องจากเกลือของแคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีจึงมีหลายแบบ เช่น ^{14,15}



แต่ส่วนมากนิยมใช้เกลือของแคดเมียมที่อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน tetraammine สำหรับงานวิจัยนี้การเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปแบบที่ 1 เนื่องจากฟิล์มบาง CdS ที่ได้นั้นเตรียมขึ้นมาจาก Cd^{2+} ของเกลือแคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) กับ S^{2-} ของไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) ในสารละลายแอมโมเนีย ซึ่งรายละเอียดของการเกิดปฏิกิริยาในกรณีนี้จะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



การเคลือบฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับมี 2 รูปแบบ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการเกิด คือ^{15,16}

1. กระบวนการควบคุมแน่นของไอออนระหว่าง Cd^{2+} กับ S^{2-} เมื่อพิจารณาสมการที่ (5.1) พบว่า NH_3 ในสมการนี้จะทำให้สารละลายมีสมบัติเป็นเบสและเมื่อเติมเกลือของแคดเมียมลงไป จะทำให้แคดเมียมที่เติมลงไปอยู่ในรูปของสารแขวนลอย $Cd(OH)_2$ ดังสมการที่ (5.2) ซึ่ง $Cd(OH)_2$ นี้จะมีลักษณะเป็นสีขาวและจะเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรองรับ นอกจากนี้เกลือของแคดเมียมยังอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน $Cd(NH_3)_4^{+2}$ ซึ่งจะปลดปล่อย Cd^{2+} ออกมาอย่างช้าๆ ดังสมการที่ (5.3) ส่วน S^{2-} จะได้มาจากการแตกตัวของไทโอยูเรีย $((NH_2)_2CS)$ โดยกระบวนการการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) ดังแสดงในสมการที่ (5.4) ซึ่งอัตราการแตกตัวขึ้นกับค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย ฟิล์ม CdS จะเกิดขึ้นเมื่อ Cd^{2+} กับ S^{2-} ทำปฏิกิริยากันและควบคุมแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ หรือเกิดจาก S^{2-} ดูดซับสารแขวนลอย $Cd(OH)_2$ ที่เกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรองรับแล้วควบคุมแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนผิวของแผ่นรองรับ ซึ่งกระบวนการนี้จะได้ CdS เป็นฟิล์มบาง

2. กระบวนการดูดซับอนุภาคคอลลอยด์ของ CdS เมื่อเติมเกลือของแคดเมียมและไทโอยูเรียลงไปในภาชนะบรรจุสารเคมี และในภาชนะบรรจุสารเคมีจะมีสารละลายของไอออน Cd^{2+} และ S^{2-} ซึ่งจะทำให้เกิดคอลลอยด์ของ CdS คอลลอยด์นี้จะไปเกาะที่ผิวของแผ่นรองรับ และจะถูกดูดซับเป็นชั้นของ CdS บนผิวของแผ่นรองรับ และสิ้นสุดการดูดซับเมื่อคอลลอยด์จับตัวกันและตกตะกอนเป็นอนุภาค CdS ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ชั้นของ CdS ที่ได้ในกระบวนการนี้มีลักษณะเป็นผง

ตัวแปรที่มีบทบาทต่อการเตรียมฟิล์มบาง CdS

ก่อนที่จะขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CdS จำเป็นที่จะต้องทราบเกี่ยวกับตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอาบเคลือบด้วยสารเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. สารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอาบเคลือบสารด้วยสารเคมี ประกอบด้วยสารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$), สารละลายแอมโมเนีย (NH_3) และ

สารละลายไทโอยูเรีย(SC(NH₂)₂) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายทั้งสามจะมีบทบาทมากต่อกระบวนการเตรียมฟิล์มบางCdS โดยเฉพาะสารละลายแอมโมเนียและสารละลายไทโอยูเรีย

สำหรับบทบาทของสารละลายแอมโมเนียจะพิจารณาได้จากปฏิกิริยาเคมีในรูปของสารเชิงซ้อน tetraammine ที่ทำให้เกิดฟิล์มบางCdS พบว่า¹⁷



สารประกอบเชิงซ้อน Tetra-amminecadmium ion $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{+2}$ จะเกิดขึ้นเมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียที่เพียงพอกับ Cd^{2+} ที่เกิดจากเกลือของแคดเมียมซัลเฟต ดังสมการ (5.3) นอกจากนี้ปริมาณของเกลือแอมโมเนียที่เหมาะสมจะทำให้ $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{+2}$ มีความเสถียร, ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้าลง และยับยั้งการเกิดของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ เนื่องจากความหนาของฟิล์มบางในวิธีการCBD นี้จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีการยับยั้งการเกิดของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$

สำหรับสารละลายไทโอยูเรียนั้นพบว่าสารเจือปนที่อยู่ภายในสารละลายไทโอยูเรียจะส่งผลกระทบต่อเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์ (Device) ที่เตรียมขึ้นมา โดยเฉพาะลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ เป็นชั้นดูดกลืนแสง¹⁸

2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ(Bath) จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของสารละลายผสมระหว่างสารละลายแคดเมียมซัลเฟต สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายไทโอยูเรียในบีกเกอร์ โดยอุณหภูมิของน้ำในอ่างจะแตกต่างกับอุณหภูมิของสารละลายผสมในบีกเกอร์ ณ เวลาสิ้นสุดของการเตรียมประมาณ 3-5 °C ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเตรียมฟิล์มบางCdS ทั้งนี้อุณหภูมิของสารละลายผสมจะมีผลต่อความหนาและความเป็นผลึก (Crystallinity) ของฟิล์มบาง¹⁹ โดยเมื่ออุณหภูมิของสารละลายผสมสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มบางจะเพิ่มมากขึ้น เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของสารละลายผสม²⁰ แต่ความหนาของฟิล์มบางจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว และยังพบอีกว่าเมื่อเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 70° C ขึ้นไป ฟิล์มบางCdS ที่ได้จะมีความเป็นผลึกสูงขึ้นด้วยโดยดูจาก peak ของลวดลายการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ของฟิล์มบาง CdS¹⁹ นอกจากนี้อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายผสมยังส่งผลต่อการเตรียมฟิล์มบางด้วย เพราะถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของ

สารละลายผสมสูง จะทำให้เกิดตะกอนขนาดใหญ่ในสารละลาย ส่งผลทำให้ฟิล์มที่ได้มีคราบของฝุ่นผงขนาดเล็กเกาะอยู่และไม่สามารถล้างออกได้ ดังนั้นอุณหภูมิของสารละลายเริ่มต้น ซึ่งก็คืออุณหภูมิห้องไม่ควรจะสูงเกิน 26°C ในงานวิจัยนี้อุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมความอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการเตรียมฟิล์มบาง Cds อยู่ที่ 60°C

3. pH ของสารละลายผสม

pH ของสารละลายผสมจะส่งผลต่อความหนาของการส่งผ่านแสง (Optical Transmission) และความเป็นผลึกของฟิล์มบาง Cds¹⁹ โดยความหนาของฟิล์มบางจะแปรผันตรงกับ pH ของสารละลายผสม แต่จะไม่แตกต่างกันมากเมื่อ pH ของสารละลายผสมอยู่ในช่วง 8-10 ส่วนค่าการส่งผ่านแสงจะไม่แปรผันตาม pH ของสารละลายผสม โดยพบว่าที่ค่า pH อยู่ใน ช่วง 8-9 ค่าการส่งผ่านแสงจะต่ำและจะสูงที่สุดที่ pH 7 และที่ pH 10 ขึ้นไปค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะมีค่าสูงแต่น้อยกว่าที่ pH 7 และสำหรับ peak ของลวดลายการเลี้ยวเบนจะปรากฏเมื่อ pH มีค่าอยู่ในช่วง 8-9 ที่ค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้จะไม่ปรากฏ peak ของลวดลายการเลี้ยวเบน ซึ่งค่า pH ของสารละลายผสมจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลายแอมโมเนียเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อต้องการเพิ่ม pH ของสารละลายผสมสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้ผสมกับสารละลายอีกสองชนิดในการเตรียมฟิล์มบาง Cds¹⁹ หรือเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียตั้งแต่เริ่มต้น สำหรับงานวิจัยนี้ค่า pH ของสารละลายผสมมีค่าประมาณ 11.5 โดยใช้กระดาษบิสมาทที่มีความละเอียดในการวัด

4. ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง

เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธี CBD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเริ่มจุ่มแผ่นรองรับลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายผสมอยู่ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำบีกเกอร์แช่ลงในอ่างที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ค่าหนึ่ง ดังนั้นระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบางจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิของสารละลายจะแปรผันตรงกับระยะเวลาการเตรียม ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มบาง และยังพบว่าค่า pH ของสารละลายจะแปรผันกับระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง¹⁷ นอกจากนั้นระยะเวลาของการเตรียมฟิล์มบางยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และความหนาของฟิล์มบาง Cds ที่ต้องการศึกษา

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

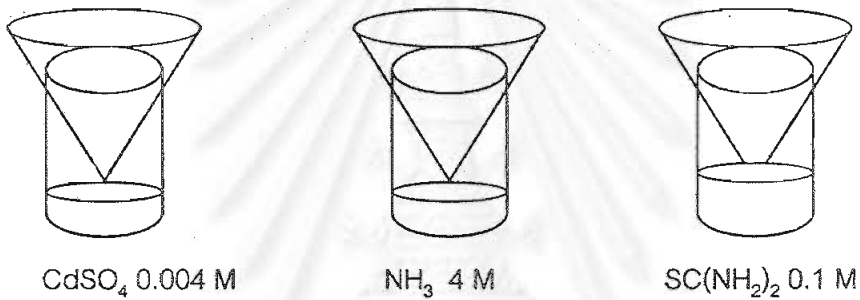
ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางCdS ที่จะกล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไปนี้เป็นขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมที่สุดต่อการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับใช้เป็นชั้นกันชน (Buffer layer) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี Cu(In,Ga)Se_2 เป็นชั้นดูดกลืนแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการเตรียมฟิล์มบางCdS ที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันถึง 10 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงเงื่อนไขที่สำคัญในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ แบบต่างๆ

แบบ	ความเข้มข้นของสารละลาย (M) ($\text{CdSO}_4 : \text{NH}_3 : \text{SC(NH}_2)_2$)	ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการ เตรียมฟิล์มบาง 1 ครั้ง (cm^3) ($\text{CdSO}_4 : \text{NH}_3 : \text{SC(NH}_2)_2$)	อุณหภูมิ bath ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที่)
1.	(0.005 : 2.5 : 0.5)	(120 : 160 : 120)	64.5	15
2.	(0.005 : 2.5 : 0.5)	(120 : 190 : 120)	70.0	20
3.	(0.005 : 2.5 : 0.5)	(120 : 160 : 120)	60.0	15
4.	(0.005 : 2.5 : 0.5)	(120 : 190 : 120)	70.0	15
5.	(0.005 : 2.5 : 0.5)	(120 : 180 : 120)	75.2	15
6.	(0.004 : 4.0 : 0.06) มี ultrathin ของ $\text{SC(NH}_2)_2$ 0.1 M	(40 : 40 : 80)	60	10
7.	(0.004 : 4.0 : 0.06) มี ultrathin ของ $\text{SC(NH}_2)_2$ 0.1 M	(40 : 40 : 80)	62	12.5
8.	(0.004 : 4.0 : 0.06)	(40 : 40 : 80)	60	10
9.	(0.004 : 4.0 : 0.03)	(40 : 40 : 80)	60	12
10.	(0.004 : 4.0 : 0.01)	(40 : 40 : 80)	60	25

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางมีดังนี้

1. ต้มน้ำกลั่นที่อยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยตั้งอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60°C และระดับน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิต้องอยู่สูงกว่าระดับสารละลายผสมภายในบีกเกอร์
2. นำสารละลายทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ CdSO_4 0.004M, NH_3 4 M และ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ มาแยกกรองผ่านกระดาษกรองลงในบีกเกอร์เพื่อป้องกันฝุ่นผงที่อาจจะอยู่ในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการกรองสารละลายทั้ง 3 ชนิด

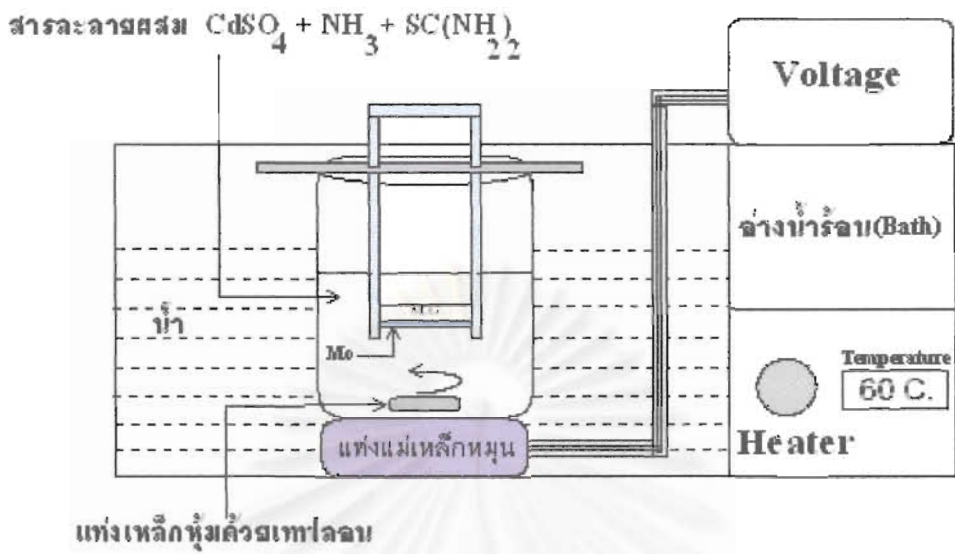
3. นำสารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.1 M ที่ผ่านการกรองแล้วมาเจือจางให้เหลือความเข้มข้น 0.06 M โดยใช้หลอดจีดียาขนาด 20 cm^3 ตวงสารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.1 M จำนวน 48 cm^3 ผสมกับน้ำดีไอออไนซ์ 32 cm^3 จะได้สารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.06M จำนวน 80 cm^3
4. ตวงสารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.1 M จำนวน 140 cm^3 ลงในบีกเกอร์ เพื่อนำไปใช้ในการทำชั้นฟิล์มบางมาก (ultrathin layer)
5. ตวงสารละลาย CdSO_4 0.004 M จำนวน 40 cm^3 ลงในบีกเกอร์ หลังจากนั้นตวงสารละลาย NH_3 4 M จำนวน 40 cm^3 ตามลงไป

6. นำแผ่นรองรับจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.1 M จำนวน 140 cm^3 บรรจุอยู่ เพื่อเตรียมชั้น ultrathin โดยคว่ำผิวหน้าของแผ่นรองรับให้อยู่ในแนวระนาบแต่ก่อนที่จะใส่แผ่นรองรับให้ใส่ตัวกวนสาร (Stirrer) ที่เป็นแท่งแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.2 ลงในบีกเกอร์ก่อนนำบีกเกอร์วางลงที่แท่นทรงกระบอกที่ภายในบรรจุด้วยแม่เหล็กและมอเตอร์ ที่อยู่ภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิ แล้วกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที



รูปที่ 5.2 แสดงตัวกวนสาร (Stirrer) ที่ใช้ในการกวนสารละลาย

7. ขณะที่รอการทำชั้น ultrathin ใกล้เคียงครบเวลา 1 นาที 30 วินาที ให้เทสารละลาย $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 0.06 M จำนวน 80 cm^3 ที่อยู่ในบีกเกอร์ขนาด 400 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 cm^3 ที่มีสารละลาย CdSO_4 0.004M จำนวน 40 cm^3 และสารละลาย NH_3 4 M จำนวน 40 cm^3 บรรจุอยู่ เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง วัดค่า pH และอุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายผสม เมื่อครบกำหนดเวลาของการทำชั้น ultrathin ให้นำแผ่นรองรับและแท่งแม่เหล็กขึ้นจากสารละลายไทโอยูเรีย และจุ่มลงในสารละลายผสมในลักษณะเดียวกันกับการทำชั้น ultrathin กวนสารละลายเป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงวิธีการอบเคลือบสารเคมี (Chemical bath deposition, CBD)

8. หลังครบกำหนดเวลาให้นำแผ่นรองรับออกจากสารละลาย และแกว่งลงในน้ำดีไอออนไนซ์ที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 1000cm^3 แล้วยกขึ้น เทน้ำดีไอออนไนซ์ที่สะอาดลงบนผิวหน้าของฟิล์มบางเพื่อล้างฝุ่นผงที่อาจจะเกาะติดขึ้นมา หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

บทที่ 6

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านชั้นฟิล์มบาง CdS ของโครงสร้างที่แตกต่างกันจำนวน 3 โครงสร้างหลักได้แก่ Mo/CdS/ZnO(Al)/Au, Au/CdS/ZnO(Al)/Au และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(Al)/Au ซึ่งจะแบ่งโครงสร้างเหล่านี้เป็นโครงสร้างย่อยดังนี้

1. Soda-lime glass (SLG)/CdS
2. Mo/CdS/Au
3. Mo/CdS/ZnO(Al)/Au
4. Au/CdS/Au
5. Au/CdS/ZnO(Al)/Au
6. Mo/Cu(In,Ga)Se₂/Au
7. Mo/ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au
8. Cu(In,Ga)Se₂/CdS/ZnO(Al)/Au

การเตรียมโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

1. การเตรียมแผ่นรองรับ แบ่งเป็น 4 แบบ คือ

- (1) Soda-lime glass (SLG)
- (2) SLG/Mo
- (3) SLG/Mo/Au
- (4) SLG/Mo/Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)

แผ่นรองรับทั้ง 4 แบบ จะมีกระจกโซดาไลม์ (Soda -lime glass) ซึ่งเป็นกระจกที่มีส่วนประกอบภายใน ได้แก่ Si, Na, Mg, Al, และ Ca มีความหนา 2 mm ขนาด 4.8 cm X 5.8 cm เป็นวัสดุรองรับทั้งหมด

1.1 ขั้นตอนการเตรียมกระจกโซดาไลม์

1. ตัดกระจกให้ได้ขนาด 4.8 cm X 5.8 cm
2. นำกระจกที่ตัดไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน และล้างด้วยน้ำดีไอออนไนซ์
3. แช่กระจกไว้ในน้ำดีไอออนไนซ์ผสมกับน้ำยาล้างจาน แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอุลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

4. ล้างกระจกในน้ำดีไอออกไนซ์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกจนกระจกสะอาดเป็นเวลา 15 นาที จำนวน 2 รอบ
5. เป่ากระจกให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปแช่กรดโครมิกเข้มข้น (Chromic acid) เป็นเวลา 1 คืน
6. นำกระจกไปล้างกรดโครมิกด้วยน้ำดีไอออกไนซ์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที จำนวน 2 รอบ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 30 นาที พร้อมนำไปใช้งาน

1.2 การเตรียมแผ่นรองรับแบบ SLG/Mo

แผ่นรองรับแบบ SLG/Mo เกิดจากการนำกระจกโซดาไลม์ขนาด $4.8\text{ cm} \times 5.8\text{ cm}$ ที่ล้างสะอาดแล้วมาใส่ไว้ใน Substrate Holder แล้วนำไปติดตั้งในเครื่อง BALZER BAE 250 โดยหันด้านที่ไม่มีดีบุกเคลือบ (Non-tin Side) เข้าหาเป้าโมลิบดีนัม แล้วทำการสปีดเตอร์โมลิบดีนัม (Mo) ลงบนกระจกโซดาไลม์ โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการสปีดเตอร์โมลิบดีนัม ได้แก่ ความดันของแก๊สอาร์กอนขณะสปีดเตอร์ 4.0×10^{-3} มิลลิบาร์ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังเป้าโมลิบดีนัม 600 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ที่วัดได้อยู่ในช่วง 300-500 โวลต์ และเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์นาน 28 นาที จะได้ความหนาของฟิล์มบาง Mo ประมาณ 1 ไมครอน และเป็นฟิล์มบางที่มีการยึดเกาะแน่นบนกระจก ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ $6.7 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$ จากการวัดด้วยวิธีการ Van De Pauw

1.3 การเตรียมแผ่นรองรับแบบ SLG/Mo/Au

แผ่นรองรับแบบ SLG/Mo/Au เกิดจากการระเหยนิเกิลและทอง (Ni/Au) ในระบบสุญญากาศในระดับ High Vacuum (10^{-6} มิลลิบาร์) ลงบนแผ่นรองรับ SLG/Mo ในลักษณะเต็มแผ่น หรือ เป็นแถบยาวที่มีความกว้าง 2 mm หลายนๆแถบ ความหนาของ Ni จะมีค่าประมาณ 50 อังสตรอม โดย Ni จะเป็นตัวที่ช่วยให้ Au ยึดติดกับ Mo ได้ดี ส่วน Au จะมีความหนาประมาณ 2500-3000 อังสตรอม

1.4 การเตรียมแผ่นรองรับแบบ SLG/Mo/CIGS

แผ่นรองรับแบบ SLG/Mo/CIGS เกิดจากการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมด้วยวิธีแบบระเหยร่วม (Co-Evaporation)²¹ ลงบนแผ่นรองรับ SLG/Mo

สำหรับโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ จำเป็นต้องมีขั้วโลหะเพื่อใช้ในการวัดสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้า และขั้วโลหะนี้จะต้องไม่ทำให้เกิดรอยต่อที่ต่อต้านการไหลของกระแส (Blocking contact) ทั้งนี้ Mo ที่อยู่ในแผ่นรองรับทั้ง 3 แบบ คือ SLG/Mo, SLG/Mo/Au และ SLG/Mo/CIGS จะทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะ ซึ่งขั้วโลหะนี้จะถือว่าเป็น back contact แต่เนื่องจากโมลิบดีนัมมีความต้านทานแผ่นไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น จึงต้องระเหยทองทับลงบน Mo ในขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมโครงสร้างอุปกรณ์แบบต่างๆ เพราะทองจัดว่าเป็น ohmic contact ที่ดี¹ และมีความต้านทานแผ่นสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น

2. การเตรียมฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ

การเตรียมฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับทั้ง 4 แบบ เตรียมโดยวิธี CBD ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 แต่การเคลือบฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกัน¹⁷ ทำให้สีของฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับทั้ง 4 แบบที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน และอาจทำให้ได้ความหนาที่แตกต่างกันแต่ไม่มากนัก

สำหรับแผ่นรองรับแบบ SLG/Mo, SLG/Mo/Au และ SLG/Mo/CIGS เมื่อผ่านขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CdS แล้ว ให้นำแผ่นรองรับไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ CdS แพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางที่อยู่บน SLG ได้ดียิ่งขึ้น

3. การเตรียมฟิล์มบาง i-ZnO/ZnO(AI)

การเตรียมฟิล์มบาง i-ZnO/ZnO(AI) ลงบนแผ่นรองรับ SLG/Mo, SLG/Mo/Au และ SLG/Mo/CIGS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง CdS เรียบร้อยแล้ว จะใช้วิธี R.F. Magnetron Sputtering ซึ่งมีเงื่อนไขที่ใช้สปีดเตอร์ i-ZnO ได้แก่ ความดันของแก๊สออกซิเจนผสมแก๊สอาร์กอนขณะสปีดเตอร์ 4.0×10^{-4} / 8.0×10^{-3} มิลลิบาร์, กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ช่วงเวลาทั้งหมดของการสปีดเตอร์ 7 นาที 12 วินาที การเตรียมฟิล์มบาง i-ZnO เรียกว่า Reactive R.F. Magnetron Sputtering และเงื่อนไขที่ใช้สปีดเตอร์ ZnO(AI) ได้แก่ ความดันของแก๊สอาร์กอน

8.0×10^{-3} มิลลิบาร์ ,กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ช่วงเวลาทั้งหมดของการสเปคเตอร์ 72 นาที การเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) วิธีนี้เรียกว่า R.F. Magnetron Sputtering

4. การทำขั้วทองเพื่อใช้เป็นขั้วของรอยต่อทางด้านเกท

การทำขั้วทองที่เป็นเกทนี้จะทำการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมแผ่นรองรับ SLG/Mo/Au โดยจะทำการระเหยทองเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ระเหยทองเต็มทั้งแผ่น, ระเหยทองเป็นแถบยาวกว้าง 2 mm หลายๆ แถบ และระเหยทองเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จะใช้ความหนาประมาณ 2,500-3,000 อังสตรอม ประกอบทั้งทางด้านบนสุดของฟิล์มบางที่เป็นโครงสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษา

การวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์

การวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพันธุ์ เป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของรอยต่อว่ามีการนำไฟฟ้าในลักษณะอย่างไร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดด้วยระบบวัดและเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์แสดงดังภาพที่ 6.1 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก



รูปที่ 6.1 แสดงระบบวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ผลการทดลอง

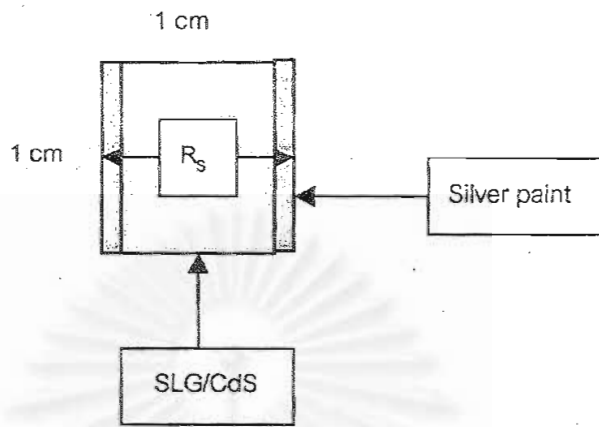
ผลของการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน โดยมีข้อมูลที่สำคัญของสารชนิดต่างๆ ที่นำมาเตรียมเป็นโครงสร้างต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน, พลังงานงาน และอิเล็กตรอนอัฟฟินิตี้ ของสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้^{13,22,23,24}

สาร	ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) (eV)	ฟังก์ชันงาน (ϕ) (eV)	อิเล็กตรอนอัฟฟินิตี้ (χ) (eV)
Mo	-	4.3	-
Au	-	4.82	-
CIGS	1.11	-	-
CIS	1.04	-	4.4
CdS	2.42	7.26	4.1
ZnO	3.3	-	4.3

1. ผลการวัดและการวิเคราะห์โครงสร้าง SLG/CdS

ในโครงสร้าง SLG/CdS เราสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในแนวระนาบ (In Plane) ได้ โดยการตัดแผ่นตัวอย่างให้มีขนาด $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ แล้วทา silver paint ที่ขอบของแผ่นตัวอย่างที่ตัดได้ขนาดตามต้องการทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงแผนตัวอย่างของโครงสร้าง SLG/CdS ขนาด 1cm X 1 cm

การหาสภาพความต้านทานไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$R_s = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{w \cdot d} \quad (6.1)$$

เมื่อ R_s เป็น ความต้านทานแผ่น

l เป็น ความยาวของแผ่นตัวอย่าง

w เป็น ความกว้างของแผ่นตัวอย่าง

d เป็น ความหนาของฟิล์มบาง CdS

ρ เป็น สภาพความต้านทานไฟฟ้า

แต่เนื่องจาก $l = w$ สมการ (6.1) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad (6.2)$$

จากการวัดความต้านทานแผ่น โดยการวัดด้วย probe วัดลงบน silver paint ทั้งสองด้าน ค่าความต้านทานแผ่นที่อ่านได้จากเครื่อง KEITHLEY 238 (High current source) มีค่าประมาณ $10^{11} \Omega/\text{sq}$ และความหนาของฟิล์มบาง CdS มีค่า 5000 อังสตรอม แทนค่า R_s และ d ลงในสมการ (6.2) จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เท่ากับ

$$\begin{aligned} \rho &= 10^{11} \times (5 \times 10^{-5}) \\ &= 5 \times 10^6 \quad \Omega - \text{cm} \end{aligned}$$

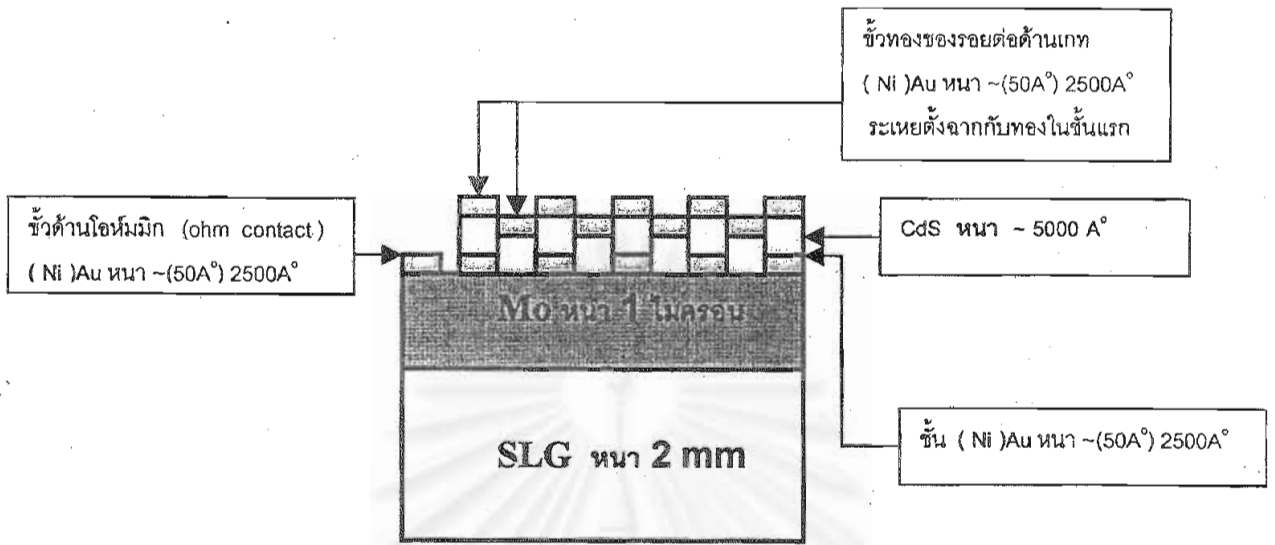
ดังนั้นจะได้ว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ในแนวระนาบมีค่าประมาณ $5 \times 10^6 \quad \Omega - \text{cm}$

นอกจากนี้ในโครงสร้างนี้ เราสามารถที่จะหาค่าความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมขึ้นมาได้ โดยใช้เทคนิคโกลานสกี²⁵ ซึ่งความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่อยู่บน SLG จะมีความแตกต่างกับความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่อยู่บน Mo, Au และ Cu(In,Ga)Se₂ แต่เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะวัดความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่อยู่บน Mo, Au และ Cu(In,Ga)Se₂ ได้ ดังนั้นความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่อยู่บนชั้นฟิล์มบางข้างต้นเหล่านี้ จะอ้างอิงจากความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่อยู่บน SLG

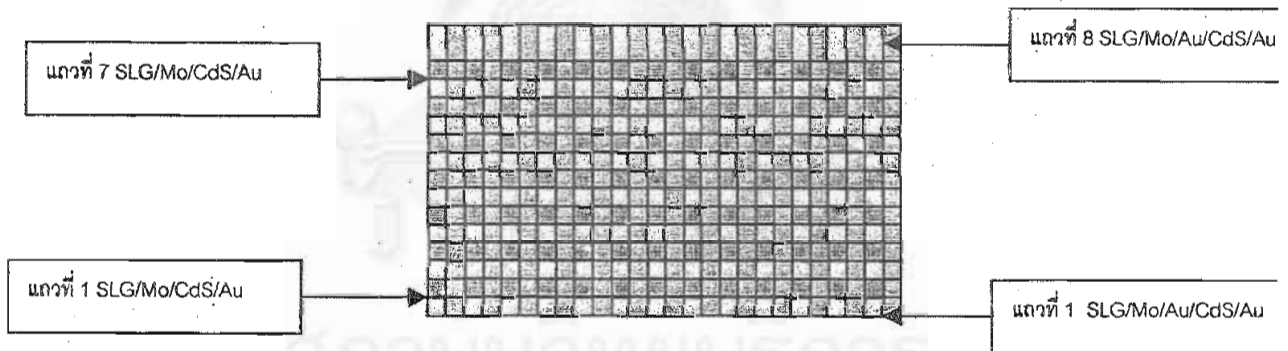
2. ผลการวัดและการวิเคราะห์โครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ โครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au

โครงสร้างของ SLG/Mo/Au/CdS/Au และ โครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au จะอยู่บนกระจกโซดาไลม์ที่เป็นแผ่นรองรับแผ่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และ 6.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

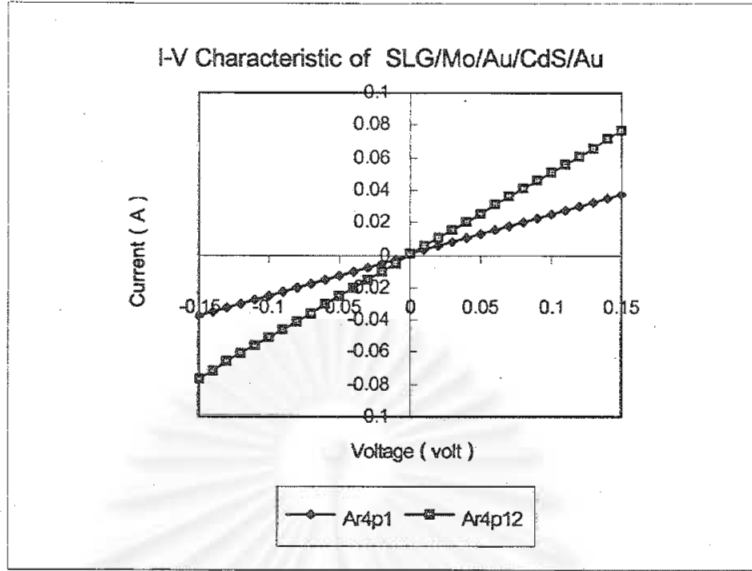


รูปที่ 6.3 แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au

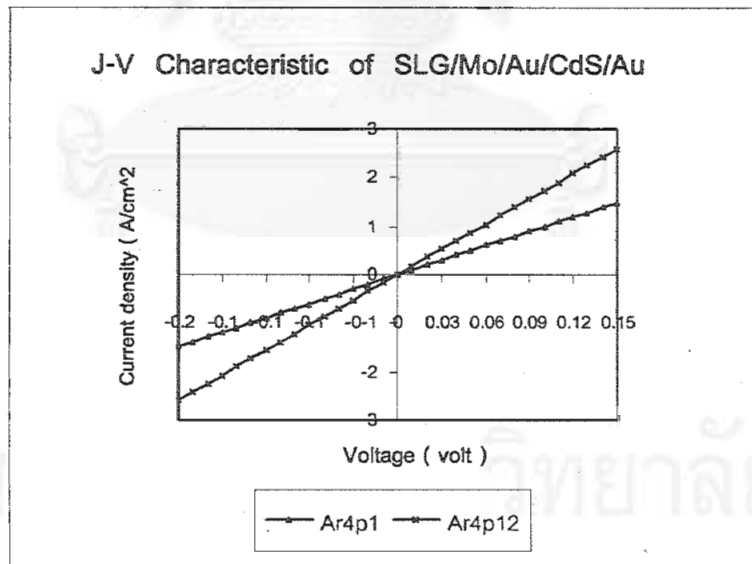


รูปที่ 6.4 แสดงโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au ในแนวระนาบ

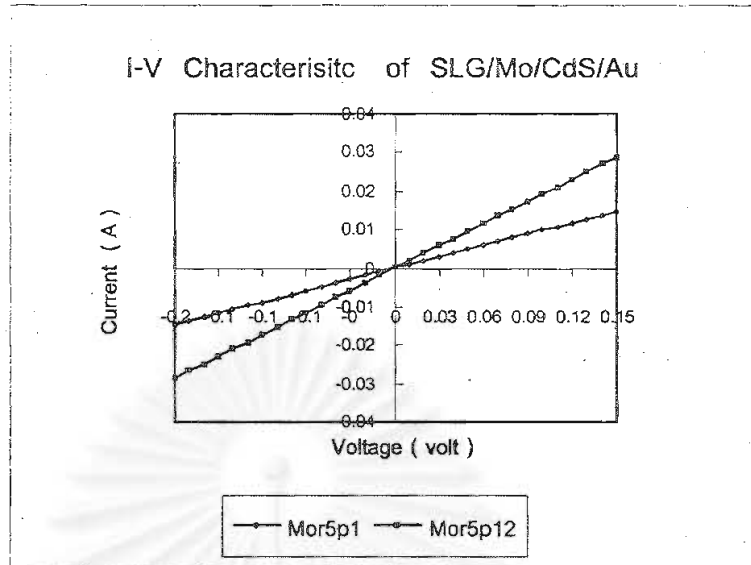
จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au ในแถวที่ 4 ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12 และโครงสร้าง SLG/Mo /CdS/Au ในแถวที่ 5 ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12 ได้ลักษณะกราฟกระแส-ความต่างศักย์ดังแสดงในรูปที่ 6.5, 6.6, 6.7 และ 6.8



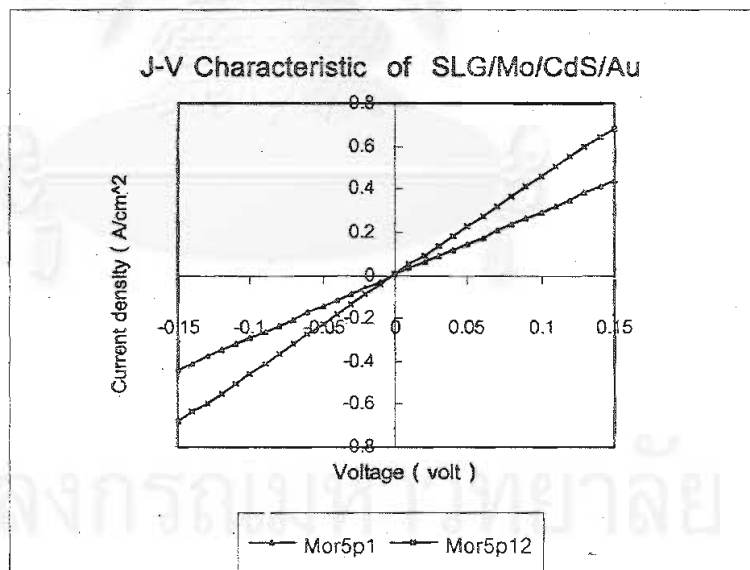
รูปที่ 6.5 แสดงกราฟกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au ในแถวที่ 4 ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12



รูปที่ 6.6 แสดงกราฟความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au ในแถวที่ 4 ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 12



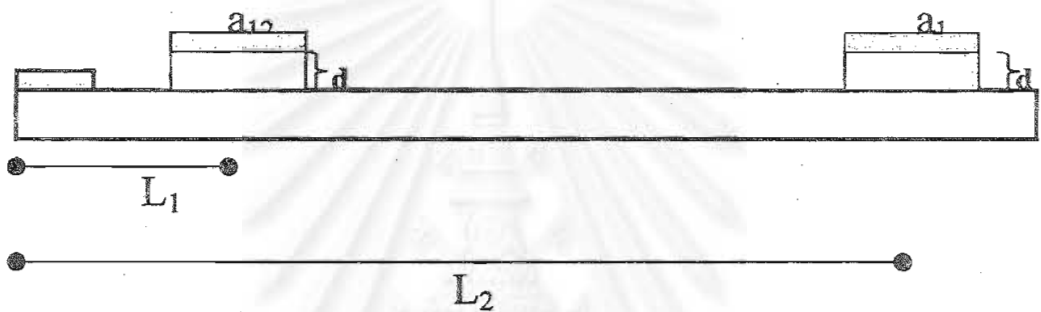
รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au ในแถวที่ 5 ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12



รูปที่ 6.8 แสดงกราฟความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au ในแถวที่ 5 ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 12

จากกราฟกระแส-ความต่างศักย์ พบว่าการนำไฟฟ้าผ่านชั้นฟิล์มบาง CdS ในโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au เป็นแบบไอห์มมิก สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของไอห์ม

เนื่องจากโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au มีรูปแบบในการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 6.3 และ 6.4 ทำให้สามารถหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ภาพประกอบการคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ในโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au

- เมื่อ L_1 คือ ระยะทางจากขั้วไอห์มมิกถึงจุดกึ่งกลางของตำแหน่งที่ 12
 L_2 คือ ระยะทางจากขั้วไอห์มมิกถึงจุดกึ่งกลางของตำแหน่งที่ 1
 a_{12} คือ พื้นที่ของตำแหน่งที่ 12
 a_1 คือ พื้นที่ของตำแหน่งที่ 1
 d คือ ความหนาของฟิล์มบาง CdS
 R_{12} คือ ความต้านทาน ณ ตำแหน่งที่ 12 คำนวณจากกราฟ I-V
 R_1 คือ ความต้านทาน ณ ตำแหน่งที่ 1 คำนวณจากกราฟ I-V

โดย L_1 มีค่า 1.75 cm, L_2 มีค่า 5.09 cm, a_1 มีค่า 0.0252 cm², a_{12} มีค่า 0.0294 cm², R_{12} มีค่า 1.9634 โอห์ม, R_1 มีค่า 3.9894 โอห์ม และ d มีค่า 5×10^{-5} cm

จากสมการ

$$L_1\alpha + \frac{\rho d}{a_{12}} = R_{12} \quad (6.2)$$

$$L_2\alpha + \frac{\rho d}{a_1} = R_1 \quad (6.3)$$

แทนค่า $L_1, L_2, a_{12}, a_1, d, R_{12}$ และ R_1 ลงในสมการ (6.2) และ (6.3)

$$1.75\alpha + \frac{\rho(5 \times 10^{-5})}{0.0294} = 1.9634 \quad (6.4)$$

$$5.09\alpha + \frac{\rho(5 \times 10^{-5})}{0.0252} = 3.9894 \quad (6.5)$$

$$1.75\alpha + (1.7 \times 10^{-3})\rho = 1.9634 \quad (6.6)$$

$$5.09\alpha + (1.98 \times 10^{-3})\rho = 3.9894 \quad (6.7)$$

(6.6) \times 5.09

$$8.9075\alpha + (8.653 \times 10^{-3})\rho = 9.9937 \quad (6.8)$$

(6.7) \times 1.75

$$8.9075\alpha + (3.465 \times 10^{-3})\rho = 6.9815 \quad (6.9)$$

(6.8) $-$ (6.9)

$$(5.188 \times 10^{-3})\rho = 3.0122 \quad (6.10)$$

$$\rho = 5.8 \times 10^2 \quad \Omega - \text{cm}$$

ดังนั้นจะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ภายในโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au มีค่าเท่ากับ $5.8 \times 10^2 \Omega - \text{cm}$

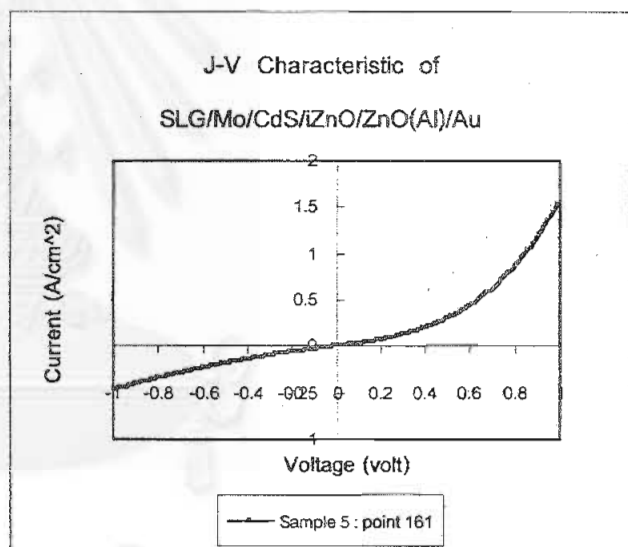
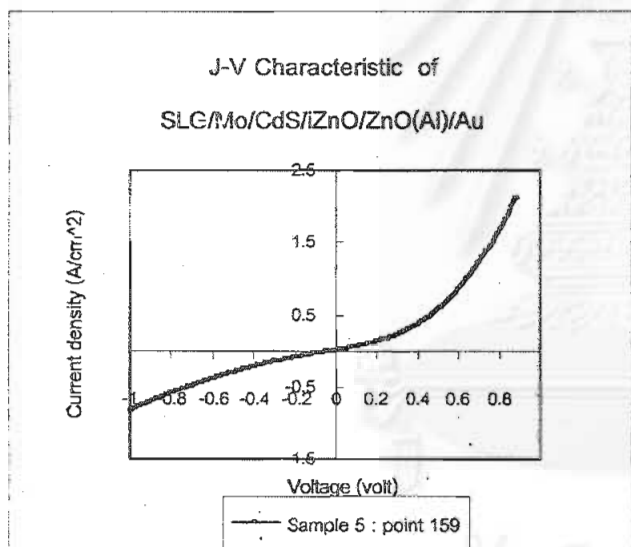
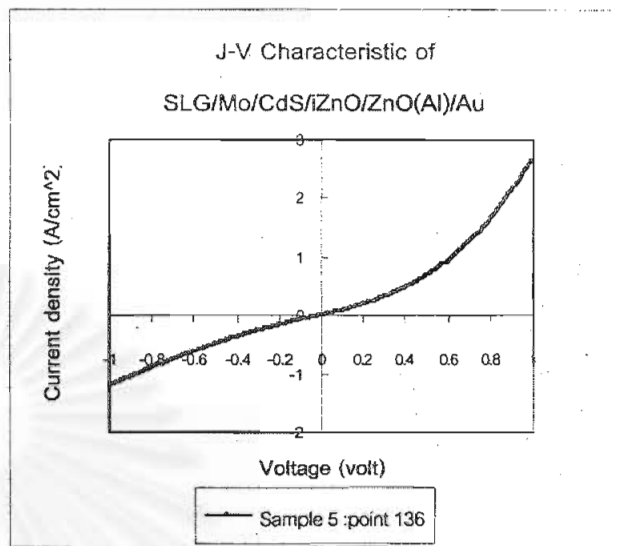
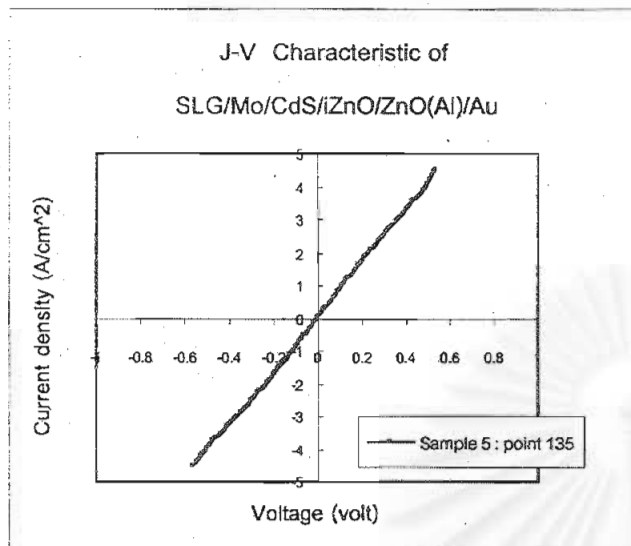
ส่วนกรณีของการหาสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ภายในโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au จะสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีการเดียวกับการคำนวณข้างต้น โดย L_1 มีค่า 1.75 cm, L_2 มีค่า 5.09 cm, a_1 มีค่า 0.0336 cm^2 , a_{12} มีค่า 0.042 cm^2 , R_{12} มีค่า 5.2264 โอห์ม, R_1 มีค่า 10.2041 โอห์ม และ d มีค่า $5 \times 10^{-5} \text{ cm}$ และจะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ภายในโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/Au มีค่าเท่ากับ $2.54 \times 10^3 \Omega - \text{cm}$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีการอบเคลือบสารเคมีในโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/Au และ SLG/Mo/CdS/Au ในแนวตั้งฉาก (Cross-plane) มีค่าใกล้เคียงกับสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีระเหยความร้อนในโครงสร้าง SLG/Au/CdS/Au¹ ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ $2.5 \times 10^3 \Omega - \text{cm}$

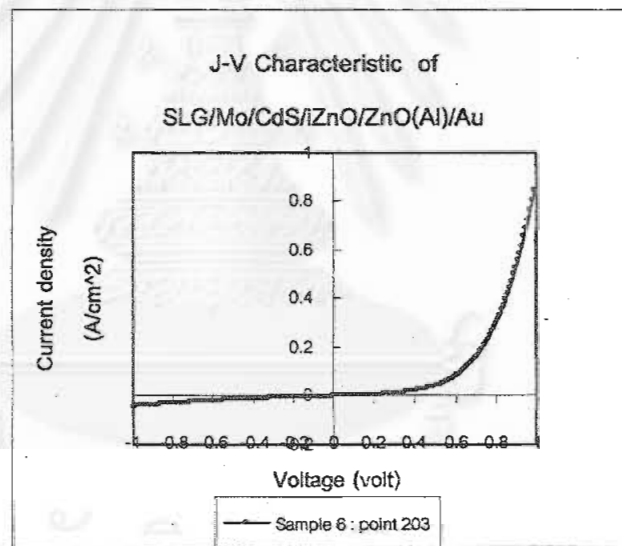
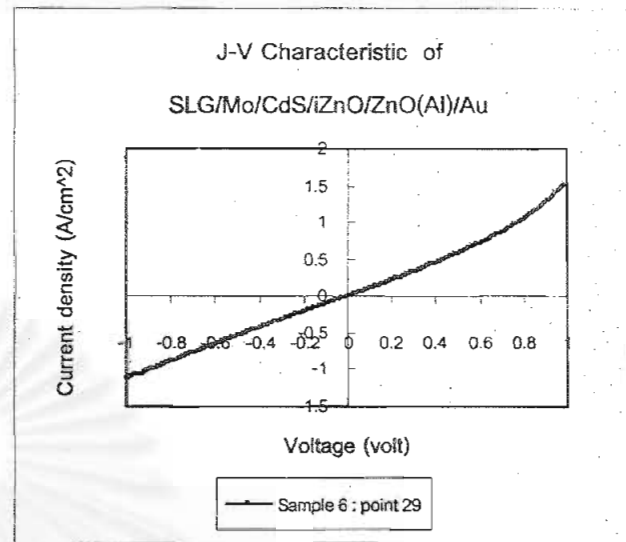
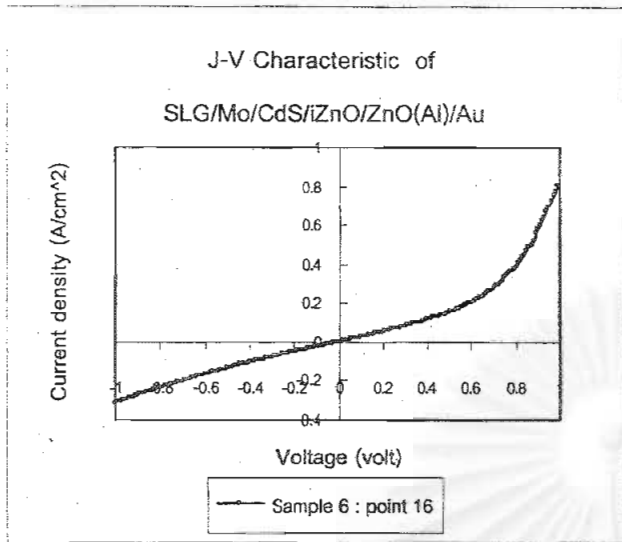
3. ผลการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au

ผลของลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบอันเนื่องมาจากเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.10-6.17

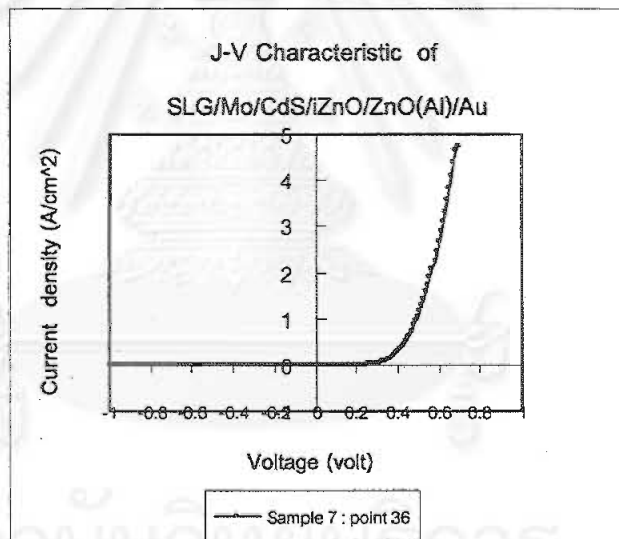
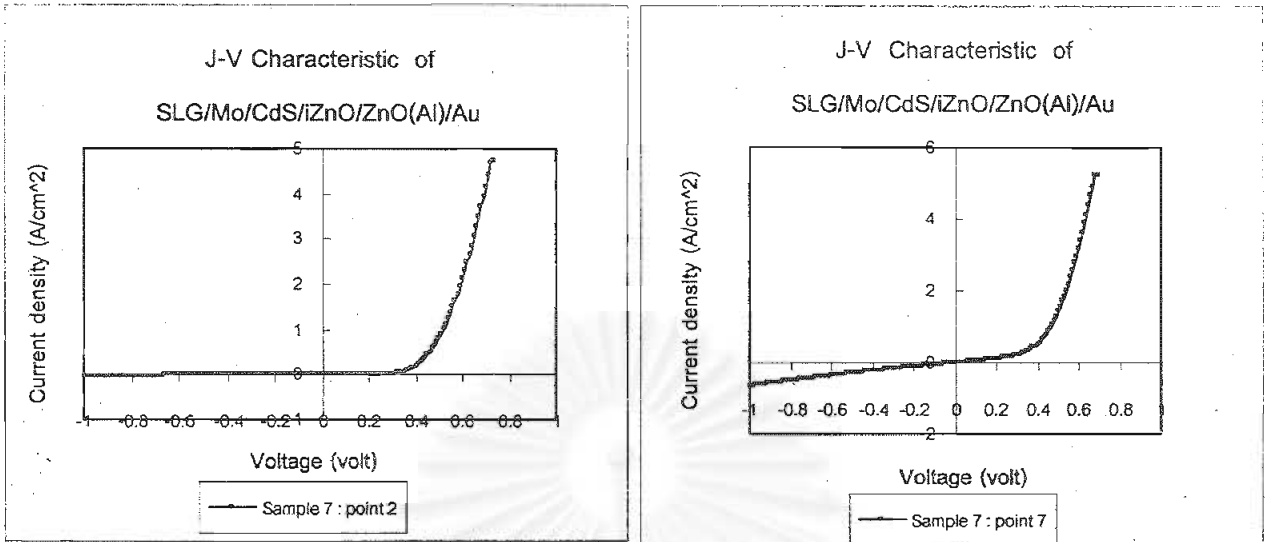
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



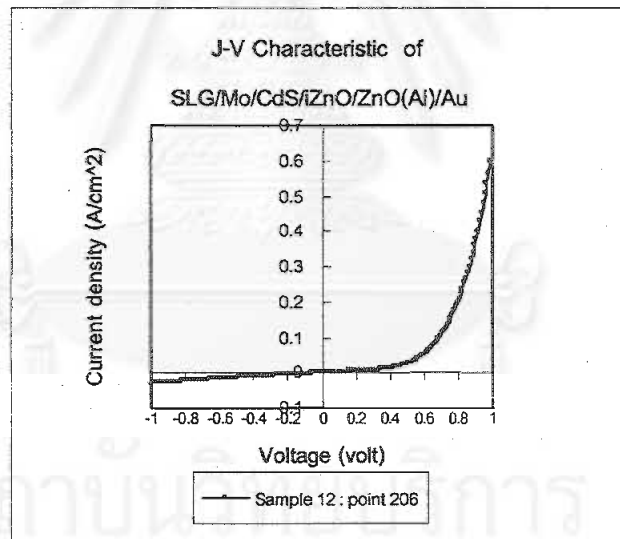
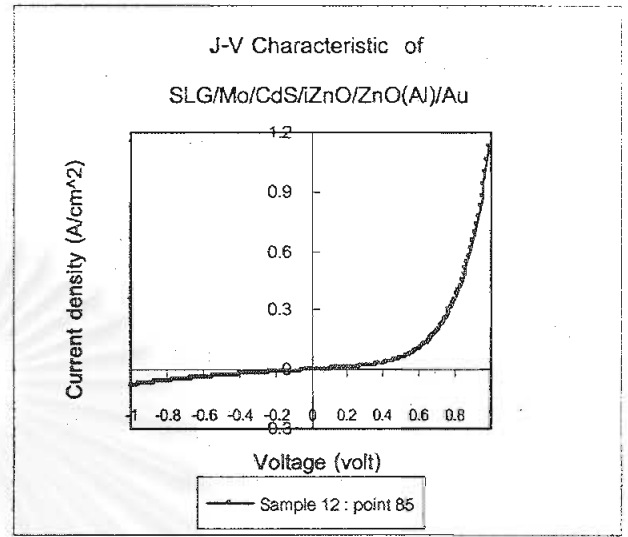
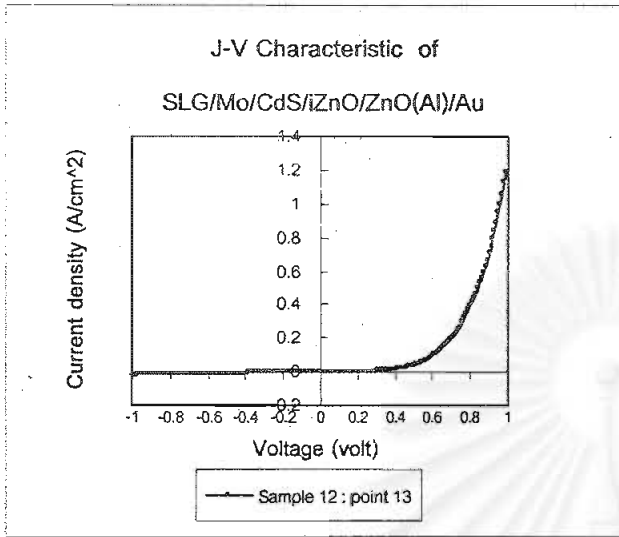
รูปที่ 6.10 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 182 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 5



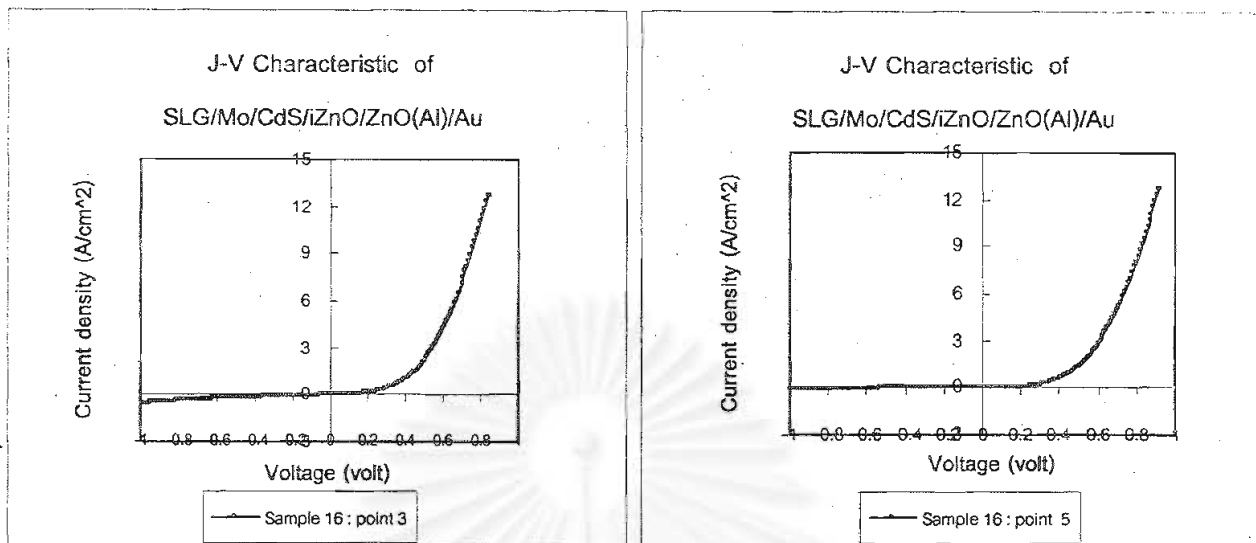
รูปที่ 6.11 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 240 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 6



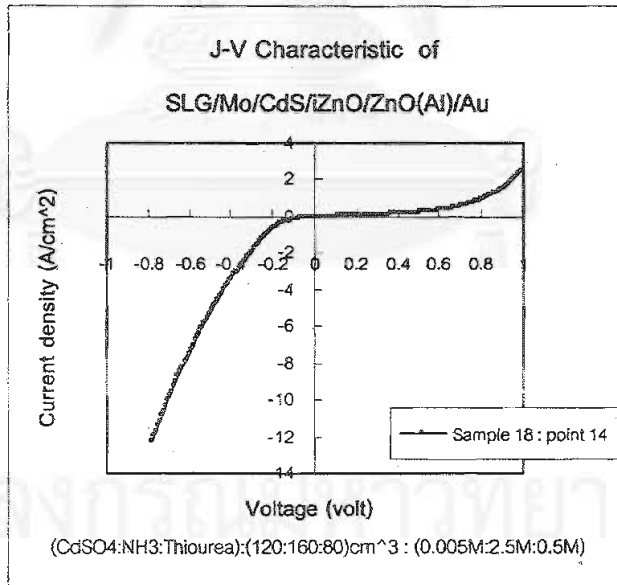
รูปที่ 6.12 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 224 จุดโน้มนำในตัวอย่างที 7



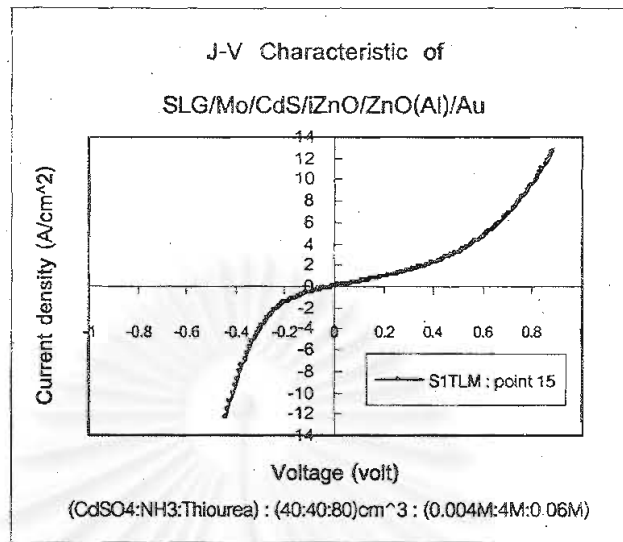
รูปที่ 6.13 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 256 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 12



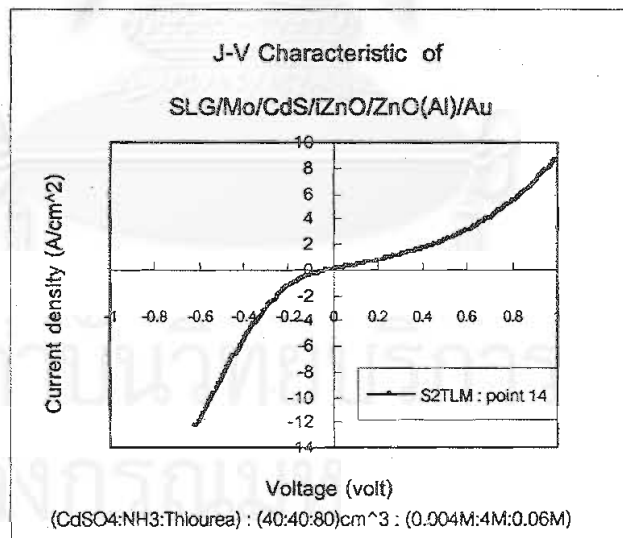
รูปที่ 6.14 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 130 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ 16



รูปที่ 6.15 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 19 จุดในแผ่นตัวอย่างที่ 18



รูปที่ 6.16 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 18 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S1TLM



รูปที่ 6.17 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/A จากจำนวน 10 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S2TLM

จากรูปที่ 6.10-6.17 ข้างต้น จะเห็นว่าลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au มีลักษณะที่แตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจากมีเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 6.10, 6.11 และ 6.12 มีเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เหมือนกันโดยความหนาของชั้นฟิล์มบาง CdS อยู่ที่ประมาณ 1000 อังสตรอม แต่การเตรียมชั้นฟิล์มบาง ZnO(AI) จะแตกต่างกัน โดยแผ่นตัวอย่างที่ 5 จะแยกเตรียมชั้นฟิล์มบาง ZnO(AI) เดี่ยวๆ เช่นเดียวกับแผ่นตัวอย่างที่ 18, S1TLM และ S2TLM แต่แผ่นตัวอย่างที่ 6 และแผ่นตัวอย่างที่ 7 จะมีการเตรียมชั้นฟิล์มบาง ZnO(AI) ร่วมกับโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS เช่นเดียวกับแผ่นตัวอย่างที่ 12 และ 16 ตั้งแต่แผ่นตัวอย่างที่ 12 จะมีการเปลี่ยนโทโอลูเรียจากบริษัท Riedl มาเป็นของบริษัท Merk ซึ่งโทโอลูเรียของบริษัท Merk มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วและมีสิ่งเจือปนมาก¹⁸ ทำให้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ต้องเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกัน ส่งผลให้ฟิล์มบาง CdS ที่ได้มีความหนาที่แตกต่างกันโดยแผ่นที่ 12 มีความหนาประมาณ 1200 อังสตรอม ขณะที่แผ่นตัวอย่าง S1TLM และ S2TLM มีความหนาประมาณ 400 อังสตรอม ซึ่งเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CdS แบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.1 จากงานวิจัยที่ได้ทำมาพบว่าเงื่อนไขที่ 6, 8 และ 9 ในตารางที่ 5.1 จะมีความเหมาะสมต่อการเตรียมฟิล์มบาง CdS มากที่สุด โดยเงื่อนไขที่ 6 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เหมาะสมต่อการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในขณะนี้ที่เตรียมขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

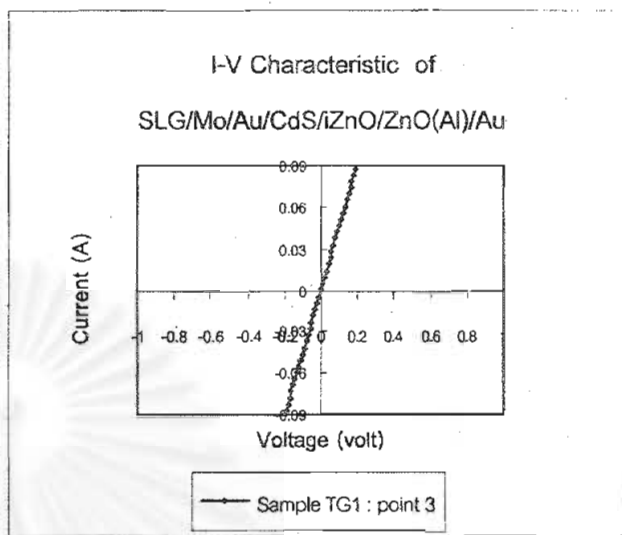
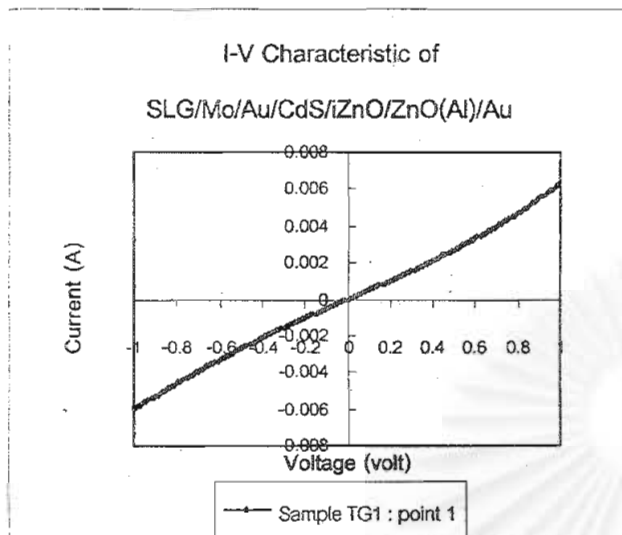
จากผลข้างต้นทำให้ได้ว่า ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากแผ่นตัวอย่าง S1TLM และ S2TLM เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาวิเคราะห์ เนื่องจากมีเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่ดี และผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากโครงสร้าง

SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au และ SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au

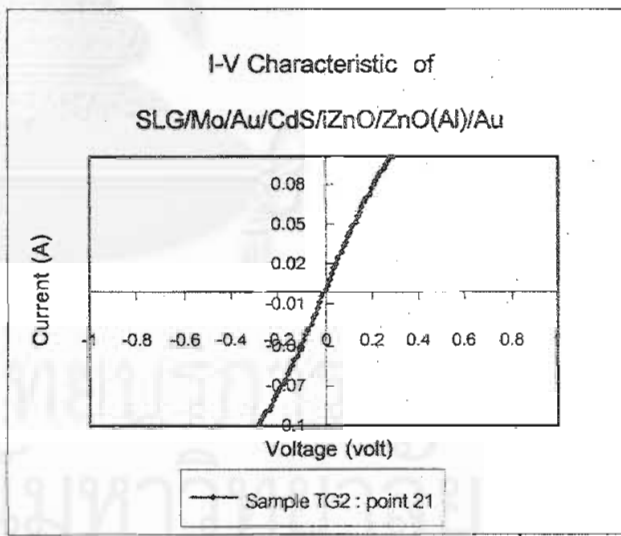
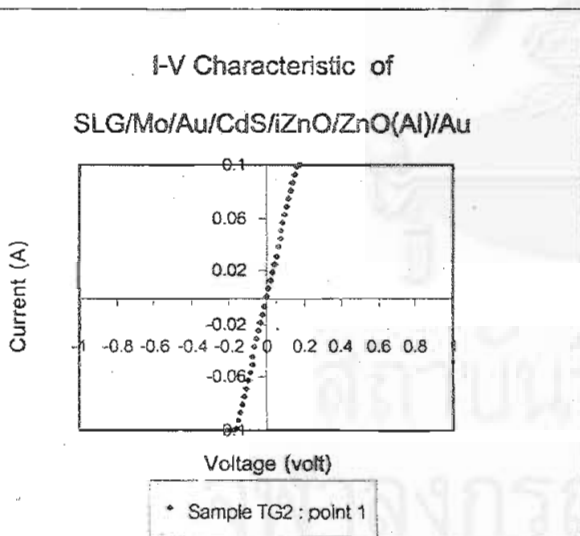
4. ผลการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง

Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au

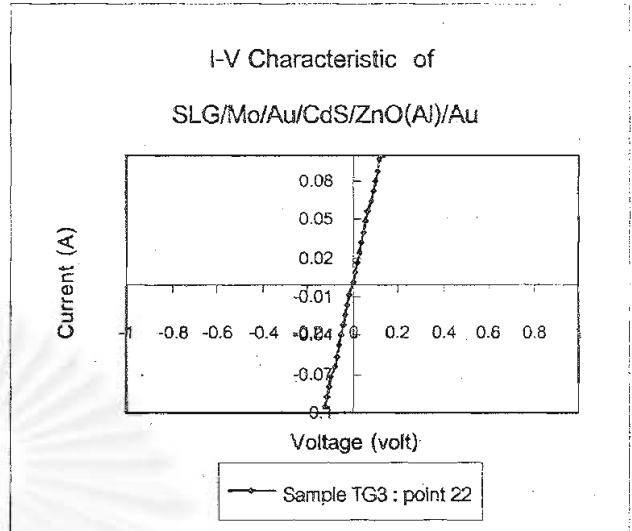
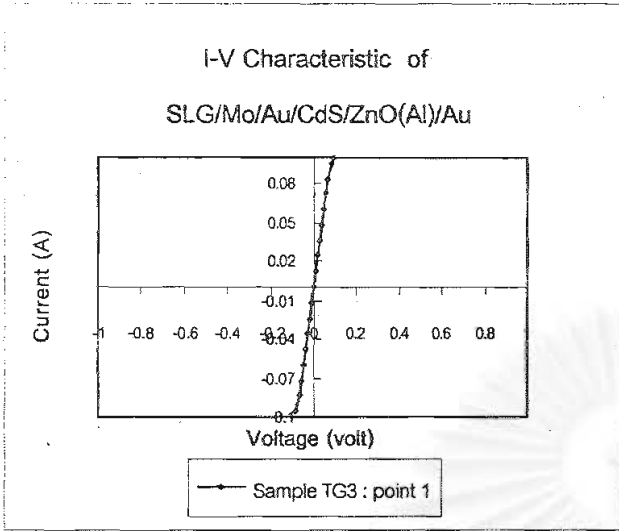
ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะการนำไฟฟ้าเป็นแบบโอห์มมิก แม้ว่าเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง CdS จะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.18-6.26



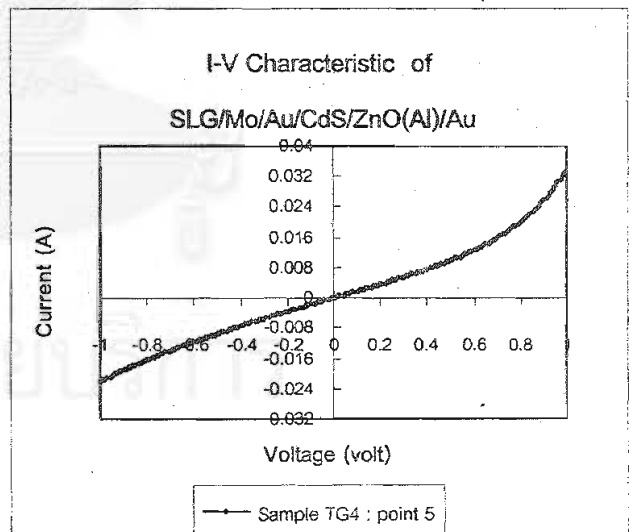
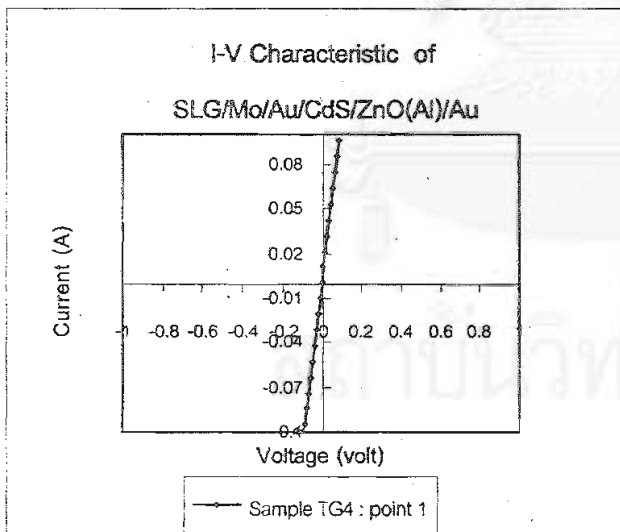
รูปที่ 6.18 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง
SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 34 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG1



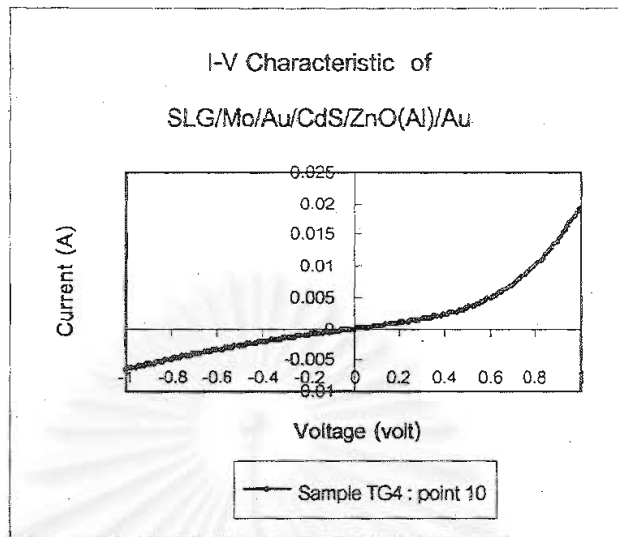
รูปที่ 6.19 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง
SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 22 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG2



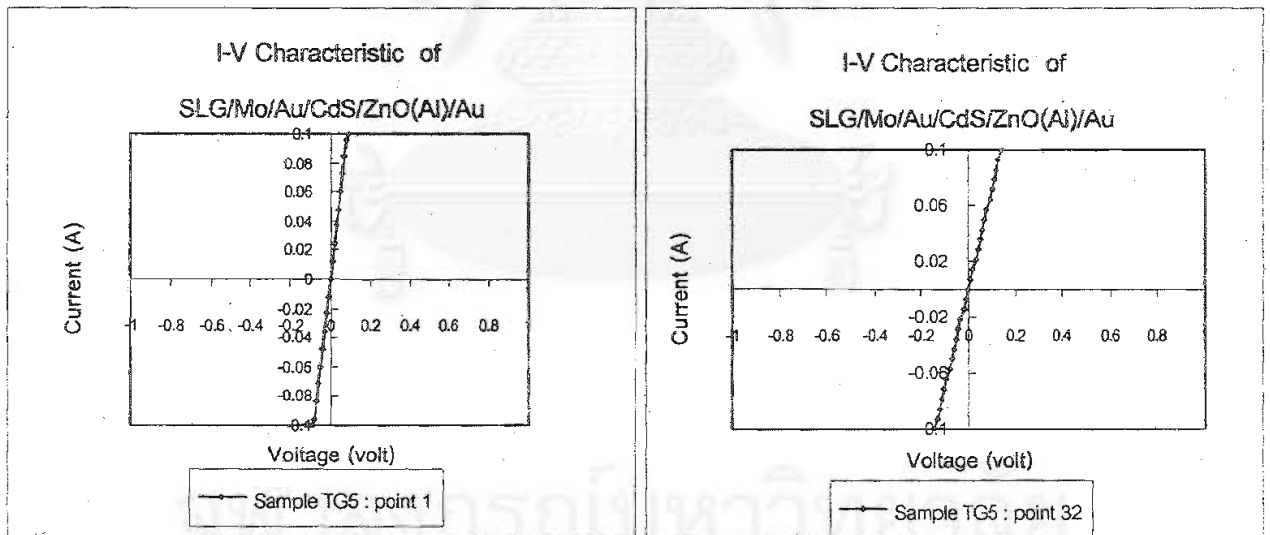
รูปที่ 6.20 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 73 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG3



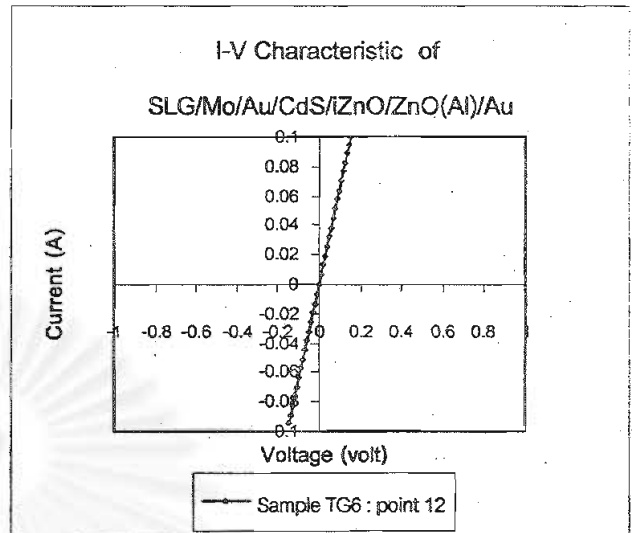
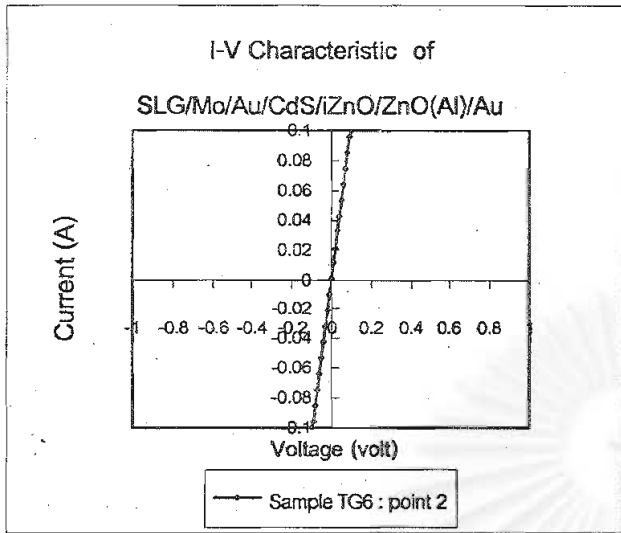
(ต่อ)



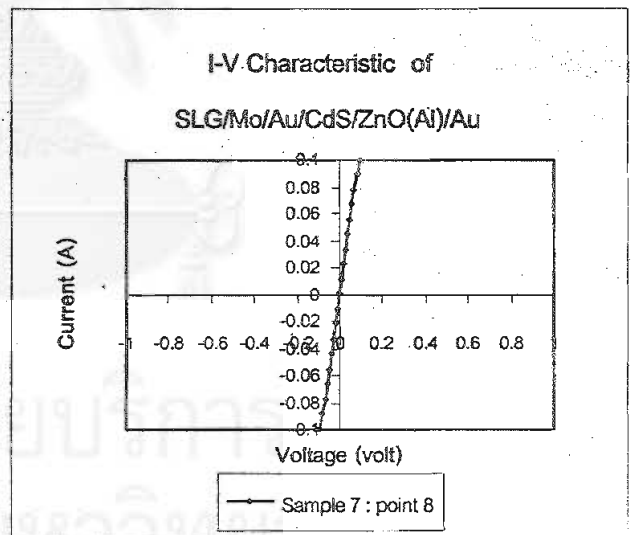
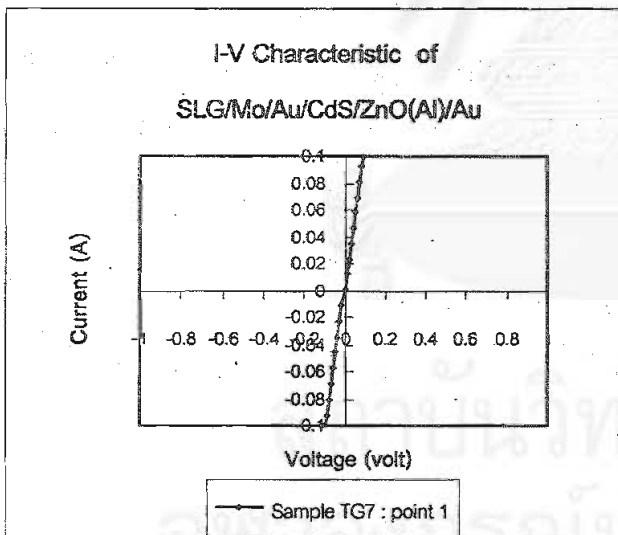
รูปที่ 6.21 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 40 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG4



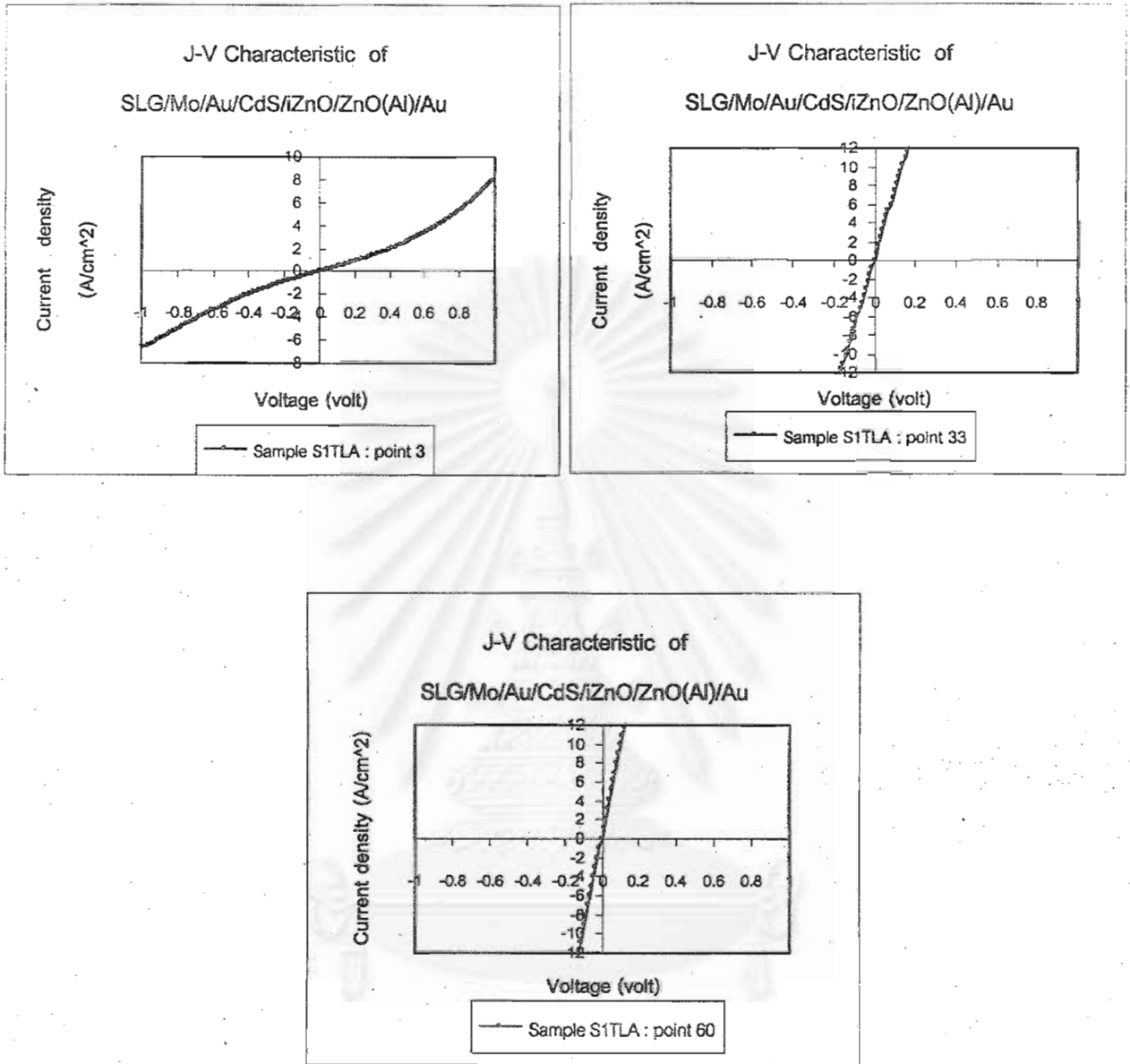
รูปที่ 6.22 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 37 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG5



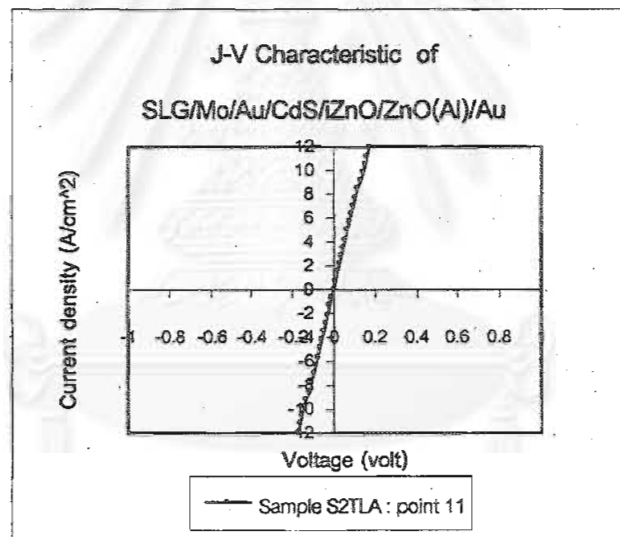
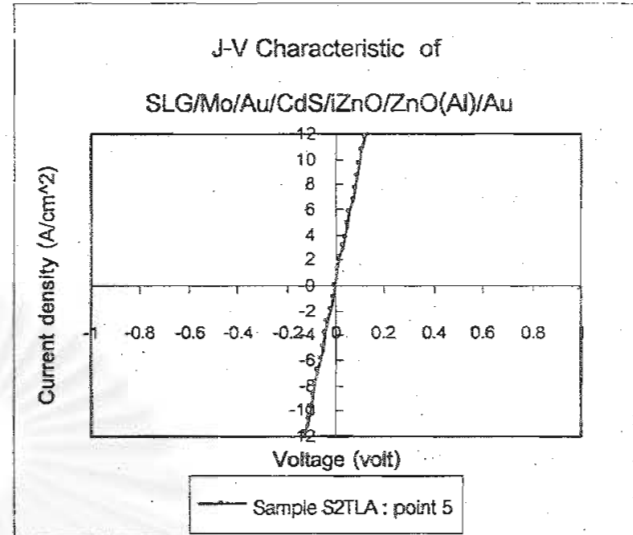
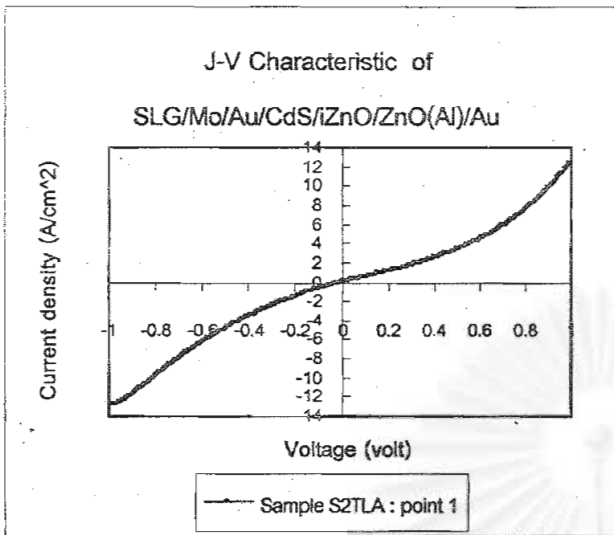
รูปที่ 6.23 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง
SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 32 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG6



รูปที่ 6.24 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง
SLG/Mo/Au/CdS/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 30 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ TG7



รูปที่ 6.25 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จากจำนวน 18 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S1TLA

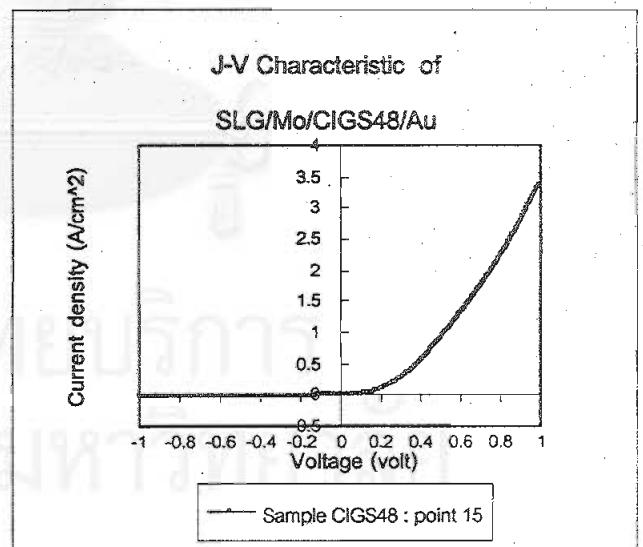
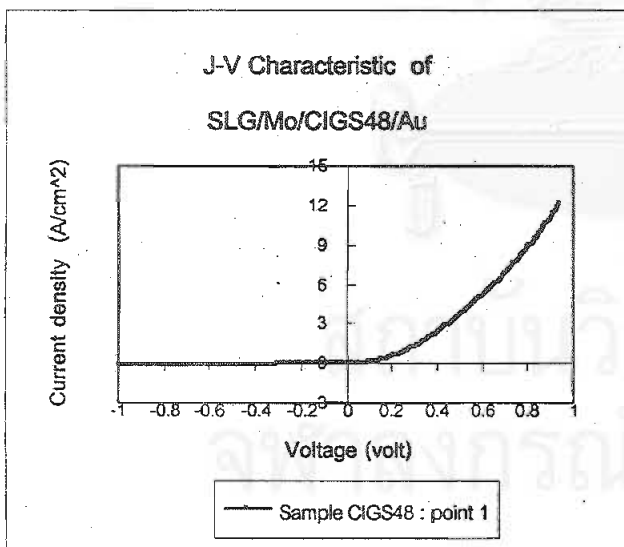


รูปที่ 6.26 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/ZnO/ZnO(Al)/Au จากจำนวน 10 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ S2TLA

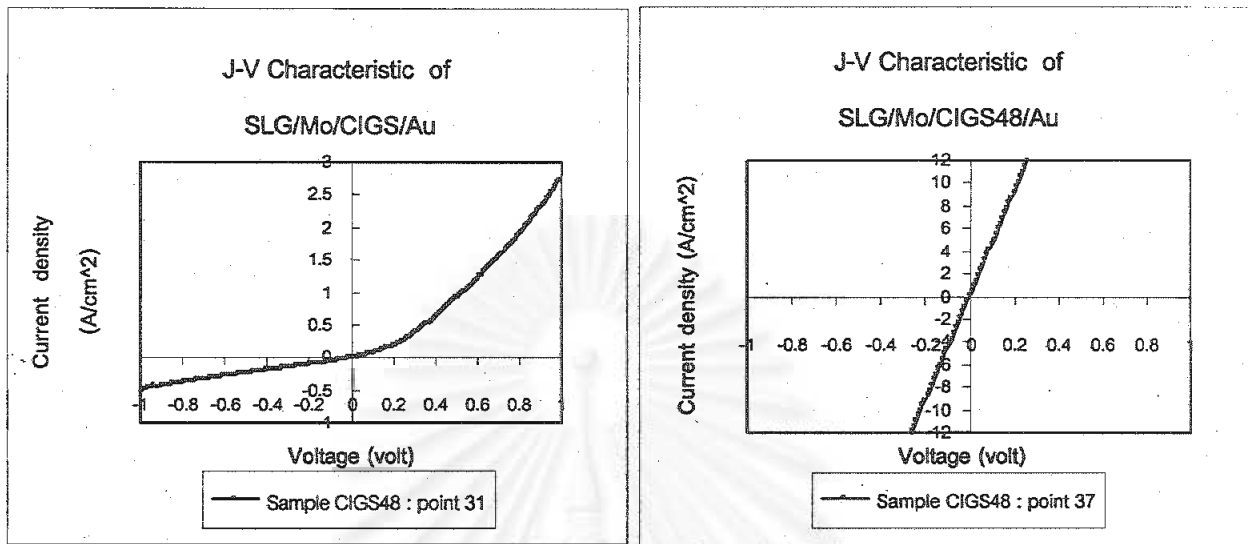
จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ดังแสดงในรูปที่ 6.18-6.26 ข้างต้นจะพบว่าลักษณะการนำไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบโอห์มมิก แต่จะมีบางส่วนที่ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์จะเป็นเส้นโค้ง โดยลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่จะนำมาวิเคราะห์จะอยู่ในรูปที่ 6.25 และ 6.26 เนื่องจากมีวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เหมือนกับโครงสร้าง SLG/Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในรูปที่ 6.16 และ 6.17 ซึ่งเป็นรูปที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เช่นกัน

4. ผลการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/Au

ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/Au มีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.27 ซึ่งเป็นลักษณะเด่นๆ ที่เกิดขึ้นจากจำนวนทั้งหมด 56 จุด



(ต่อ)



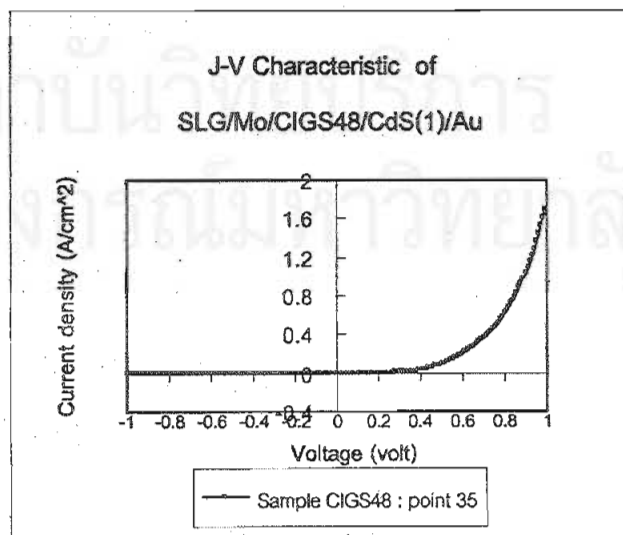
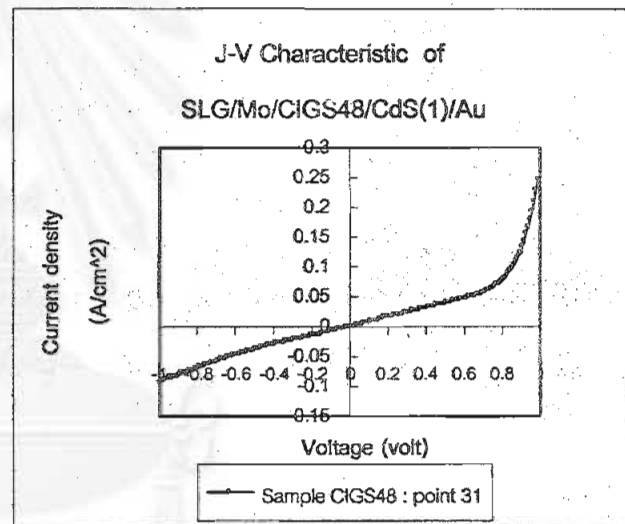
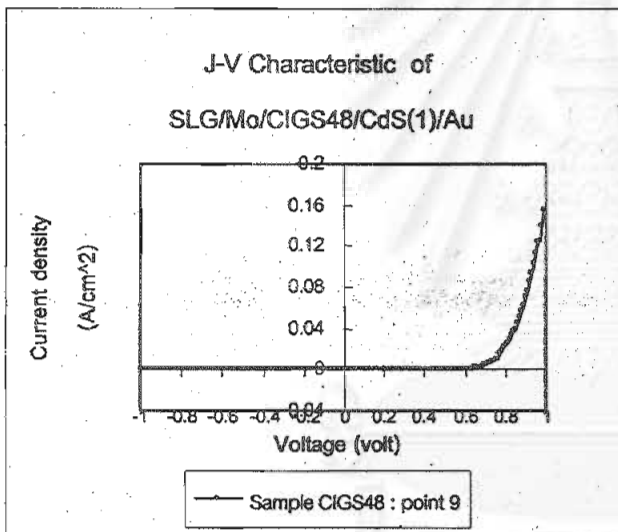
รูปที่ 6.29 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/Au จากจำนวน 56 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 48

จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/Au จะพบว่าการนำไฟฟ้าผ่านเนื้อฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 มีลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างหนึ่งในการตรวจสอบว่าฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นหรือไม่ ถ้าฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 ที่เตรียมขึ้นมา มีสมบัติที่ดีและมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/Au ที่ควรจะพบจะคล้ายคลึงกับตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 6.27

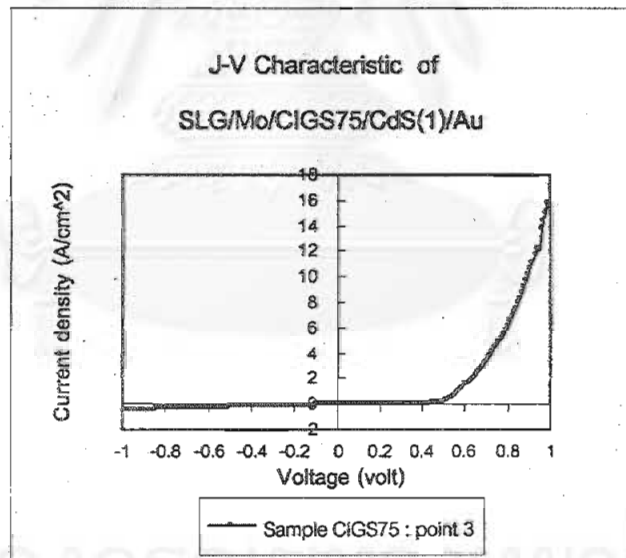
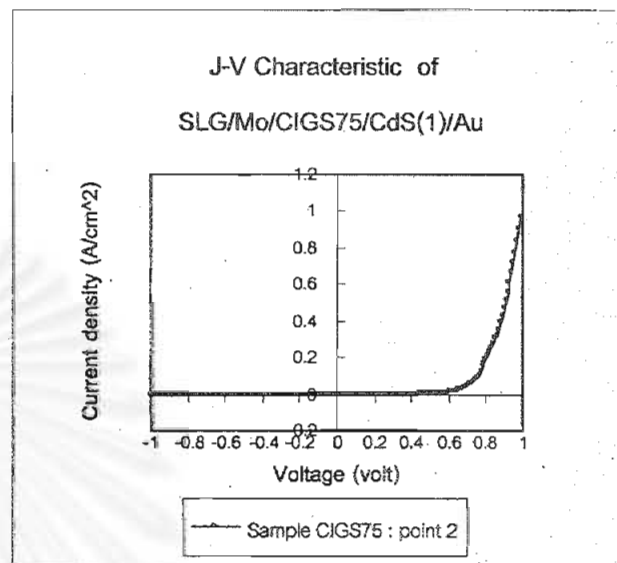
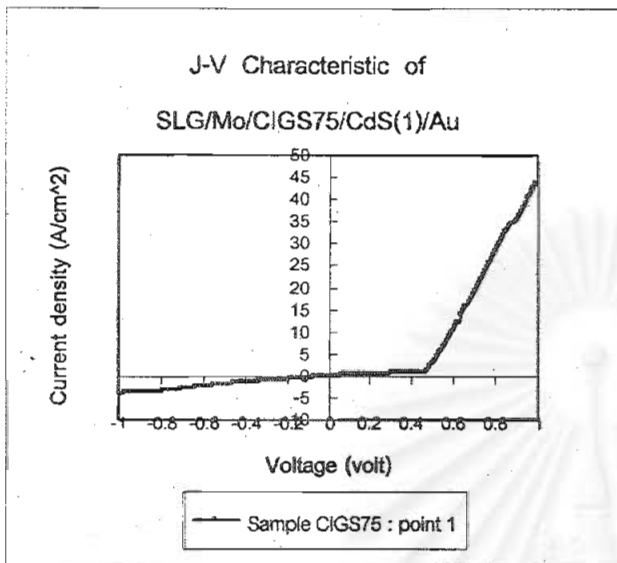
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ผลการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง
SLG/Mo/CIGS/CdS/Au

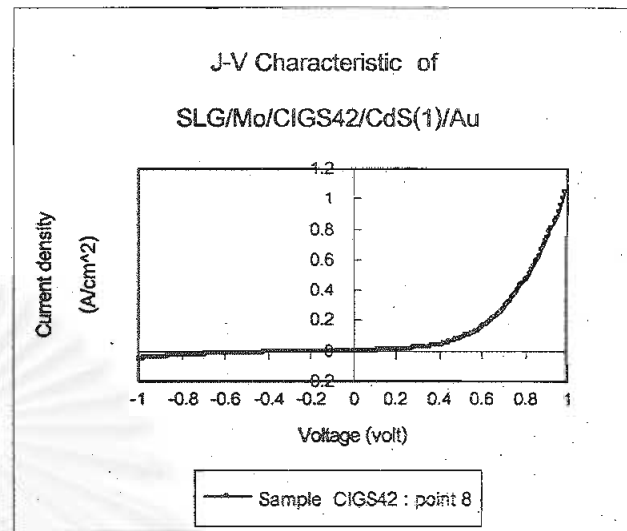
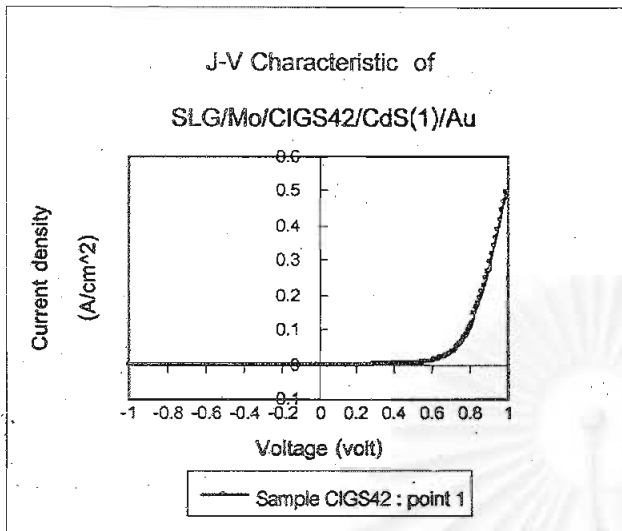
ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/Au มีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.28-6.32 โดยลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันนี้จะขึ้นกับเนื้อของฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ และสมบัติของฟิล์มบาง CdS อันเป็นผลมาจากวิธีการที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางทั้งสองชนิด ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่ใช้ในโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/Au จะแตกต่างกันไป โดยการเพิ่มขึ้นของความหนาของฟิล์มบาง CdS นอกจากจะขึ้นกับวิธีการเตรียมแล้วยังขึ้นกับจำนวนรอบที่ใช้ในการเตรียม (ตัวเลขภายในวงเล็บ ข้างหลัง CdS แสดงถึงจำนวนรอบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม)



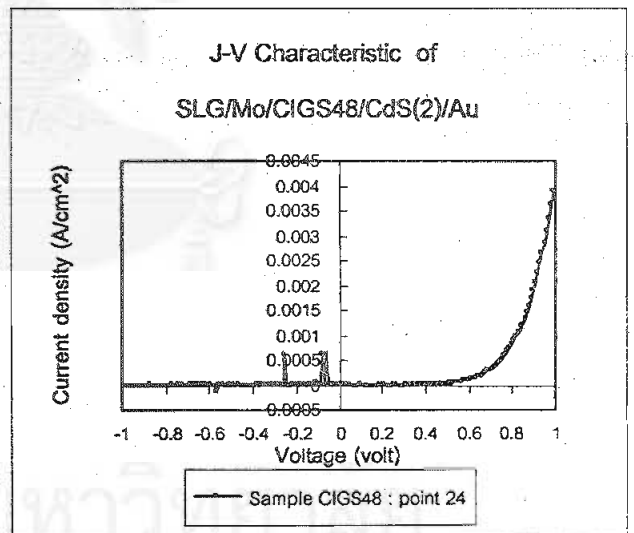
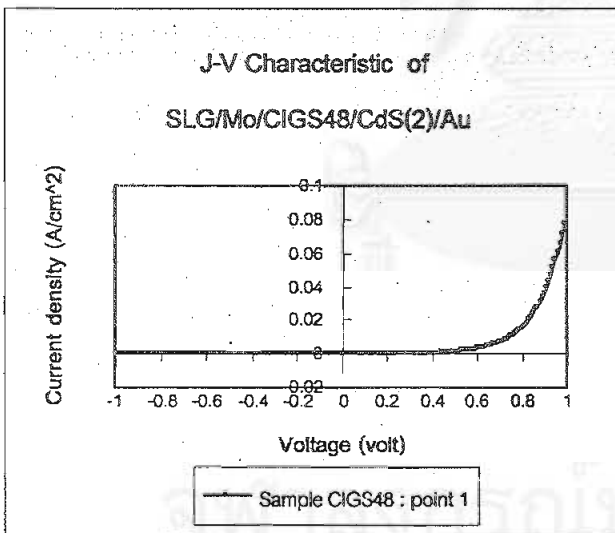
รูปที่ 6.28 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS(1)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 48



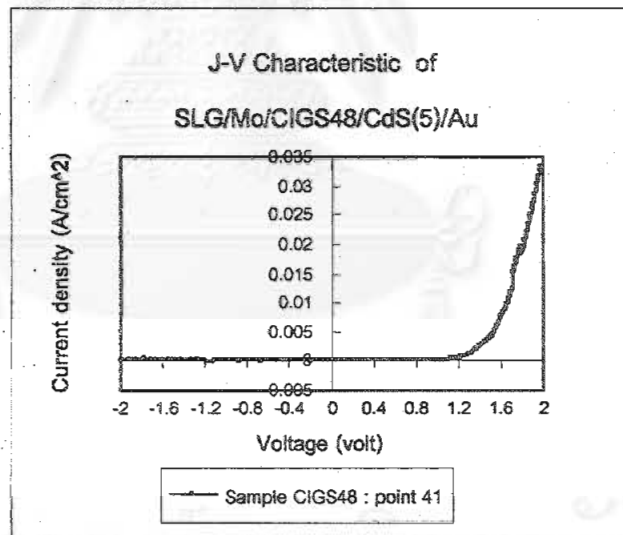
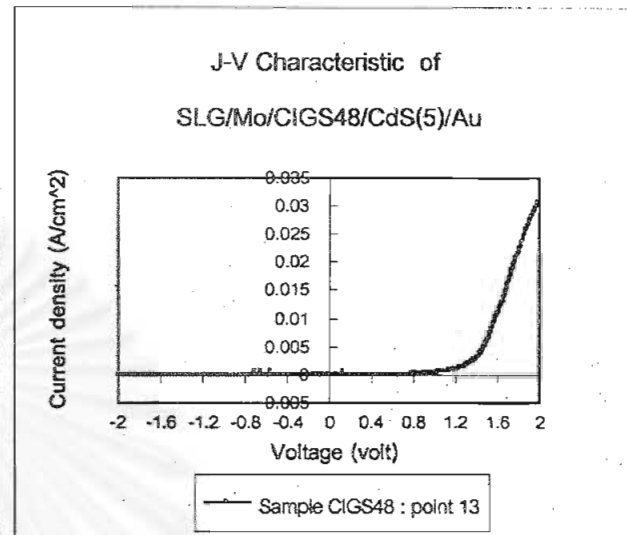
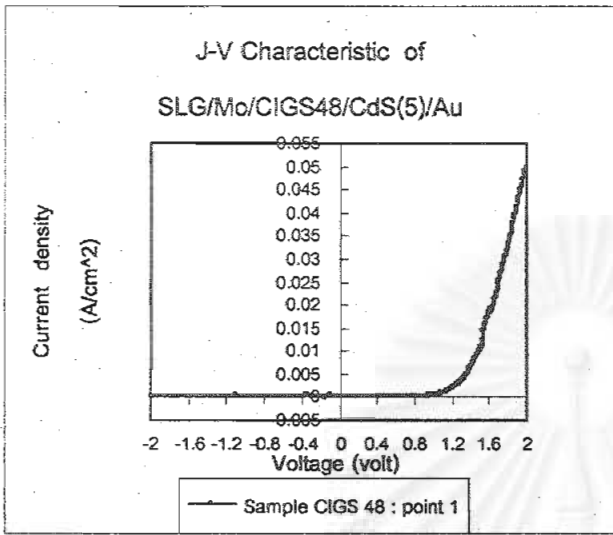
รูปที่ 6.29 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS75/CdS(1)/Au จากจำนวน 30 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 75



รูปที่ 6.30 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS42/CdS (1)/Au จากจำนวน 19 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 42



รูปที่ 6.31 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS (2)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 48

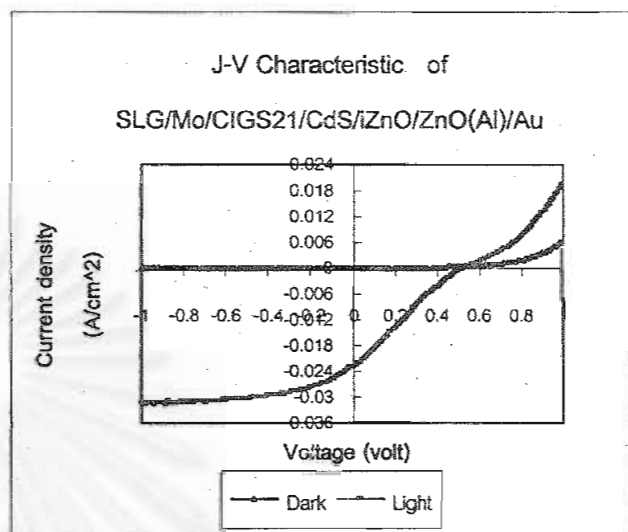
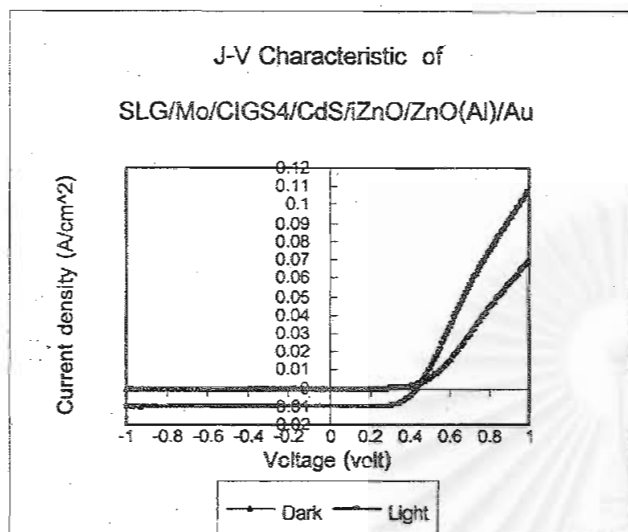


รูปที่ 6.32 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS48/CdS(5)/Au จากจำนวน 60 จุด ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS 48

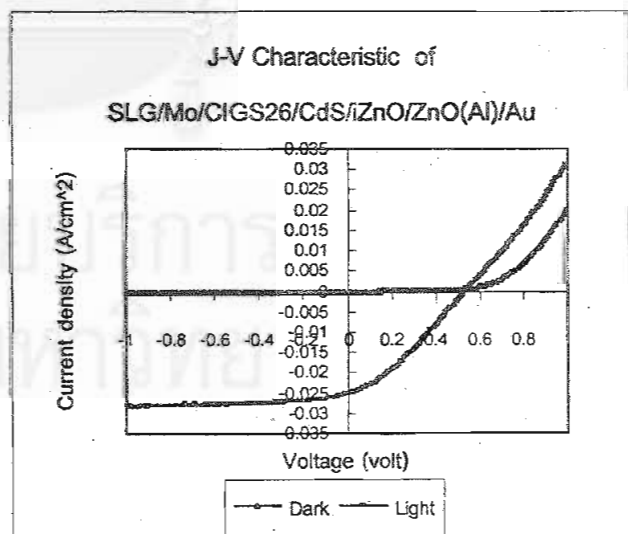
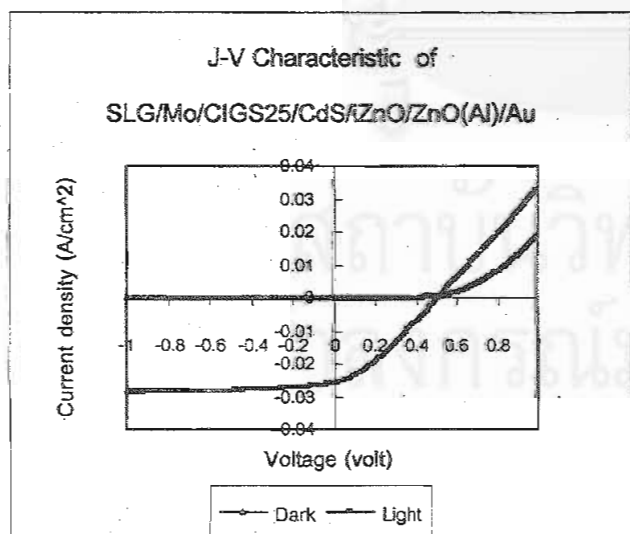
จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/Au ดังแสดงในรูปที่ 6.28-6.32 พบว่าการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อในโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/Au มีลักษณะที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากวิธีการเตรียมฟิล์มบางCdS โดยในรูปที่ 6.28 การเตรียมฟิล์มบางCdS จะเตรียมจากสารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นสูง (0.5M) ขณะที่ในรูปที่ 6.29 การเตรียมฟิล์มบางCdS จะเตรียมจากสารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.06M) แต่ทั้งนี้สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงประกอบการพิจารณาคือเนื้อฟิล์มบางCu(In,Ga)Se₂ นอกจากนี้การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อในโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/Au จะขึ้นกับความหนาของฟิล์มบางCdS โดยเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบางCdS เพิ่มขึ้นการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อจะลดลงมาก จำเป็นต้องให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น จึงจะสามารถสังเกตลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้างนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.32

7. ผลการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au

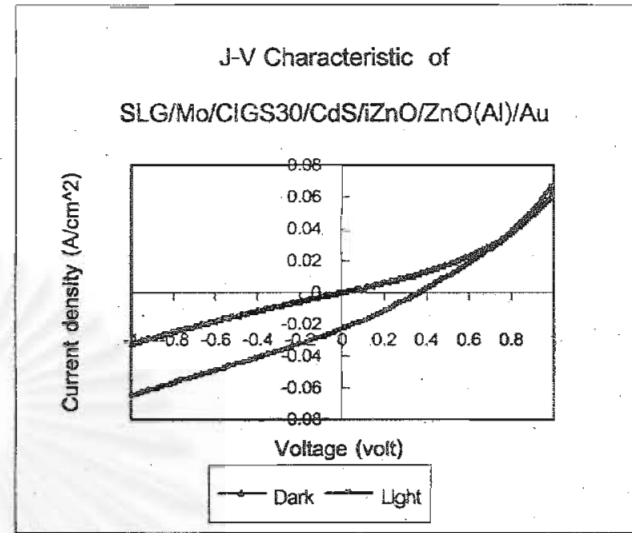
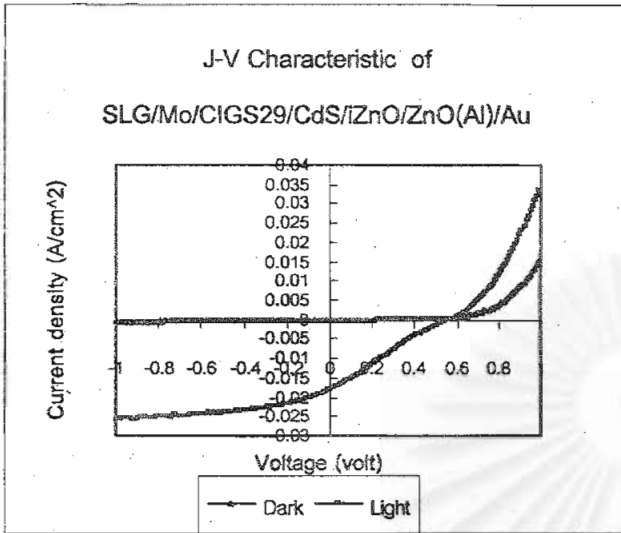
ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au มีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.33-6.43 โดยลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันนี้ส่วนหนึ่งจะขึ้นกับเนื้อของฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se₂ และสมบัติของฟิล์มบางCdS อันเป็นผลมาจากวิธีการที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางทั้งสองชนิด



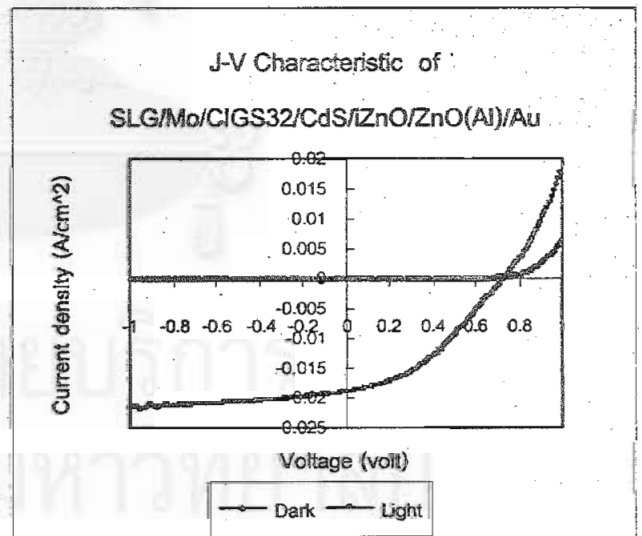
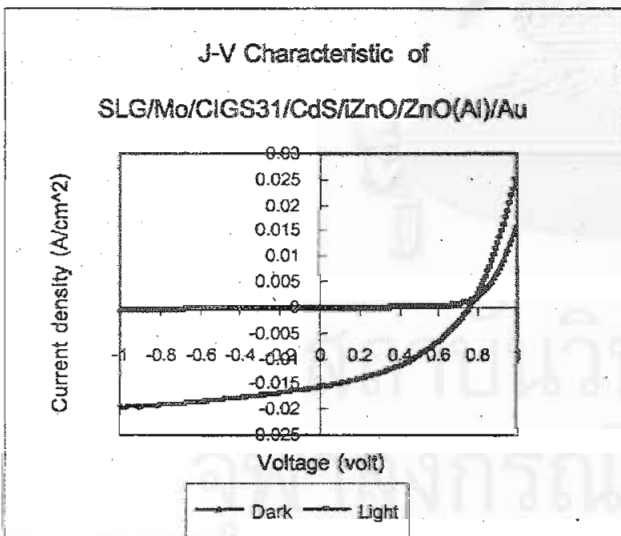
รูปที่ 6.33 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS4 และ CIGS 21



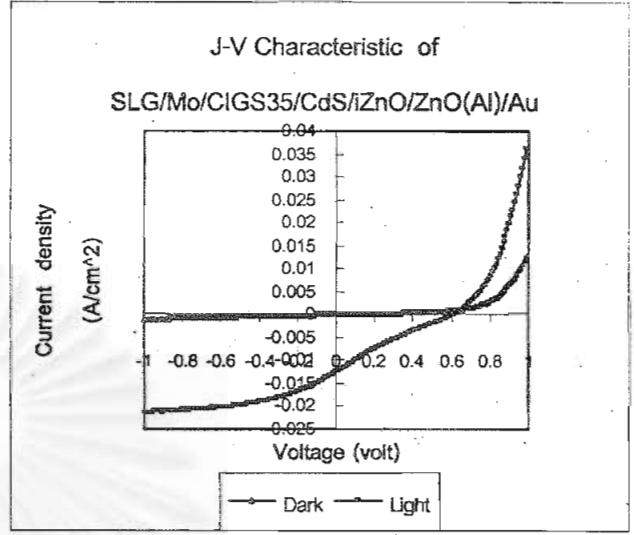
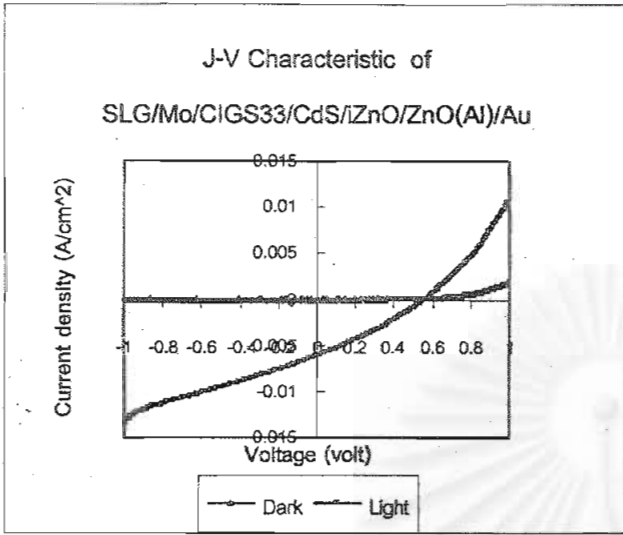
รูปที่ 6.34 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS25 และ CIGS 26



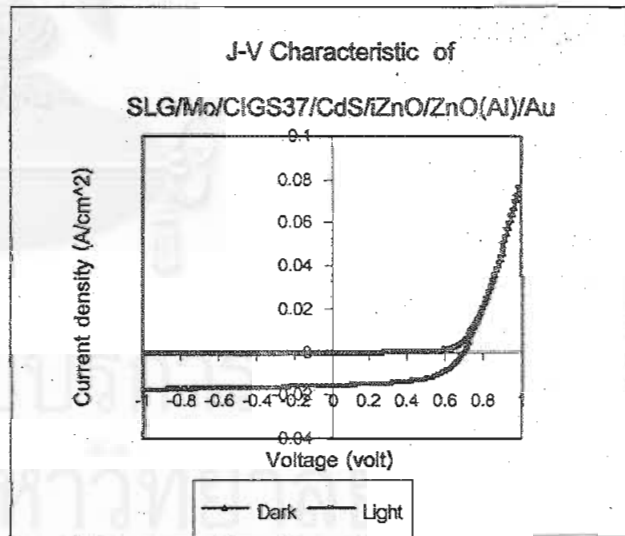
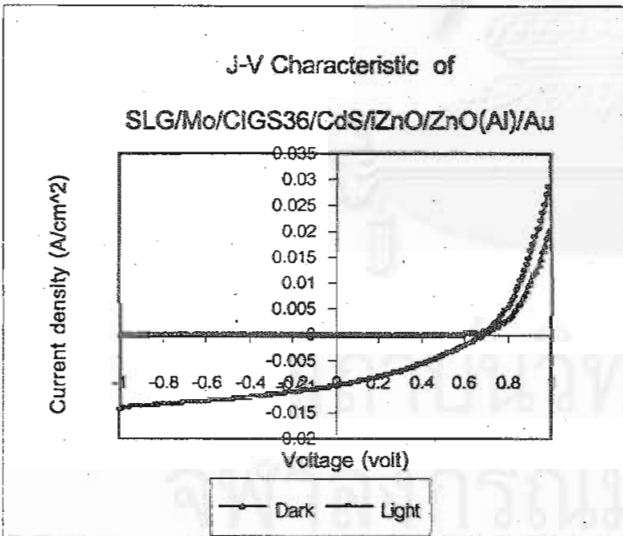
รูปที่ 6.35 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS29 และ CIGS 30



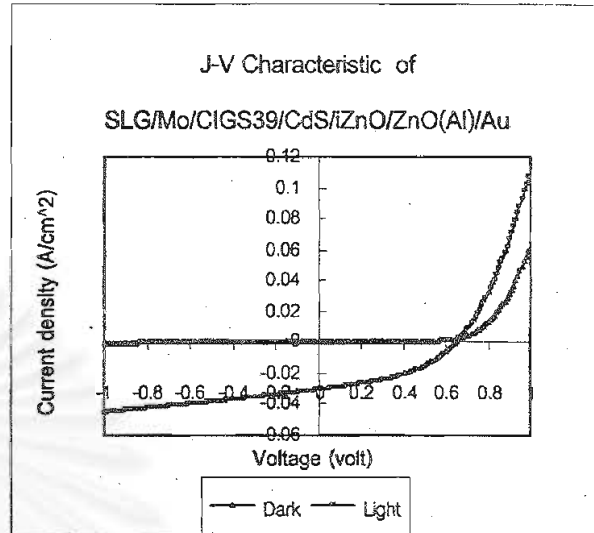
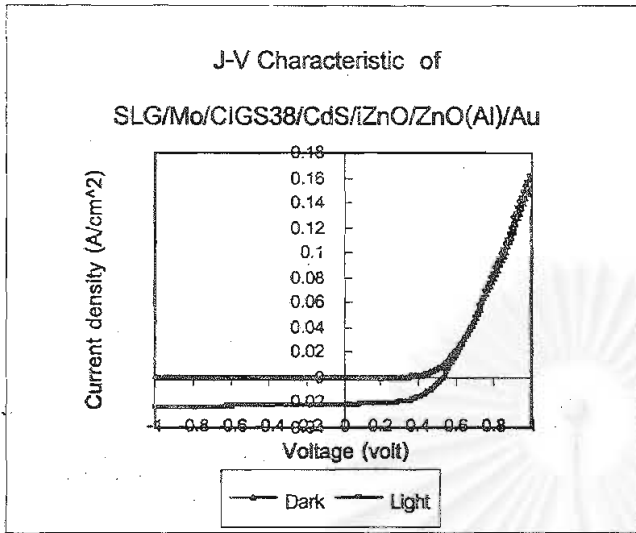
รูปที่ 6.36 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS31 และ CIGS 32



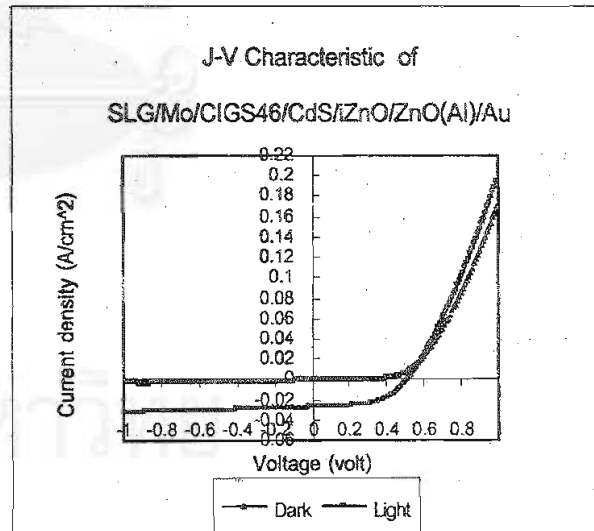
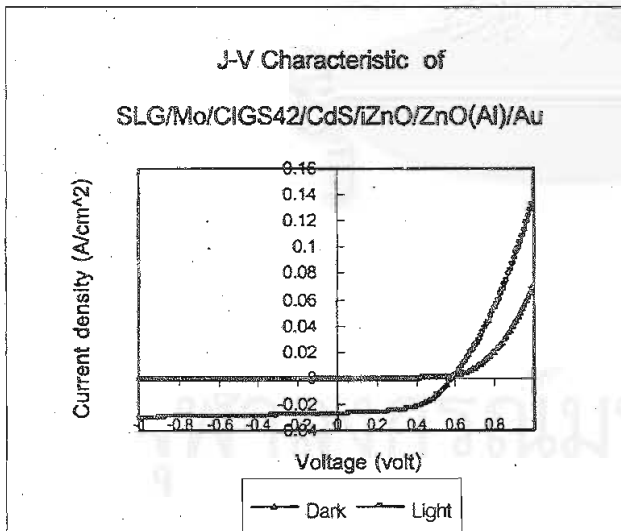
รูปที่ 6.37 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS33 และ CIGS 35



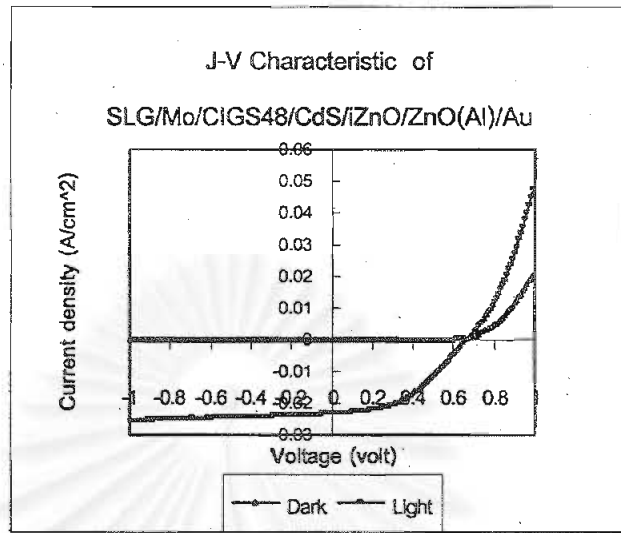
รูปที่ 6.38 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO(Al)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS36 และ CIGS 37



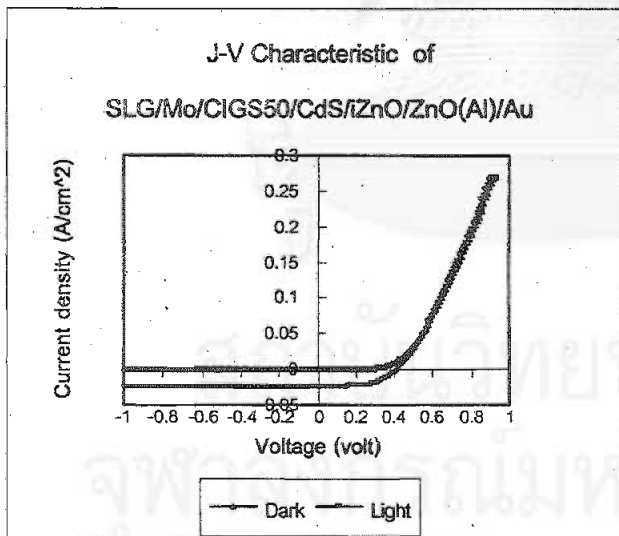
รูปที่ 6.39 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS38 และ CIGS 39



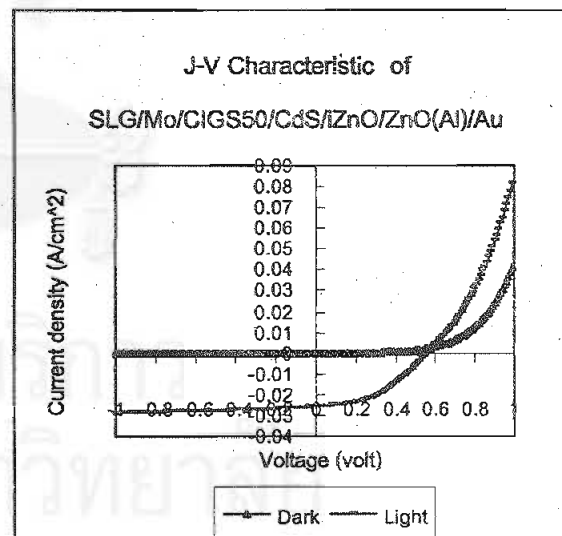
รูปที่ 6.40 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS42 และ CIGS 46



รูปที่ 6.41 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS48

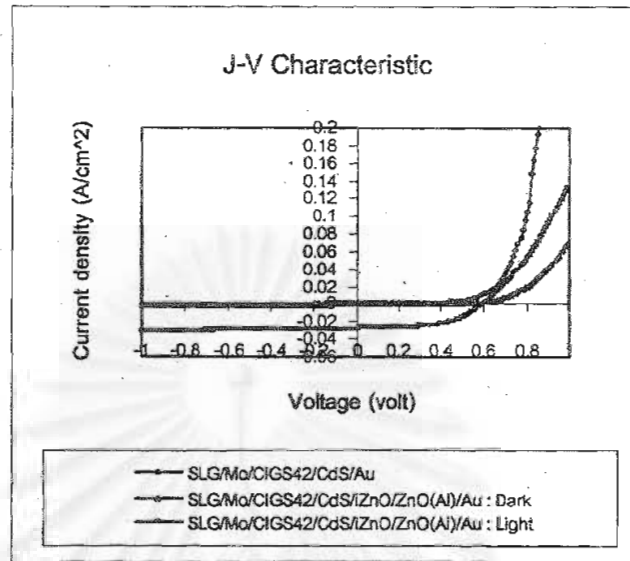


(a)



(b)

รูปที่ 6.42 แสดงลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เด่นๆ ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแผ่นตัวอย่างที่ CIGS50 (a) ไม่มีผลของการไขว้กัน (b) มีผลของการไขว้กัน



รูปที่ 6.43 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS42/CdS /Au และ SLG/Mo/CIGS42/CdS/ZnOZnO(AI) /Au (กรณีไม่ฉายแสง (Dark) และฉายแสง (Light))

จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ดังแสดงในรูปที่ 6.33-6.42 ของโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/ZnO/ZnO(AI)/Au พบว่าลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อในโครงสร้างนี้จะแตกต่างกัน โดยส่วนสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อนี้คือเนื้อฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 ที่มีขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกันในแต่ละครั้ง และความไม่สม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มบางตลอดทั้งแผ่น²¹ และส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยในรูปที่ 6.42 (a) การเตรียมฟิล์มบาง CdS ใช้สารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.06M) ขณะที่ในรูปที่ 6.42 (b) การเตรียมฟิล์มบาง CdS ใช้สารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นสูง (0.5M) เมื่อเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าในรูปที่ 6.42 (a) กับ รูปที่ 6.42 (b) ในกรณีที่ไม่มีแสงฉายจะพบว่าการนำไฟฟ้าในรูปที่ 6.42 (a) จะดีกว่ารูปที่ 6.42 (b) และเมื่อมีการฉายแสงพบว่ารูปที่ 6.42 (a) เกือบจะไม่พบลักษณะการไขว้กัน (Cross over) ของเส้นกราฟระหว่างฉายแสง และไม่ฉายแสง

ขณะที่ในรูปที่ 6.42 (b) จะเห็นลักษณะการไขว้กันของเส้นกราฟระหว่างฉายแสง และไม่ฉายแสงอย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะการไขว้กันนี้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของสิ่งเจือปนภายในสารละลายไทโอยูเรีย โดยลักษณะการไขว้กันนี้จะลดน้อยลงเมื่อสารละลายไทโอยูเรียมีความเข้มข้นน้อยลง นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มบาง CdS จะมีผลต่อลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อในขณะที่มีการฉายแสงดังแสดงในรูปที่ 6.33 (CIGS 21) และรูปที่ 6.35 (CIGS 29) โดยลักษณะเส้นกราฟที่เป็น S-shape เมื่อมีการฉายแสงจะปรากฏเมื่อความหนาของฟิล์มบาง CdS เกิน 1000 อังสตรอม

สำหรับรูปที่ 6.43 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะความหนาแน่นกระแส-ความต่างศักย์ระหว่างโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS42/CdS/Au และ SLG/Mo/CIGS42/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au จะถูกนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

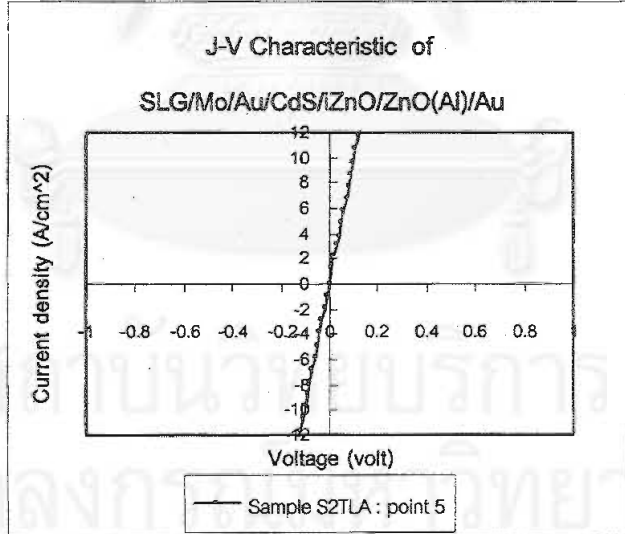
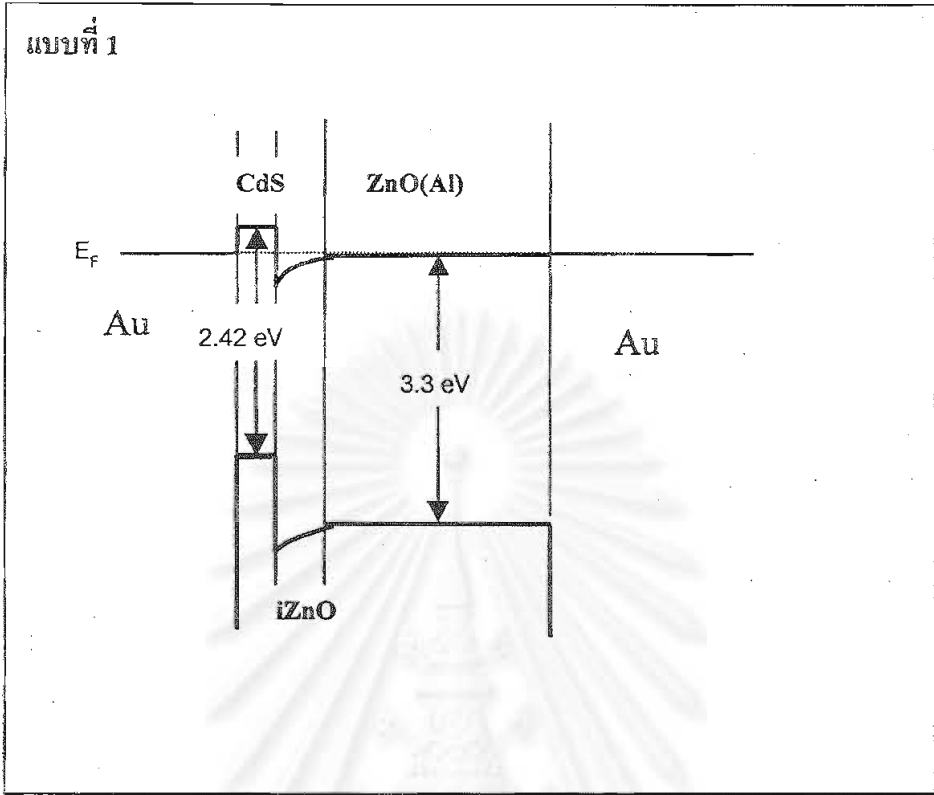
วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 โครงสร้างหลัก ได้แก่ Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au, Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au และโครงสร้างย่อยๆ ซึ่งได้แก่ SLG/CdS, Au/CdS/Au, Mo/CdS/Au, Mo/Cu(In,Ga)Se₂/Au และ Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวระนาบที่วัดได้จากโครงสร้าง SLG/CdS มีค่าประมาณ $5 \times 10^6 \Omega - \text{cm}$ ขณะที่สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวตั้งฉากที่วัดได้จากโครงสร้าง Au/CdS/Au และ Mo/CdS/Au มีค่าประมาณ $10^2 - 10^3 \Omega - \text{cm}$ เป็นตัวชี้ให้เห็นว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวตั้งฉากมีค่าต่ำกว่าในแนวระนาบมากและจากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au พบว่าลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านโครงสร้างนี้เกือบจะทั้งหมดเป็นแบบโอห์มมิก ทำให้สามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในโครงสร้างนี้เป็นแบบโอห์มมิกด้วย ทั้งนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เป็นแบบโอห์มมิกนี้ จะสอดคล้องกับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าต่ำของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เมื่อวัดในแนวตั้งฉาก สำหรับกระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในโครงสร้าง

Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au และโครงสร้าง Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ไม่อาจจะชี้ชัดลงไปได้อย่างแน่นอนว่ามีลักษณะเป็นแบบใด แต่จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/CdS/Au จะเห็นว่า มีลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านโครงสร้างนี้เป็นแบบโอห์มมิก ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au น่าจะเป็นแบบโอห์มมิก แต่การที่เห็นลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านโครงสร้างนี้ไม่เป็นแบบโอห์มมิก อาจเนื่องมาจากผลที่เกิดขึ้นจากการนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่าง CdS กับ iZnO/ZnO(AI) แสดงผลที่เด่นชัดกว่า การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่าง Mo กับ CdS ทั้งนี้เป็นเพราะว่ารอยต่อระหว่าง Mo กับ CdS แสดงผลการเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกไม่ดีเท่ารอยต่อระหว่าง Au กับ CdS และสำหรับกรณีกระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในโครงสร้าง Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au จะพิจารณาจากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/Au และ Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au ซึ่งพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/Au พบว่ามีรอยต่อในแบบของขอตติที่เกิดขึ้นระหว่าง Mo กับ Cu(In,Ga)Se₂ และเมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au จะพบว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีส่วนช่วยให้รอยต่อที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ดีขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในโครงสร้าง Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ไม่ได้แสดงลักษณะความเป็นฉนวนทั้งยังสามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ค่อนข้างดี ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 6.43 และจากข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถนำมาใช้ในการเขียนลักษณะของแถบพลังงานที่เป็นไปได้ของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au, Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ได้ดังต่อไปนี้

1. โครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au

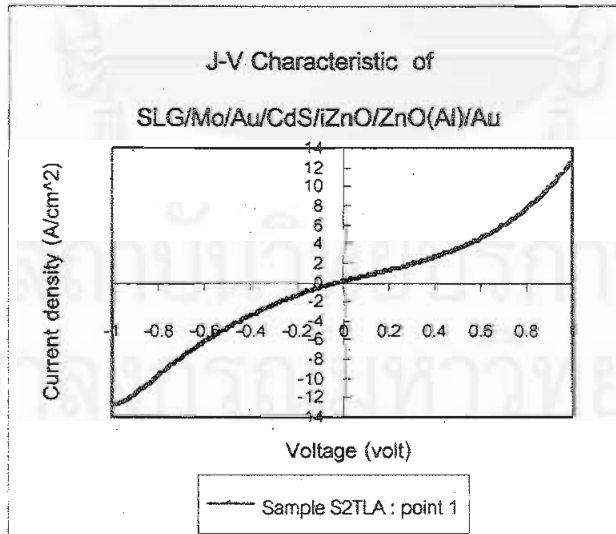
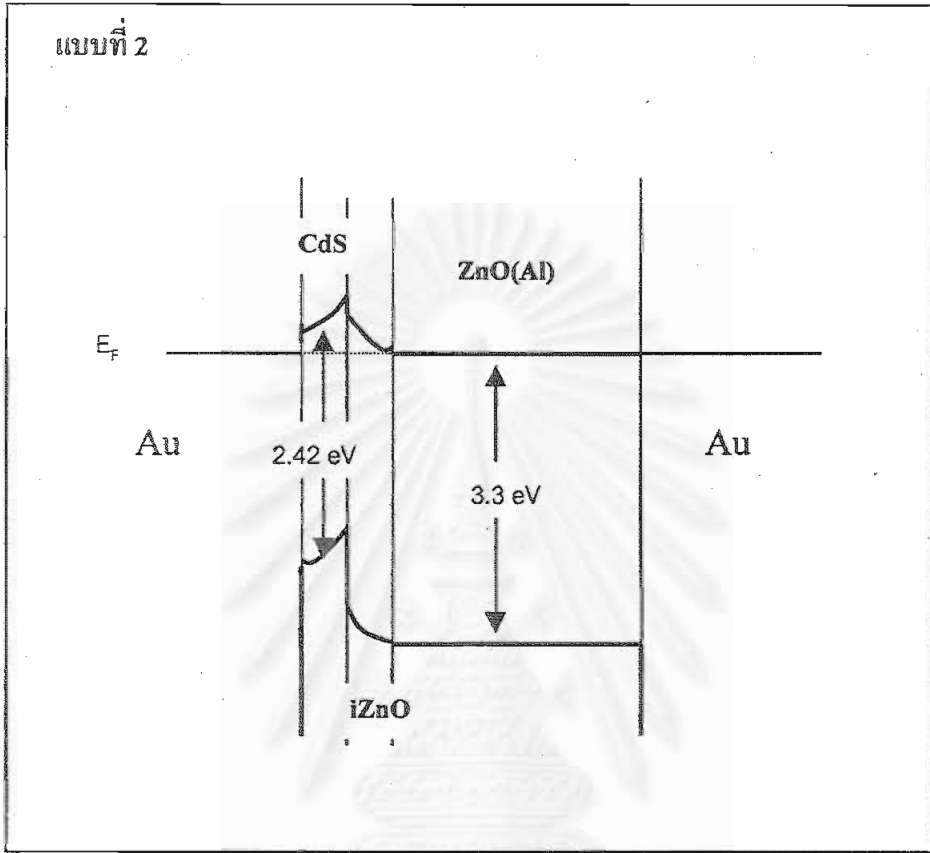
ลักษณะของแถบพลังงานที่เป็นไปได้ของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ที่สภาวะสมดุล เมื่อมีผลของสถานะรอยต่อระหว่าง CdS กับ iZnO ดังแสดงในรูปที่ 6.44 และ 6.45



แบบที่ 1

รูปที่ 6.44 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่ 1

(ต่อ)

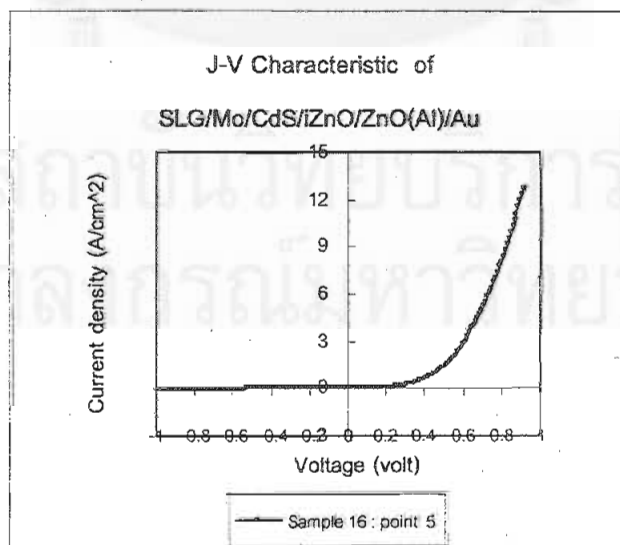
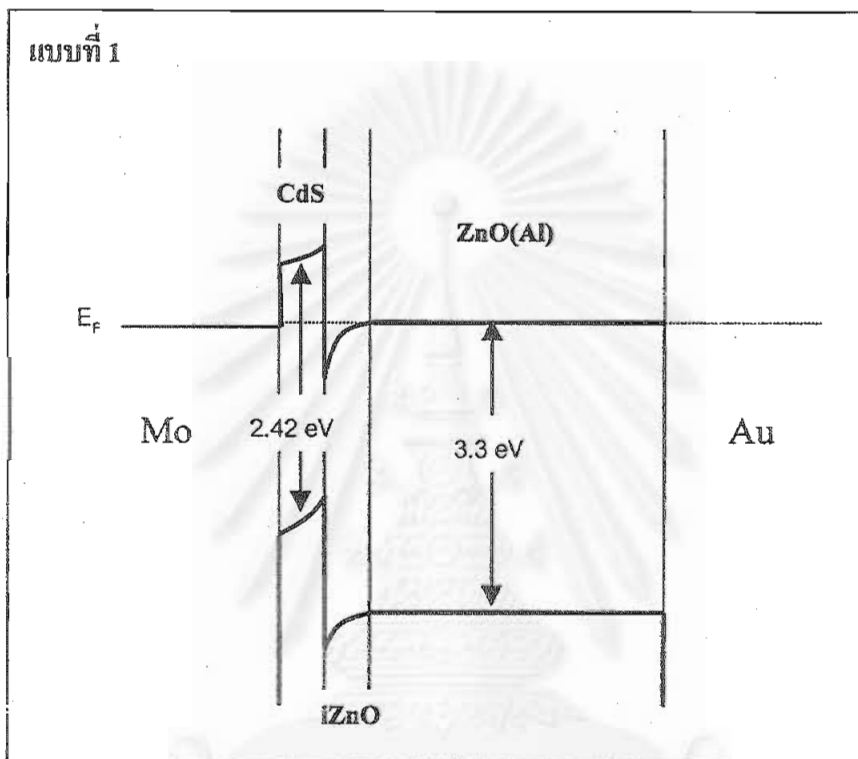


แบบที่ 2

รูปที่ 6.45 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่ 2

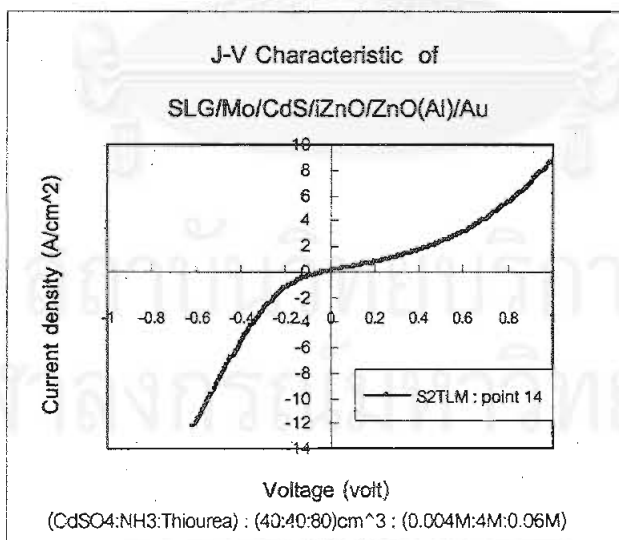
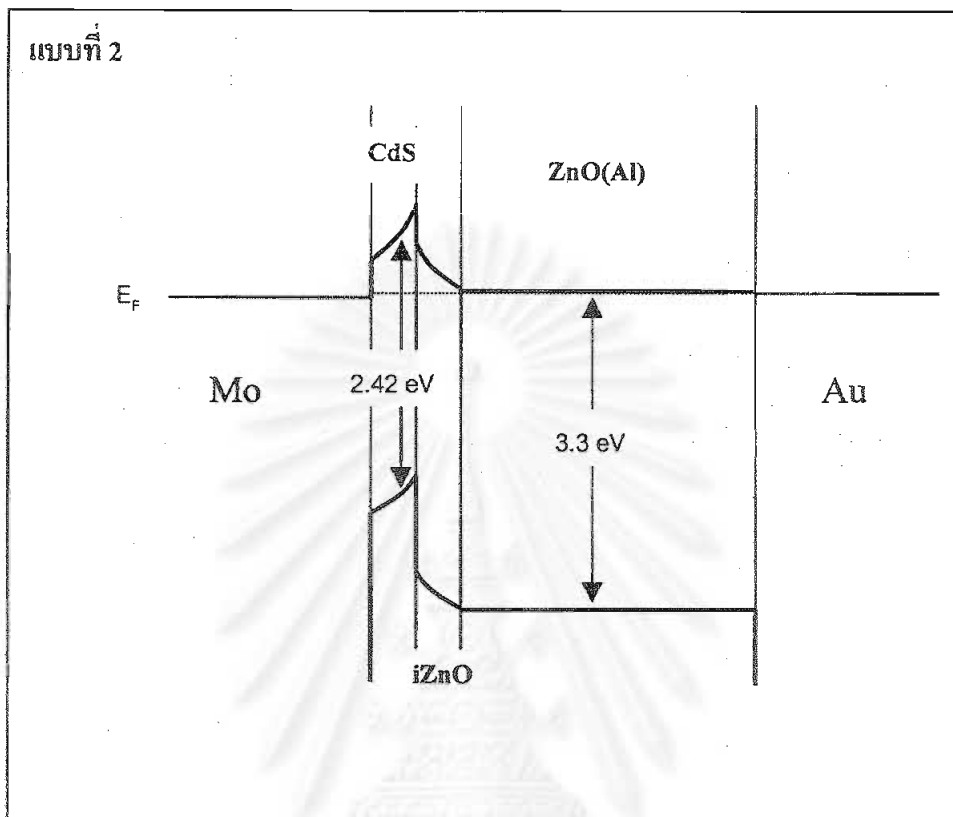
2. โครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au

ลักษณะของแถบพลังงานที่เป็นไปได้ของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ที่สภาวะสมดุล แสดงดังรูปที่ 6.46 และ 6.47



รูปที่ 6.46. แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ในแบบที่ 1

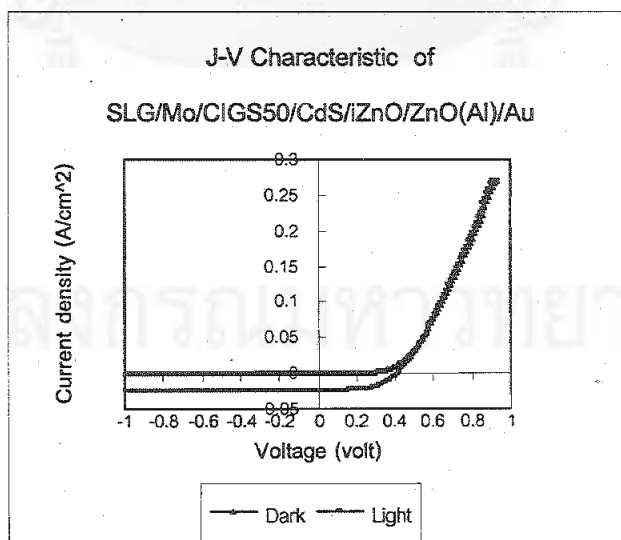
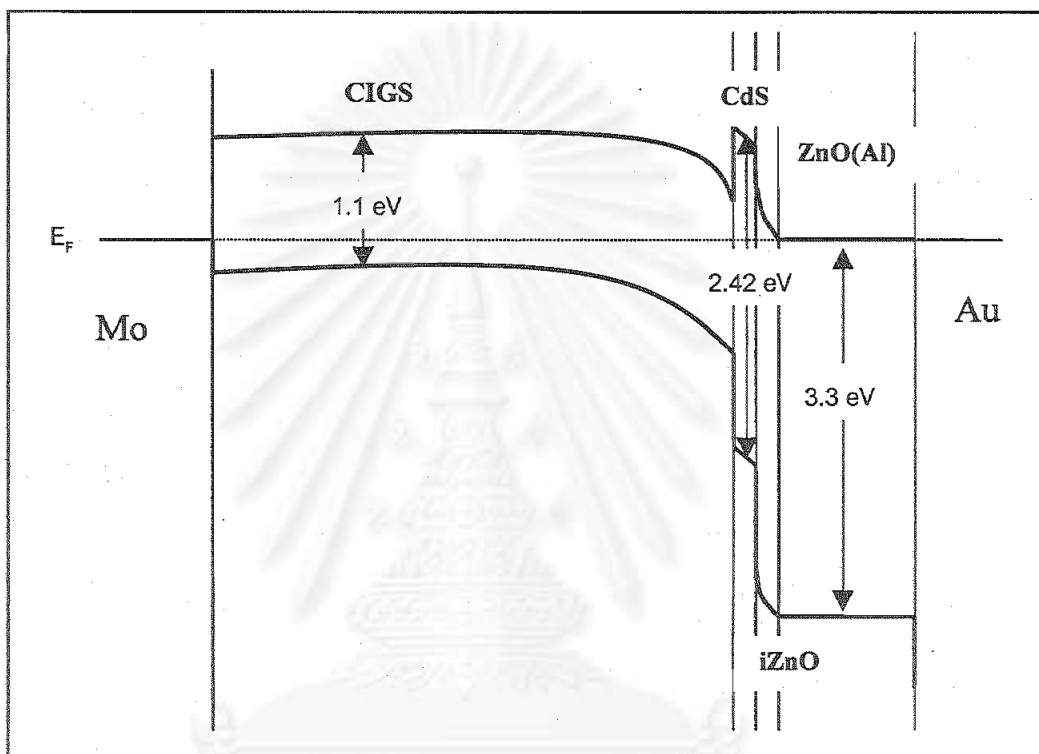
(ต่อ)



รูปที่ 6.47 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(AI)/Au ในแบบที่ 2

3. โครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au

ลักษณะแถบพลังงานที่เป็นไปได้ของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ที่สภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 6.48



รูปที่ 6.48 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของโครงสร้าง Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 โครงสร้าง ได้แก่ Au/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au, Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au และ Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au (โครงสร้าง Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se₂ เป็นชั้นดูดกลืนแสง) เพื่อศึกษากระบวนการการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการออบเคลือบสารเคมีในโครงสร้างทั้งสาม

ผลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 โครงสร้างหลักข้างต้น และโครงสร้างย่อยๆ ซึ่งได้แก่ SLG/CdS, Au/CdS/Au, Mo/CdS/Au, Mo/Cu(In,Ga)Se₂/Au และ Mo/Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวระนาบมีค่าประมาณ 5×10^5 (Ω -cm) ขณะที่สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวตั้งจากมีค่าประมาณ 10^2 - 10^3 (Ω -cm) เป็นตัวชี้ให้เห็นว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวตั้งจากมีค่าต่ำกว่าในแนวระนาบมา และจากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างดังกล่าวข้างต้น พบว่ากระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และรอยต่อที่เกี่ยวข้องของโครงสร้าง Au/CdS/Au Au/CdS/ZnO(Al)/Au และ Mo/CdS/Au มีรูปแบบเป็นแบบโอห์มมิก สำหรับโครงสร้าง Mo/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า มีทั้งแบบที่เป็นโอห์มมิกและไม่เป็นโอห์มมิก (Non-Ohmic) สำหรับโครงสร้าง Cu(In,Ga)Se₂/CdS/Au Cu(In,Ga)Se₂/CdS/iZnO/ZnO(Al)/Au ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นแบบ Rectifying อย่างชัดเจน กล่าวคือโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ทั้งสองแบบเป็นไดโอด จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างทั้งหมดดังกล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ในแนวตั้งจากกับฟิล์มเป็นการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อ Au/CdS ก็เป็นแบบโอห์มมิกเช่นเดียวกัน ในขณะที่การนำไฟฟ้าผ่านรอยต่อ Mo/CdS และ CdS/ZnO(Al) เป็นแบบ Non-Ohmic และรอยต่อ Cu(In,Ga)Se₂/CdS เป็นแบบ Rectifying ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของทั้งสามโครงสร้างร่วมกัน สามารถนำมาเขียนลักษณะแถบพลังงานที่น่าจะเป็นไปได้สำหรับโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟิล์มบางของ CdS และรอยต่อที่เกี่ยวข้องได้ นอกจากนี้ยัง

พบว่าตัวแปรต่างๆ ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมีมีผลอย่างมากต่อลักษณะการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยเฉพาะผลของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่อยู่ในโครงสร้าง $\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}/\text{Au}$ เมื่อมีการฉายแสงให้แก่โครงสร้างนี้ โดยจะปรากฏลักษณะการไขว้กันของเส้นกราฟเมื่อไม่มีการฉายแสงและเมื่อมีการฉายแสง เมื่อฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เตรียมขึ้นจากสารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นสูง (0.5M) และลักษณะการไขว้กันนี้จะหายไปเมื่อใช้สารละลายไทโอยูเรียที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.06M) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้¹⁸ และความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ยังส่งผลต่อลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง $\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}/\text{Au}$ โดยเมื่อฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีความหนามาก ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อมีการฉายแสงจะมีลักษณะของ S-shape เกิดขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ดี และพบว่าความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ใช้ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 400 อังสตรอม และความหนานี้เป็นความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมที่ใช้ในโครงสร้าง $\text{Au}/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}/\text{Au}$ และ $\text{Mo}/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}/\text{Au}$ ที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เพราะให้ผลที่มีความสอดคล้องกันทั้ง 3 โครงสร้าง

จากข้อมูลของลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้างหลักทั้งสามสามารถนำมาเขียนลักษณะของแถบพลังงานที่น่าจะเป็นไปได้ของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ สำหรับลักษณะของแถบพลังงานของโครงสร้าง $\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}/\text{Au}$ จะมีลักษณะที่สอดคล้องกับลักษณะของแถบพลังงานที่มีผู้ศึกษาวิจัยมาก่อนหน้านี้¹³

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ ทำให้ทราบถึงกระบวนการการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ รวมทั้งเข้าใจถึงบทบาทของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่อยู่ภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ $\text{Mo}/\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS}/\text{iZnO}/\text{ZnO(Al)}$ ได้ดียิ่งขึ้น
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำมาทำเป็นชั้นกันชนในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการเข้าใจปัญหาและสามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ได้

ข้อเสนอแนะ

ลักษณะแถบพลังงานของโครงสร้าง $\text{Mo/Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS/ZnO/ZnO(Al)}$ ที่ได้ในงานวิจัยนี้ยังขาดรายละเอียดในส่วนย่อยอยู่ ดังนั้นเมื่อสามารถเตรียมฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 ได้ดีแล้ว ควรที่จะวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของโครงสร้างนี้ ซึ่งจะสามารถหาค่าต่างๆที่ถูกต้อง อาทิเช่น ศักย์ขวางกัน ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการเขียนลักษณะแถบพลังงานถูกต้องยิ่งขึ้น และเข้าใจถึงบทบาทของฟิล์มบางในแต่ละชั้นที่อยู่ภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเมื่อสามารถที่จะเตรียมฟิล์มบาง Cu(In,Ga)Se_2 ได้ดีแล้ว น่าที่จะหาสารชนิดอื่นมาใช้แทนแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งอาจจะเป็นซิงค์ซัลไฟด์ ซิงค์ซีลีไนด์ หรือไม่กี่ตัวชั้นนี้ออกเลย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Ruxandra, V. and Antohe, S. The effect of the electron irradiation on the electrical properties of thin polycrystalline CdS layers. J.Appl.Phys. Vol.84 No.2 (1998): 727-733.
2. Smith, R.W. and Rose, A. Space-Charge-limited Currents in Single Crystals of Cadmium Sulfide. Physical Review Vol.97 No.6 (1955): 1531-1537.
3. Richard, J. Fundamentals of Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons, 1988.
4. Charles, K. Introduction to Solid State Physics. New York: John Wiley & Sons, 1971.
5. Nichols, K.G. and Vernon, E.V. Transistor Physics. London: Chapman and Hall, 1966.
6. Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 1981.
7. Streetman B. G. Solid State Electronic Devices (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall, 1990.
8. กรกฎ วัฒนวิเชียร. โซลิดสเตตอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
9. Robert, F. Semiconductor Device Fundamentals. New York: Addison-Wesley, 1996.
10. Sharma, B.L. and Purohit, R.K. Semiconductor Heterojunction. New York: Pergamon Press, 1974.
11. Calixto, M.E. and Sebastin, P.J. A comparison of the properties of chemical vapor transport deposited CdS thin films using different precursors. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 59 (1999): 65-74.
12. Kessler, J., Velthaus, K.O., Ruckh, M. R., Laichinger, R. and Schock H.W. Chemical bath deposition of CdS on CuInSe₂, Etching effects and growth kinetics. Proceedings of the 6th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (1992): 1005-1010.

13. Rau, U. and Schock, H.W. Electronic properties of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ heterojunction Solar cells-recent achievements, current understanding, and future Challenges. Journal of Applied Physics A (1999): 13-29
14. Nair, P.K. and Samsore, L.E. A Critical Discussion of The Vary High Photoconductivity in Chemically Deposited Cadmium Sulfide Thin Films. Solar Energy Matter (1987): 211-277.
15. Chu, T.L., Shirley S., Schultz, N., Wang, and Wu, C.Q. Solution-Grown Cadmium Sulfide Films for Photovoltaic Devices. J.Electrochem.Soc 139 (1992): 2443 – 2446.
16. Pandya, D.K. and Chopra, K.L. Growth Kinetics and Polymorphism of Chemically Deposited CdS Films. J.Electrochem. Soc.127 (1980): 943-948.
17. Hashimoto, Y., Kohara, N., Negami, T., Nishitani, N. and Wada, T. Chemical bath deposition of CdS buffer layer for CIGS solar cells. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 50 (1998): 71-77.
18. Kylner, A. Effect of impurities in the CdS buffer layer on the performance of the $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin film solar cell. J. Appl.Phys. Vol. 85 No. 9 (1999): 6858-6865.
19. Shin'ichi Kuranouchi, Tatsuo Nakazawa, Atsushi Ashida, and Nobuyuki Yamamoto. Cadmium Sulfide thin films prepared by chemical bath deposition method. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 35 (1994): 185 –191
20. Takuya Nakanishi and Kentaro Ito. Properties of chemical bath deposited CdS thin Films. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 35 (1994): 171-178
21. ศักดิ์ถาวร พงศ์วินชยา. การเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ โดยวิธีการระเหยร่วมและการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
21. Karl W. Boer. Survey of Semiconductor Physics. Vol. 2. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
23. Ruck, M., Schmid, D. and Schock, H.W. Photoemission studies of the ZnO/CdS Interface. J.Appl.Phys. Vol.76 No.1 (1994): 5945-5948.

24. Nelson, Art J. and et. al. Soft x-ray photoemission investigation on the effect of In doping in CdS/CuInSe₂ heterojunction formation. J.Appl.Phys. Vol.72 No.12 (1994): 5888-5891
25. สิงหนเดช แดงจวง. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการอบเคลือบสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

การวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า

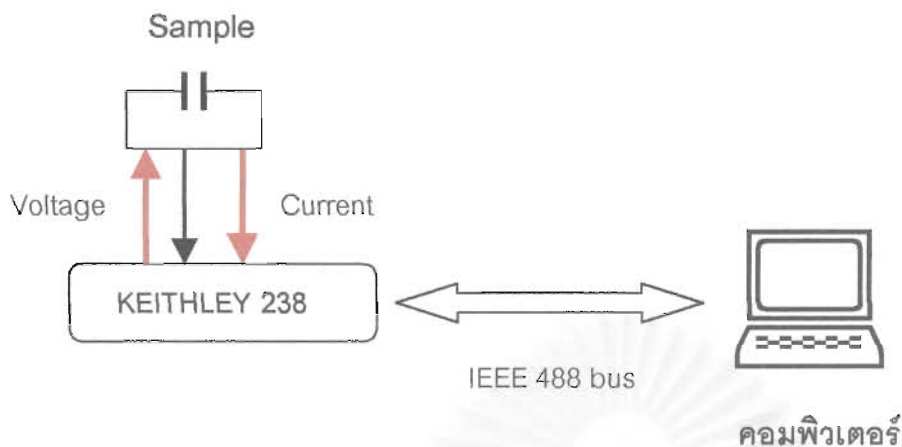
1. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC
2. เครื่อง Keithley 238 High Current Source Measure Unit
3. การ์ดอินเตอร์เฟซและบัล IEEE 488

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC ประกอบด้วย ซีพียู จอแสดงผล คีย์บอร์ด และ การ์ดอินเตอร์เฟซ ซึ่งใช้ในการควบคุมเครื่อง Keithley 238 แล้วยังใช้อ่าน เรียง เก็บ และประมวลผลข้อมูลที่อ่านได้ โดยแสดงเป็นข้อมูลดิบและกราฟออกมาทางจอภาพและสามารถแสดงกราฟออกทางเครื่องพิมพ์ได้

2. เครื่อง Keithley 238 High Current Source Measure Unit มีความสามารถในการวัดค่ากระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาได้เลย โดยสามารถบ่อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการวัดเข้าไปแล้ววัดกระแสออกมา หรือบ่อนค่ากระแสในช่วงที่ต้องการเข้าไปแล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมา

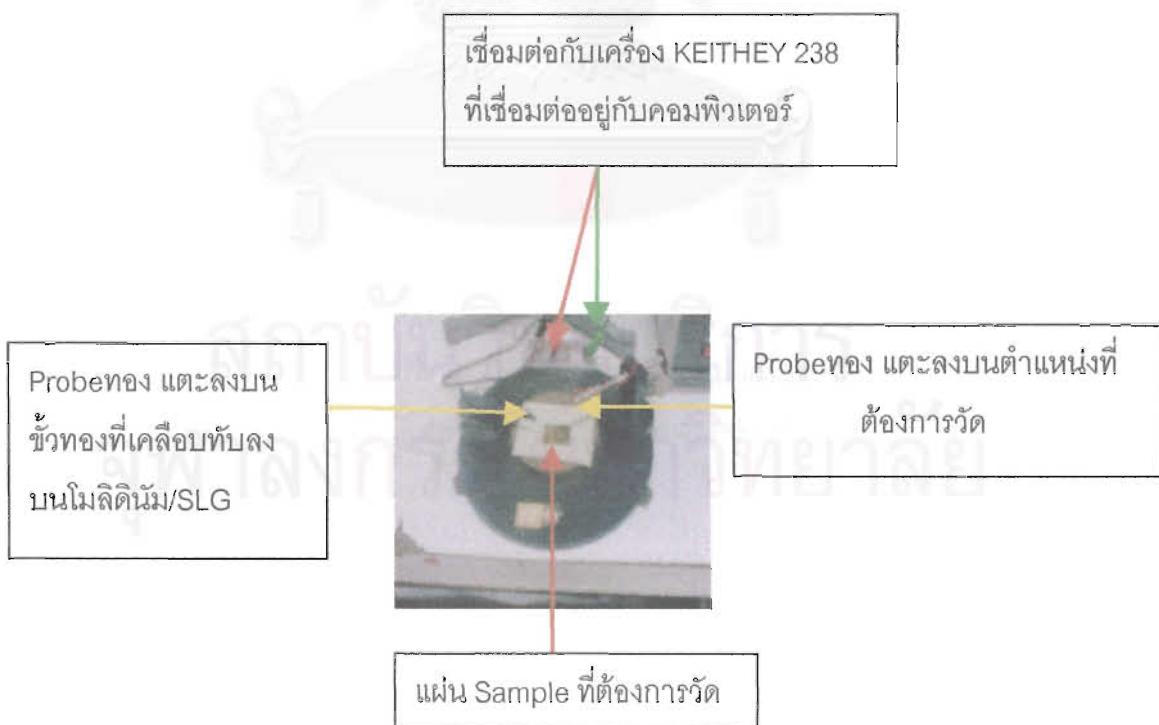
3. การ์ดอินเตอร์เฟซและบัล IEEE 488 เป็นอุปกรณ์เกี่ยวกับการส่งและรับข้อมูลระหว่างเครื่องมือ ทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างเครื่องมือหนึ่งไปสู่เครื่องมืออื่นๆ สามารถควบคุมการเชื่อมต่อ การสั่งงาน การรับและส่งข้อมูลได้โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ ก แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบวัด I-V

2. ขั้นตอนการวัด I-V

1. จัดวางแผ่น Sample ดังแสดงในรูป ข



รูปที่ ข แสดงการจัดวาง Sample

2. ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม I-V Characteristic ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่อง Keithley 238 High Current Source Measure Unit โดยป้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการวัด เครื่อง KEITHLEY 238 จะวัดค่ากระแสไฟฟ้าออกมา โดยคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่อง KEITHLEY 238 จะเก็บข้อมูลไว้แล้วทำการประมวลผลและแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

โปรแกรมที่ใช้ในการวัด จะแสดงผลของกราฟ I-V ณ ตำแหน่งที่ทำการวัด



เครื่อง KEITHLEY 238
เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์

เครื่อง KEITHLEY 238 HIGH CURRENT SOURCE MEASURE UNIT
เมื่อป้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ในช่วงที่ต้องการวัดเข้าไป เครื่องจะให้ค่ากระแสออกมา โดยแสดงผลเป็นกราฟ I-V ผ่านออกมาทางคอมพิวเตอร์

รูปที่ ค แสดงระบบจริงที่ใช้วัด I-V

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวไพบรมา ดิษฐสมบุรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาปริญญาครุศาสตรบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย