



บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

การวัดและศึกษาสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ในงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษารอยต่อวิวิธพันธุ์ ทั้งในส่วนของรอยต่อที่สร้างอยู่บนชั้นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และรอยต่อที่เป็นแบบฟิล์มบาง โดยในการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นนี้ ได้มีการทำการวัดลักษณะความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ ทั้งในสภาวะที่มืดและสภาวะฉายแสงอาทิตย์จำลอง ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ และการวัดลักษณะความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ซึ่งทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

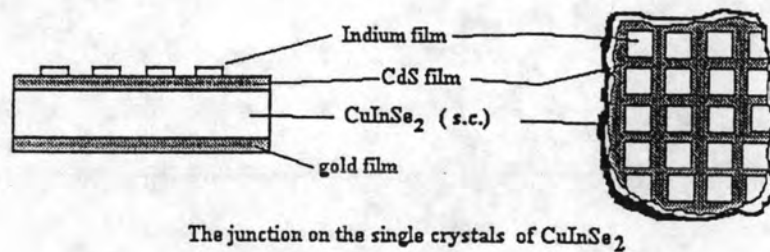
รอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ บนชั้นผลึกเดี่ยว CuInSe_2

ได้มีการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ลงบนชั้นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิด พี โดยมีขั้นตอนในการศึกษารอยต่อดังนี้

1. การเตรียมรอยต่อบนชั้นผลึกเดี่ยว

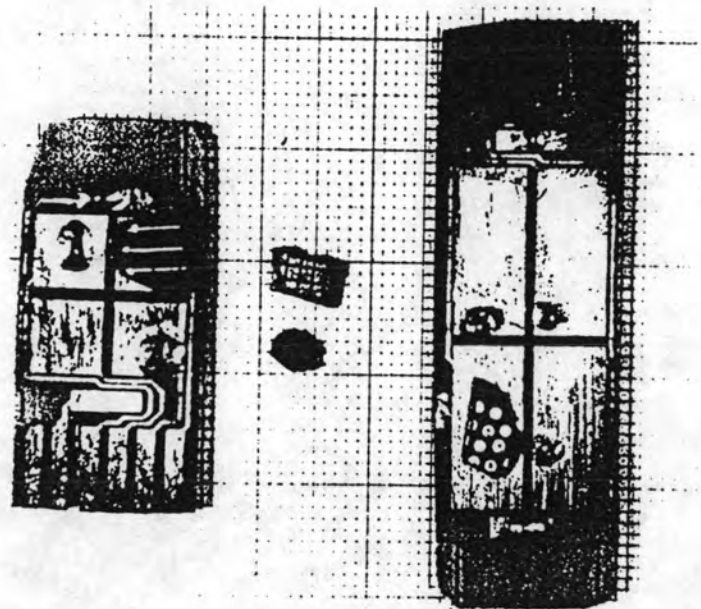
- 1.1 คัดเลือกชั้นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 หนาประมาณ 1 mm เพื่อนำมาตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชั่วคราว^{10,21} เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี
- 1.2 ทำการขัดผิวของชั้นผลึกเดี่ยว CuInSe_2 โดยเริ่มต้นจากกระดาษทรายความละเอียดเบอร์ 800 และ 1200 จากนั้นทำการขัดด้วยผงขัดอลูมินาความละเอียด 1.0, 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับ จนผิวเป็นมันวาว แล้วล้างออกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water) ในเครื่องล้างอุลตราโซนิก (ultrasonic bath)
- 1.3 ทำความสะอาดผิวหน้าของชั้นผลึกเดี่ยว ตามกระบวนการล้างชั้นผลึกโดยทั่วไป โดยเริ่มต้นล้างจาก trichloroethylene, acetone, methanol และน้ำดีไอออไนซ์ตามลำดับ โดยทั้งหมดจะกระทำในเครื่องล้างอุลตราโซนิก ขั้นตอนละ 3 นาที
- 1.4 ทำการกัดเปิดผิวหน้าของชั้นผลึกเดี่ยวด้วยกรดกัดทองความเข้มข้น 60 %

- (60% aqua regia) เป็นเวลา 20 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ จากนั้นทำการเป่าแห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจน
- 1.5 นำชิ้นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้ไปทำการระเหยฟิล์มบางของทองคำในเครื่องระเหยในสุญญากาศ (evapulating system) เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) โดยฟิล์มบางของทองคำมีความหนาประมาณ 1800 Å
 - 1.6 ทำการเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยวิธีอบสารเคมี (chemical bath deposition) โดยกระทำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS²⁶ ซึ่งจะมีความหนาประมาณ 300 - 350 Å
 - 1.7 ทำการระเหยฟิล์มบางของโลหะอินเดียม (indium) ในระบบสุญญากาศ เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน (front contact) มีความหนาประมาณ 1800 Å ซึ่งโครงสร้างแสดงชั้นรอยต่อที่เตรียมขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างชั้นรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ บนชิ้นผลึกเดี่ยว CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นได้

- 1.8 ทำการติดตั้งรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ลงบนแผ่นวงจรมพิมพ์ และทำการต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าด้วยลวดทองคำและกาวเงิน (silver paint) เพื่อเตรียมวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อที่เตรียมขึ้นได้



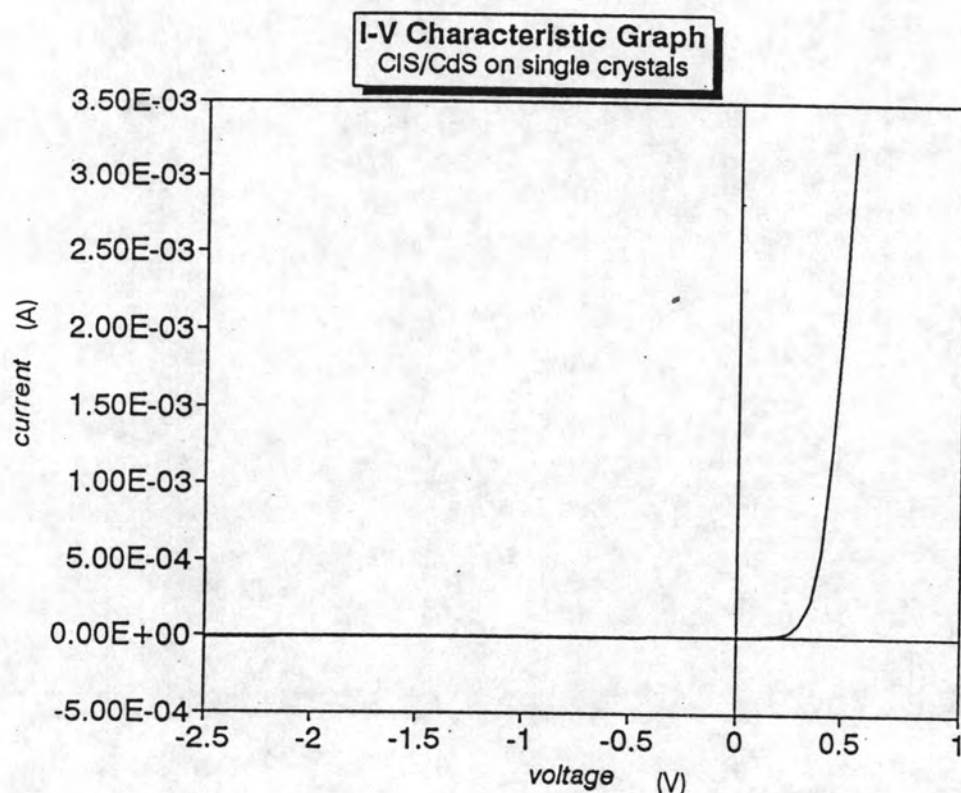
รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายแสดงรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นได้

2. การทดลองวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์^{1,19,25}

รอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ซึ่งเตรียมบนชั้นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิดพี จำนวน 7 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีรอยต่อที่สามารถต่อออกไปวัดได้ประมาณ 6 - 8 จุด ซึ่งจะถูกนำมาวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าตามขั้นตอนต่างๆ โดยผลการทดลองที่น่าเสนอนี้เป็นผลการทดลองจากรอยต่อส่วนใหญ่ที่ได้ทำการวัดจากจำนวนรอยต่อทั้งหมด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้อง ในสภาพมืด

โดยการนำรอยต่อที่เตรียมได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใส่ในภาชนะที่บดแสง แล้วทำการวัดด้วยระบบวัดที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งจากผลการ วัดความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.3

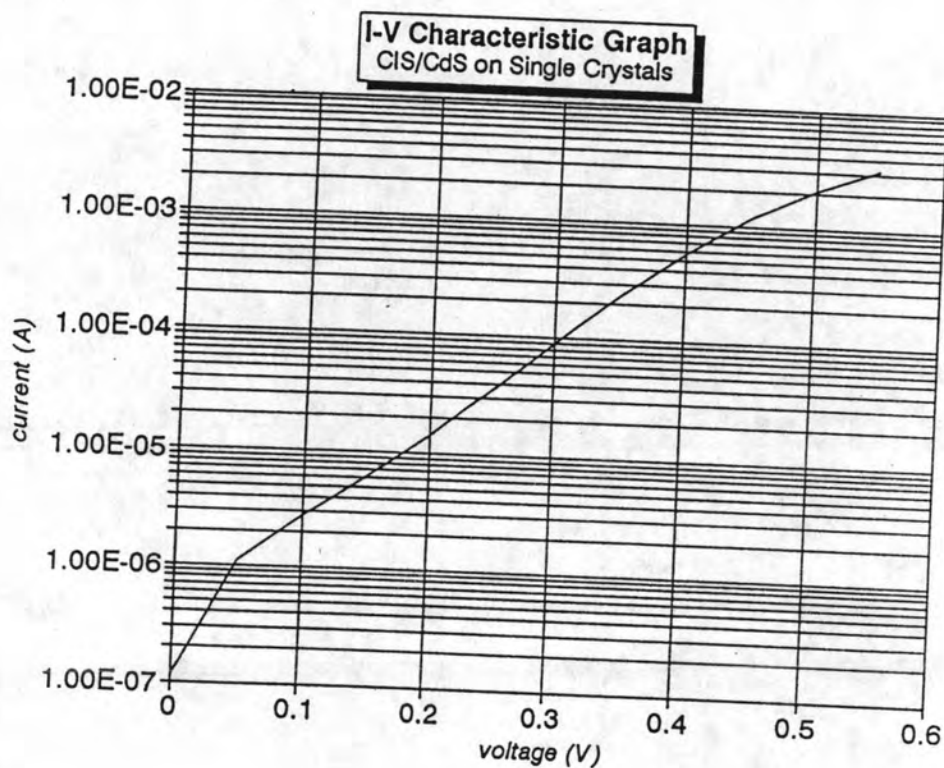


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ CuInSe_2 ที่เตรียมบนชั้นผลึกเดี่ยว CuInSe_2

จากกราฟในรูปที่ 6.3 นั้น แสดงให้เห็นถึงการมีสมบัติการเรียงกระแส (rectifying) ของ รอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้อย่างชัดเจน คือจะมีการยอมให้กระแสไหลผ่านได้สะดวกในด้านไบแอสตรง แต่จะมีการกั้นกระแสไม่ให้ไหล หรือไหลได้น้อยมากในด้านไบแอสย้อน ซึ่งเป็น สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของรอยต่อแบบไดโอด จากสมการของช็อคเลห์ (3.13) และสมการ (3.15) ความสัมพันธ์ กระแส - ความต่างศักย์ จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I = I_0 [\exp(qV/nkT - 1)] \quad (6.1)$$

ซึ่งถ้านำข้อมูลที่ได้จากการวัดในขั้นตอนมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ ในแบบกราฟกึ่งล็อก (semilog scale) ดังกราฟในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ในแบบกึ่งล็อก

จากกราฟในรูปที่ 6.4 สมการ (6.1) จะได้ว่า ความชันของกราฟในรูปที่ 6.4 ในส่วนที่เป็นลักษณะเชิงเส้น (linear) จะมีค่าเท่ากับเทอม q / nkT นั่นคือ

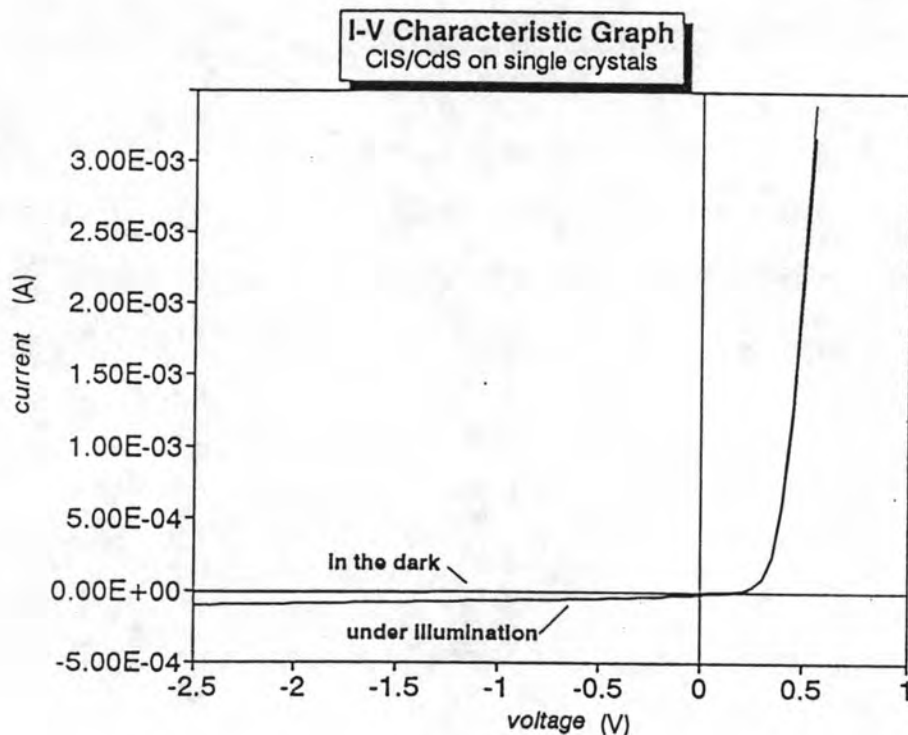
$$\text{ความชันกราฟ} = q / nkT \quad (6.2)$$

เมื่อ n คือค่าตัวแปรอุดมคติ และเทอม kT เป็นพลังงานความร้อน (thermal energy)

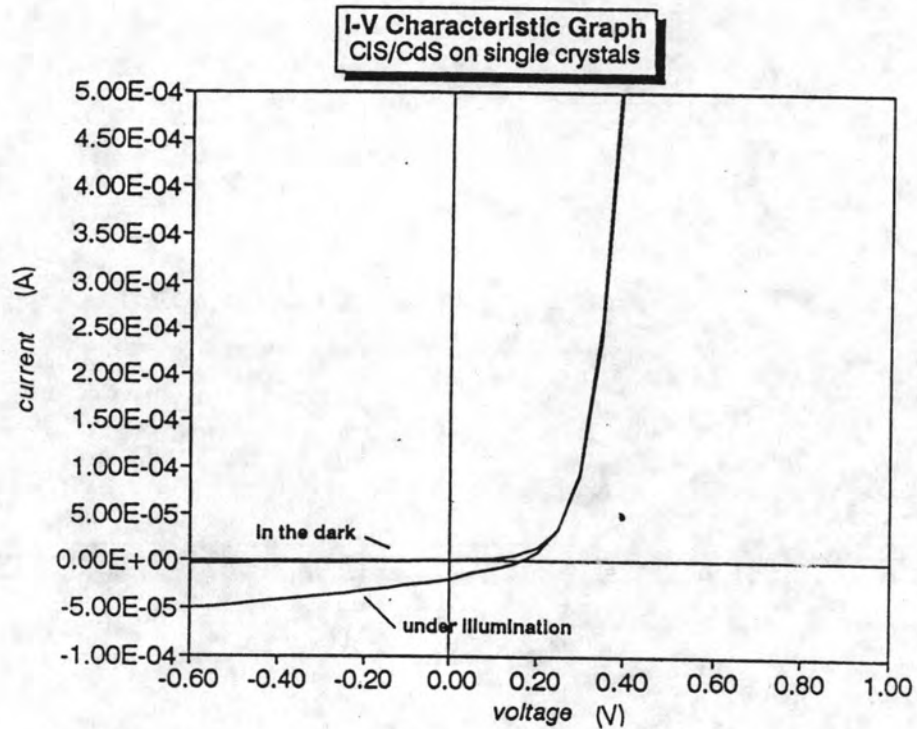
ส่วนจุดตัดแกนกระแสของกราฟในรูปที่ 6.4 นั้น จะบ่งบอกถึงค่ากระแสอิ่มตัว (I_0) ของรอยต่อ โดยรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 นี้ จะมีค่าตัวแปรอุดมคติ ประมาณ 2.0 และมีค่ากระแสอิ่มตัวของรอยต่อเท่ากับ 3.28×10^{-7} A ค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งหาได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟในส่วนการไบแอสตรงที่ความต่างศักย์สูงๆ จะมีค่าประมาณ 50Ω ซึ่งยังเป็นค่าที่สูงพอสมควรสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์

2.2 การวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้อง ในสภาพฉายแสง

การวัดกระทำโดยการนำรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ มาทำการฉายด้วยแสง ซึ่งเป็นแสงอาทิตย์จำลองจากหลอดบรรจุแก๊สแบบ ELH ซึ่งมีความเข้มแสงประมาณ 844 W/m^2 (AM1.5) แล้วทำการวัดความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ โดยเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ กระแส - ความต่างศักย์ ในสภาวะที่ไม่มีการฉายแสง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ทั้งในสภาวะที่ฉายแสง และสภาวะมืด

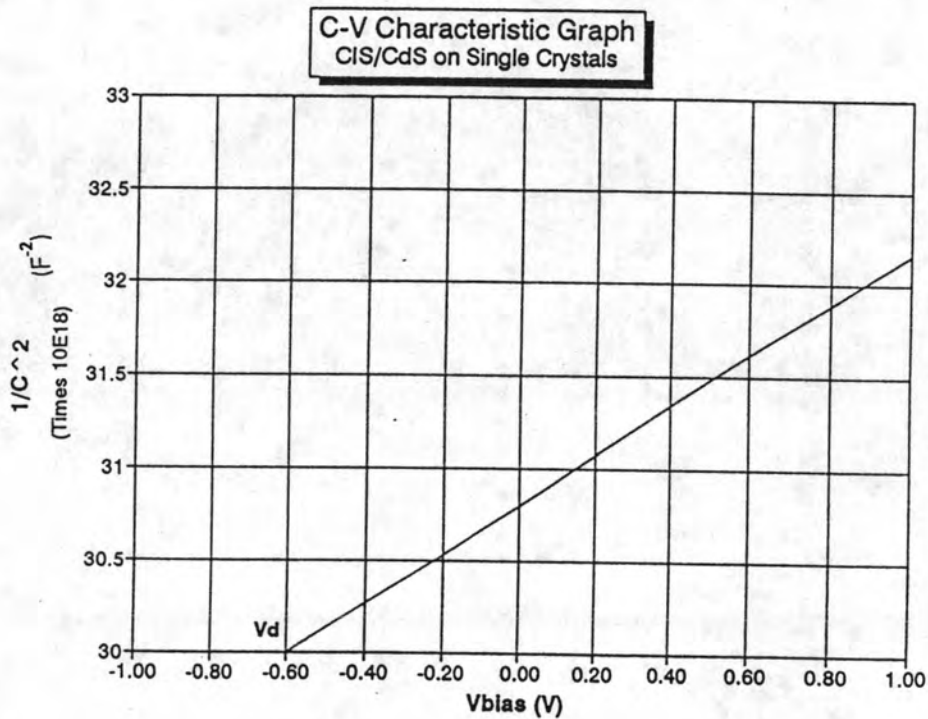


รูปที่ 6.6 กราฟส่วนขยายของรูปที่ 6.6 ในบริเวณใกล้
จุดกำเนิด (origin)

จากกราฟในรูปที่ 6.5 และ 6.6 จะเห็นได้ว่า รอยต่ออวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นนี้ มีการตอบสนองต่อแสงที่มากกระทบได้พอสมควร แต่เนื่องจากพื้นที่ในการรับแสงของรอยต่อเองมีขนาดเล็ก และชั้นผลึกเดี่ยว CuInSe_2 เอง ก็มีขนาดเล็ก จึงทำให้ได้ค่าของกระแสจากแสง (photocurrent) ออกมามีค่าน้อย โดยจากกราฟ สามารถคำนวณค่าของกระแสเปิดวงจร (I_{sc}) มีค่าประมาณ $20 \mu\text{A}$ และค่าของความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{oc}) ประมาณ 192 mV ซึ่งแสดงถึงการมีลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าที่ไม่ค่อยดีนักในเชิงของการเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์บนชั้นผลึกเดี่ยวที่เตรียมขึ้นนี้

2.3 การวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะมืด

โดยการนำรอยต่อพีเอ็นที่เตรียมได้ ไปวัดความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ด้วยระบบวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ที่ได้จากการวัดสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V ได้ดังกราฟในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ V ของรอยต่อพีเอ็นบนชิ้นผลึกเดี่ยวที่เตรียมขึ้นได้

จากกราฟในรูปที่ 6.7 โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ดังในบทที่ 3 จะสามารถเขียนได้ว่าได้ว่า^{9.6.19}

$$d(1/C^2)/dV = 2/qK_s\epsilon_0 A^2 N_A \quad (6.3)$$

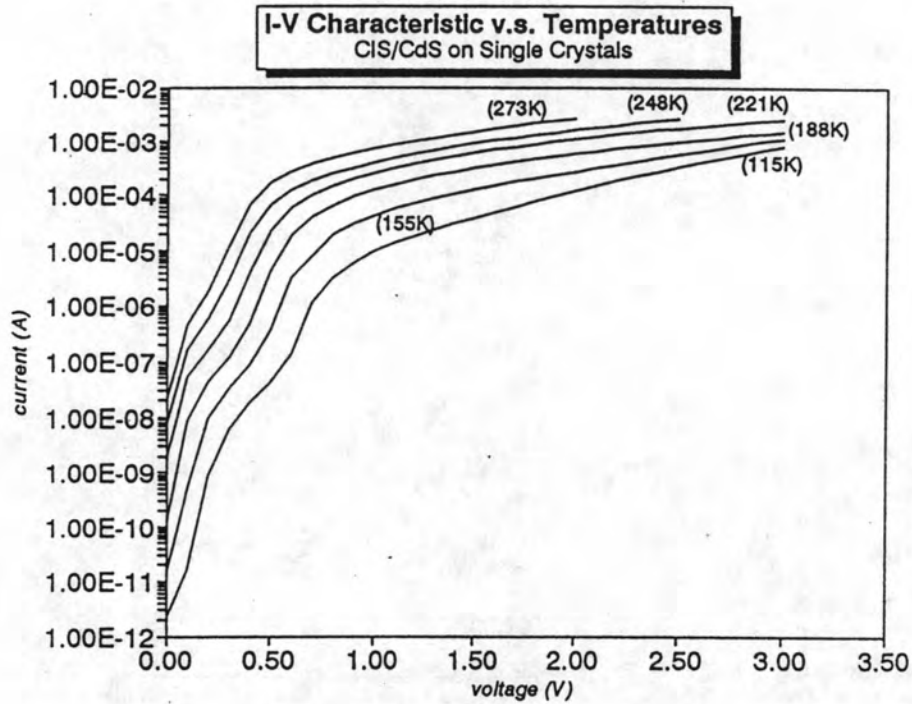
ซึ่งจากความชันของกราฟในรูปที่ 6.7 สามารถนำมาคำนวณหาค่าของความเข้มข้นพาหะ (N_A) ได้จากสมการ

$$N_A = 2 / \{ qK_s \epsilon_0 A^2 (\text{ความชันของกราฟ}) \} \quad (6.4)$$

เมื่อ ϵ_0 คือค่าความซึมซาบ (permittivity of free space) และ K_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ และ A คือพื้นที่รอยต่อวิวิธพันธุ์ ถ้าทำการลากกราฟต่อไปตัดยังแกนของความต่างศักย์ด้วยวิธีเอกซ์ตราโพล (extrapolated) จะสามารถประมาณค่าของความต่างศักย์ของการแพร่ (diffusion voltage) ได้ ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 6.7 สามารถคำนวณค่าของความเข้มข้นพาหะได้เท่ากับ $6.36 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้รายงานไว้¹⁰ และประมาณค่าความต่างศักย์ของการแพร่ได้เท่ากับ 0.60 V อีกทั้งในขณะที่ทำการวัด พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไบแอสคงที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าไปกับเวลา ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงการปรากฏของการมีสิ่งเจือระดับลึกในโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งอาจส่งผลต่อ วิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ โดยเป็นการลดค่าชีวิตของรอยต่อ หรืออาจส่งผลในการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพต้านทานของสารชั้นฐาน (substrate resistivity)^{1,11}

2.4 การวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ในสภาพมืด

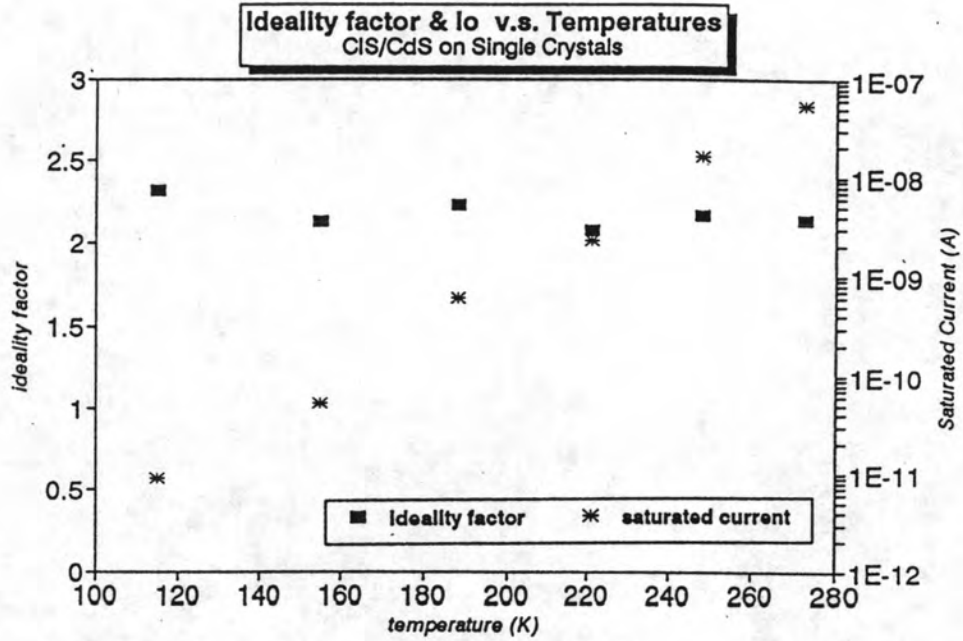
การวัดกระทำโดยนำรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ ติดตั้งลงในห้องรับรอยต่อ สำหรับการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ทำการต่อสายเชื่อมโยงสำหรับการวัด แล้วปิดท่อให้แน่นหนา ทำการจุ่มห้องรับลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลว จนระบบทั้งหมดเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้น ทำการยกห้องรับขึ้นเหนือผิวของไนโตรเจนเหลว แล้วเริ่มทำการวัดความสัมพันธ์ของกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่เริ่มมีการเพิ่มขึ้นทีละน้อย โดยข้อมูลความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิต่างๆ ในช่วงตั้งแต่ 119 K ถึง 273 K แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.8 ค่าของตัวแปรอุณหภูมิต่างๆ และค่ากระแสอิ่มตัว ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการคำนวณจากผลการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์
ที่อุณหภูมิต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมบนผลึกเดี่ยว

temperature(K)	ideality factor	saturated current (A)
115	2.32	8.86×10^{-12}
155	2.13	5.23×10^{-11}
188	2.23	6.04×10^{-10}
221	2.08	2.25×10^{-9}
248	2.17	1.60×10^{-8}
273	2.14	5.37×10^{-8}

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าตัวแปรอุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัวของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ



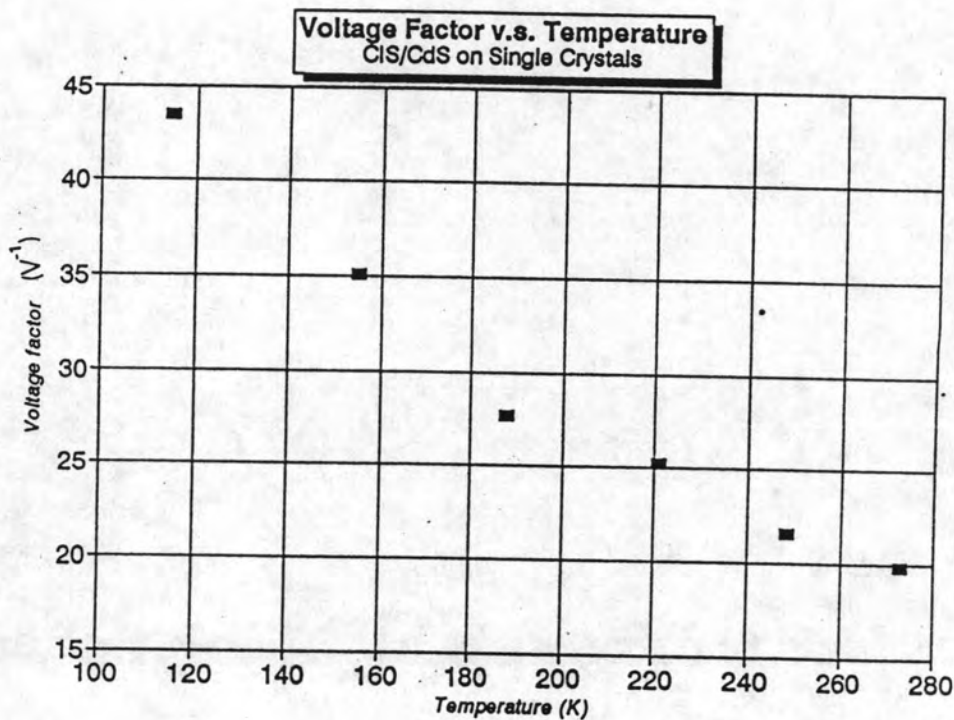
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรอุดมคติ และค่ากระแสอิ่มตัวกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 และกราฟในรูปที่ 6.9 พบว่า ค่าของตัวแปรอุดมคติ และค่ากระแสอิ่มตัว จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่างๆ

ถ้าให้นิยามตัวแปรความต่างศักย์ (voltage factor , α) โดยเขียนได้ว่า ¹

$$\alpha = 1 / nkT \quad (6.5)$$

พบว่า ค่าตัวแปรความต่างศักย์ที่คำนวณได้จากผลการวัดนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ดังกราฟในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอุณหภูมิกับอุณหภูมิ

จากข้อมูลที่ได้ทั้งหมด พบว่า ค่าตัวแปรอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงเดียวกัน กล่าวคือ จะมีค่าอยู่ประมาณ 2 ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองของรอยต่อวิวิธพันธุ์ถึงกลไกการขนส่งระหว่างรอยต่อ ดังรายละเอียดในบทที่ 2 นั้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะมีกลไกการขนส่งแบบรวมตัวเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ และการที่มีการเปลี่ยนแปลงของเทอมตัวแปรความต่างศักย์ไปกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้น แสดงให้เห็นการแปรผันกับอุณหภูมิของความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ซึ่งจากแบบจำลองรอยต่อวิวิธพันธุ์ สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่า มีความเป็นไปได้ที่จะมีกลไกการขนส่งแบบการทะลุผ่านเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์อีกด้วย หรืออาจจะมีได้ทั้งสองกระบวนการรวมกันคือเป็นกลไกการขนส่งแบบการทะลุผ่าน - รวมตัว ^{1,8,7,20}

ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ชนิดฟิล์มบาง^{1.5,11}

ได้มีการเตรียมรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ชนิดฟิล์มบางขึ้น โดยที่รอยต่อนี้จะเป็นโครงสร้างหลักในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ที่จะทำการพัฒนาในขั้นต่อไป ซึ่งรายละเอียดในการวัดและศึกษาารรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางมีดังต่อไปนี้

1. การเตรียมรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ชนิดฟิล์มบาง

การเตรียมรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางเพื่อใช้ในการวิจัยและศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า มีขั้นตอนการเตรียม ดังต่อไปนี้

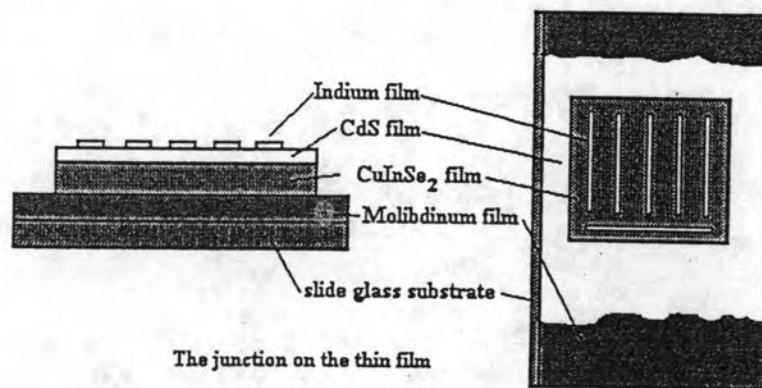
- 1.1 ทำการตัดกระจกสไลด์ (slide glass) ซึ่งหนาประมาณ 0.1 cm โดยให้มีขนาดกว้าง 1.3 cm และยาว 2.5 cm จากนั้นล้างให้สะอาดและแช่ลงในกรดโครมิกเข้มข้น (chromic acid) เป็นเวลา 1 คืน
- 1.2 ล้างกระจกที่แช่กรดด้วยน้ำดีไอออไนซ์ในเครื่องล้างอุลตราโซนิคจนสะอาดแล้วทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ประมาณ 1 ชั่วโมง
- 1.3 นำกระจกที่ได้ไปทำการสร้างชั้นฟิล์มบางของโลหะโมลิบดีนัม (molybdenum) ด้วยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง โดยมีความหนาของฟิล์มประมาณ 1500 \AA เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง
- 1.4 นำฟิล์มบางของโลหะโมลิบดีนัมบนกระจกสไลด์ที่ได้ ไปทำการระเหยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ในสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของซิลิเนียมที่อุณหภูมิ 400°C ซึ่งมีความหนาต่างๆกันในแต่ละแบบ²¹ ดังตารางที่ 6.2 แบบละ 5 - 6 ชั้น
- 1.5 นำชั้นฟิล์มบางที่ได้จากข้อ 1.4 ไปเตรียมชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยวิธีการอบสารเคมี ที่อุณหภูมิ 75°C ในเวลา 30 นาที ซึ่งจะได้ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS หนาประมาณ 300 \AA แล้วทำการขีดฟิล์มบางของ CdS ในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 80 %
- 1.6 นำชั้นฟิล์มที่ได้ตามข้อ (1.5) ไประเหยฟิล์มบางของโลหะอินเดียมในระบบระเหยสุญญากาศ โดยมีความหนาประมาณ 1800 \AA เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าอินเดียมนี้มีการทำทั้งในลักษณะเป็นจุด (dots) และเป็นเส้น (lines) โดยโครงสร้างของรอยต่อแบบฟิล์มบางที่ได้ แสดงดังรูปที่ 6.11

- 1.7 นำชั้นรอยต่อที่ได้ ติดตั้งลงบนแผ่นวงจรมพิมพ์ แล้วต่อสายจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง คือ ขั้วโลหะโมลิบดีนัมและโลหะอินเดียม นำรอยต่อวิวิธพันธุ์เข้าระบบวัด เพื่อทำการวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าต่อไป

film code	Mo layer	CuInSe ₂ layer	CdS layer	In layer
AM	1.5 μm	1.0 μm	300 Å	1800 Å
AN	1.5 μm	1.5 μm	300 Å	1800 Å
AO	1.5 μm	2.0 μm	300 Å	1800 Å
AP	1.5 μm	1.5 μm*	300 Å	1800 Å
AQ	1.5 μm	2.0 μm*	300 Å	1800 Å
AR	1.5 μm	2.5 μm	300 Å	1800 Å

* เตรียมชั้นฟิล์มบาง CdS ต่อทันทีที่นำออกจากระบบระเหย

ตารางที่ 6.2 แสดงรายละเอียดโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์
CuInSe₂ / CdS ชนิดฟิล์มบาง แบบต่างๆ

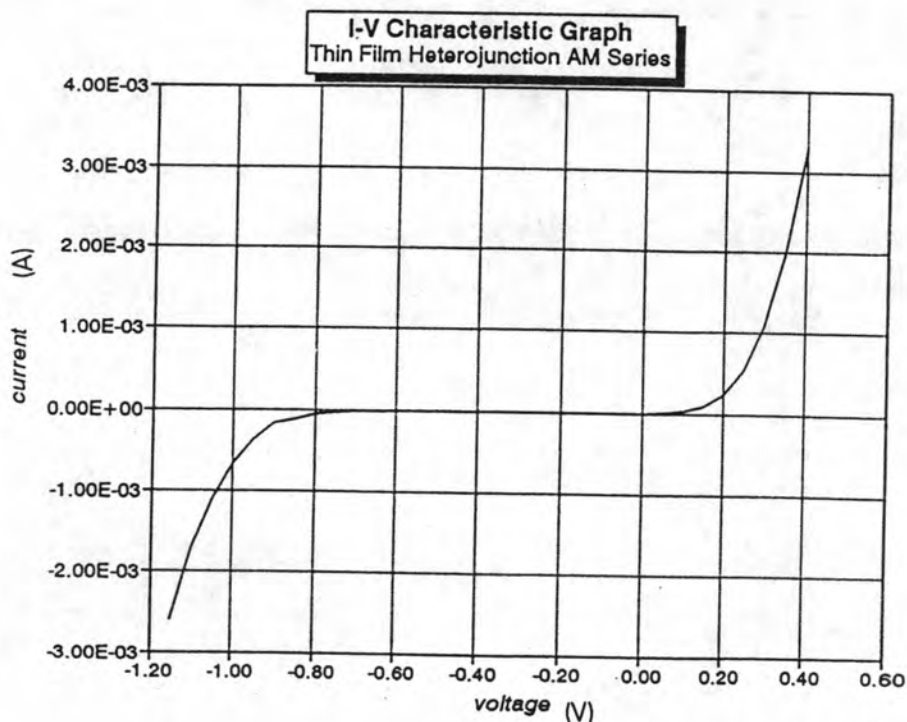


รูปที่ 6.11 แสดงโครงสร้างชั้นต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์
CuInSe₂ / CdS ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้

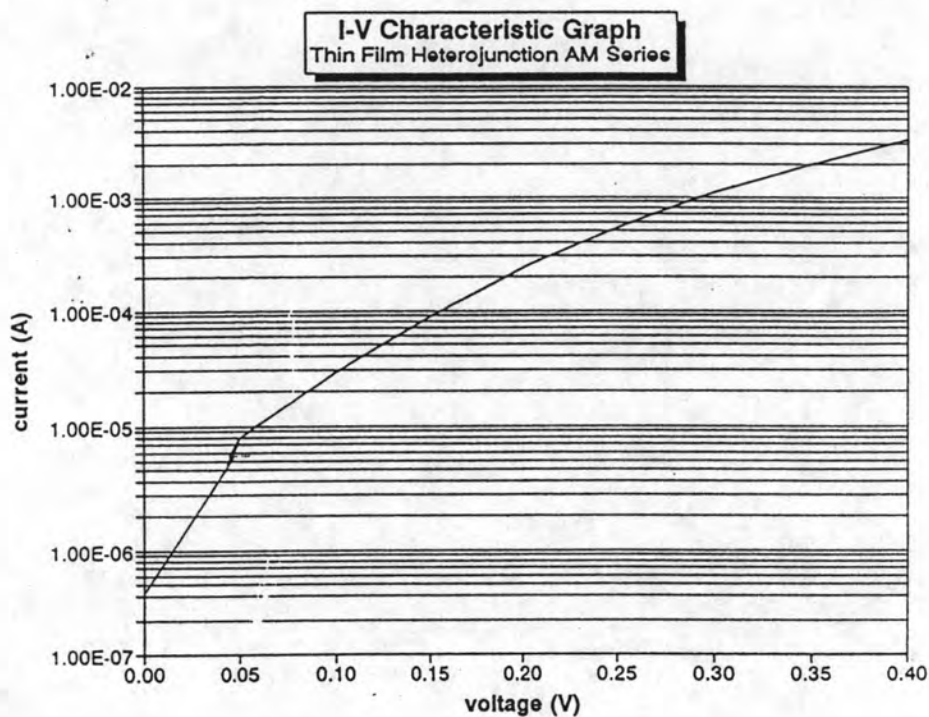
2. การทดลองวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่ออิวิวิรพันธุ์และการวิเคราะห์ผลการทดลอง การวัดกระทำโดยนำรอยต่ออิวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้ มาทำการวัด ลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งในสภาวะมืดและสภาวะที่มีการฉายแสง และทำการวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้องในสภาวะมืด โดยกระบวนการวัดทั้งหมดจะมีลักษณะคล้ายกับการวัดรอยต่ออิวิวิรพันธุ์บนชั้นผลึกเดี่ยว ข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบต่างๆ มีดังนี้

2.1 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AM (AM series)

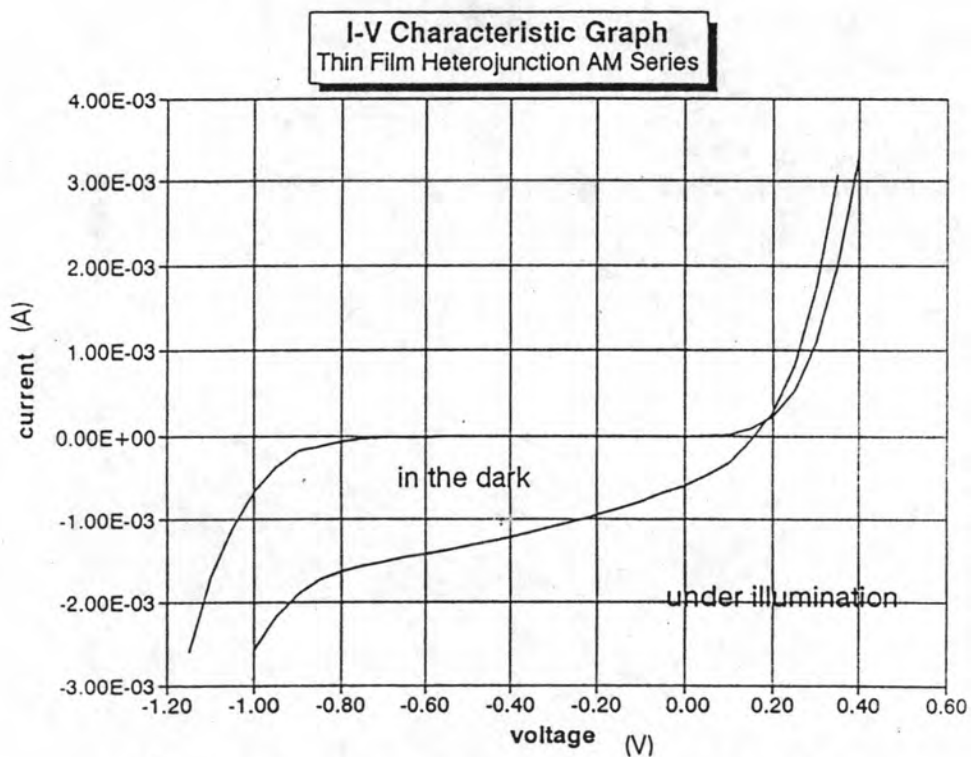
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และ ลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.12, 6.13, 6.14, และ 6.15 ตามลำดับ



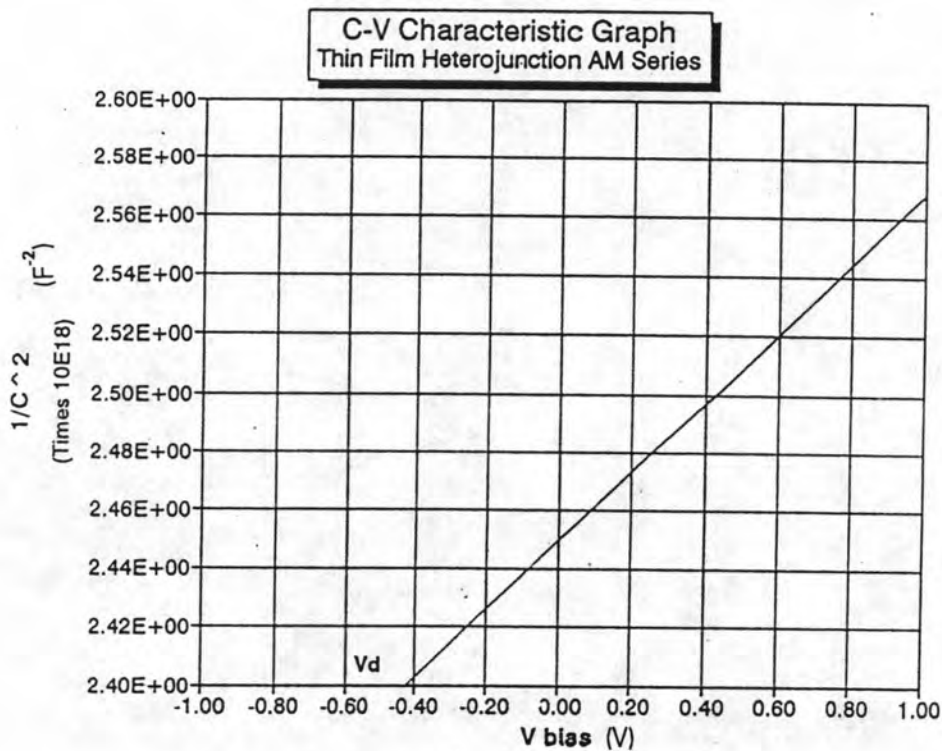
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ของรอยต่ออิวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งลึอกของรอยต่อวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM ในสภาวะฉายแสง



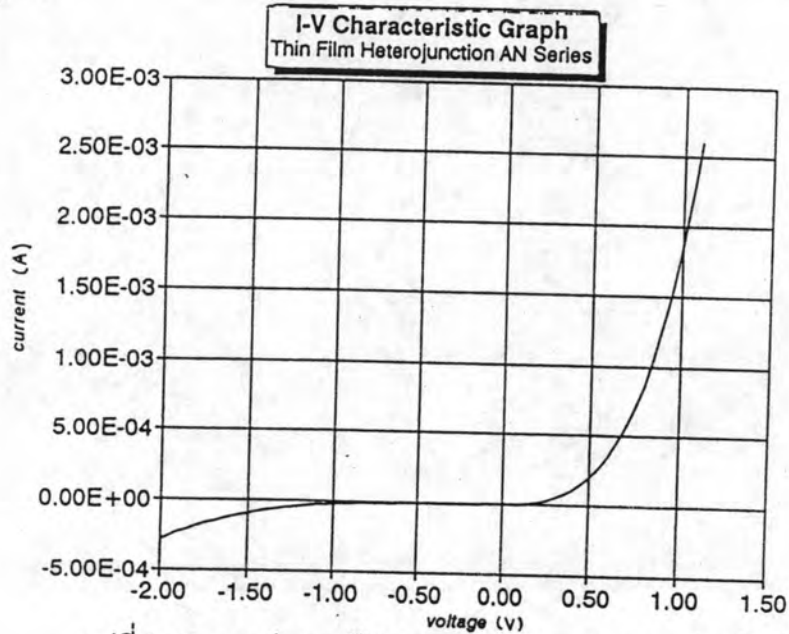
รูปที่ 6.15 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ พบว่า กราฟที่ได้ดังรูปที่ 6.12 แสดงถึงลักษณะการมีสมบัติการเรียงกระแสที่ดี และแสดงลักษณะการเกิดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ชัดเจน จากกราฟรูปที่ 6.13 สามารถหาค่าของตัวแปรอุดมคติโดยอาศัยสมการ (6.1) ได้ค่าประมาณ 1.76 ในขณะที่มีค่ากระแสอิ่มตัวเท่ากับ 2.25×10^{-5} A จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ภายใต้สภาวะฉายแสง พบว่า มีการตอบสนองที่ดีพอใช้โดยให้ค่าของกระแสเปิดวงจรอยู่ที่ 0.54 mA และ ค่าความต่างศักย์เปิดวงจรเท่ากับ 168 mV ดังกราฟรูปที่ 6.14 ซึ่งสามารถคำนวณค่าฟิลแฟคเตอร์จากสมการ (4.33) มีค่าเท่ากับ 0.4 และคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานดังสมการ (4.34) ได้ประมาณ 0.96 %

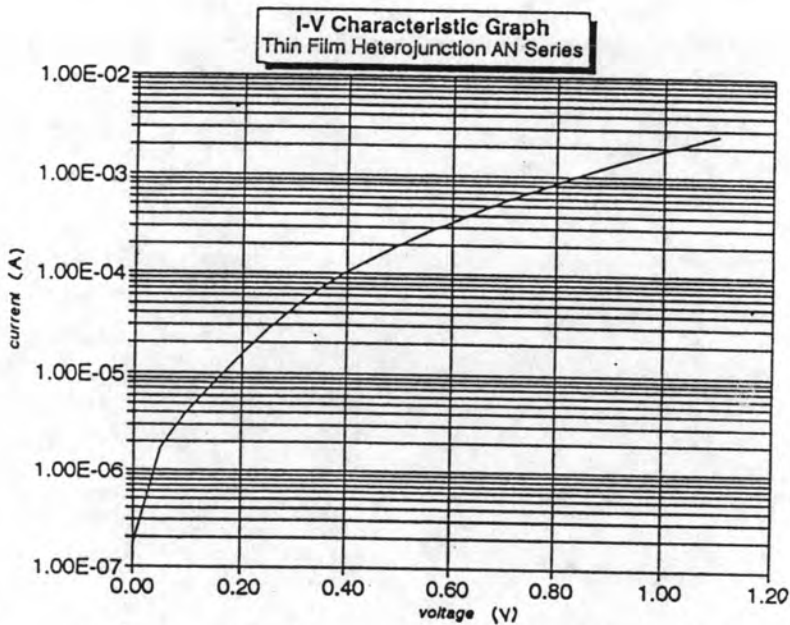
จากข้อมูลของกราฟความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ พบว่า ได้ค่าของความต่างศักย์การแพร่, V_d เท่ากับ 0.55 V. และสามารถคำนวณความเข้มข้นพาหะ, N_A เท่ากับ 3.81×10^{16} cm³ และพบว่าการปรากฏของสิ่งเจือระดับลึกที่รอยต่อ ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่อเวลาในแต่ละค่าความต่างศักย์ป้อนที่คงที่^{1.11}

2.2 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AN (AN series)

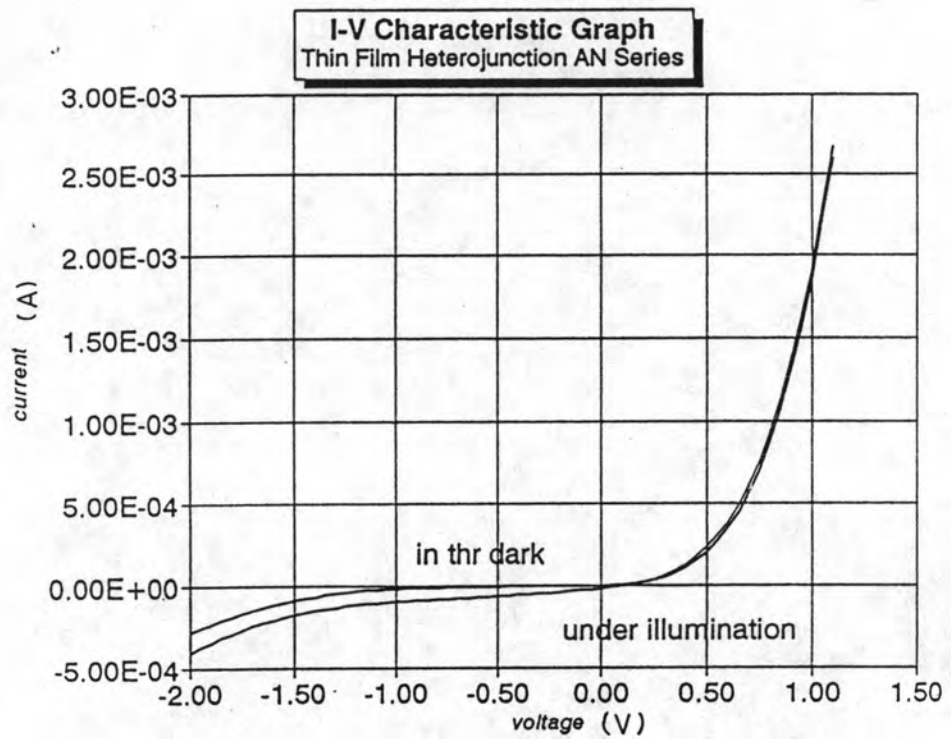
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และ ลักษณะเฉพาะ
ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.16, 6.17, 6.18, และ 6.19
ตามลำดับ



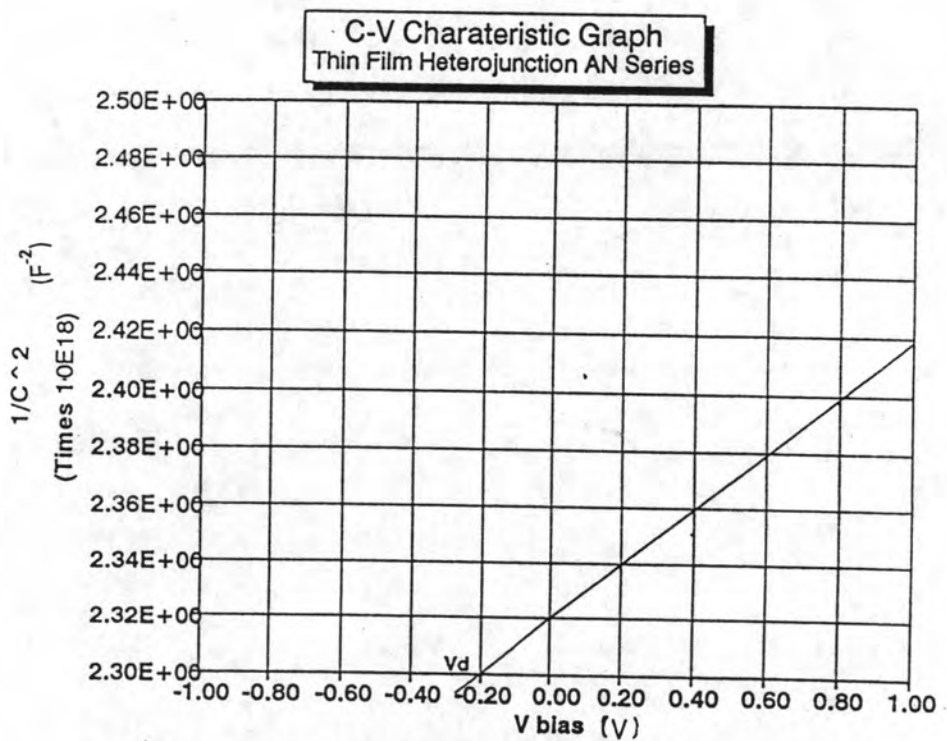
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN ในสภาวะฉายแสง



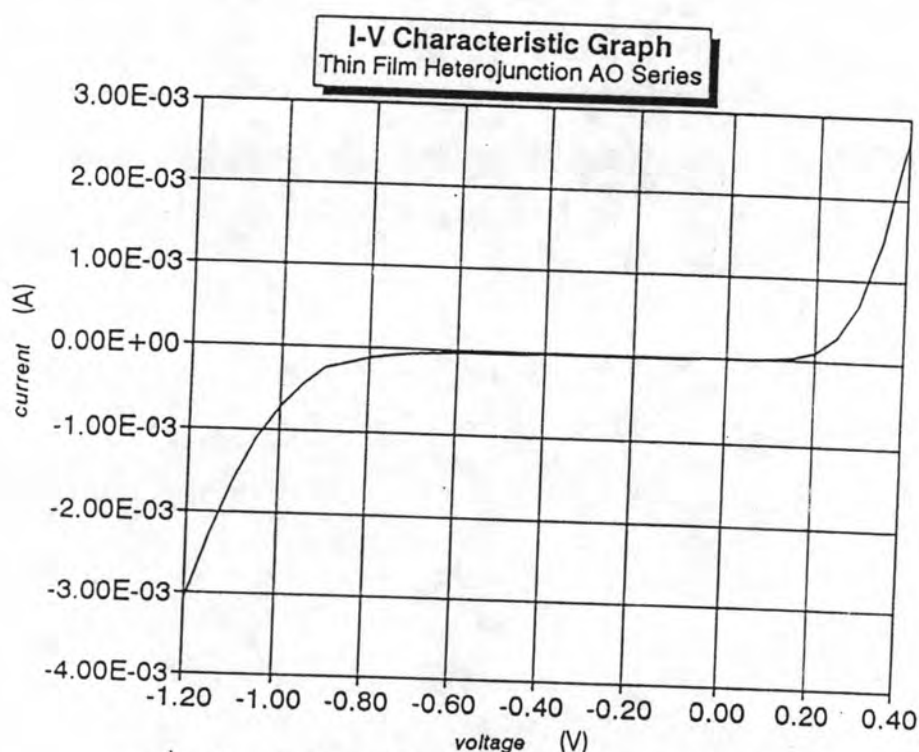
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ พบว่ารอยต่อแบบนี้มีสมบัติการเรียงกระแสค่อนข้างดี ดังกราฟรูปที่ 6.16 และจากกราฟรูปที่ 6.17 สามารถที่จะคำนวณค่าตัวแปรอุดมคติได้ 1.76 และค่าของกระแสอิ่มตัว เท่ากับ 8.89×10^{-7} A แต่ในการศึกษาภายใต้สภาวะที่ฉายแสงพบว่า การตอบสนองต่อแสงไม่ดีนัก โดยให้ค่าของกระแสปิดวงจรเพียง 0.02 mA ขณะที่ความต่างศักย์เปิดวงจรมีค่าเท่ากับ 120 mV ดังกราฟรูปที่ 6.18 และมีความต้านทานค่อนข้างสูง

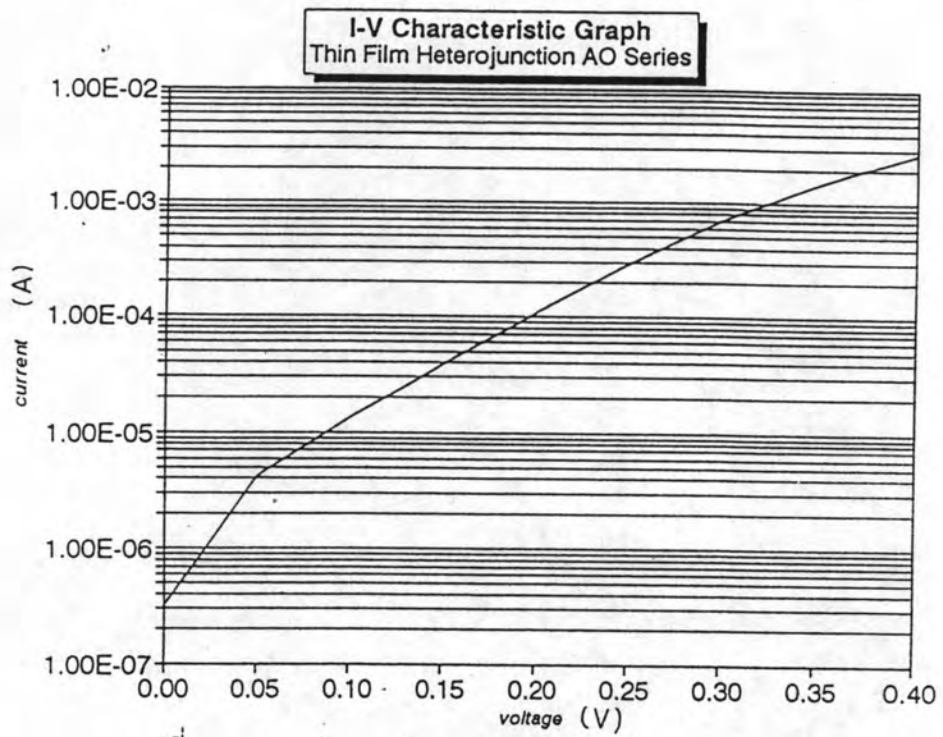
จากการศึกษาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ พบว่ามีการปรากฏของสิ่งเจือระดับเล็ก โดยจากกราฟรูปที่ 6.20 จะให้ค่าความต่างศักย์การแพร่เพียง 0.2 V และค่าของความเข้มข้นพาหะประมาณ 5.21×10^{16} cm⁻³

2.3 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AO (AO series)

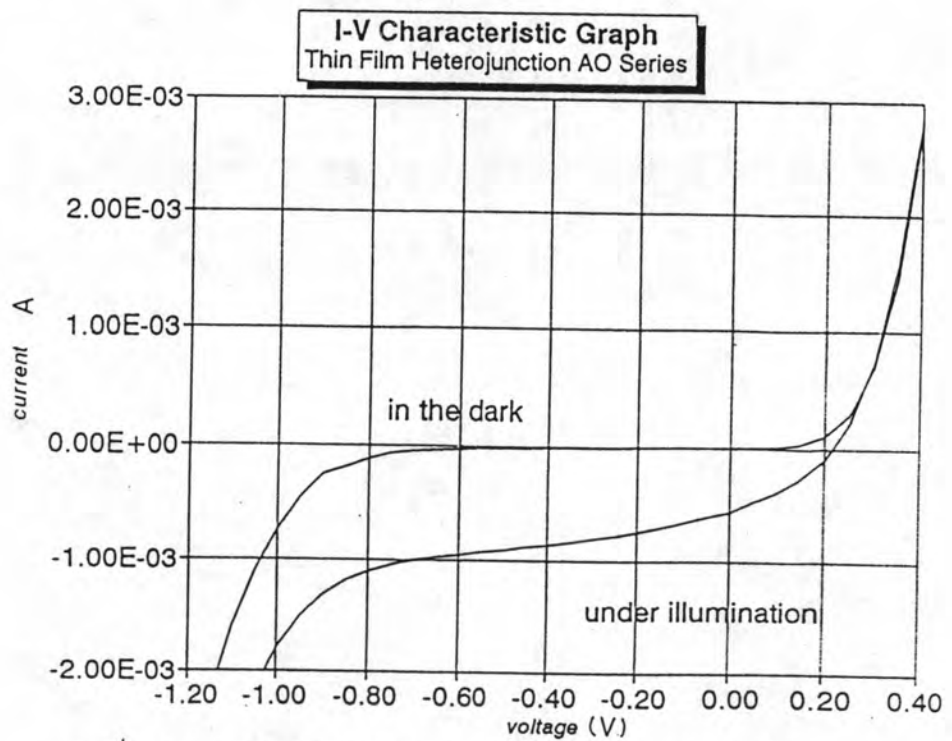
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และ ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.20, 6.21, 6.22, และ 6.23 ตามลำดับ



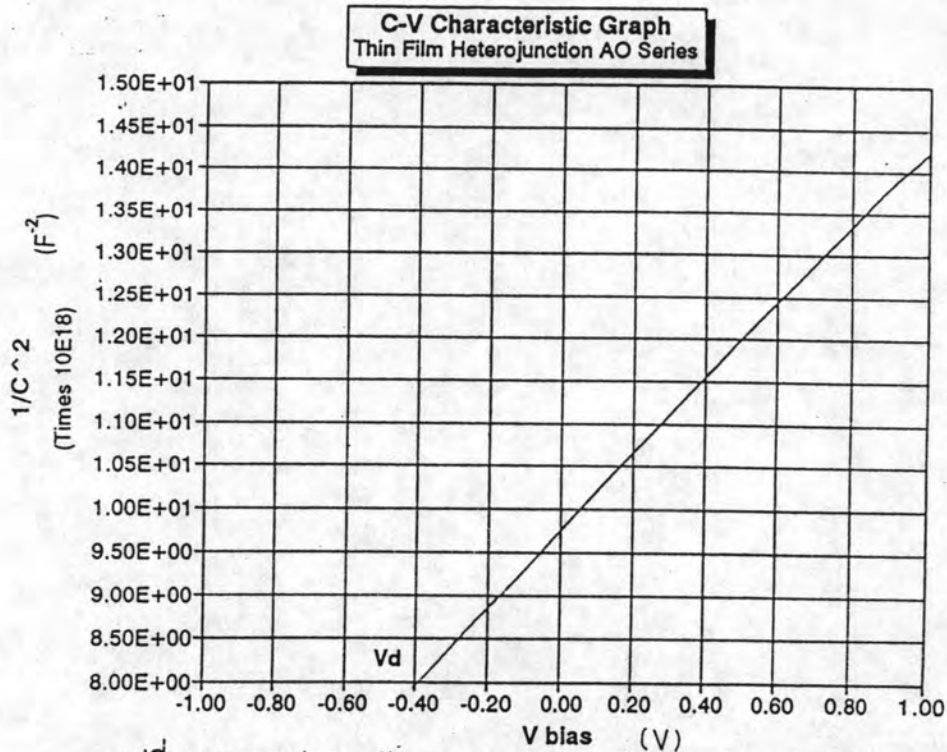
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO



รูปที่ 6.21 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งลึอกของรอยต่อวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO



รูปที่ 6.22 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO ในสภาวะฉายแสง



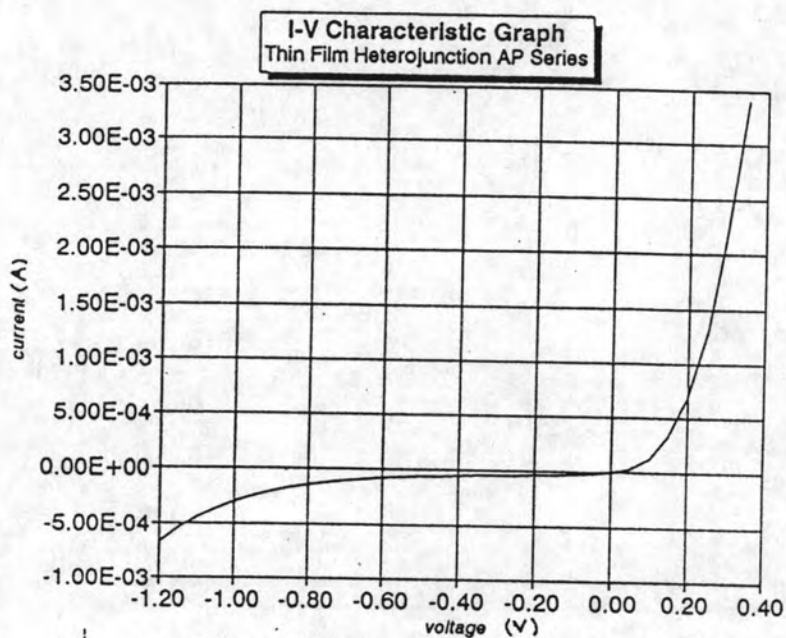
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ พบว่ามีการเกิดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ค่อนข้างชัดเจน และให้สมบัติการเรียงกระแสของ ไดโอดที่ดีพอควร ดังกราฟรูปที่ 6.20 โดยจากกราฟ ระหว่าง $\ln I$ กับ V ในรูปที่ 6.21 สามารถคำนวณค่าตัวแปรอุดมคติได้เท่ากับ 1.78 และ ค่ากระแสอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 1.41×10^{-6} A กราฟลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ภายใต้สภาวะที่ฉายแสงพบว่า มีการตอบสนองต่อแสงได้ดี โดยให้ค่าของกระแสเปิดวงจรเท่ากับ 0.55 mA และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 215 mV ดังกราฟในรูปที่ 6.22 โดยคำนวณค่าของฟิลแฟคเตอร์ประมาณ 0.4 และคำนวณประสิทธิภาพได้ถึง 1.24 % โดยคิดพื้นที่รับแสงจริง (active area) เท่ากับ 4.5×10^{-6} m²

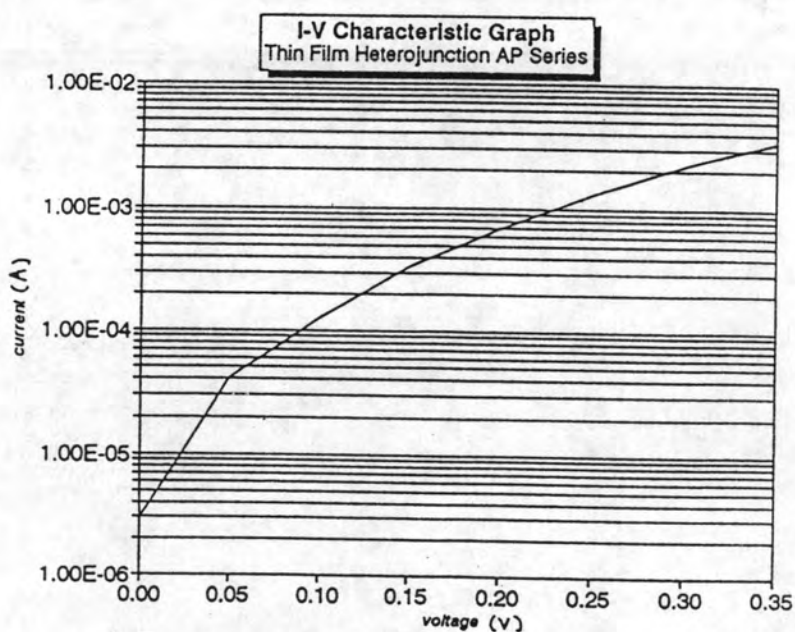
จากการศึกษาความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ พบว่า มีการปรากฏของสิ่งเจือระดับลึกในโครงสร้างของรอยต่อ จากกราฟรูปที่ 6.23 สามารถคำนวณค่าของความต่างศักย์การแพร่เท่ากับ 0.39 V. และค่าของความเข้มข้นพาหะเท่ากับ 1.02×10^{16} cm⁻³

2.4 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AP (AP series)

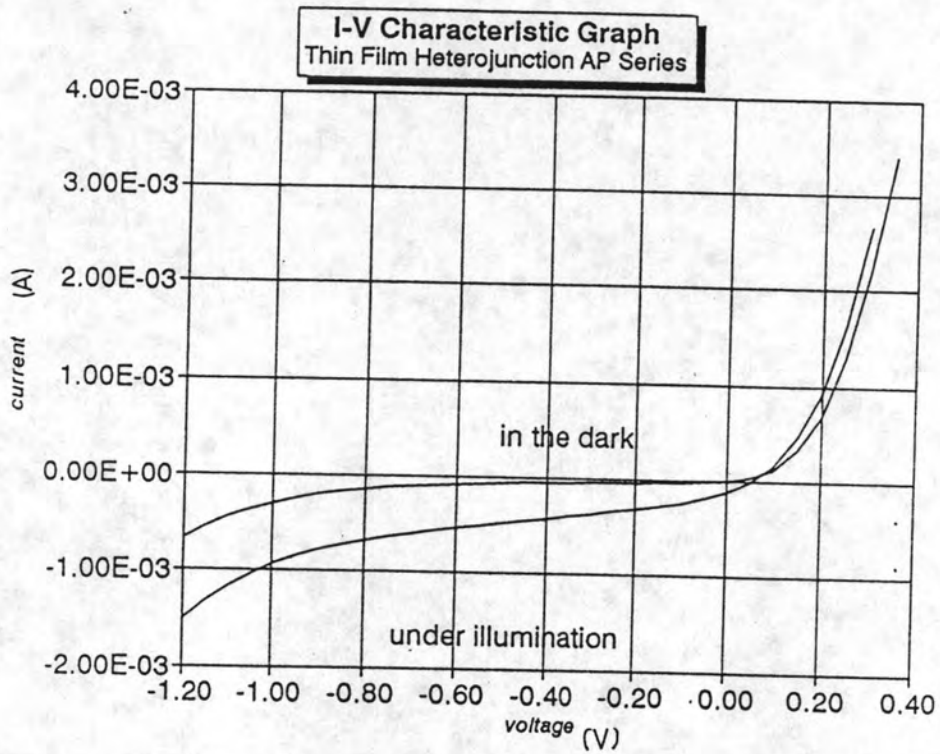
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.24, 6.25, 6.26, และ 6.27 ตามลำดับ



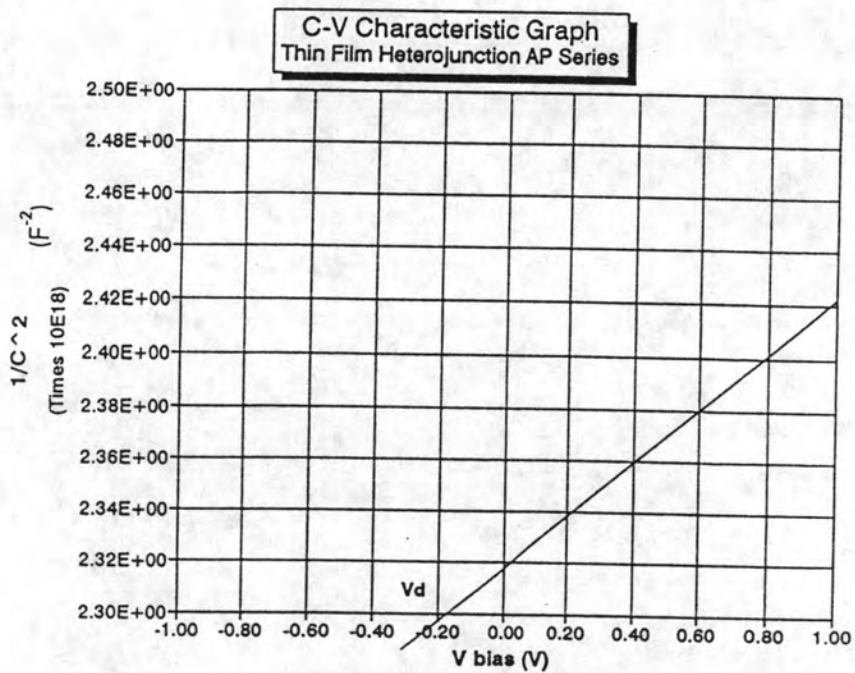
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP



รูปที่ 6.25 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP



รูปที่ 6.26 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP ในสภาวะฉายแสง



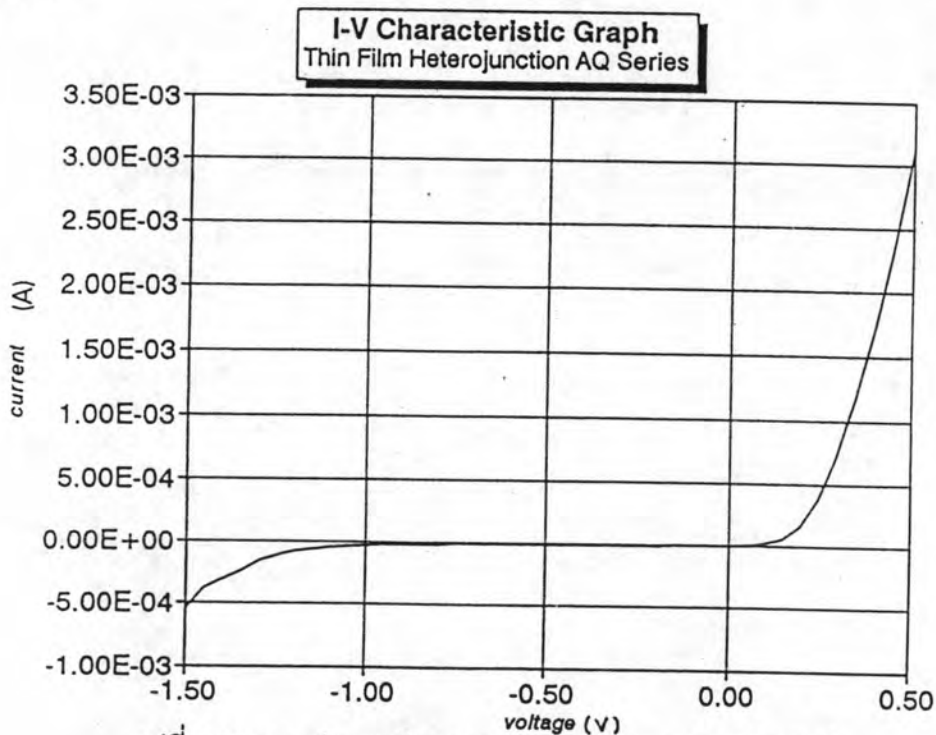
รูปที่ 6.27 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP

จากกราฟระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ในรูปที่ 6.24 พบว่าลักษณะกราฟที่ได้มีสมบัติการเรียงกระแสของไดโอดที่ไม่ค่อยดีนัก กล่าวคือมี กระแสรั่วไหล (leakage current) เกิดขึ้นมากในด้านการไบแอสย้อน โดยถ้าเขียนกราฟระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังกราฟรูปที่ 6.25 พบว่าได้ค่าของตัวแปรอุดมคติเท่ากับ 2.23 และค่าของกระแสอิ่มตัว (I_0) เท่ากับ 1.74×10^{-5} A การตอบสนองของรอยต่อแบบนี้กับแสงไม่ค่อยดีนัก ดังจะเห็นได้ดังกราฟรูปที่ 6.26 โดยให้ค่ากระแสเปิดวงจรเพียง 0.11 mA และให้ค่าของความต่างศักย์เปิดวงจรเพียง 55 mV เท่านั้น

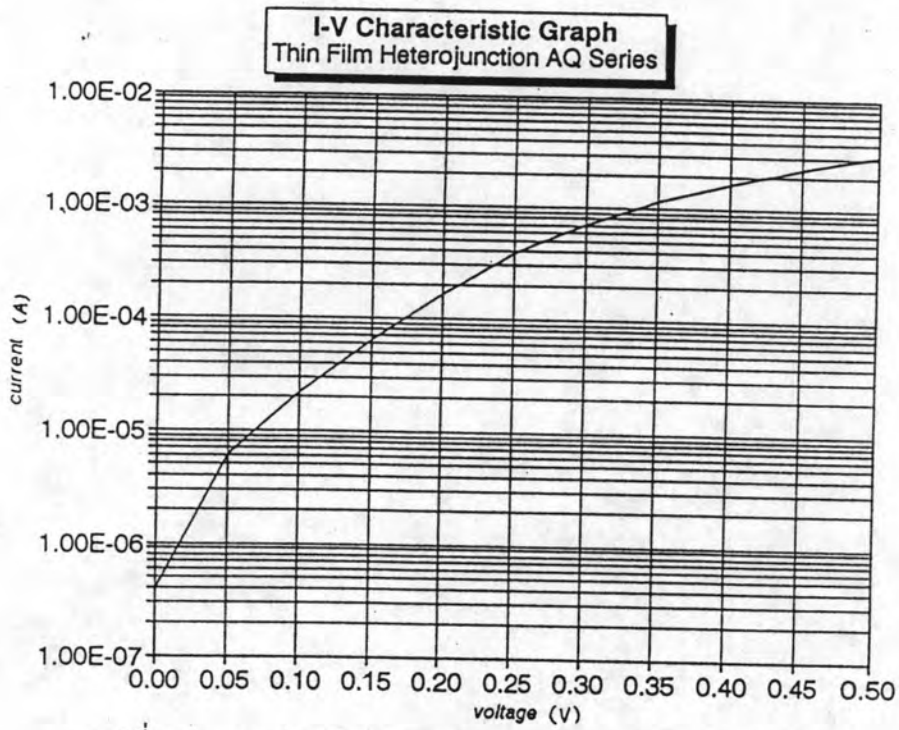
จากกราฟระหว่าง $1/C^2$ v.s. V ในรูปที่ 6.27 พบว่า ได้ค่าของความต่างศักย์การแพร่เพียงแค่ 0.19 V และสามารถคำนวณค่าของความเข้มข้นพาหะเท่ากับ 4.92×10^{16} cm^{-3} อีกทั้งยังพบการมีสิ่งเจือระดับลึก เช่นเดียวกันกับในแบบอื่นๆ

2.5 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AQ (AQ series)

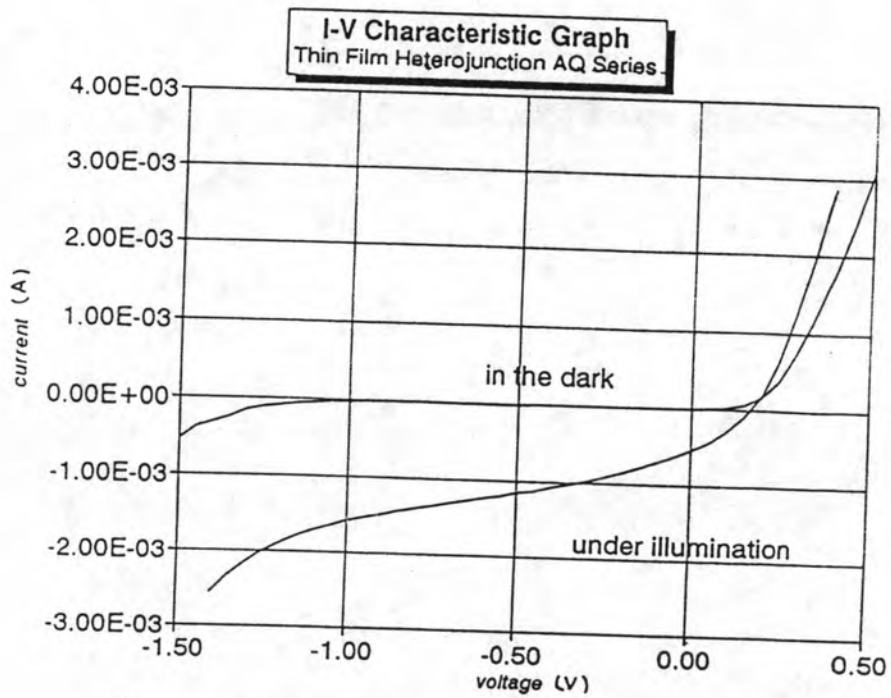
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และ ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.28, 6.29, 6.30, และ 6.31 ตามลำดับ



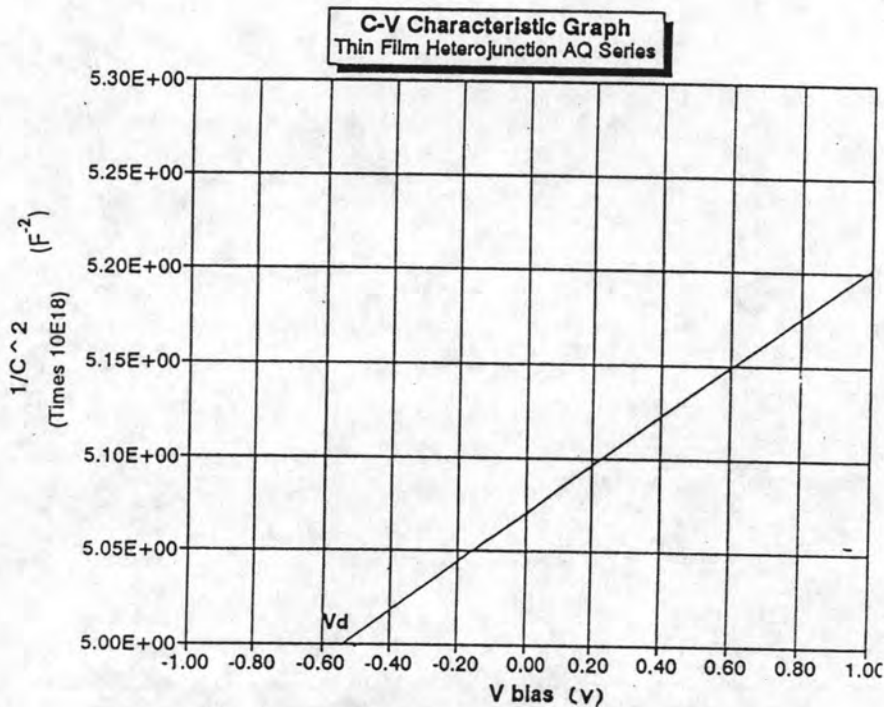
รูปที่ 6.28 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ



รูปที่ 6.29 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งลิอ็อกของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ



รูปที่ 6.30 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่ออวิวิรพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ ในสภาวะฉายแสง



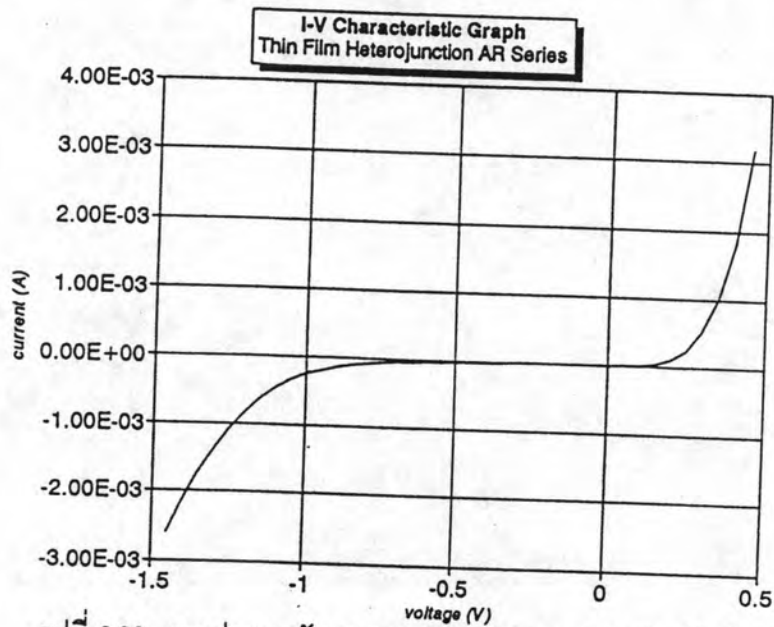
รูปที่ 6.31 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ

จากการศึกษาความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ พบว่า กราฟที่ได้ดังในรูปที่ 6.28 แสดงถึงลักษณะการมีสมบัติการเรียงกระแสที่ดี และแสดงลักษณะการเกิดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ และจากกราฟรูปที่ 6.29 สามารถหาค่าตัวแปรอุดมคติจากสมการ (6.1) ได้ประมาณ 1.76 ในขณะที่มีค่ากระแสอิ่มตัวเท่ากับ 2.25×10^{-6} A ความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ภายใต้สภาวะฉายแสงพบว่า มีการตอบสนองที่ดีพอใช้ได้ โดยให้ค่าของกระแสเปิดวงจรอยู่ที่ 0.54 mA และมีค่าความต่างศักย์เปิดวงจรเท่ากับ 168 mV ดังกราฟรูปที่ 6.30 ซึ่งสามารถคำนวณได้ค่าฟิลแฟคเตอร์เท่ากับ 0.4 และคำนวณประสิทธิภาพได้ 0.96 %

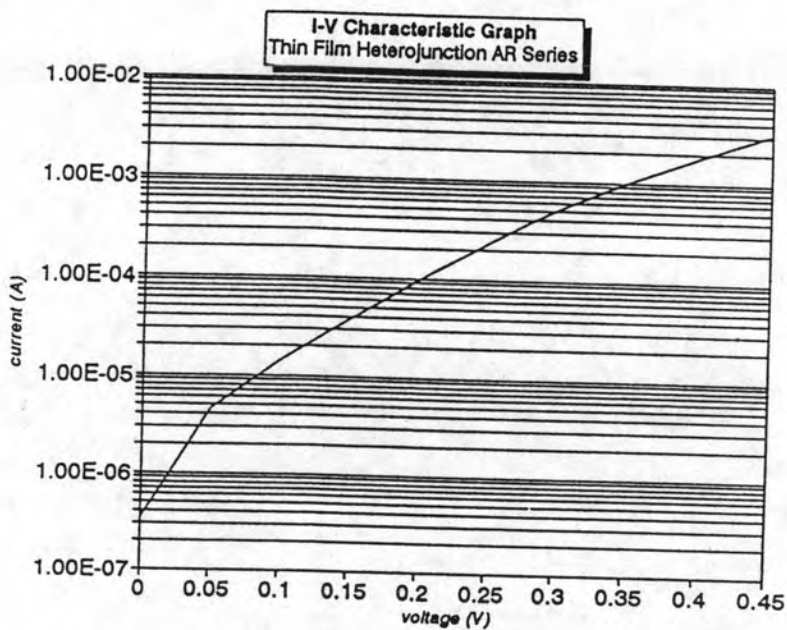
จากข้อมูลของกราฟลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ พบว่าค่าของความต่างศักย์การแพร่ที่ได้จากกราฟจะมีค่าเท่ากับ 0.55 V และคำนวณความเข้มข้นการแพร่ได้เท่ากับ 3.81×10^{16} cm⁻³ ในการวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ พบว่ามีการปรากฏของการมีสิ่งเจือระดับลึกในโครงสร้างของรอยต่อ โดยบ่งบอกจากการเปลี่ยนแปลงค่าของความจุไฟฟ้าต่อเวลาในแต่ละค่าความต่างศักย์ไบแอสที่คงที่ค่าหนึ่งๆ ดังรายละเอียดในบทที่ 3

2.6 รอยต่อชนิดฟิล์มบางแบบ AR (AR series)

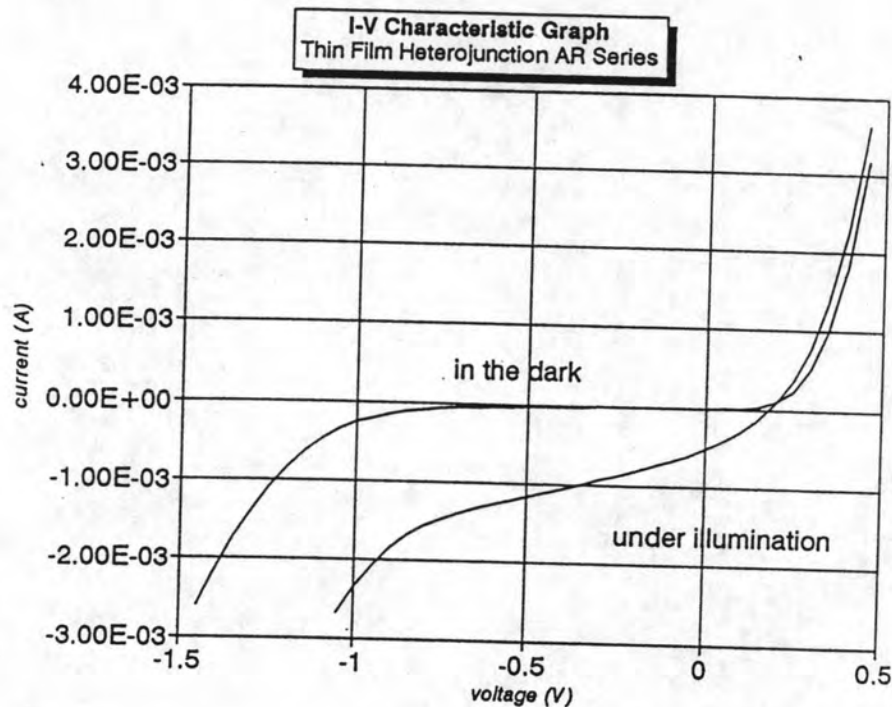
ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ และ ลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.32, 6.33, 6.34, และ 6.35 ตามลำดับ



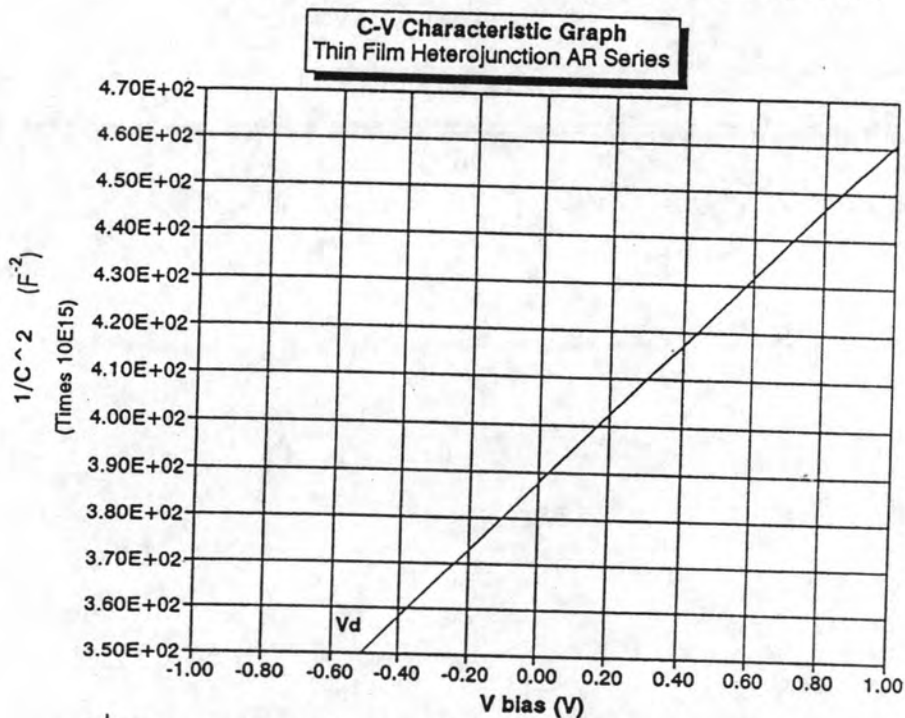
รูปที่ 6.32 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR



รูปที่ 6.33 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ที่ล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR



รูปที่ 6.34 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR ในสภาวะฉายแสง



รูปที่ 6.35 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR

จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ พบว่ารอยต่ออวิวิธพันธุ์ที่ได้มีลักษณะของการมีสมบัติการเรียงกระแสที่ดีพอควร ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.32 โดยกราฟจะเริ่มมี ลักษณะการมีกระแสรั่วไหลในช่วง -0.5 V และกราฟจะเริ่มโค้งงอลงในช่วงตั้งแต่ -1.0 V ลงมา ซึ่งจะเป็นจุดทะลุ (break down) ของรอยต่อ จากกราฟรูปที่ 6.33 สามารถที่จะคำนวณค่าตัวแปรอุดมคติได้เท่ากับ 1.88 และได้ค่าของกระแสอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 1.72×10^{-6} A ในการวัดความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ภายใต้สภาวะฉายแสง พบว่า รอยต่อจะมีการตอบสนองต่อแสงได้ดี ดังจะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 6.34 ซึ่งหาค่าของกระแสเปิดวงจรได้เท่ากับ 0.51 mA และ ความต่างศักย์เปิดวงจรได้เท่ากับ 191 mV โดยจะสามารถคำนวณค่าฟิลแฟคเตอร์ได้เท่ากับ 0.39 และสามารถคำนวณประสิทธิภาพได้เท่ากับ 1.00 % ตามสมการ (4.33) และ (4.34) ตามลำดับ

กราฟระหว่าง $1/C^2$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 6.35 จะให้ค่าของความต่างศักย์การแพร่เท่ากับ 0.54 V. และคำนวณหาค่าของความเข้มข้นพาหะได้เท่ากับ 7.0×10^{16} cm^{-3} นอกจากนี้ยังพบการมีสิ่งเจือระดับลึกในโครงสร้างของรอยต่อที่เตรียมขึ้นปรากฏเช่นในแบบอื่นๆ

จากผลการวัดและศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ , และลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้ง 6 แบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาคำนวณตัวแปรองค์ประกอบต่างๆ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 6.3

code	n	I_0 (A)	R_s (Ω)	I_{ph} (mA)	V_{oc} (mV)	f.f.	eff. (%)	V_d (v)	N_A (cm^{-3})
AM	1.83	3.26×10^{-6}	68.00	0.59	170.00	0.31	0.88	0.42	4.34×10^{16}
AN	1.76	8.89×10^{-7}	143.00	0.02	120.00	0.30	low	0.21	5.20×10^{16}
AO	1.78	1.41×10^{-6}	61.00	0.55	215.00	0.40	1.24	0.39	1.01×10^{16}
AP	2.03	1.74×10^{-5}	55.00	0.11	55.00	low	low	0.19	4.92×10^{16}
AQ	1.76	2.25×10^{-6}	76.00	0.54	168.00	0.40	0.96	0.55	3.81×10^{16}
AR	1.88	1.72×10^{-6}	78.00	0.51	191.00	0.39	1.00	0.54	7.01×10^{16}

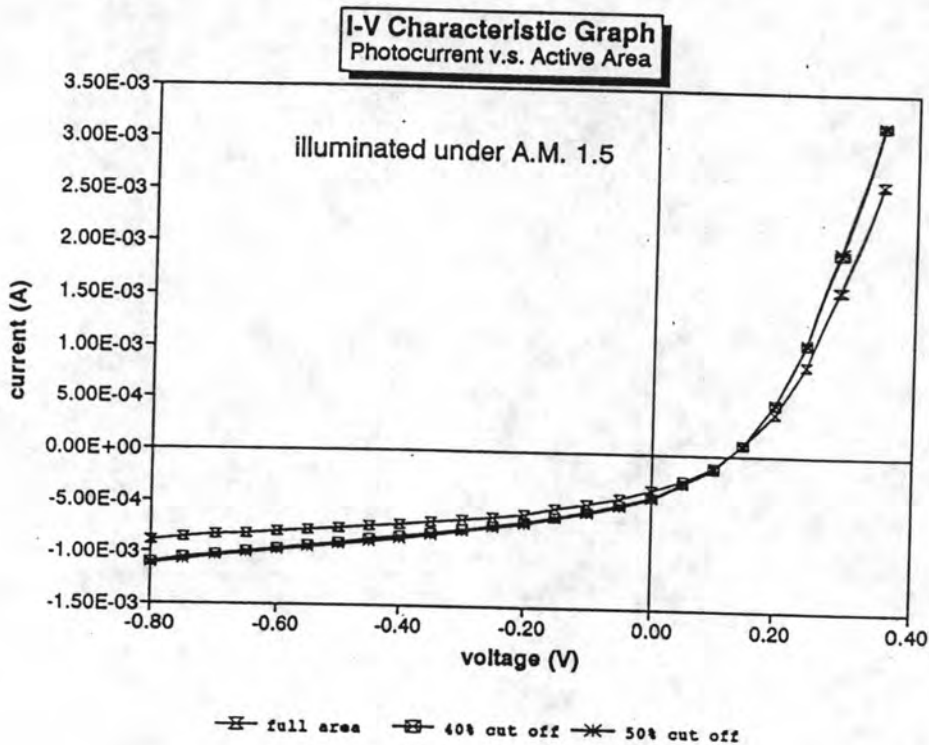
ตารางที่ 6.3 แสดงตัวแปรองค์ประกอบต่างๆ ที่คำนวณได้จากการวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบาง

จากข้อมูลตามตารางที่ 6.3 พบว่าค่าตัวแปรคุณสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้นี้ จะอยู่ในช่วงประมาณ 1.7 - 2.0 โดยค่ากระแสอิ่มตัวจะมีค่าประมาณ $8.89 \times 10^{-7} - 1.74 \times 10^{-5}$ A พบว่าจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสอิ่มตัวของรอยต่อที่เตรียมบนชั้นผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนย้ายของพาหะหนุ่่น้อยในโครงสร้างรอยต่อชนิดฟิล์มบางในขณะที่ไม่มีการไบแอส มีได้มากกว่าในรอยต่อที่อยู่บนชั้นผลึกเดี่ยว⁹

กราฟลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่สภาวะฉายแสง แสดงให้เห็นถึงสมบัติการตอบสนองต่อแสงในเชิงของการเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อที่เตรียมได้ ซึ่งพบว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้นี้มีการตอบสนองต่อแสงได้ดีพอควร แต่ก็ยังให้ค่าของกระแสเปิดวงจรและความต่างศักย์เปิดวงจรในระดับที่น้อยจึงทำให้คำนวณค่าฟิลแฟคเตอร์และค่าประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานดังสมการ (4.33) และ (4.34) ได้น้อยตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าของสภาพต้านทานพื้นผิว (sheet resistance) ของฟิล์มบางชั้น CdS มีค่าสูงมาก (ในระดับของ $10 \text{ M}\Omega$)²⁶ สันนิฐานได้ว่าค่ากระแสแสงที่ได้จากการวัดนั้น น่าจะมาจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล ที่บริเวณขอบของขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางอินเดียมเท่านั้น ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณไกลออกไปจะไม่สามารถเดินทางมาถึงขั้วไฟฟ้าได้ เนื่องจากการมีสภาพต้านทานพื้นผิวที่สูงของฟิล์มบาง CdS นั้นเอง ซึ่งจากการลดพื้นที่ในการรับที่อยู่ในบริเวณรอบๆ ขั้วไฟฟ้าอินเดียมลง พบว่าจะไม่ส่งผลต่อค่ากระแสเปิดวงจรและค่าความต่างศักย์เปิดวงจรเท่าไรนัก ในทางกลับกันยังช่วยในการลดความบกพร่อง (defect) ของเนื้อฟิล์มอีกด้วย คาดว่าถ้ามีการเติมชั้นฟิล์มบางของสาร ZnO (Al) ซึ่งมีลักษณะที่ใสและมีสมบัติในการนำไฟฟ้าลงไปเป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) และมีการออกแบบลายกริดของขั้วไฟฟ้าอินเดียมให้มีขนาดเล็กพอและครอบคลุมพื้นที่ได้ดี น่าจะช่วยในการแก้ไขข้อบกพร่องในจุดนี้ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นสามารถที่ไหลผ่านชั้นของ ZnO (Al) ได้ดีกว่าชั้นของ CdS ซึ่งจะไปสู่ขั้วของอินเดียมออกไปภายนอกได้มากขึ้น ทำให้ได้ค่าของกระแสแสงที่มากขึ้น และจากลักษณะของกราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของความต้านทานขนานของรอยต่อในขณะที่มีการฉายแสง ซึ่งเป็นผลมาจากทางเดินของกระแสรั่วไหล (leakage path current) เช่น กระแสการรวมตัว (recombination current) หรือ กระแสผิว (surface current)¹⁶

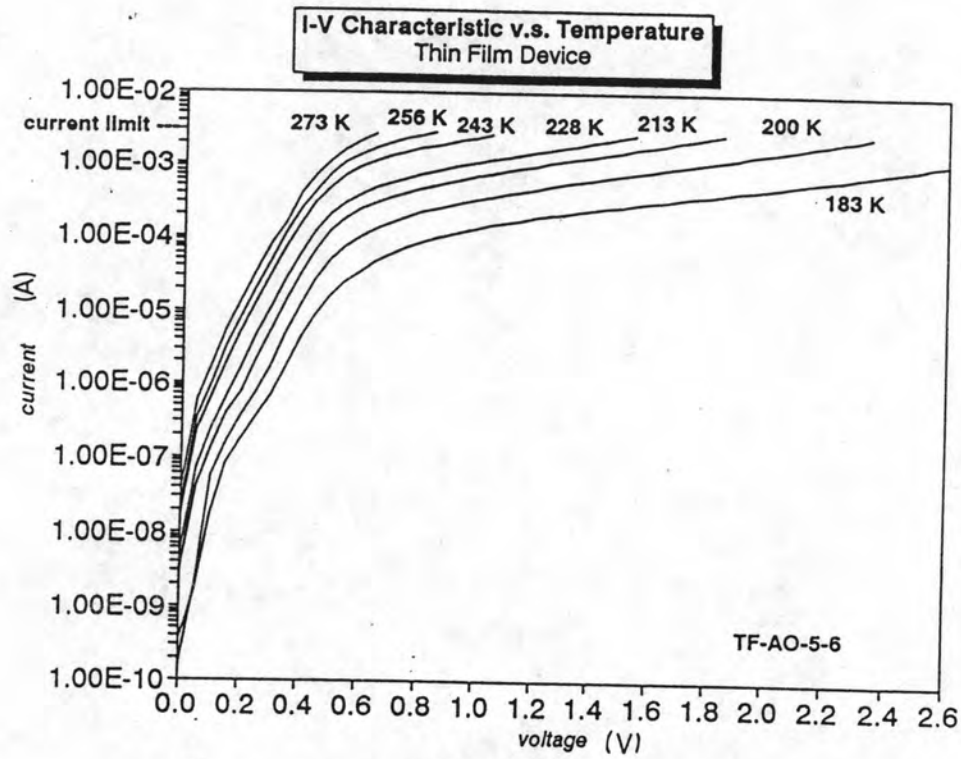
จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ พบว่าค่าความต่างศักย์การแพร์จะมีค่าประมาณ 0.4 - 0.5 V และสามารถคำนวณค่าของความเข้มข้นพาหะจากสมการ (3.17) และ (6.4) มีค่าในระดับ 10^{16} cm^{-3} ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดสภาพการเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (Hall effect measurement)²¹ และจากการวัดยังแสดงให้เห็นถึง

การมีสิ่งเจือระดับลึกปรากฏในโครงสร้างของรอยต่อที่เตรียมได้ ดังแสดงให้เห็นจากการที่ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 6.36 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อแบบฟิล์มบางกับการลดทอนพื้นที่รับแสง

ในส่วนของการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ชนิดฟิล์มบางนั้น พบว่าไม่สามารถจะทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำมากเท่ากับรอยต่อชนิดที่เตรียมบนชั้นผลึกเดี่ยว เนื่องจากความบางของชั้นฟิล์มและการมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชั้นฟิล์มและกระจกสไลด์มีค่าต่างกัน เป็นผลทำให้รอยต่อชนิดที่เป็นฟิล์มบางมีการแตกกร้าวและหลุดร่อนออกได้ อีกทั้งพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ -100°C (173 K) ลงไป ชั้นรอยต่อระหว่างฟิล์มบางของโลหะโมลิบดีนัมและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จะแสดงลักษณะการเป็นรอยต่อแบบโลหะ - สารกึ่งตัวนำ (metal - semiconductor junction) ออกมาซึ่งจะส่งผลถึงรอยต่ออวิวิธพันธุ์ $\text{CuInSe}_2 / \text{CdS}$ ด้วย^{9,11} ข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 6.37

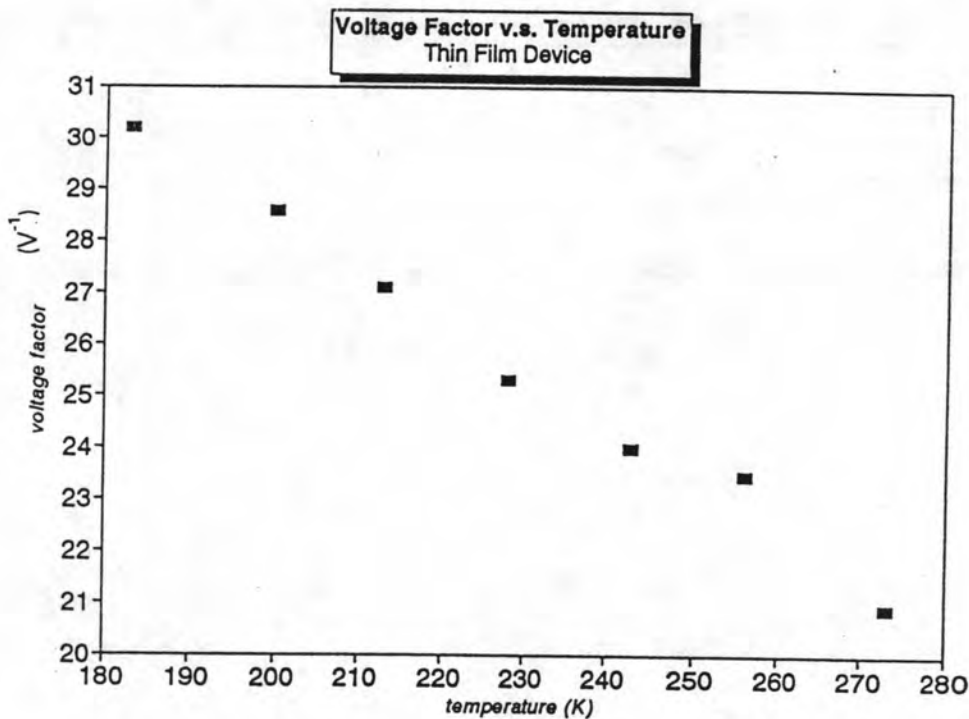


รูปที่ 6.37 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ

temperature (K)	ideality factor	saturated current (A)	α (V^{-1})
183	2.10	2.64×10^{-9}	30.18
200	2.03	5.97×10^{-9}	28.57
213	2.01	1.67×10^{-8}	27.10
228	2.01	3.60×10^{-8}	25.31
243	1.99	1.08×10^{-7}	23.99
256	1.93	1.48×10^{-7}	23.47
273	2.03	3.00×10^{-7}	20.93

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าตัวแปรอุดมคติ ค่ากระแสอิ่มตัวและ
ค่าตัวแปรความต่างศักย์ของรอยต่อชนิดฟิล์มบาง
ที่อุณหภูมิต่างๆ

ซึ่งจากกราฟจะสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรอุดมคติ ค่ากระแสอิ่มตัวและค่าตัวแปรความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตามสมการที่ (3.13) , (3.14) และ (6.5) ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 6.4 พบว่าค่าของกระแสอิ่มตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิด้วย แต่ตัวแปรอุดมคติจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยจะมีค่าเกาะกลุ่มอยู่ประมาณ 2.0 ซึ่งจากการวิเคราะห์กลไกการขนส่งระหว่างรอยต่อวิวิธพันธุ์ ดังรายละเอียดในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่ปรากฏการณ์การขนส่งระหว่างรอยต่อ จะเป็นแบบการรวมตัว ณ บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อ^{1,7,18,19,20} (interface recombination) และจากการที่ค่าตัวแปรความต่างศักย์ มีการแปรผันกับอุณหภูมิดังกราฟรูปที่ 6.38 แสดงให้เห็นว่าลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ นั้นขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ซึ่งจากการวิเคราะห์กลไกการขนส่งของรอยต่อวิวิธพันธุ์ แสดงถึงความเป็นไปได้ที่ปรากฏการณ์ขนส่งระหว่างรอยต่อจะเป็นแบบการทะลุผ่าน หรืออาจจะเป็นทั้งสองแบบรวมกัน นั่นคือเป็นแบบการทะลุผ่าน - รวมตัว^{1,7,18,19,20} ดังเช่นแบบจำลองที่ 5 ในบทที่ 2



รูปที่ 6.38 กราฟแสดงค่าตัวแปรความต่างศักย์ที่แปรผันกับอุณหภูมิ