หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

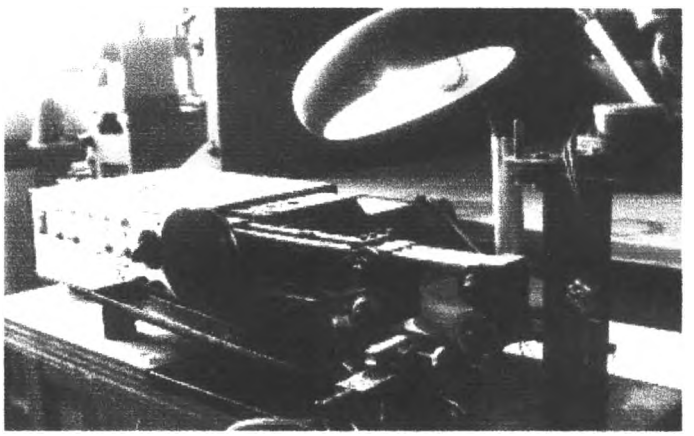
วิธีทดลอง และผลการทดลอง

การศึกษาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO(Al)/CdS/$CuInSe_2$ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาจากรอยต่อที่สร้างอยู่บนสารกึ่งตัวนำ$CuInSe_2$ ในรูปผลึกเอกพันธุ์ ซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้

การเตรียมชิ้นอุปกรณ์ที่เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO(Al)/CdS/$CuInSe_2$

1. การเตรียมผลึก $CuInSe_2$

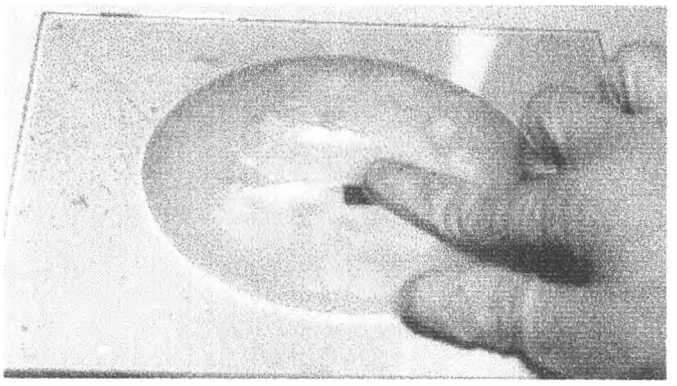
สารกึ่งตัวนำผลึกเอกพันธุ์$CuInSe_2$ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการนำไฟฟ้าเป็นชนิด p มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงและอยู่ในรูปของผลึกเอก-พันธุ์ (single crystal) ที่ได้จากการปลูกผลึกแบบแข็งตัวตามแนวยาว (directional freezing)[15] จากนั้นนำผลึกที่ได้มาตัดด้วยเครื่องตัดผลึก (string saw) ให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นฐาน ผลึกที่ได้นี้ต้องนำไปทำความสะอาดเพื่อเอาเศษเทียนและไขมันที่ติดอยู่ออกด้วยน้ำยาล้างจาน แล้วจึงนำไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 800 และ1200 ตามลำดับเพื่อให้ผลึกมีความเรียบและมีระนาบของผลึกในแนวเดียวกันและพร้อมสำหรับการเตรียมชั้นฟิล์มในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตัดผลึก $CuInSe_2$

2. การเตรียมผิวหน้า

การเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ$CuInSe_2$ จะต้องทำการเตรียมทั้งสองด้านของผิว ซึ่งด้านหนึ่งจะเป็นด้านของขั้วไฟฟ้า และอีกด้านจะเป็นส่วนที่ทำเป็นรอยต่อกับฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ขั้นตอนในการเตรียมผิวหน้านี้เป็นส่วนสำคัญเพราะจะเป็นการลดผลที่อันอาจให้เกิดความบกพร่องที่รอยต่อ โดยการขัด ด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 1 , 0.5 และ0.1 ไมครอน บนกระดาษกรอง และกระดาษเคคาโรส ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 ผลึกที่ขัดด้วยผงขัดอะลูมินาบนกระดาษกรอง

ผลึกจะถูกขัดจนมีความเรียบมากที่สุด โดยสังเกตจากความเงาที่เกิดขึ้นและไม่เห็นริ้วรอยขีดข่วนหรือรอยแยกเมื่อมองผ่านกล้องจุลทัศน์ ผลึกที่ได้ขัดเตรียมไว้แล้วนี้ยังมีคราบของไขมันติดอยู่ ดังนั้นจึงต้องนำผลึกนี้ไปล้างด้วยสารละลายล้างไขมันไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethelene หรือ TCE) ตามด้วย อะซีโตน(Acetone) และเมธานอล(Methanal) ตามลำดับด้วยเครื่องล้างอุลตร้าโซนิค ขั้นตอนละ 3 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ หลาย ๆ ครั้งจนแน่ใจว่าสะอาดพอแล้วจึงเป่าให้แห้งด้วยกาซไนโตรเจน แล้วดำเนินขั้นตอนการเปิดผิวหน้าผลึกต่อไป

3. การกำจัดความบกพร่องที่ผิวหน้าของชิ้นผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$

โดยทั่วไป การขัดผิวของผลึกจะทำให้เกิดความบกพร่องของโครงผลึกในรูปของความเค้นที่เหลือจากแรงขัด (Residual strain) ความบกพร่องในส่วนนี้จะต้องกำจัดออกโดยการกัดด้วยสารเคมี การกำจัดความบกพร่องที่ผิวหน้านั้นจะมีวิธีการทำเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนของทางด้านสารกึ่งตัวนำที่จะทำเป็นรอยต่อกับขั้วโลหะ และอีกส่วนเป็นด้านของสารกึ่งตัวนำที่จะทำรอยต่อกับชั้นฟิล์มบางกับสารกึ่งตัวนำอื่น

3.1 การกำจัดความบกพร่องที่ผิวหน้า ทางด้านสารกึ่งตัวนำกับรอยต่อขั้วโลหะ

เนื่องจากเมื่อมีการประกบกันระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ผลของรอยต่อนี้จะทำให้เกิดความต้านทานสูง แสดงผลขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการลดผลนั้นด้วยการทำเอ็ดชิ่ง (Etching) ด้วย สารละลายกรดกัดทองซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง $HCl + HNO_3$ ในอัตราส่วน 3:1 ด้วยความเข้มข้น 50% โดยนำผลึกแช่ในสารละลายกรดที่เตรียมไว้ประมาณ 2-3 นาที จากนั้นนำขึ้นมาล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลาย ๆ ครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วย กาซไนโตรเจน ผลึกที่ได้จะพร้อมสำหรับทำขั้วทองต่อไป

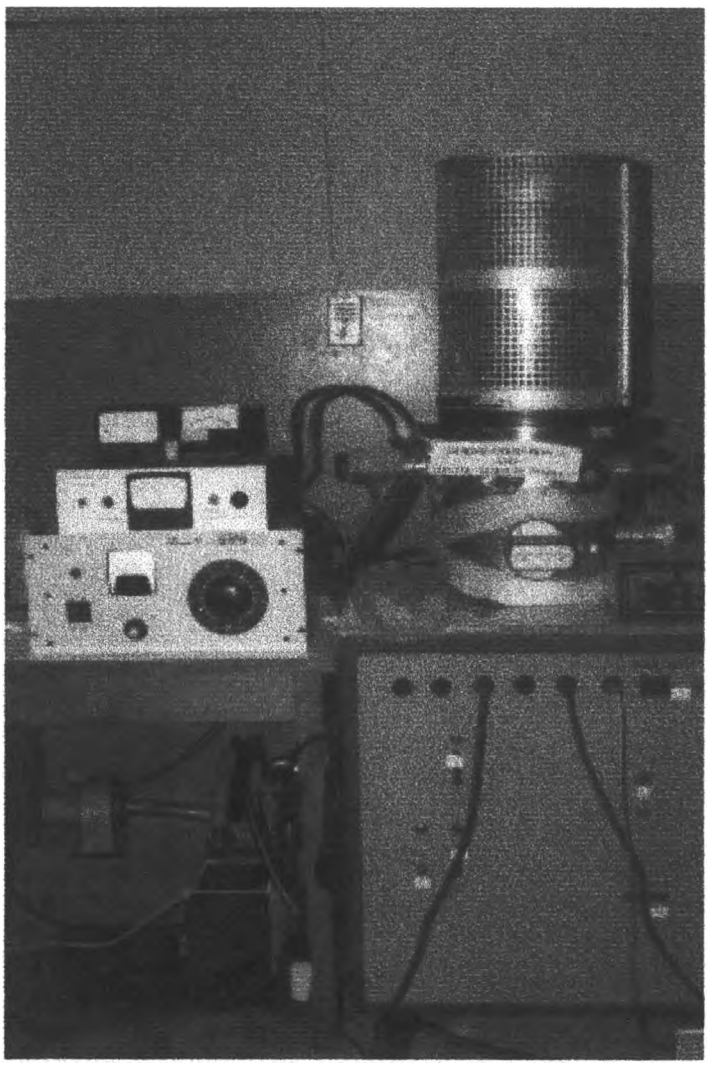
3.2 การกำจัดความบกพร่องที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำสำหรับเป็นรอยต่อกับชั้นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอื่น

เนื่องจากการขัดผลึกในขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นถึงแม้ผลึกที่ได้จะมีผิวเรียบและสะอาดก็ตามแต่ก็ยังไม่เพียงพอ เพราะผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นยังมี

บางส่วนที่ไม่เรียบ และผิวหน้ายังไม่พร้อมที่จะยึดเกาะกับสารกึ่งตัวนำในชั้นต่อไป อาจจะเป็นผลทำให้รอยต่อที่ได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องมีการกัดผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำด้วยสารละลายเคมี โบรมีนเมธานอล (Br+ Methanol) ซึ่งได้จากการผสมระหว่างสารละลายเคมีโบรมีนกับเมธานอล ในอัตราส่วนโบรมีน 0.5 ซม^3 กับ เมธานอล 100 ซม^3 จะได้สารละลายกรดสีส้ม จากนั้นนำผลึกจุ่มลงในสารละลายกรดที่เตรียมไว้เป็นเวลา 1 นาที นำขึ้นมาล้างด้วยสารละลายเมธานอลเพื่อล้างโบรมีนออกให้หมด จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าสะอาดดีแล้วจึงนำไปเป่าให้แห้งด้วยกาซไนโตรเจน เพื่อเตรียมขั้นตอนต่อไป

4. การเตรียมขั้วโลหะทองด้านโอห์มิก

โครงสร้างอุปกรณ์ที่จะทำขึ้นนี้จำเป็นต้องมีขั้วโลหะเพื่อใช้ในการวัดสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ขั้วโลหะอาจทำขึ้นจากการเคลือบผิวหน้าสารกึ่งตัวนำด้วยโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี และไม่ทำให้เกิดรอยต่อที่ต้านการไหลของกระแส (blocking contact) สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิด p ขั้วโลหะดังกล่าวนี้คือทอง ซึ่งการเตรียมขั้วทองนี้จะทำการเคลือบด้วยกระบวนการระเหยในระบบสุญญากาศ ระบบสุญญากาศที่ใช้ในการระเหยทองนั้นแสดงดังรูป



รูปที่ 5.3 แสดงระบบสุญญากาศที่ใช้ในการระเหยทอง

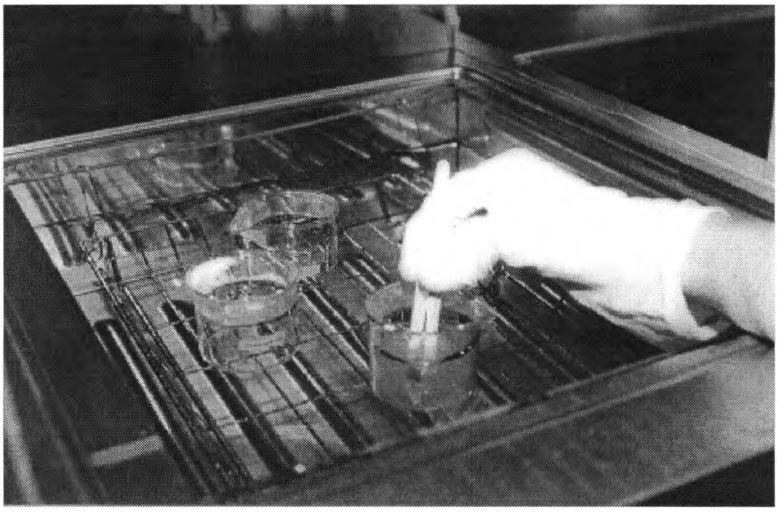
ความหนาของทองที่ต้องการสำหรับขั้วด้านโอห์มมิกนั้นประมาณ 2,000-2,500 A°

5. การเตรียมฟิล์มบางชั้นต่าง ๆ

หลังจากการเตรียมขั้วโลหะด้านโอห์มิกที่เป็นรอยต่อที่มีความต้านทานต่ำระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะทองแล้ว และผิวอีกด้านหนึ่งได้ทำการกำจัดความบกพร่องที่ผิวหน้าด้วยสารละลายกรดโบรมีน+เมธานอลเรียบร้อยแล้ว นำมาเตรียมรอยต่อฟิล์มบางตามลำดับต่อไปนี้

5.1 การเตรียมชั้นฟิล์มบางของ CdS

การเตรียมชั้นของฟิล์มบาง CdS ที่เป็นรอยต่อกับผิวหน้าสารกึ่งตัวนำในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการเรียกว่า การอาบเคลือบด้วยสารเคมี (Chemical bath deposition process) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง สารละลาย $CdSO_4$ ความเข้มข้น 5 mM , Thiourea (CHN_2S) ความเข้มข้น 0.5 M และ NH_3 ความเข้มข้น 2.5 M ทำการจุ่มสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เป็นฐานของรอยต่อในสารละลายผสม $CdSO_4$ 15 cm^3 กับ NH_3 20 cm^3 แล้วนำไปแช่ในอ่างทำความร้อนจนสารละลายผสมมีอุณหภูมิถึง 60 $^{\circ}C$ จากนั้นผสมสารละลาย Thiourea ที่มีอุณภูมิ 60 $^{\circ}C$ เข้ากับสารละลายผสม $CdSO_4 + NH_3$ จะปรากฏตะกอน CdS ที่มีลักษณะสีเหลือง เคลือบติดกับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เป็นฐานรองรับ การเคลือบใช้เวลา 90 วินาที จากนั้นนำชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มาล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลาย ๆ ครั้งไม่ให้มีคราบของผง CdS ติดอยู่ เป่าให้แห้งด้วยกาซไนโตรเจน แล้วทำการเคลือบซ้ำอีก 60 วินาทีด้วยสารละลายผสมชุดใหม่ จะได้ผลึกที่มีสีน้ำเงินเข้ม และมีความหนาของชั้น CdS นี้ประมาณ 750 A°



รูปที่ 5.4 แสดงระบบที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง CdS

5.2 การเตรียมชั้นฟิล์มบาง ZnO[16]

การเตรียมชั้นของฟิล์มบาง ZnO นี้จะทำการเตรียมชั้นฟิล์มต่อจากชั้นของ CdS ซึ่งจะใช้กระบวนการที่เรียกว่า อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริ่ง ซึ่งได้มีการพัฒนาให้เป็นฟิล์มบางโปร่งแสงและใช้เป็นหน้าต่างของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี การเคลือบฟิล์มใช้เวลา 30 นาที ที่กำลัง 75 วัตต์ ความดันอาร์กอน $8x10^{-3}$ mbar โดยการติดวัสดุที่เป็นฐานรองรับวางตั้งฉากกับเป้าจะได้ฟิล์ม ZnO ที่มีความหนา $2.7x10^{-5}$ cm และมีค่าสภาพความต้านทาน $1.5x10^{-3}$ Ω-cm

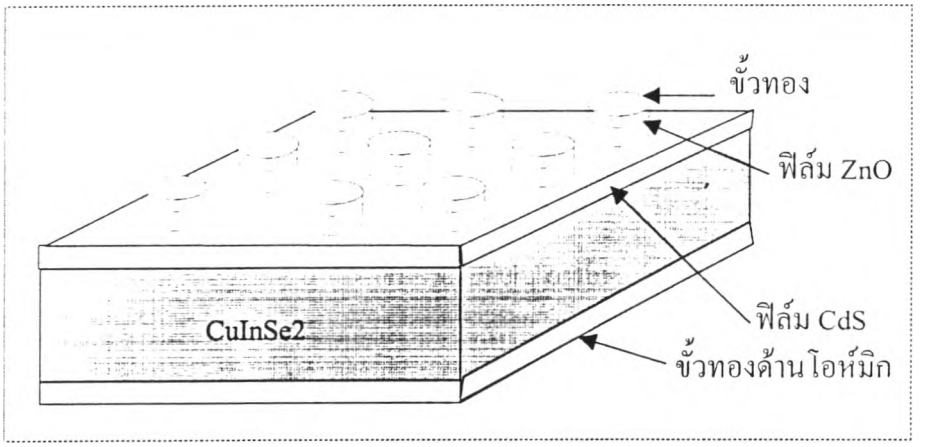
6. การทำขั้วทองเพื่อใช้เป็นขั้วของรอยต่อทางด้านเกท

การทำขั้วทองที่เป็นเกทนี้จะทำการเตรียมเช่นเดียวกับการทำขั้วที่ด้านโอห์มิกด้วย กระบวนการระเหยในระบบสูญญากาศ โดยจะทำการระเหยทองเป็นวง

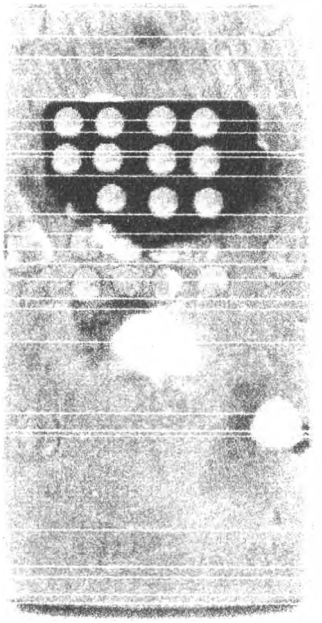
กลมเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm. จะใช้ความหนาประมาณ1,000-1,200 A° ประกบทับทางด้านบนของชั้นฟิล์ม ZnO

7. การทำ Mesa etching

เมื่อทำการเตรียมโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ต้องมีการแยกให้มีลักษณะเป็นอุปกรณ์หลาย ๆ ตัวบนชิ้นสารกึ่งตัวนำชิ้นเดียว ดังนั้นจึงต้องทำการกัดเอา ZnO ออก โดยแช่ ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อที่ทำไว้ตามขั้นตอนข้างต้นในกรด HCl ความเข้มข้น 0.25 % เป็นเวลาประมาณ 1 นาที ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางของ ZnO ที่ไม่มีทองประกบทับอยู่ด้านบนจะหลุดออกไป โครงสร้างที่ได้มีลักษณะดังภาพ



รูปที่5.5 แสดงโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ZnO/CdS/CuInSe$_2$ที่ทำขึ้นเมื่อเสร็จสมบูรณ์

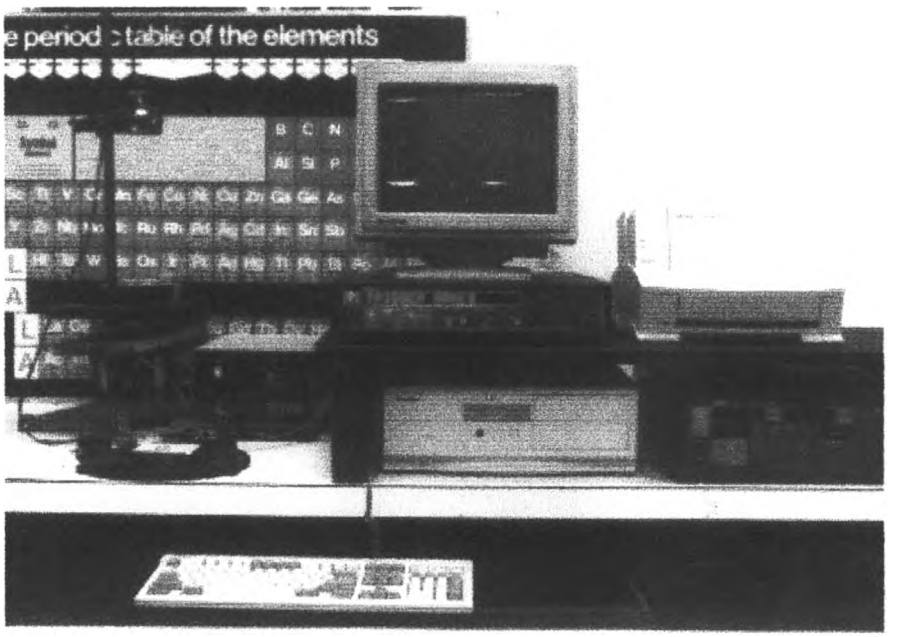


รูปที่ 5.6 ชิ้นรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

นำโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ได้ทำการเตรียมเสร็จสมบูรณ์ตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วมาทำการติดตั้งลงบนแผ่นทองแดงเพื่อใช้ในการวัดลักษณะทางไฟฟ้าของรอยต่อต่อไป

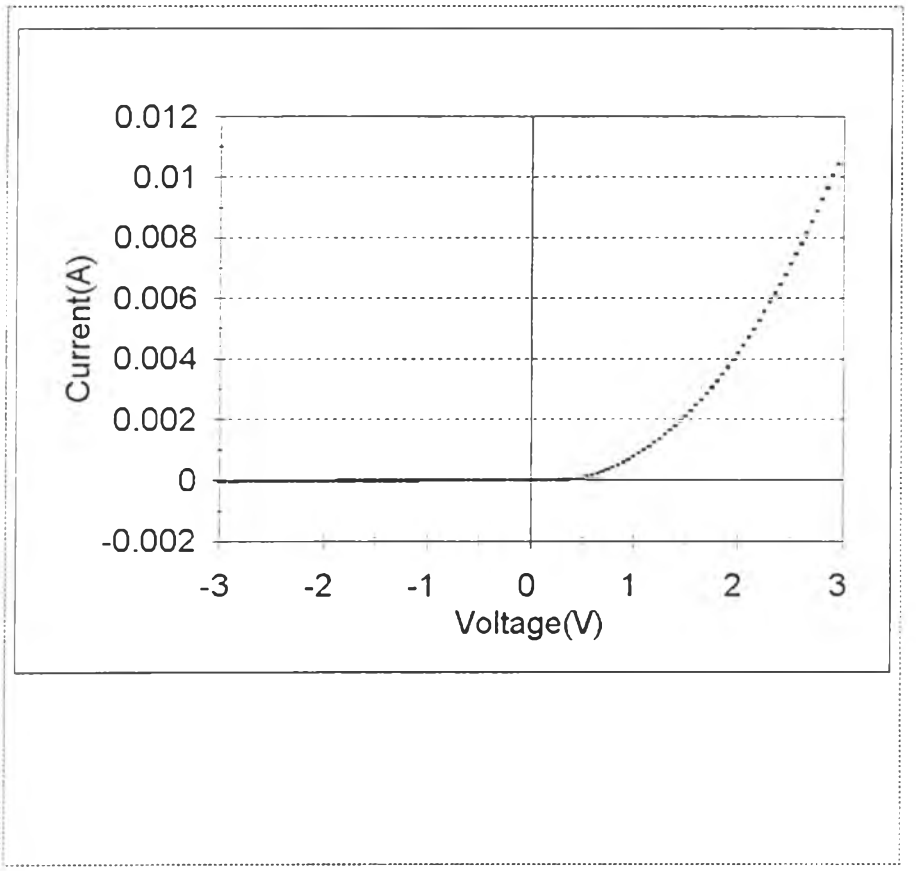
การวัดคุณลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์

การวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของรอยต่อว่ามีลักษณะการนำกระแสคล้ายกับการนำกระแสของไดโอดที่ดีหรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดด้วยระบบวัดและเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์แสดงดังภาพ



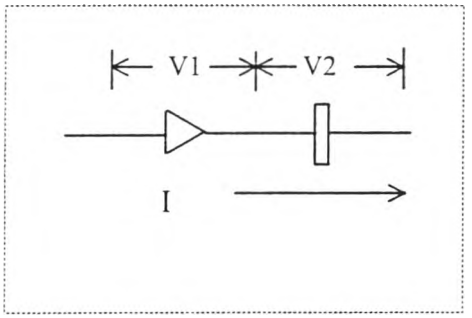
รูปที่5.7 แสดงระบบวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ครั้งนี้ ทำการวัดเพื่อหาชุดของรอยต่อที่ดีและเหมาะสมที่จะใช้ในการวัดหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ต่อไป ซึ่งลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่ดีจะแสดงการเรียงกระแสแบบไดโอดคือจะนำกระแสเมื่อมีการไบแอสตรงและไม่นำกระแส และมีค่ากระแสรั่วไหลน้อยเมื่อมีการไบแอสกลับ ผลของการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์แสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงการนำกระแสแบบไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO(Al)/CdS/$CuInSe_2$

ซึ่งจากกราฟลักษณะความสัมพันธ์นี้ พบว่าการนำกระแสของรอยต่อวิวิธ-พันธุ์ ZnO(Al)/CdS/$CuInSe_2$ แสดงสมบัติของการเรียงกระแสอย่างชัดเจน จะมีการยอมให้กระแสไหลผ่านได้สะดวกในด้านไบแอสตรงและมีการกั้นกระแสไม่ให้ไหลในด้านไบ-แอสกลับ ซึ่งการนำกระแสที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นเพียงการนำกระแสแบบไดโอดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากตามลักษณะโครงสร้างของรอยต่อ ที่มีชั้นของ CdS ที่มีลักษณะเป็นฉนวนบางกั้นอยู่ ดังนั้นการนำกระแสที่เกิดขึ้นจึงมีขบวนการนำกระแสที่อาจเกิดจากการทะลุผ่านชั้นฉนวนนี้เกิดขึ้นด้วย ลักษณะการนำกระแสอธิบายได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ภาพแสดงการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ผ่านชั้นต่าง ๆ

เราสามารถแสดงการนำของกระแสที่เป็นลักษณะการนำของไดโอดตามความสัมพันธ์ดังนี้ [1]

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{qV_I}{nkT}\right) - 1\right] \qquad (5.1)$$

เมื่อ I ค่ากระแสที่ไหลในวงจร

I_0 ค่ากระแสอิ่มตัวของรอยต่อ

V_i ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด

n ค่าตัวแปรอุดมคติของไดโอด (ideality factor)

q ประจุ

kT ค่าพลังงานความร้อน (thermal energy)

การนำกระแสในโครงสร้าง MIS แบบอุดมคตินั้น จะไม่มีกระแสไหลผ่านชั้นฉนวนเมื่อฉนวนนั้นเป็นฉนวนอย่างแท้จริง การนำของพาหะจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ

ระบบมีสนามไฟฟ้าหรืออุณหภูมิที่สูงอย่างเพียงพอ ค่าของสนามไฟฟ้าในฉนวนภายใต้การไบแอสที่ได้จากกฎของเกาส์

$$Q_S = -\varepsilon_S \mathcal{E}_S$$

และ

$$V_i = \mathcal{E}_i d = \frac{|Q_S| d}{\varepsilon_i}$$

จะได้

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_S \left(\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_i} \right)$$

เมื่อ $\mathcal{E}_i, \mathcal{E}_S$ คือสนามไฟฟ้าในฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

$\varepsilon_i, \varepsilon_S$ คือค่าpermittivities ของฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

ในโครงสร้างนี้ CdS เป็นชั้นที่มีความต้านทานสูงจึงเสมือนกับเป็นชั้นของฉนวน การนำกระแสผ่านชั้นของ CdS จึงต้องใช้สนามที่สูงมากและขบวนการการขนส่งพาหะที่เกิดขึ้นจะเป็นการทะลุ-ปลดปล่อย (tunnel emission) เนื่องมาจากการไอออไนซ์สนามของอิเล็กตรอนที่ถูกดักไว้ไปยังแถบนำพลังงาน หรือโดยการทะลุของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะไปยังแถบนำพลังงานของฉนวน การทะลุ-ปลดปล่อยจะขึ้นอยู่กับศักย์ที่ไบแอสและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ของกระแสและสนามเนื่องมาจากขบวนการทะลุ-ปลดปล่อยในชั้นฉนวนแสดงดังนี้[1]

$$I \sim \mathcal{E}_i^2 \exp\left[-\frac{4\sqrt{2m^*}(q\phi_B)^{3/2}}{3q\hbar E} \right]$$

ความสัมพันธ์ของกระแสกับความต่างศักย์

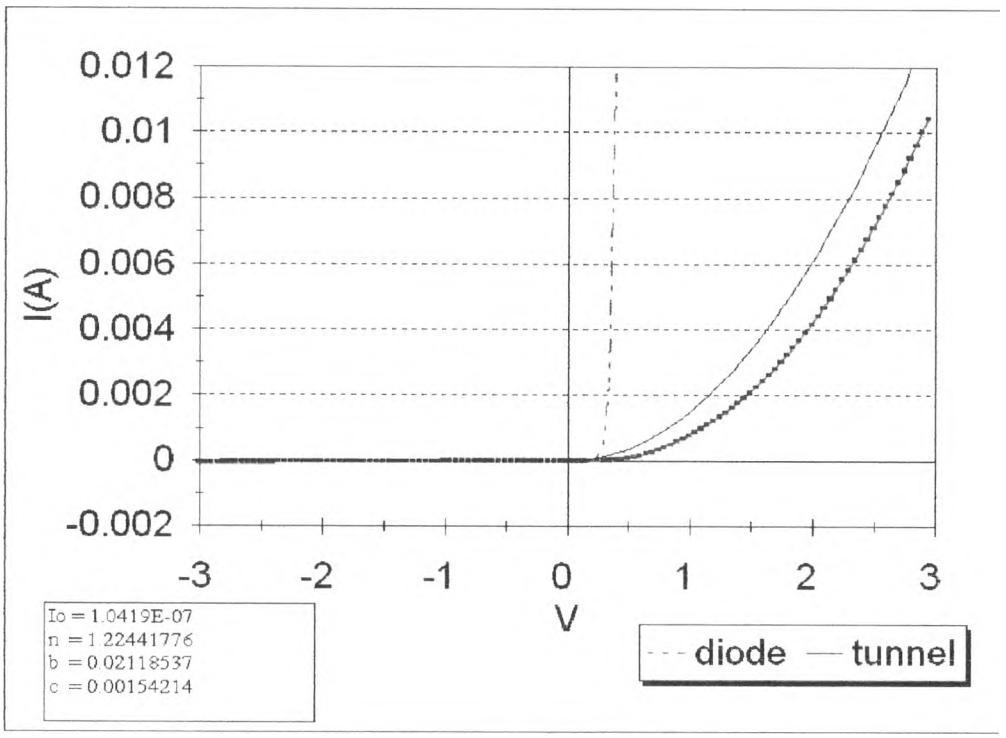
$$I = cV_2^2 \exp\left(\frac{-b}{V_2}\right) \qquad (5.2)$$

เมื่อ V ค่าศักย์ที่ทำการไบแอสให้แก่วงจร

V_2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกตร่อมชั้นของ CdS

c, b ค่าคงที่ของการทะลุผ่าน

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5.1) และ(5.2) จะได้ลักษณะของความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ ที่แยกตามสมการ เมื่อ $V = V_1 + V_2$



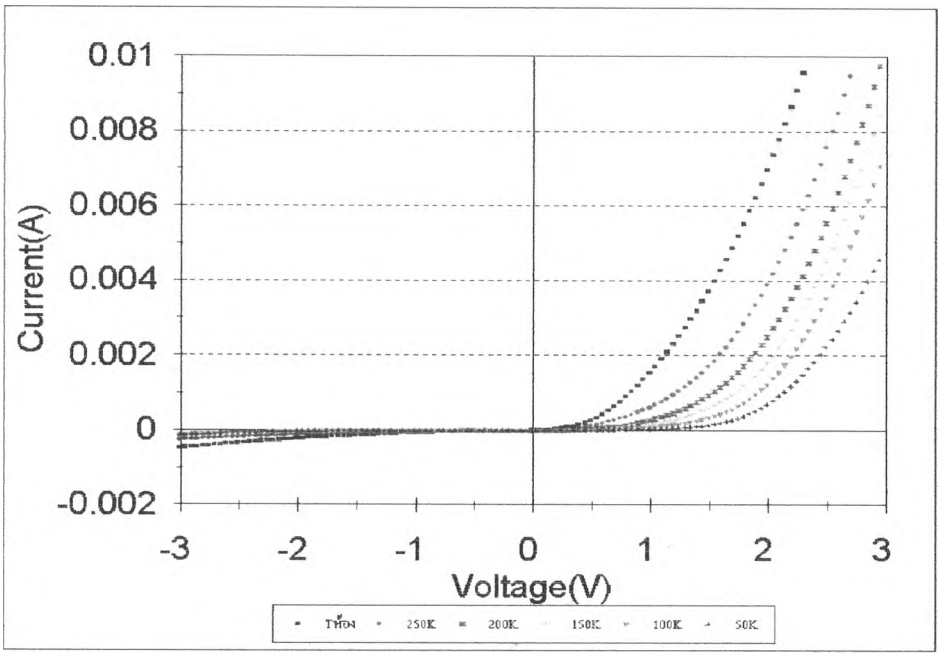
รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะของกระแส-ความต่างศักย์แยกตามสมการ

จากสมการที่ (5.1) แสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่เป็นการนำแบบไดโอด และสมการที่ (5.2) แสดงกระแสที่ทะลุผ่านชั้นของฉนวน

โดยรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้นี้ จะมีค่าตัวแปรอุดมคติของไดโอดเท่ากับ 1.22 และมีค่ากระแสอิ่มตัวของรอยต่อเท่ากับ 1.042×10^{-7} แอมป์

การวัดคุณลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่ำ

นำรอยต่อนี้ไปวัดที่อุณหภูมิต่ำต่าง ๆ โดยการติดตั้งระบบการวัดเข้ากับระบบทำความเย็น พบว่าความสัมพันธ์ของกระแส-ความต่างศักย์ที่ได้มีลักษณะที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิอย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

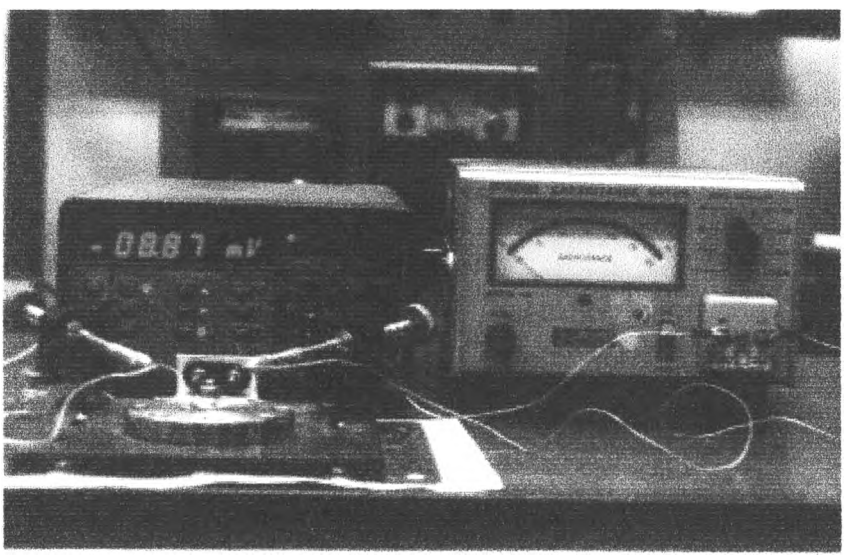
จากสมการความสัมพันธ์ ตามสมการที่ (1)และ(2) กับข้อมูลที่วัดได้ดังกล่าวข้างต้น เมื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับรูปแบบสมการและข้อมูลการวัดจะเห็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เปลี่ยนกับอุณหภูมิ ข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตนี้แสดงดังตารางที่ 5.1

อุณหภูมิ(K)	n	I_0(A)	c	b
ห้อง(300)	1.5	7.3×10^{-5}	0.0026	0.17
250	1.8	9.3×10^{-6}	0.0019	0.42
200	2.2	4.6×10^{-6}	0.0017	0.98
150	2.69	1.9×10^{-6}	0.002	1.68
100	3.11	1.2×10^{-6}	0.0023	2.57
50	4.05	1.8×10^{-7}	0.002	3.93

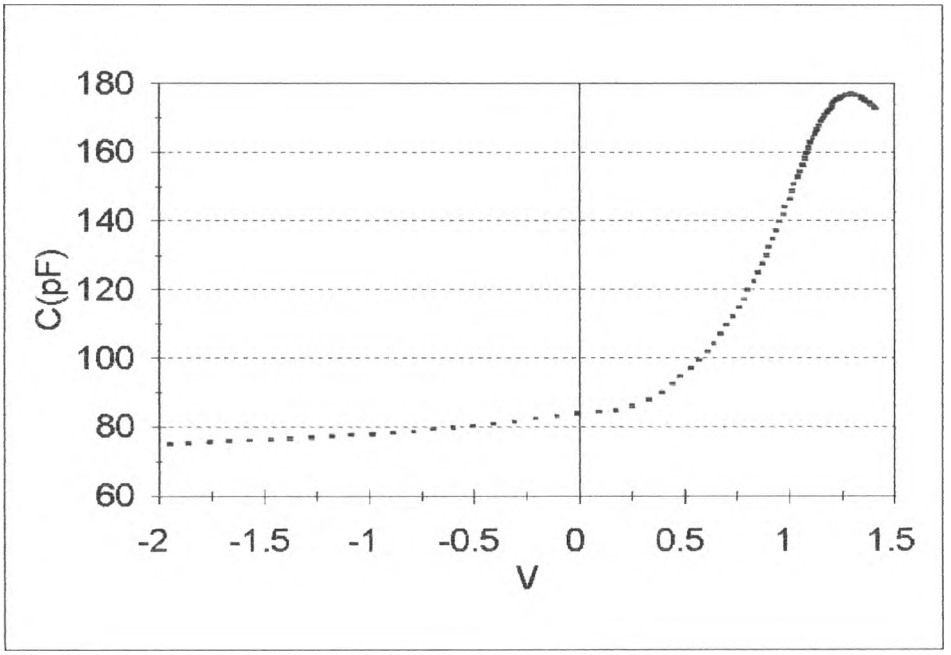
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลที่ทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์

การวัดลักษณะ ความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาสมบัติของรอยต่อ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าขนาดของช่วงดีพลีชั่น, ค่าความจุของฉนวนและนำไปอธิบายลักษณะการโค้งของแถบพลังงานที่ผิวรอยต่อ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดลักษณะ ความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ได้ผ่านการตรวจสอบโดยการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ ว่ามีลักษณะการนำกระแสแบบไดโอดที่ดี มีกระแสรั่วไหลน้อย การวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ได้ใช้เครื่องวัดค่าความจุ Boonton 72A ความถี่ 1 MHz ทำการวัดทั้งการไบแอสตรงและไบแอสกลับ ผลของการวัดแสดงดังรูปที่ 5.13

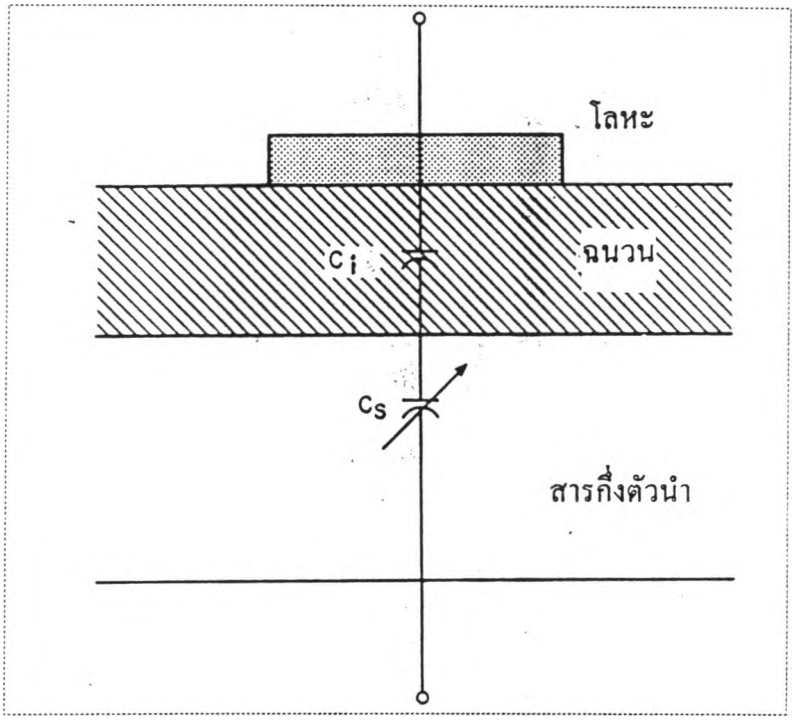


รูปที่ 5.12 แสดงระบบวัดลักษณะเฉพาะความจุ-ความต่างศักย์



รูปที่ 5.13 แสดงลักษณะเฉพาะของความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO(Al)/CdS/$CuInSe_2$

จากลักษณะเฉพาะของความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ที่ได้ พบว่าโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO/CdS/$CuInSe_2$มีลักษณะเช่นเดียวกับรอยต่อโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) เนื่องจาก ZnO มีความต้านทานต่ำมากเสมือนเป็นโลหะ และ CdS ซึ่งเป็นชั้นบัฟเฟอร์นั้นมีค่าความต้านทางสูงเสมือนเป็นฉนวน ที่การไบแอสตรงที่ขั้วเกทเป็นบวก ขบวนการที่เกิดขึ้นเป็นขบวนการแอคคิวมูเลชั่นของโฮลเป็นผลทำให้ค่าความจุรวมของระบบจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นั้นเป็นค่าความจุของฉนวนในโครงสร้าง ลักษณะของโครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำนี้สามารถอธิบายในรูปของวงจรเสมือนที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมที่ชั้นของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงวงจรตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันภายในชั้นของโครงสร้าง [2]

จากรูปที่ 5.14 แสดงวงจรตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นที่ชั้นฉนวน CdS (C_i) กับตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นที่ชั้นของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ (C_s) ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ภายในโครงสร้างของรอยต่อ ดังนั้นความสัมพันธ์ของความจุที่เกิดที่รอยต่อในลักษณะโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำนี้จึงเป็น [2]

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_s} \qquad (5.3)$$

C คือค่าความจุรวมของรอยต่อวิวิธพันธุ์ต่อหน่วยพื้นที่ที่วัดได้

C_i คือค่าความจุที่เกิดจากชั้นฉนวน

C_s คือค่าความจุที่เกิดจากชั้นดีพลีชั่นในสารกึ่งตัวนำ

สมการที่ 5.3 แสดงถึงความจุรวมของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่วัดได้ต่อพื้นที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมของตัวเก็บประจุในชั้นฉนวนและตัวเก็บประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำ ค่าความจุในชั้นของฉนวนนั้นเป็นค่าคงที่และสอดคล้องกับค่าความจุสูงสุดของระบบ และตัวเก็บในชั้นของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะของการไบแอส

เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่การไบแอสกลับ หรือขณะที่ความต่างศักย์ที่ขั้วเกทมีค่าบวกเป็นกรณีที่เกิดขบวนการดีพลีชั่นขึ้น ค่าของความจุไฟฟ้าที่ชั้นดีพลีชั่นต่อหน่วยพื้นที่ นิยามไว้คือ $C \equiv dQ_c/dV$

สำหรับรอยต่อฉับพลันด้านเดียว (one-side abrupt junctions) ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่จึงนิยามได้ดังนี้ [1]

$$
\begin{aligned}
C &\equiv \frac{dQ_c}{dV} \\
&= \frac{d(qN_B W)}{d\left[\left(\frac{qN_B}{2\varepsilon_s}\right)W^2\right]} \\
&= \frac{\varepsilon_s}{W} \\
&= \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_B}{2}}\left(V_{bi} \pm V - \frac{2kT}{q}\right)^{-1/2} \\
&= \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{2}\,L_D}(\beta V_{bi} \pm \beta V - 2)^{-1/2} \ \text{F/cm}^2
\end{aligned}
\tag{5.4}
$$

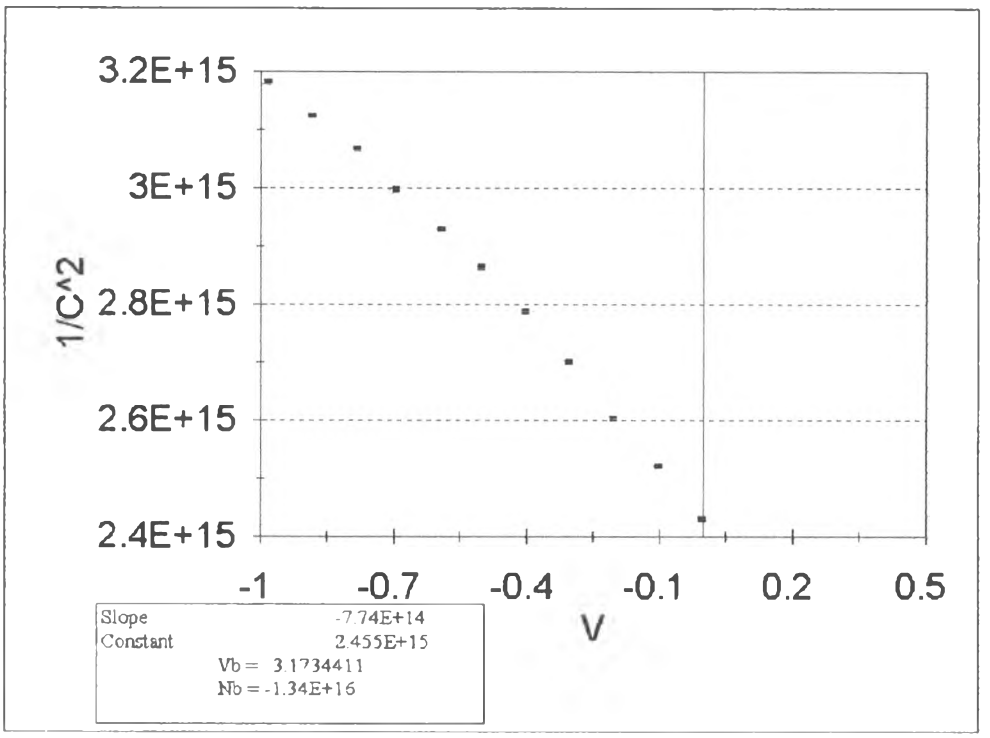
หรือ

$$
\frac{1}{C^2} = \frac{2L_D^2}{\varepsilon_s^2}(\beta V_{bi} \pm \beta V - 2)
$$

$$
\frac{d(1/C^2)}{dV} \cong \frac{2L_D^2\beta}{\varepsilon_s^2} = \frac{2}{q\varepsilon_s N_B} \tag{5.5}
$$

ข้อมูลที่ได้นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_s^2$ กับ ความต่างศักย์ คำนวนหาค่า carrier concentration ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ เมื่อความชันของกราฟมีความสัมพันธ์กับcarrier concentration ตามสมการที่ (5.5) กราฟความสัมพันธ์ของ $1/C_s^2$ กับ ความต่างศักย์ ของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 5.15

จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_s^2$ กับความต่างศักย์ สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของพาหะตามสมการที่ (5.5) จะได้ $N_B = 1.3 \times 10^{16}$ cm^{-3} และจุดตัดกราฟจะได้ built-in potential ที่มีค่าสูงถึง 3.17 V



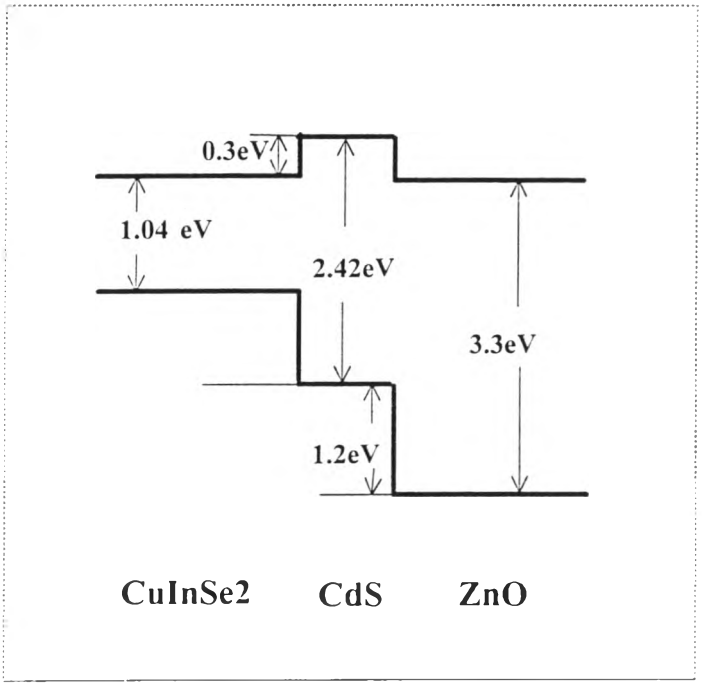
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของ $1/C_s^2$ กับความต่างศักย์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลเฉพาะของสารกึ่งตัวนำในงานวิจัยนี้ และในงานของผู้อื่น [6,7,8,9] ที่ทำการศึกษาหา ค่าความกว้างของแถบพลังงานว่าง, ค่าพลังงานของแถบนำและแถบวาเลนซ์ เราสามารถแสดงรูปลักษณะของแถบพลังงานที่รอยต่อวิวิธพันธ์ได้แสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าของความกว้างของแถบพลังงานว่างของ เป็นลักษณะของ $CuInSe_2$ มีค่าเท่ากับ 1.04 eV, ของ CdS มีค่า 2.4 eV และของ ZnO 3.3 eV จากการศึกษาด้วย Synchrotron radiation [6,8] พบว่า สำหรับกรณีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างCdS/p-$CuInSe_2$ ค่าของΔE_v เท่ากับ 0.3 eV และ ΔE_c เท่ากับ 1.08 eV สำหรับรอยต่อระหว่าง CdS /ZnO จะมี ΔE_v เท่ากับ 1.2 eV

จากข้อมูลของลักษณะกระแส-ความต่างศักย์และลักษณะของความจุ-ความต่างศักย์ เราสามารถที่จะบอกถึงลักษณะแถบพลังงานและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรอยต่อวิวิธพันธุ์นี้ เมื่อมีการไบแอสได้ดังนี้

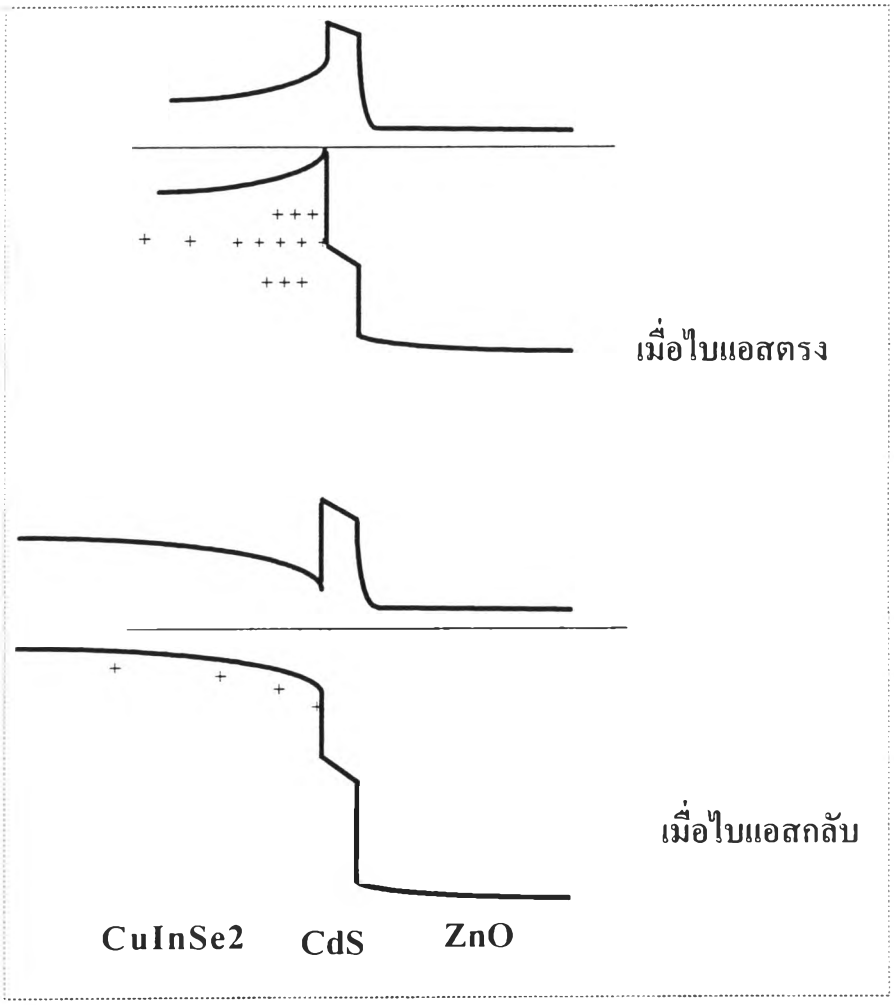
ลักษณะของแถบพลังงานที่เกิดขึ้นขณะเมื่อยังไม่มีการไบแอส V= 0 แถบพลังงานยังไม่มีการโค้ง เรียกว่า แถบพลังงานเรียบ (flat-band condition) ซึ่งในขณะนี้จะมีความหนาแน่นของพาหะสม่ำเสมอตลอดชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และไม่มีพาหะมาสะสมอยู่ที่บริเวณของชั้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ตรงรอยต่อกับชั้นCdS เมื่อทำการไบแอส จะมีประจุเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ตรงที่รอยต่อกับชั้นCdsและมีประจุตรงกันข้ามจำนวนเท่ากันเกิดขึ้นที่ชั้นของ ZnO จากการที่ชั้นของCds มีความต้านทานสูงมาก อาจเปรียบได้ว่าเป็นลักษณะของฉนวน จึงทำให้ไม่มีการไหลของประจุผ่านชั้นCdS การเปลี่ยนแปลงของประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ที่บริเวณรอยต่อกับCdS จะมีลักษณะที่เกิดขึ้นตามการไบแอสดังนี้



รูปที่ 5.16 ภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเมื่อไม่แสดงการโค้งของแถบพลังงาน

เมื่อมีการไบแอสด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าลบทางด้านเกท(ขั้วทองทางด้านชั้นของ ZnO) หรือเป็นการทำไบแอสตรง และเสมือนเป็นการใส่ประจุให้แก่ ZnO ทำให้ด้านบนของแถบวาเลนซ์ของ $CuInSe_2$ โค้งขึ้นเข้าใกล้ แถบพลังงานเฟอร์มิ การโค้งของแถบพลังงานนี้เนื่องมาจากมีการรวมตัวกันของพาหะข้างมากโฮลของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่มีจำนวนเท่ากับจำนวนประจุที่ทำการไบแอสมารวมกันอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อกับชั้นของ CdS ขบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าขบวนการแอคคิวมูเลชั่น เมื่อทำการไบแอสด้วยค่าโวลเตจบวกเข้าทางด้านเกท หรือเป็นการไบแอสกลับ แถบพลังงานวาเลนซ์จะโค้งลงเนื่องจากพาหะข้างมากโฮลของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ถูกผลักออกไป เรียกขบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า ดีพลีชั่น

ในขบวนการที่เกิดการแอคคิวมูเลชั่นของโฮล ที่มีการรวมตัวกันของพาหะและขณะนี้ยังไม่เกิดช่วงดีพลีชั่นขึ้น ดังนั้นค่าของความจุที่เกิดจากชั้นดีพลีชั่นในสารกึ่งตัวนำ C_s จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นค่าความจุรวม C จากสมการที่ (5.3) จึงมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ ค่าความจุที่เกิดจากชั้นฉนวนC_i ซึ่งเป็นค่าความจุมากที่สุด เมื่อมีการไบแอสกลับให้เกิดขบวนการที่เกิดการดีพลีชั่นค่าความจุรวมจะมีค่าลดลงตามค่าไบแอสที่กลับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องจากการที่พาหะถูกผลักออกไป ทำให้ความกว้างของช่วงดีพลีชั่นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.17 ภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงานขณะที่ได้รับการไบแอสต่าง ๆ