



บทที่ 7

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

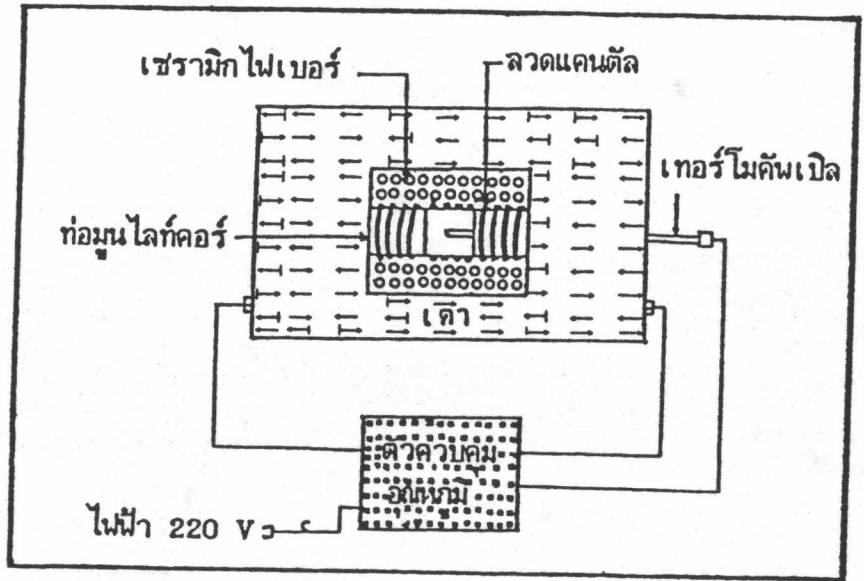
ผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นตามสโตยคิโอเมตตรี และที่เพิ่มปริมาณธาตุ Cu หรือ In หรือ Se อย่างใดอย่างหนึ่งจากสโตยคิโอเมตตรีเล็กน้อย เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้เราเตรียมแบบไดเรกชันแนล ฟริ่งชิง โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ ด้วยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเตาแบบอัตโนมัติ โดยการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังกลศาสตร์ที่ต่อพ่วงเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิเตา ต่อจากนั้นจะนำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์ว ในขั้นสุดท้ายจะเป็นการศึกษาสมบัติรอยต่อแบบ MIS ของ CuInSe_2 เมื่อใช้โลหะเหลว In-Ga หรือ In-Hg หรือ Ga อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นชั้นโลหะ ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบของโกดัก (negative photoresist) ผสมทินเนอร์ในอัตราส่วนผสม 1 : 20 เคลือบเป็นฉนวนชั้นบาง ๆ บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และใช้กาวนำไฟฟ้า (silver paint) ทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แล้วจึงนำอุปกรณ์ MIS นี้ มาวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V measurement) ที่อุณหภูมิห้อง โดยการใช้อุณหภูมิสูงคงที่เท่ากับ 1 MHz และใช้สารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นที่ถูกโด๊ปด้วย Si ซึ่งมีค่าความหนาแน่นพาหะเท่ากับ $3.2 \times 10^{18} - 4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $0.0019 - 0.0010 \Omega\text{-cm}$. และมีค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนเท่ากับ $1041 - 1326 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ เป็นแผ่นสารสำหรับสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือ และวิธีการทดลอง

จากผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิห้องนี้ทำให้ทราบค่า ชนิดของพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำ ค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณโกลี ๆ ผิวยรอยต่อ (net carrier concentration) ขนาดของช่วงดัดลิชั้นมากที่สุด (maximum depletion width), ค่าความจุของรอยต่อแบบฉับพลัน (abrupt junction capacitance), ค่าความจุของฉนวน (insulator capacitance), ค่าความจุของชั้นกลับกลาย (inversion layer capacitance) หรือค่าความจุของช่วงดัดลิชั้น เมื่อขนาดของช่วงดัดลิชั้นมากที่สุด (depletion layer capacitance at maximum depletion width), ค่าความจุขณะที่ไม่มีการไบอัสแก่รอยต่อ (flatband capacitance), ค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง (flatband voltage) ที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ ค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน หรือของโฮล (mobility) เป็นต้น ส่วนรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองจะได้กล่าวในหัวข้อต่าง ๆ ของบทนี้ประกอบกับ ในตอนท้ายของแต่ละหัวข้อจะแสดงผลการทดลองประกอบไว้ด้วย

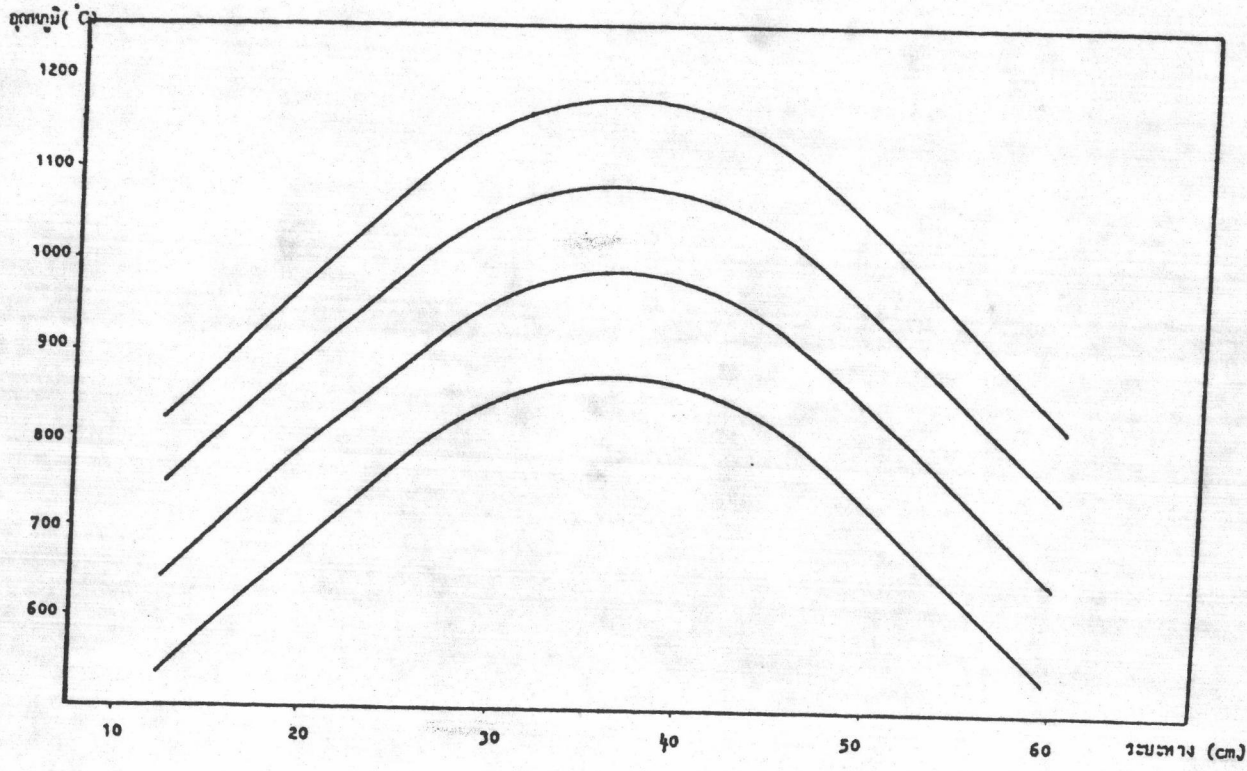
7.1 การเตรียมผลึก

7.1.1 ส่วนประกอบของระบบเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ

เตาที่ใช้ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 เป็นเตาโซนเดี่ยว (single zone furnace) ยาวประมาณ 75 cm. ถูกปรับให้ตั้งเฉียง 5 องศา กับแนวราบคงที่ โดยมีค่าเกรเดียนท์อุณหภูมิเตา (temperature gradient) ประมาณ $20^\circ\text{C}/\text{cm}$. ซึ่งสร้างขึ้นเองที่ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วยท่อมูนไลท์คอร์ (moonlite core) ยาว 75 cm. พื้นด้านนอกของท่อด้วยลวดแคนดัล (Kantal wire) ที่มีความต้านทาน $0.42 \Omega/\text{cm}$. แต่ละรอบห่างกันสามมิลลิเมตร เหลือปลายท่อที่ไม่ได้พันลวดไว้ด้านละประมาณ 5 cm. ใช้เข็มขัดชนิดทนความร้อนรัดปลายขดลวดทั้งสองข้างของท่อให้แน่น เมื่อล้างให้สะอาด แล้วจึงฉาบด้วยซิเมนต์ทนความร้อน ซิเมนต์นี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเนื่องมาจากลวดแตะกัน ขณะที่ลวดร้อนและขยายตัวเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เสร็จแล้วทดสอบโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าค่าประมาณ 2 A ผ่าน ทิ้งไว้ประมาณครึ่งวัน ตรวจสอบดูว่าเกิดรอยแตกของซิเมนต์ที่ฉาบไว้หรือไม่ ถ้ามีแสดงว่าฉาบซิเมนต์บางเกินไป จะต้องฉาบกับอีกครึ่งหนึ่ง เมื่อแห้งแล้วจึงนำลงบรรจุในกล่องอลูมิเนียมขนาด $75 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. โดยมีเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) เป็นฉนวนความร้อน บรรจุในช่องว่างระหว่างท่อกับผนังกล่องอลูมิเนียมอัดแน่น ด้านหัวและท้ายของกล่องอลูมิเนียมจะใส่แผ่นแอสเบสตอส (Asbestos) ที่เจาะรูตรงกลางขนาดให้พอดีที่ปลายท่อจะโผล่ออกมาได้ เจาะรูเล็ก ๆ หนึ่งแผ่นแอสเบสตอส เพื่อสอดปลายลวดแคนดัล ซึ่งร้อยด้วยลวดทนความร้อนออกมาจากข้างในของเตาเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า และต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างเข้ากับระบบไฟฟ้า 220 V โดยในวงจรมีระบบควบคุมและตั้งอุณหภูมิโดยอาศัยแวนิแอค (variac) เพื่อเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดในเตาตามต้องการ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ตามที่ได้อัปเดตไว้ ก็จะหยุดจ่ายกระแส และเมื่ออุณหภูมิภายในเตาลดลงจากค่าที่อัปเดตไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิก็จะจ่ายกระแสให้กับเส้นลวดอีก เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ตามที่อัปเดตไว้ตลอดเวลา โดยเราจะอ่านค่าอุณหภูมิของเตาผ่านทางเทอร์โมคัปเปิลชนิดแพลทตินัม-แพลทตินัม 25% อลูมิเนียม (Platinum-Platinum 25% Aluminium) ที่ต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยการสอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปตามแนวยาวของท่อให้ปลายอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวท่อเตา แผนผังแบบของเตาหลอมและกราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาได้แสดงอยู่ในรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2 ตามลำดับ

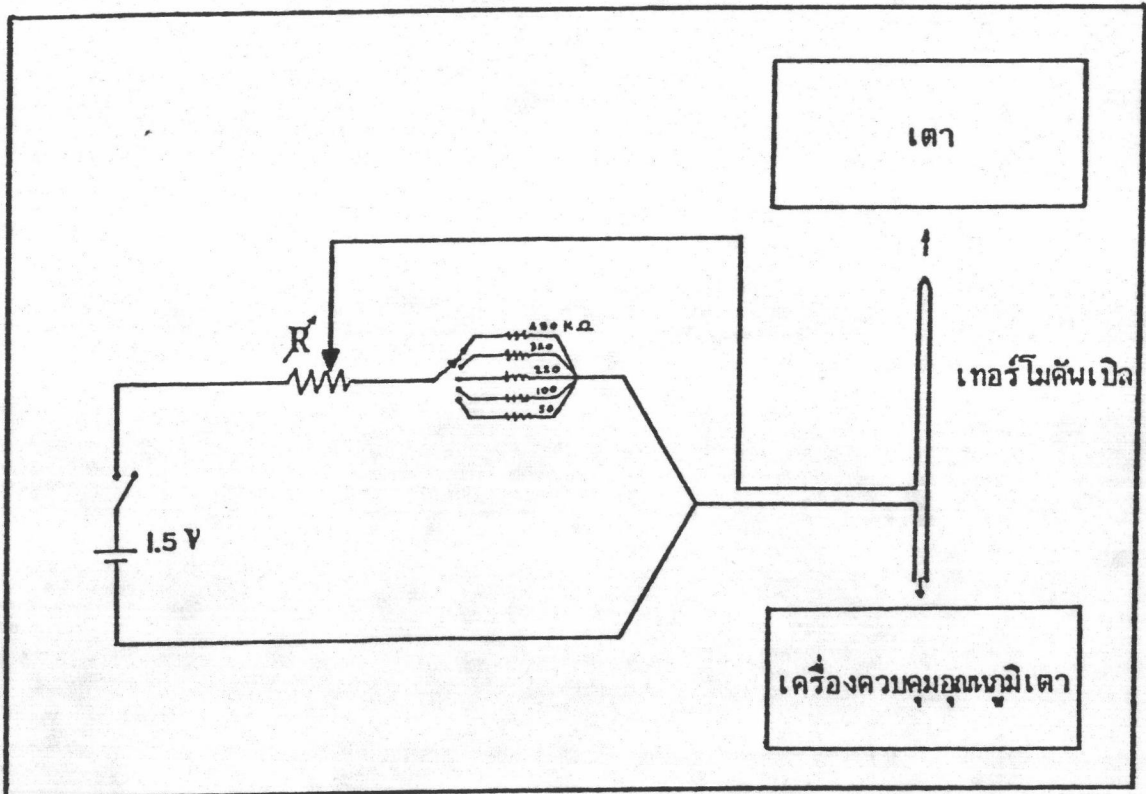


รูปที่ 7.1 ส่วนประกอบของระบบเตาหลอม โชน์เดี่ยวนพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 7.2 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโดยตั้งอุณหภูมิมกลางเตาให้เป็น 1200 °C, 1100 °C, 1050 °C และ 880 °C ตามลำดับ

ส่วนสำคัญอีกอย่างก็คือ วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ต่อวงจรเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้แก่เตาโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7.3

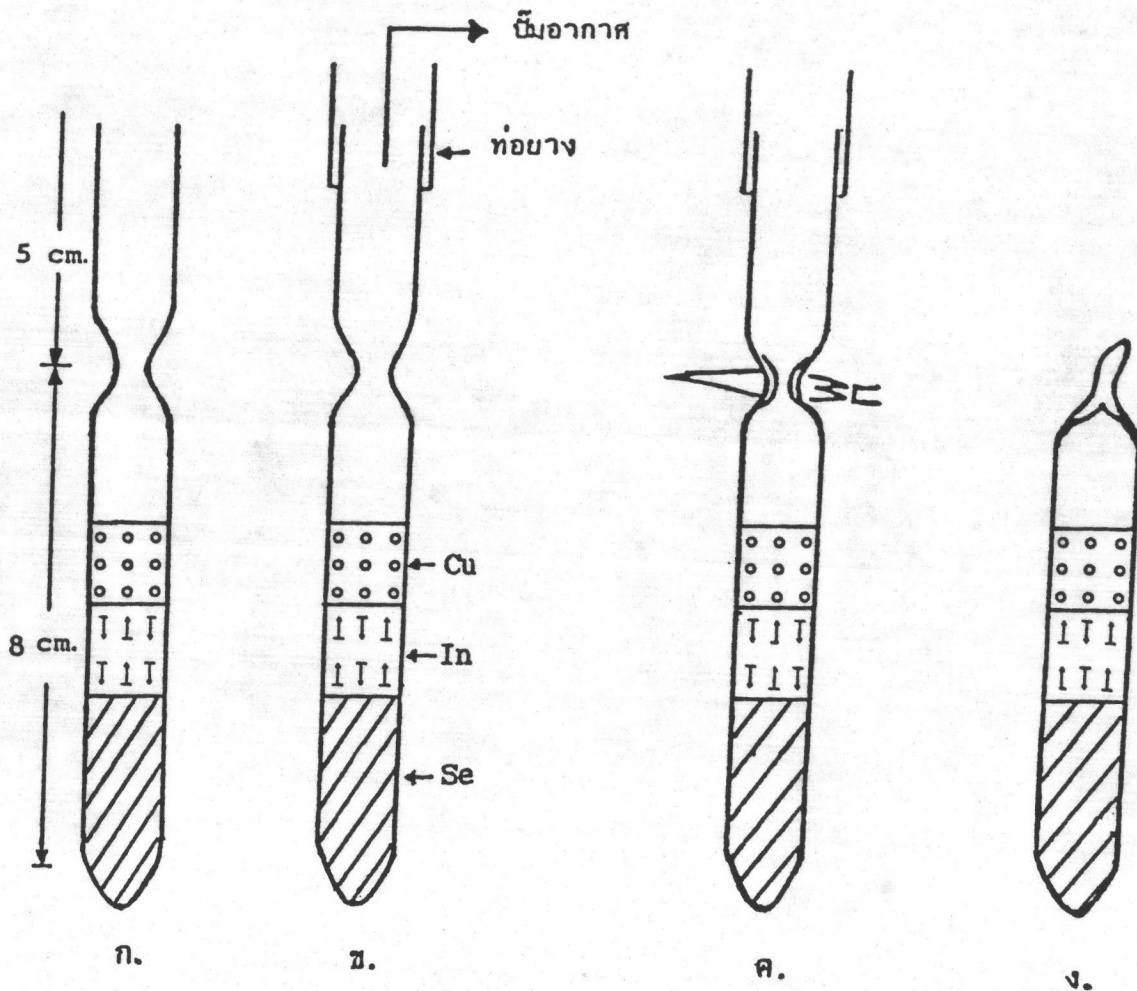


รูปที่ 7.3 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์เพื่อควบคุมอัตราการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิของเตา

การเปลี่ยนค่าความต้านทาน R ด้วยการขยับเคลื่อนของมอเตอร์รอบซ้ำ วงจรไฟฟ้าจะป้อนความต่างศักย์ให้กับเทอร์มิสเตอร์ชนิด แพลทตินัม-แพลทตินัม 25% อลูมิเนียม อย่างซ้ำ ๆ เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะปล่อยกระแส เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่อ่านได้จากความต่างศักย์ที่เทอร์มิสเตอร์จะเป็นผลทำให้อุณหภูมิของเตาลดลงประมาณ 28°C ต่อวัน หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 226°C ต่อวัน

7.1.2 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร

ภาชนะที่ใช้เตรียมสารในการทดลองครั้งนี้จะต้องทนอุณหภูมิได้สูง ดังนั้นเราจึงเลือกใช้หลอดแก้วควอทซ์ซึ่งมีค่าอุณหภูมิที่หลอดเริ่มหลอมเหลว (softening point) เท่ากับ 1583°C และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 10 mm. มีความยาวประมาณ 20 cm. มาทำความสะอาด โดยเริ่มต้นด้วยการล้างอะซิโตน (acetone) และเมททานอล (methanol) อย่างละ 3 ครั้ง ตามลำดับ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จนสะอาดจึงนำเข้าตู้อบเพื่ออบให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปปิดผนึกปลายหลอดด้านหนึ่ง ให้เป็นรูปกรวยมีมุมกรวยประมาณ 30 องศา ด้วยเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้สูงกว่า 1300°C ต่อจากนั้นทำคอคอด โดยให้ห่างจากด้านปลายปิดประมาณ 8 cm. เพื่อให้ง่ายต่อการหลอมปิดหลอด (seal) เนื้อแก้วควอทซ์ตรงคอคอดควรจะหนาพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงการร้าวของหลอดในขณะที่กำลังหลอมปิด และยังทำให้หลอด มีความแข็งแรงทนต่อบรรยากาศของแก๊ส ในขณะที่หลอมสารตัวอย่างด้วย เช่นเดียวกับความหนาของเนื้อแก้วควอทซ์ตรงปลายแหลมรูปกรวย ดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 แสดงขั้นตอนการปิดหลอดแก้วก่อนนำไปบรรจุสาร

7.1.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์ก่อนนำไปบรรจุธาตุ

หลอดแก้วควอทซ์ ที่จะนำไปบรรจุธาตุควรสะอาดมากที่สุด เพื่อขจัดสิ่งเจือปนเบื้องต้นที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และ เพื่อสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ จะไม่ติดกับผนังหลอดแก้วควอทซ์อื่นทำให้สารกึ่งตัวนำ แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขณะทบทูลอดแตก ยากต่อการที่จะนำไปตัดเป็นชิ้นบาง ๆ ที่มีขนาดใหญ่พอจะนำไปศึกษาในขั้นต่อไปได้ การทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์มีมากมายหลายวิธี วิธีทำความสะอาดด้วยสารละลายเคมี จะเป็นวิธีที่เราเลือกใช้ แต่ข้อควรระวัง คือสารละลายเคมีที่ใช้ในการล้างหลอดนี้เป็นอันตราย ผู้ใช้ต้องสวมถุงมือ สวมหน้ากากป้องกันไอพิษ และอากาศควรถ่ายเทได้สะดวก ซึ่งสถานที่ที่เหมาะสมคือในตู้ควันที่ใช้สำหรับดูดไอพิษทิ้ง (fume hood) เราสามารถทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ล้างหลอดแก้วควอทซ์ที่จัดเตรียมไว้ด้วยน้ำกลั่น หลาย ๆ ครั้ง เพื่อขจัดฝุ่นละออง สิ่งสกปรกออกให้หมด
2. เทอะซีโตนลงไปจนเกือบเต็มหลอด แช่ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที แล้วรินออกเล็กน้อย เขย่าหลอดสักครู่จึงค่อย ๆ รินอะซีโตนออกอีกเล็กน้อย เติมนเมทานอลเข้าไปแทนที่จนมีปริมาตรเท่าเดิม เขย่าหลอดแล้วจึงรินเอาอะซีโตนที่เจือจางออกเล็กน้อย เติมนเมทานอลเข้าไปแทนที่อีก กระทำซ้ำแบบเดิมประมาณ 10 ครั้ง จนกระทั่งรินอะซีโตนทั้งหมด
3. เติมนอะควา-รีเจีย (Aqua-Regia) เจือจางเข้าไปจนเต็มหลอดทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน (Aqua-Regia ประกอบด้วย $\text{HCl} : \text{HNO}_3$ ด้วยอัตราส่วน 3 : 1 โดยปริมาตร) เขย่าหลอดสักครู่ รินออกเล็กน้อย แล้วเติมน้ำกลั่นเข้าไปแทนที่จนมีปริมาตรเท่าเดิม เขย่าหลอดสักครู่ รินออกเล็กน้อยเติมน้ำกลั่นเข้าไปแทนที่จนมีปริมาตรเท่าเดิมอีก กระทำซ้ำแบบเดิมประมาณ 10 ครั้ง จึงรินอะควา-รีเจียเจือจางนี้ออกจนหมด
4. ใส่สารละลายกรดเจือจางของ $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) ลงไปจนเต็มหลอด แช่ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที รินออกเล็กน้อย เขย่าหลอดสักครู่ รินออกอีกเล็กน้อย เติมน้ำกลั่นเข้าไปแทนที่จนมีปริมาตรเท่าเดิม เขย่าหลอดสักครู่ รินออกเล็กน้อย เติมน้ำกลั่นเข้าไปแทนที่กระทำซ้ำแบบเดิมประมาณ 10 ครั้ง แล้วจึงรินสารละลายกรดเจือจางออกทั้งหมด
5. ล้างหลอดแก้วควอทซ์ที่เตรียมเสร็จจนครบขั้นตอนทั้ง 4 ด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water) อีกหลาย ๆ ครั้งจนแน่ใจว่าไม่มีกรดหลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถทดสอบด้วยกระดาษทดสอบ pH. ถ้ายังมีกรดหลงเหลืออยู่ให้แช่หลอดแก้วควอทซ์ลงในน้ำดีไอออไนซ์ประมาณ 1 วัน แล้วล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์อีกหลาย ๆ ครั้ง ทดสอบด้วยกระดาษทดสอบ pH. อีกที่

6. เมื่อหลอดแก้วควอทซ์สะอาดดีแล้ว เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อาจใช้เครื่องเป่าลมช่วยเพื่อให้แห้งเร็วขึ้นก็ได้ หรืออาจนำไปอบให้แห้งสนิทด้วยเตาอบอุณหภูมิประมาณ 70°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
7. หุ้มหลอดด้วยฟอยล์ (foil) เพื่อป้องกันฝุ่นละอองก่อนที่จะบรรจุธาตุลงไป

สำหรับกรณีที่เกิดฟองอากาศชั้นที่ผิวของหลอดแก้วควอทซ์ ขณะหลอมสารนั้นสามารถทำให้ลดน้อยลง ได้โดยการเผาหลอดเปล่าที่ค่าอุณหภูมิสูง ๆ ประมาณ 1000°C ในสุญญากาศ แล้วจึงหุ้มหลอดด้วยฟอยล์ เมื่อหลอดเย็นลง พร้อมทั้งจะนำไปบรรจุธาตุต่อไป

7.1.3 การชั่งและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์

ก่อนอื่นควรมีการสอบเทียบมาตรฐานของเครื่องชั่ง โดยใช้ตุ้มน้ำหนักที่เราทราบค่าอยู่แล้ว ต่อจากนั้นจึงนำธาตุ Cu, In, Se ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่คำนวณเอาไว้ ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่งของกรัม ควรบรรจุธาตุ Se ลงไปในก้นหลอดก่อนแล้วจึงตามด้วยประจุ In และธาตุ Cu ตามลำดับ เพื่อให้ธาตุ Se และธาตุ In อยู่ห่างจากคอคอด เนื่องจากธาตุ Se มีจุดเดือดต่ำ จึงระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ขณะหลอมปิดคอคอด ด้วยไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน เมื่อใส่ธาตุต่าง ๆ ครบแล้ว ควรเหลือที่ว่างเหนือธาตุเหล่านี้ไว้ประมาณ 2 cm. เพื่อเติมที่ว่างของธาตุที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว ซึ่งจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำที่แผ่ขยายผิวหน้า (free-surface) เพิ่มขึ้นตามที่ต้องการ

รายละเอียดและสมบัติของธาตุที่จัดหามาเพื่อเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จำนวน 15 กรัมที่มีสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริ แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1

ธาตุ	ความบริสุทธิ์ (%)	น้ำหนักอะตอม	น้ำหนักธาตุ (g)	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	ลักษณะของธาตุ
Cu	99.999	63.546	7.0440	1083	2567	เป็นก้อนโลหะแข็งเหนียว เป็นมันวาว
In	99.999	114.82	2.8345	156.4	2050	โลหะอ่อนเป็นก้อนสีบรอนซ์
Se	99.9999	78.96	5.1215	217	688	เป็นก้อนเล็กๆ สีน้ำตาลดำ

ตารางที่ 7.1 แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ และนารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การหลอมสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จำนวน 15 กรัมที่มีสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริ

รายละเอียดแสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จำนวน 15 กรัมที่มีสัดส่วนของธาตุ Cu, In, Se อย่างใดอย่างหนึ่ง ตามสตอยคิโอเมตริ และมากกว่าสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริ 0.3% ตามลำดับ

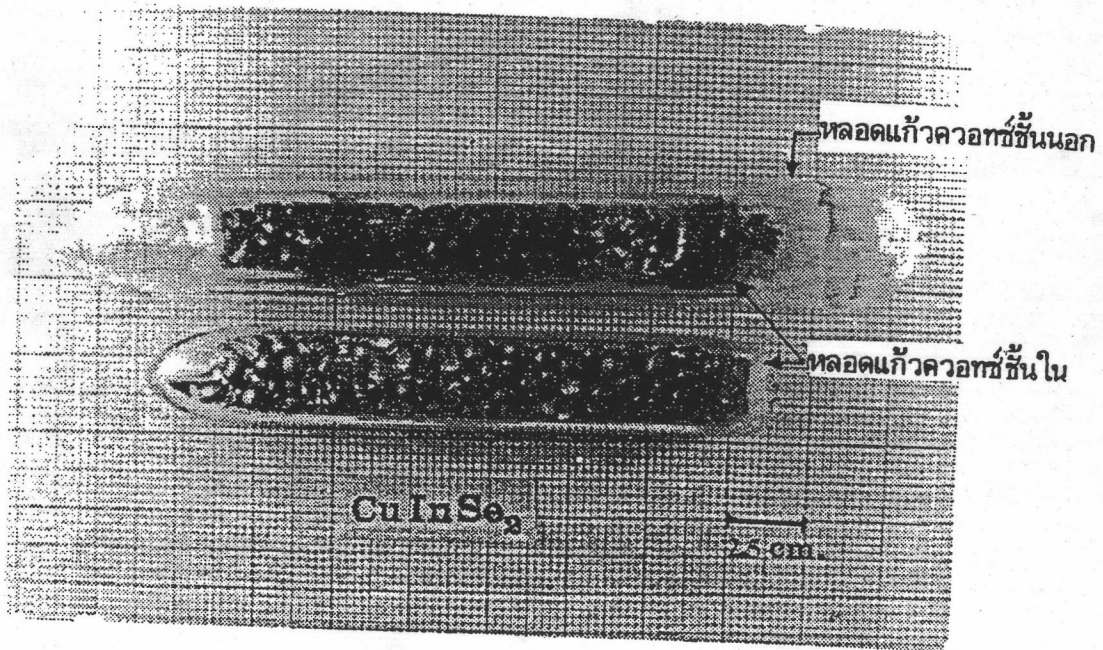
หมายเลข สารตัวอย่าง	สารประกอบที่ต้องการเตรียม	น้ำหนักธาตุ (g.)			น้ำหนักรวม (g)
		Cu	In	Se	
#T1	CuInSe_2	7.0440	2.8345	5.1215	15.0000
#T2	CuInSe_2	7.0440	2.8345	5.1215	15.0000
#T3	CuInSe_2 (In 0.3%)	7.0440	2.8795	5.1215	15.0450
#T4	CuInSe_2 (Se 0.3%)	7.0440	2.8345	5.1665	15.0450
#T5	CuInSe_2 (Se 0.3%)	7.0440	2.8345	5.1665	15.0450
#T6	CuInSe_2 (Cu 0.3%)	7.0890	2.8345	5.1215	15.0450

ตารางที่ 7.2 แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จำนวน 15 กรัม ที่มีสัดส่วนของธาตุ Cu, In, Se อย่างใดอย่างหนึ่งตามสตอยคิโอเมตริ และมากกว่าสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตริ 0.3% ตามลำดับ

7.1.3.1 การหลอมปิดแก้วควอทซ์

ทาบบริเวณด้านนอกของปากหลอดแก้วควอทซ์ ที่บรรจุธาตุเรียบร้อยแล้วด้วยกรีส ที่ใช้กับระบบสุญญากาศ (vacuum grease) แล้วนำมาเสียบเข้ากับท่อของเครื่องโรตารี-ดิฟฟิวชันปั๊ม (rotary-diffusion pump) เพื่อทำการดูดอากาศภายในหลอดออกให้เหลือน้อยที่สุด กล่าวคือถ้าเป็นไปได้ เราจะไม่ต้องการให้น้ำภายในหลอดมีอากาศเหลืออยู่เลย เพื่อป้องกันไม่ให้ธาตุแต่ละตัว หรือสารประกอบที่เตรียมได้ทำปฏิกิริยากับอากาศภายในหลอดขณะกำลังหลอมที่ค่าอุณหภูมิสูง ๆ อีกทั้งยังช่วยป้องกันหลอดระเบิดอันเกิดเนื่องจากความดันไอที่มีมากเกินไปขณะที่สารกำลังหลอมด้วย เครื่องปั๊มนี้สามารถทำให้ความดันภายในหลอดลดต่ำลงถึง 3×10^{-5} torr (1 torr เท่ากับ 1 mm. ของปรอท) ซึ่งเราสามารถอ่านได้จากไอออไนเซชันเกจ (ionization gauge) ที่ต่อเข้ากับระบบของเครื่องโรตารี-ดิฟฟิวชันปั๊ม เมื่อได้ค่าความดันตามต้องการควรปล่อยระบบไว้เช่นนี้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อให้แก๊ส (gas) ที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิว (adsorbed) ของธาตุถูกดูดออกไปมากที่สุด แล้วจึงหลอมปิดคอคอดโดยใช้ไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน โดยค่อย ๆ ลนรอบ ๆ บริเวณคอคอดที่ทำไว้แล้วให้เนื้อแก้วควอทซ์

ละลายอย่างช้าๆ จนกระทั่งหลอมติดเป็นเนื้อเดียวกันสนิท ไม่มีรูรั่วและนพายามทำให้เนื้อแก้วควอทซ์ตรงส่วนนั้นหนาพอสมควร เพื่อป้องกันหลอดทะเลอันจะเกิดเนื่องจากความดันไอค่าสูงมากๆ ขณะหลอมสารกัมมันตภาพรังสี เราจะได้สังเกตเห็นรูรั่วได้ชัดเจน และความดันภายในหลอดที่อ่านได้จากไฮดรอนิเมตริกเกจจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องนำธาตุออกมาบรรจุในหลอดใหม่ แล้วจึงดำเนินการตามขั้นตอนตั้งแต่เริ่มแรกใหม่นอกจากนี้ ขณะหลอมปิดหลอด เราไม่ควร ปิดระบบของเครื่องโรตารี-ดิฟิวชันปั๊ม มิฉะนั้น ขณะหลอมปิดหลอด อากาศหรือแก๊สที่ถูกดูดซับไว้ในผิวท่ออาจจะระเหยไหลกลับเข้าไปในหลอดสารขณะที่ท่ออาจได้รับความร้อน ความดันภายในหลอด ที่อ่านได้จากไฮดรอนิเมตริกเกจ จะเพิ่มขึ้น การเปิดระบบของเครื่องโรตารี-ดิฟิวชันปั๊มทิ้งไว้ขณะหลอมปิดหลอด แก๊สที่เหลือค้างอยู่ในท่ออาจจะถูกดูดออกไปหมด จึงไม่มีผลทำให้ ความดันภายในหลอดสารเปลี่ยนแปลงไปจากที่ต้องการมากนัก หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุเรียบร้อยแล้วนี้ อาจแตกได้ง่ายขณะที่กำลังหลอมที่อุณหภูมิสูง หรือขณะที่กำลังลดอุณหภูมิให้ต่ำลง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอก เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่เตรียมได้ ในกรณีที่หลอดแตกหรือมีรอยร้าว เราจึงนำหลอดนี้ มาบรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งล้างให้สะอาด และหลอมปิดปลายด้านหนึ่งเรียบร้อยแล้วหลังจากการนำปาลไฟเพื่อทำการคอคอดตามวิธีการเดียวกับหลอดเล็กแล้ว ให้อุณหภูมิอากาศออก จนกระทั่งความดันภายในหลอดลดต่ำลงถึง 1.5×10^{-5} torr จึงทำการหลอมปิดคอคอด ด้วยการทำดังกล่าว เราจะได้หลอดแก้วควอทซ์สองชิ้นดังรูป 7.5 โดยหลอดชั้นในมีธาตุบรรจุอยู่ บันทึกหมายเลขกำกับไว้ให้หมดก่อนที่จะนำไปทำการหลอม เพื่อจะได้ทราบอย่างถูกต้องว่าหลอด ไทเทเนียมประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ปริมาณเท่าใดบ้าง ซึ่งขั้นตอนต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการหลอมสารเพื่อเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากสภาวะหลอมเหลวแบบไดเรกชันนัล ฟริชชิงด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ



รูปที่ 7.5 แสดงหลอดแก้วควอทซ์สองชิ้นที่บรรจุธาตุ Cu, In และ Se

7.1.4 ขั้นตอนและรายละเอียดในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตา ในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ

นำเอาหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุสารไว้ภายในเรียบร้อยแล้ว วางตรงกลางเตา คือ ตรงตำแหน่งที่ 37.50 cm. ภายในเตา (ดูจากเครื่องหมายที่ทำไว้บนแท่งเซรามิก ที่ยาวประมาณ 90 cm. ที่ใช้เลื่อนหลอดสารเข้าไปในเตา) ที่ตั้งเฉียง 5 องศา กับแนวราบคงที่อยู่แล้ว อดปลายท่อมูนไลต์คอร์ทั้งสองด้านด้วยอิฐทนไฟ เพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเตาซึ่งเย็นกว่าไหลผ่านเข้าไปในเตา อันเป็นเหตุให้อุณหภูมิเตาไม่คงที่ตามที่ตั้งไว้ และป้องกันไม่ให้หลอดแก้วควอทซ์ หลุดออกมาจากเตาในกรณีที่เกิดหลอดแก้วควอทซ์ระเบิดแตก จากนั้น นำเทอร์โมคัปเปิล ชนิดแพลทตินัม-แพลทตินัม 25% อลูมิเนียมอีกอันหนึ่ง เสียบจากปลายข้างหนึ่งของท่อมูนไลต์คอร์ เข้าไปยังตำแหน่งกลางเตา โดยให้แตะกับพื้นผิวท่อเตานี้ด้วย เพื่อวัดค่าอุณหภูมิตรงตำแหน่งกลางเตา สอบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่เราตั้งไว้โดยอาศัยวาเรียนด ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิที่มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของหลอดสาร ตรงตำแหน่งนี้ที่สุด หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เติมอุณหภูมิให้กับเตาอย่างช้า ๆ ในอัตราที่เหมาะสม โดยตั้งอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้น 50°C ทุก ๆ ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่เตรียม จนถึงค่าอุณหภูมิ 200°C จะใช้วงจรวัดไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ ที่ต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ ค่อย ๆ เติมอุณหภูมิอย่างอัตโนมัติด้วยอัตราเท่ากับ 226°C ต่อวัน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างธาตุ In กับธาตุ Se เกิดขึ้นช้า ๆ และเพื่อป้องกันหลอดระเบิดแตกอันเกิดเนื่องมาจากความดันไอภายในหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุต่าง ๆ สูงมากเกินไป ต่อจากนั้น จึงเติมอุณหภูมิด้วยอัตรา 50°C/hr. จนถึง 1150°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวสูงสุดของธาตุที่ใช้เตรียมประมาณ 100°C และปล่อยให้ธาตุต่าง ๆ หลอมเหลวเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยทิ้งไว้อย่างน้อย 14 ชั่วโมง ในระหว่างนี้ ต้องหมุนหลอดบรรจุสารด้วยแท่งเซรามิก ยาวประมาณ 90 cm. เชี่ยวให้หลอดกลิ้งไปมาเป็นระยะ ๆ ห่างกันประมาณทุก 3 ชั่วโมง เพื่อให้ Cu, In, Se ในหลอดแก้วควอทซ์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยไม่ให้เกิดช่องว่างเล็กๆ (voids) ภายในเนื้อสารด้วย เพราะขณะที่หมุนหลอดแก้วควอทซ์ไป ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ใ้ในสภาวะหลอมเหลวภายในหลอดจะไหลกลิ้งตามไปด้วย การหมุนเราจะหมุนหลอดแก้วควอทซ์ไปในทิศทาง เข็มนาฬิกาและตาม เข็มนาฬิกาสลับกันไปมาเพื่อไม่ให้หลอดแก้วควอทซ์สองชั้นนั้น เลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม เมื่อหลอมสารเป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จึงเลื่อนหลอดแก้วควอทซ์อย่างช้า ๆ ด้วยแท่งเซรามิก ไปอยู่ที่ตำแหน่งระหว่าง 23-31 cm. (ดังรูปที่ 7.2) ซึ่งคือบริเวณที่ใกล้เกรเดียนต์อุณหภูมิเตา (18°C/cm.) มากที่สุดแต่ต้องไม่ถึงจุดหลอมเหลวของสารประกอบ CuInSe_2 (เท่ากับ 986°C) จะเห็นได้ชัดว่า Cu, In และ Se ยังหลอมเหลวอยู่ เนื่องจากสารประกอบ CuInSe_2 จะเปลี่ยนจากสภาวะของเหลวเป็นของแข็งที่ค่าอุณหภูมิ 986°C เพื่อประหยัดเวลาในการปฏิบัติงาน จึงเริ่มลดอุณหภูมิของเตาลง ด้วยวงจรวัดไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ ด้วยอัตราเร็วประมาณ 28°C เกรเดียนต์ของอุณหภูมิเตามีค่าประมาณ 18°C/cm. จะค่อย ๆ ผ่าน

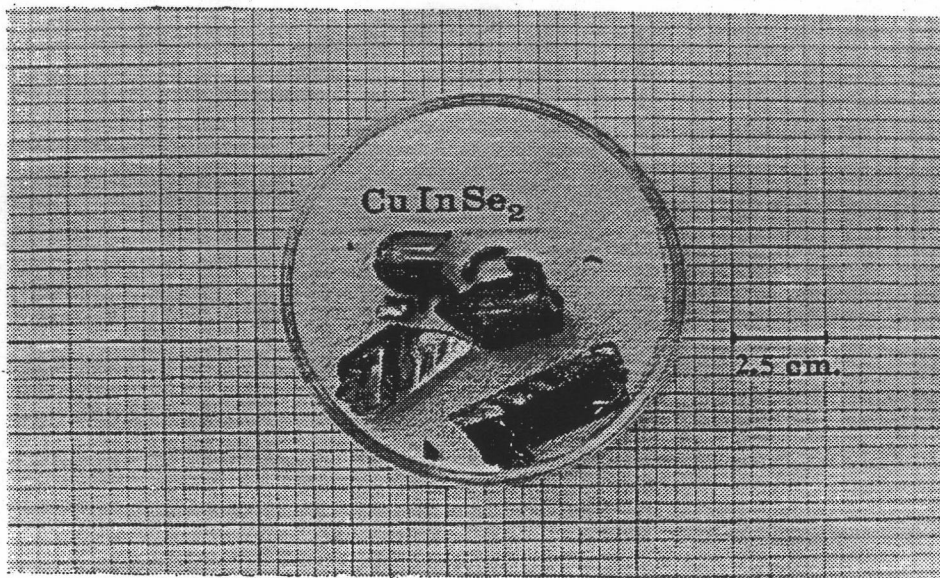
Cu, In และ Se ที่กำลังหลอมเหลว จะทำให้สารที่กำลังหลอมเหลวนี้เย็นลงช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอ จนเป็นของแข็ง จากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งด้วยอัตราเร็วประมาณ 1.6 cm. ต่อวัน จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิ 900 °C จึงทำการแอนเนล (ซึ่งตามปรกติแล้วค่าอุณหภูมินี้ควรต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของสารประกอบที่เตรียมได้ประมาณ 50 °C) ด้วยการเลื่อนหลอดแก้วควอทซ์ บรรจุสารไปตรงกลางเตา คือ ตำแหน่งที่ 37.5 cm. ด้วยแท่งเซรามิก แล้วปล่อยให้เย็นที่ค่าอุณหภูมินี้เป็นระยะเวลา 1 วัน ต่อจากนั้นจึงเริ่มลดอุณหภูมิเตาลงด้วยวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ ด้วยอัตราเร็วประมาณ 28 °C เช่นเดิม ขณะที่ทำการแอนเนลนี้จะต่อมต่าง ๆ ในผลึกจะเรียงตัว เป็นระเบียบอยู่ในตำแหน่งถูกต้องมากขึ้น จนกระทั่งถึงสถานะสมดุล ใช้เวลาทั้งหมดอีกประมาณ 2 สัปดาห์ อุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ จะต่ำกว่า 600 °C อันเป็นค่าอุณหภูมิที่ผลึก มีลักษณะโครงสร้างแบบเทตระโกนอลซาลโคไพไรท์แน่นอน (จากเฟสไดอะแกรมเราพบว่า ที่ค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C ผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จะมีลักษณะโครงสร้างแบบเทตระโกนอลซาลโคไพไรท์แน่นอน จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ที่อุณหภูมิประมาณหนึ่งวันจึงนำหลอดสาร ออกมาจากเตา ดังนั้นจะใช้เวลาในการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แต่ละชุดประมาณ 20 วัน สิ่งเกิดลักษณะหลอดและสารที่เตรียมได้ ในกรณีที่หลอดแตก ถ้าสารใดมีสีน้ำตาลคล้ำ ก็แสดงว่า สารนั้นไม่ใช่สารที่ต้องการเตรียม เพราะคาดว่าสารนั้น เกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนแล้ว แต่ถ้ามองลักษณะสารที่เตรียมได้ ไม่มีสีน้ำตาลคล้ำ สารนั้นยังคงใช้ได้อยู่ ให้นำไปบรรจุลงใน หลอดแก้วควอทซ์แล้วเริ่มทำการหลอมตามขบวนการที่กล่าวมาข้างต้นใหม่อีกครั้ง เมื่อนำหลอดสาร ออกมาจากเตาแล้วจึงนำหลอดแก้วควอทซ์ มาตัดด้วยเครื่องตัดแก้วควอทซ์เพื่อเอาหลอดขึ้นออกออก แล้วจึงใช้คีมเหล็กบีบหลอดขึ้นในให้แตก เพื่อนำเอาสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ไปตัด ให้เป็นชิ้นบาง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ในขั้นต่อไป ข้อสังเกตอย่างหนึ่งก็คือ ถ้าหลอดแก้วควอทซ์ สะอาด สารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะเป็นแท่ง ไม่ติดกับผิวหลอดแก้วควอทซ์และสามารถเลื่อนไปมา ภายในหลอดได้คล่อง

7.1.5 ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศาขึ้นแนวราบ

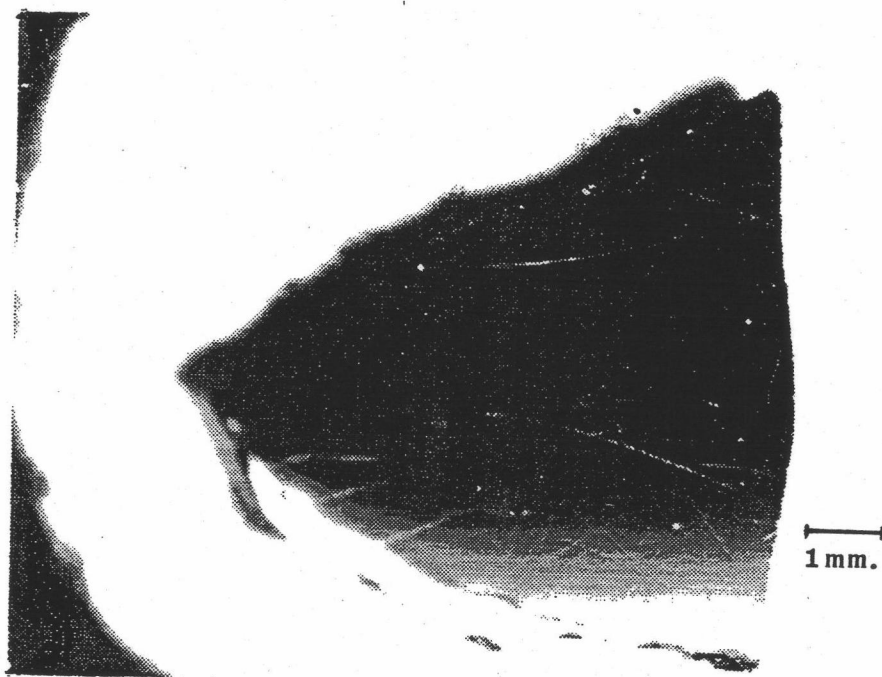
การเตรียมสารด้วยวิธีนี้ ไม่พบปัญหาเรื่อง หลอดแตกเร็วและหลอดระเบิดที่เกิด เนื่องจากความดันไอภายในหลอดแก้วควอทซ์สูงมากในช่วงอุณหภูมิ 220 °C-232 °C ดังกล่าวเลข สารตัวอย่างที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่เท่ากับ $1 \times 5 \times 0.8 \text{ cm}^3$ เป็นแท่งเกือบแบนราบ สีเทาดำ ตรงปลายหลอดรูปกรวย สารตัวอย่าง จะมีลักษณะเป็นรูปกรวยแหลมตามรูปร่างของหลอดสาร ดังรูปที่ 7.6 ผิวเนื้อสารด้านที่สัมผัสกับหลอดนี้ค่อนข้างเรียบไม่เป็นมันวาวสะท้อนแสงได้น้อย เสถียร (stable) ในสถานะปรกติ มีสมบัติแข็งแรงแต่เปราะ บดเป็นผงละเอียดได้ง่าย ขนาดของเกรนผลึกเดี่ยว (single grains) โคนอสมควรร ไม่มีส่วนใดของสารตัวอย่าง

ติดกับผิวหลอดแก้วควอทซ์เลข สสารตัวอย่างสามารถเลื่อนไปมาในหลอดแก้วได้สะดวก มีรอยแตกขนาดใหญ่ (bulk cracks) และขนาดเล็ก (microcracks) บ้างเล็กน้อยมีช่องว่างเกิดในเนื้อสารเพียงเล็กน้อย สามารถนำมาตัดใช้งานได้ในระดับขนาด $5 \times 8 \times 1 \text{ mm}^3$ ดังรูปที่ 7.7 เมื่อขัดผิวหน้าชิ้นสารที่ตัดมาใช้งานบางขึ้นด้วยกระดาษทรายละเอียด จะสามารถมองเห็นขอบของเกรน (grain boundary) ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 7.8 หรือบางครั้งอาจเห็นทวิน (twins) ด้วย ผิวหน้าเปิด (free surface) จะขยายแผ่ออกตามความยาวหลอดแก้วควอทซ์เกือบทั้งหมด มีตรงบริเวณปลายแหลมเท่านั้นที่เป็นแท่งกลม เนื่องจากเราเหลือที่ว่างภายในหลอดไว้มากพอสมควร เมื่อสารแข็งตัวเนื้อสารจึงสามารถขยายตัวได้มากขึ้น โดยที่ลักษณะผิวหน้าเปิดจะค่อนข้างเรียบ เป็นมันวาวกว่าผิวด้านที่สัมผัสกับผิวหลอดแก้วควอทซ์ มีชั้นของระนาบเล็ก ๆ ซ้อนกันให้เห็นอย่างชัดเจนกำมุ่มเงียงกับแนวราบเล็กน้อย เรียงขนานกันไปตามความยาวของแท่งสาร ดังรูปที่ 7.9

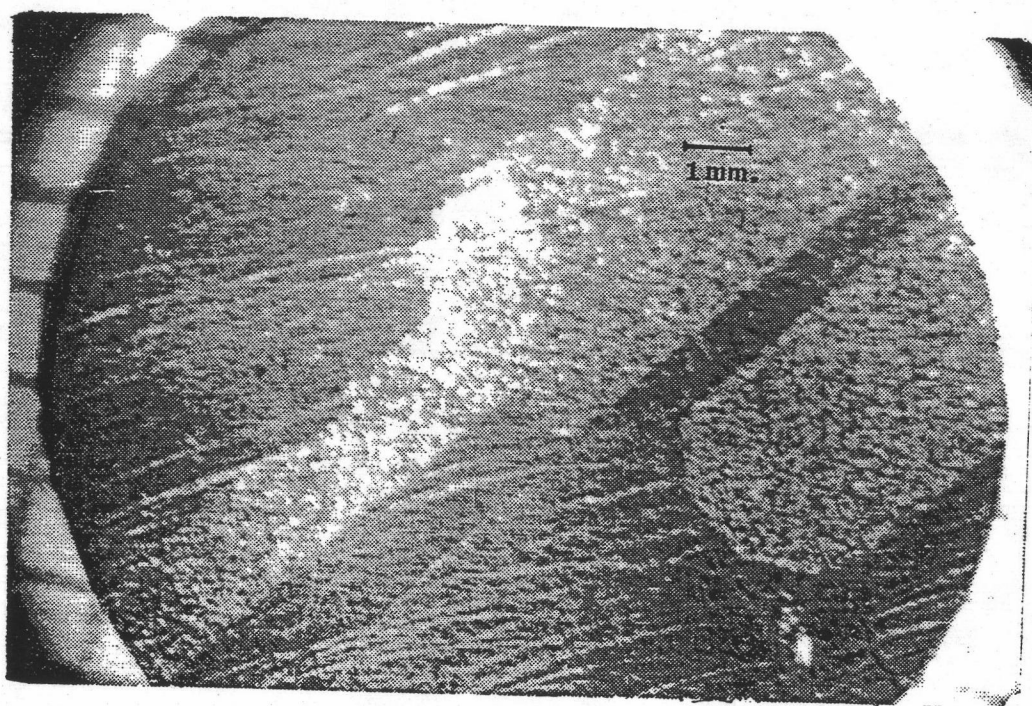
สารประกอบที่เตรียมได้ส่วนใหญ่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneities) ทั้งด้านองค์ประกอบ (composition) และชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type) ที่กล่าวเช่นนี้ เพราะจากการเตรียมสารประกอบ CuInSe_2 ด้วยวิธีนี้หลายชุด พบว่าสารตัวอย่างบางชุดมีบางส่วนไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งด้านองค์ประกอบ และการนำไฟฟ้า กล่าวคือพบว่าแท่งผลึกที่เตรียมได้บางส่วนเป็นชนิดพี (p-type) บางส่วนเป็นชนิดเอ็น (n-type) และยังพบทวินรวมทั้งรอยแตกทั้งขนาดเล็ก และใหญ่ พอสมควรในแท่งผลึกแท่งเดียวกันด้วย ซึ่งคาดว่าอาจเกิดเนื่องจาก สมบัติของผิว รูปทรงเรขาคณิตของหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้และผลกระทบจากภายนอกที่มีต่อขั้นตอนการเตรียมผลึกแต่ละชุดแตกต่างกันไป ดังนั้นแม้จะใช้วิธีการเตรียมวิธีเดียวกันก็ตาม จึงอาจมีผลทำให้เราได้ลักษณะสมบัติของผลึกแตกต่างกันไปบ้างในบางครั้ง



รูปที่ 7.6 แสดงขนาดของผลึกกิ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ



รูปที่ 7.7 แสดงชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบที่ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ แล้วขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด



รูปที่ 7.8 แสดงชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบที่ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายละเอียด ซึ่งสามารถมองเห็นขอบของเกรน (grain boundary) ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 7.9 แสดงผิวหน้าเปิด (free surface) ของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ

7.1.6 การตัดผลึกด้วยเครื่องตัดสตริงซอ (string saw)

ในการตัดผลึกด้วยเครื่องสตริงซอ เราจะพยายามตัดชิ้นผลึกมาใช้งานให้ได้ขนาดใหญ่ และตัดให้ได้ระนาบที่ขนานกับชั้นระนาบที่ซ้อนกันบนผิวหน้าเปิด (free surface) ที่สุดเพราะ คาดว่า ชั้นแผ่นสารที่ตัดได้เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์นั้นเป็นเกรนผลึกเอกพันธ์จริง ๆ

วิธีการทำคือ นำผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้วางบนแท่นไม้หกดด้วยเทียสนไซ เพื่อยึดแท่งผลึกให้ติดแน่นกับแผ่นไม้ จากนั้นจึงนำไปวางบนแท่นที่สามารถเลื่อนตำแหน่งสาร ไปในทิศทางที่ต้องการได้ เริ่มตัดผลึกเป็นชิ้นบาง ๆ หนาประมาณ 1 mm. ด้วยการใช้นวดทั้งสแตน ที่มีขนาดพอเหมาะที่ขึ้นอยู่กับลูกล้อของเครื่องสตริงซอ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้นวดทั้งสแตนที่มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.95% และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.1 mm. ฎไปมาโดยการใช้นวดซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ผสมกับน้ำมันเครื่องหกดช่วยในการตัดผลึกด้วยอัตราเร็วและปริมาณหกด

ที่เหมาะสม ซึ่งมีระบบมอเตอร์ไฟฟ้าควบคุมการปิด-เปิดวาล์วโดยอัตโนมัติ ขณะเปิดสวิตช์ให้ลวดทั้งสองเตนุไปมาบนเนื้อแท่งผลึก การตัดด้วยวิธีนี้จะสามารถตัดได้เร็วหรือช้าขึ้นกับสาเหตุ 3 ประการด้วยกันคือ

1. ความเร็วของมอเตอร์ ที่ใช้หมุนวงล้อซึ่งลวดทั้งสองเตนุ และของมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบการปิด-เปิดวาล์ว
2. ความหนืดของน้ำมัน หรือชนิดของน้ำมัน
3. ส่วนผสมของผงขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ กับน้ำมันเครื่อง

ชิ้นผลึกที่ตัดได้ เหล่านี้จะมีเทียนไข น้ำมันเครื่อง และผงซิลิกอนคาร์ไบด์ติดอยู่ จะต้องล้างออกให้หมด ตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. แช่ในทินเนอร์เดือด ประมาณ 10 นาที
2. แช่ในอะซิโตนเดือด ประมาณ 10 นาที
3. แช่ในเมทานอลเดือด ประมาณ 10 นาที
4. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water, D.I.) หลาก ๆ ครั้ง
5. ปฏิบัติซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 อีกครั้งหนึ่ง

เมื่อแผ่นชิ้นสารที่ตัดได้สะอาดดีแล้ว จึงนำมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด เพื่อให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ลดรอยขีดข่วนให้เหลือน้อยลง ซึ่งจะช่วยให้ร็อบกพร่องบริเวณผิวหน้าผลึกลดน้อยลง จากนั้นล้างแผ่นชิ้นสารด้วย อะซิโตน และน้ำดีไอออไนซ์ ตามลำดับ เพื่อล้างฝุ่นที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทรายออกจนหมดพร้อมที่จะนำชิ้นสารนี้ไปขัดมันเป็นขั้นตอนต่อไป

7.1.7 ขั้นตอนการขัดแผ่นชิ้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2

ชิ้นสารที่จะนำไปใช้ทดลองนั้น ต้องขัดให้เป็นมันวาว และเหลือร่องรอยขีดข่วนน้อยที่สุด เพื่อลดร็อบกพร่อง (defects) บนผิวหน้าของชิ้นแผ่นสาร ขั้นตอนการขัดชิ้นสารทำโดยนำชิ้นสารที่ผ่านขั้นตอนการตัดมาแล้ว ไปติดบนแท่นโลหะด้วยการใช้เทียนไขเป็นตัวยึด ในขั้นแรกจะทำให้แท่นโลหะร้อนก่อน โดยการลนด้วยเปลวไฟของตะเกียงอัลกอฮอล์ ต่อจากนั้นจึงวางเทียนไข ทาละเลงบนแท่นโลหะเล็กน้อยตรงบริเวณที่จะวางชิ้นแผ่นสาร และต้องระวังไม่ให้เทียนไขไหลเยิ้มออกจากผิวหน้าแท่นโลหะ วางชิ้นแผ่นสารลงตรงกลางแท่นโลหะนั้น ทั้งไว้จนกระทั่งแท่นโลหะเย็นลง จึงใช้กระดาษทรายละเอียดขัดเทียนไขที่ปกคลุมผิวหน้าของชิ้นแผ่นสารออกเบาๆ แล้วจึงเอาแท่นโลหะนี้ ไปวางบนแท่นหมุนของเครื่องขัดที่ถูกคลุมผิวหน้า ด้วยผ้าป่านเนื้อหยาบ และถูกขับเคลื่อนด้วยสายพานที่ต่อมาจากมอเตอร์ไฟฟ้า ขณะที่แท่นหมุนหมุนไป ชิ้นสารต้องสัมผัส

กับผ้าขัดตลอดเวลา และต้องฉีดน้ำที่ผสมกับผงขัดอลูมินา (AlO_3) ขนาด $1 \mu m$. ลงไปด้วย เป็นระยะๆ น้ำที่ผสมกับผงขัดอลูมินานี้บรรจุอยู่ในกระป๋องพลาสติก และจะถูกฉีดออกมาด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ อย่างอัตโนมัติ เท่ากับ 5 นาทีต่อหนึ่งครั้ง ตามการทำงานของมอเตอร์ปั๊มที่ถูกควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่น้ำผสมกับผงขัดจะถูกฉีดออกมา ต้องมีการกวาดผงขัดไม่ให้ตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะ ด้วยเครื่องกวนของเหลว (magnetic stirrer) เป็นผลทำให้งานขัดชิ้นสารสะดวกมากขึ้น ไม่จำเป็นต้องคอยควบคุมตลอดเวลา

เมื่อผิวหน้าของชิ้นแผ่นสารเรียบสม่ำเสมอจนกว่าดีแล้ว จึงเปลี่ยนแท่งหมุนใหม่เป็นแท่งหมุนที่คลุมด้วยผ้าสักหลาด และเปลี่ยนมาใช้ผงขัดขนาด $0.05 \mu m$. ขั้นตอนนี้เป็นการขัดละเอียด เพื่อให้ผิวหน้าชิ้นแผ่นสารเรียบ มันวาวมากขึ้น รอยขีดข่วนจะลดน้อยลงไปอีก เมื่อขัดชิ้นแผ่นสารได้ตามต้องการแล้ว นำเป็นโลหะไปลงไนด้วยตะเกียงอัลกอฮอล์ เพื่อนำชิ้นแผ่นสารออกมาได้โดยง่าย การขัดชิ้นแผ่นสารแต่ละผิวหน้า ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 1 ชั่วโมง ถ้าต้องการขัดมันผิวหน้าอีกด้านหนึ่งก็ดำเนินการซ้ำขั้นตอนเดิม โดยเปลี่ยนผลิกกลับใช้อีกด้านหนึ่งเท่านั้น หลังจากขัดมันเสร็จตามความประสงค์แล้ว จึงนำไปล้างให้สะอาด เพื่อขจัดผงขัดอลูมินา ผงของเนื้อสาร และสิ่งสกปรกอื่นที่แทรกติดอยู่บนผิวหน้าชิ้นแผ่นสารออกให้หมด ตามขั้นตอนต่อไป

1. แช่ใน TCE (Trichloroethylene; C_2HCl_3) เดือดนานประมาณ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
2. แช่ในอะซิโตน เดือดนานประมาณ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
3. แช่ในเมทานอล เดือดนานประมาณ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
4. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ หลาย ๆ ครั้ง
5. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

ผิวหน้าของชิ้นแผ่นสารที่สะอาดดีแล้ว จะถูกนำไปกัดผิวหน้า (etch) ด้วยสารละลายเคมี เพื่อให้ผิวหน้าชิ้นแผ่นสารที่สะอาด มันวาว เรียบ เหมาะสำหรับทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์แต่ละชนิดในขั้นตอนต่อไป

7.1.8 การกัดผิวหน้าชิ้นผลึกด้วยสารละลายเคมี (chemical etching solution) [40,61]

การทำความสะอาดผิวหน้าของผลึกสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญมากต่อการที่จะนำไปใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดยเฉพาะการนำผลึกไปใช้เป็นฐานรอง (substrate) เพื่อปลูกชั้นผลึก (Epitaxial layer) ที่มีคุณภาพดีกับลงไป ซึ่งจะเอาไปใช้ทำเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field-effect transistor; FET) MOSFET DMOS MOIS และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น การทำความสะอาดผิวหน้าของผลึก จึงต้อง

คำนึงถึงความสะอาด เรียบ และความสมบูรณ์ของผิวหน้าผลึก ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาที่สำคัญที่จะมีผลต่อสิ่งประดิษฐ์นั้นโดยตรง

การกัดผิวหน้าของชั้นผลึกด้วยสารละลายเคมี เพื่อให้ผิวหน้าเรียบ สะอาด ชัด ขึ้นออกไซด์ และผิวหน้าส่วนที่ชำรุดเสียหาย (damaged surface) เนื่องจากการกัดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก รวดเร็วและถ้าทำการกัดผิวหน้าของชั้นผลึกอย่างถูกต้องระมัดระวัง วิธีนี้จะไม่ทำลายผิวหน้าของชั้นผลึกให้ชำรุดด้วย มีรายงานที่ [19] สำหรับ CuInSe_2 เมื่อนำมาขจัดผิวหน้าของชั้นผลึกด้วย $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วนของ $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 1 : 1 : 1 และสารละลาย $\text{Br} 1\%$ ใน $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ แล้วนั้นพบว่าจะทำให้สิ่งสกปรกบนผิวหน้าของชั้นผลึก (surface contaminates) 2 ชนิด คือ อะตอมของธาตุคาร์บอน (C) กับออกซิเจน (O) ลดลง สำหรับ GaAs [62] ที่ขจัดผิวหน้าของผลึกด้วย $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ในอัตราส่วนของ $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ เท่ากับ 15 : 1 : 1 โดยปริมาตรเป็นเวลานาน 7 นาที จะช่วยลดค่ากระแสรั่วไหล (leakage currents) ที่เกิดจากการใช้โลหะที่มาทำรอยต่อกับผิวหน้าของผลึกถึงตัวนำ GaAs ที่มีขนาดเล็กมากเกินไป และลักษณะเส้นรอบรูปไม่เป็นแบบตั้งฉากกับผิวหน้าของผลึก (abrupt) เป็นต้น แต่สำหรับงานวิจัยนี้ เราจะใช้สารละลายเคมีที่ใช้กัดหน้าชั้นผลึก CuInSe_2 คือ $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ที่มีอัตราส่วนของ HCl และ HNO_3 อย่างละ 16% ของน้ำหนักโดยปริมาตร (weight by volume) สารละลายเหล่านี้เตรียมจากการใช้ HCl จำนวน 13.5 cm^3 HNO_3 จำนวน 7.5 cm^3 และน้ำดีไอออไนซ์ จำนวน 10 cm^3 (เมื่อความเข้มข้นของ HCl และ HNO_3 เป็น 37% และ 70% ของน้ำหนักโดยปริมาตรตามลำดับ) ขั้นตอนต่อไปจะใช้เมทธานอลที่มีโบรมีนผสมอยู่ 0.1 cm^3 ต่อเมทธานอล 150 cm^3 เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่อาจหลงเหลือจากการกัดผิวหน้าในขั้นตอนแรก ซึ่งมีวิธีการขจัดดังต่อไปนี้

1. วางชั้นผลึก CuInSe_2 บนฐาน เทฟลอน (teflon) ที่เตรียมไว้สำหรับวางให้ผิวหน้าชั้นผลึกเอียงประมาณ 45 องศา แล้วนำไปจุ่มลงในสารละลายเคมี $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ที่เตรียมไว้เป็นเวลาประมาณ 30 นาที โดยใช้เวลาในการจุ่มนาน 5 วินาที จึงรีบยกขึ้นเพื่อปฏิบัติตามขั้นตอนต่อไปทันที
2. จุ่มลงในเมทธานอลที่มีโบรมีนผสมอยู่ ที่เตรียมทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30 นาที โดยใช้เวลาในการจุ่มนาน 10 วินาที จึงยกขึ้น
3. จุ่มลงในเมทธานอลนาน 5 วินาที จึงยกขึ้น
4. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ หลาย ๆ ครั้ง
5. ปฏิบัติซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 อีกครั้งหนึ่ง
6. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ นำชั้นผลึก CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นมาทุกเงื่อนไขจำนวนหนึ่ง วางลงบนจานแก้วแบบราบ ปิดฝาให้สนิทแล้วอบที่อุณหภูมิ

70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สำหรับ GaAs นั้น สารละลายเคมีที่ใช้กัดหน้าชั้นผลึก คือ H_2SO_4 (ความเข้มข้นเท่ากับ 96% ของน้ำหนักโดยปริมาตร) + H_2O + H_2O_2 (ความเข้มข้นเท่ากับ 35% ของน้ำหนักโดยปริมาตร) ในอัตราส่วนของ $H_2SO_4 : H_2O : H_2O_2$ เท่ากับ 8 : 1 : 1 โดยปริมาตรคือเตรียมจาก H_2SO_4 จำนวน 42 cm^3 เติม H_2O จำนวน 3 cm^3 กิ่งไว้ให้เย็นแล้วเติม H_2O_2 จำนวน 5 cm^3 ปลอຍทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ขึ้นต่อไปจะใช้ HCl จำนวน 20 cm^3 ผสมกับน้ำ 8 cm^3 เพื่อขจัดชั้นออกไซด์ที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นผลึก GaAs ออกทิ้งไว้ให้เย็น ในขั้นตอนแรก รายละเอียดในทางปฏิบัติมีดังนี้

1. วางชั้นผลึก GaAs บนฐานเทฟลอนเพื่อให้ผิวหน้าชั้นผลึกเอียงประมาณ 45 องศา นำไปจุ่มลงในสารละลายเคมี $H_2SO_4 + H_2O + H_2O_2$ ที่เตรียมไว้แล้ว โดยใช้เวลาในการจุ่มนาน 5 นาที จึงยกขึ้น
2. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์) หลาย ๆ ครั้ง
3. จุ่มลงในสารละลายเคมี HCl ที่เตรียมไว้แล้ว โดยใช้เวลาในการจุ่มนาน 1 วินาที จึงยกขึ้น
4. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ วางชั้นผลึก GaAs จำนวนหนึ่งลงบนจานแก้วที่แบนราบปิดฝาให้สนิท แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C ทันทันที โดยใช้เวลาในการอบประมาณ 1 ชั่วโมง

ในขณะที่กำลังจุ่มชั้นผลึกลงในสารละลายเคมี ควรจะให้ชั้นผลึกนั้นนิ่งมากที่สุด ระยะเวลาที่ยกขึ้นจากสารละลายเคมี เพื่อดำเนินการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป ควรให้ชั้นผลึกสัมผัสกับอากาศสั้นที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงการทำปฏิกิริยากับอากาศ สำหรับ $CuInSe_2$ ผิวหน้าชั้นผลึกที่ถูกกัดเรียบร้อยแล้ว จะมีความมันวาวลดน้อยลง ผิวด้านหนึ่งจะเป็นมันวาวกว่าผิวอีกด้านหนึ่ง ซึ่งเรียกกันว่าผิวด้าน A และผิวด้าน B กล่าวคือผิวด้าน A จะเป็นพวกโลหะ เช่น อะตอมของ Cu กับ In ส่วนผิวด้าน B จะเป็นอะตอมของ Se ซึ่งจะถูกรีดออกได้ง่าย จึงถูกรีดออกไ้มากกว่าผิวด้าน A นั้นเอง [18] นอกจากนี้ความมันวาวที่ลดน้อยลงไป อาจเกิดเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเคมี ที่ใช้กัดหน้าชั้นผลึกกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบว่าร่องรอยที่เกิดขึ้นจากการขีดลดน้อยลงไป ยกเว้นกรณีร่องรอยนั้นลึกมาก ๆ บริเวณที่เป็นผลึกที่สมบูรณ์ ผิวหน้าจะถูกกัดค่อนข้างสม่ำเสมอ บริเวณที่มีข้อบกพร่องของผลึก เช่น ส่วนที่เป็นรอยแยกของผลึก เป็นต้น จะถูกรีดออกไ้มาก

สำหรับ $CuInSe_2$ ที่นำมาอบนั้นพบว่าผิวหน้าจะขึ้นเหมือนมีไอน้ำเกาะอยู่เมื่อเย็นลง จะเห็นขบวนการ ลักษณะผิวหน้าจะมีความมันวาวลดน้อยลงกว่าก่อนนำมากัดด้วยสารละลายเคมี

เล็กน้อย แต่จะมีลักษณะเหมือนผิวหน้าชั้นผลึกก่อนนำไปอบภายหลังจากที่กัดด้วยสารละลายเคมีทันที แต่ลักษณะชั้นที่พบนี้ ไม่สามารถทำนายได้ว่า เกิดจากมีสารชนิดใดมาเกาะผิวหน้า CuInSe_2 เนื่องจากยังไม่เคยมีรายงานกล่าวถึงมาก่อน

สำหรับ GaAs นั้น ภายหลังจากพบว่าผิวหน้าจะขึ้นเหมือนมีไอน้ำเกาะอยู่เมื่อเย็นลง จะเห็นยาวหนืด ผิวหน้าชั้นผลึกที่อบแล้วจะมีความมันวาวลดน้อยลงกว่าก่อนนำมากัดด้วยสารละลายเคมีเล็กน้อย แต่จะเหมือนลักษณะผิวหน้าชั้นผลึก ก่อนนำไปอบภายหลังจากที่ถูกรัดด้วยสารละลายเคมีทันทีลักษณะที่พบนั้นอาจเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากขณะกัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมี $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$ อาจมีอะตอมของออกซิเจนจาก H_2O_2 มาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอะตอมของธาตุ ที่มีพันธะขาดอยู่ (dangling bond) ที่อยู่บนบริเวณผิวหน้าของชั้นผลึกกึ่งตัวนำ GaAs เกิดเป็นสารประกอบ $\text{Ga}_2\text{O} \cdot m \text{H}_2\text{O}$, $\text{As}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ (เมื่อ m และ n คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ) และ GaAsO_4 [62] กลายเป็นฉนวนชั้นบาง ๆ เคลือบอยู่ เมื่อนำ GaAs ที่กัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมีเสร็จมาอบ จะทำให้ฉนวนชั้นบาง ๆ บนผิวชั้นผลึก GaAs เสถียรมากขึ้นอีก เมื่อนำมาเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ เพื่อทำฉนวน ก็จะทำได้อุปกรณ์ที่ไม่ต้องการกล่าวคือ แทนที่จะเป็นอุปกรณ์ที่มีรอยต่อแบบ โลหะ-ฉนวน (เป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์)-GaAs ที่เรานิยาม ก็จะถูกกลายเป็นอุปกรณ์ที่มีรอยต่อแบบ โลหะ-ฉนวน (เป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์) - ฉนวน (เป็นสารประกอบ $\text{Ga}_2\text{O} \cdot m \text{H}_2\text{O}$, $\text{As}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ และ GaAsO_4) - GaAs ที่เรานิยามขึ้นมา แต่ก็นับว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่งคือ เมื่อนำมาทำการทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ พบว่าจะได้กราฟค่าความจุของฉนวนคงที่เมื่อค่าความต่างศักย์สูงมากขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ฉนวนที่เป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ จะทำหน้าที่กั้นประจุที่ถูกจับไว้ตรงผิวรอยต่อและในฉนวนที่เป็นสารประกอบ $\text{Ga}_2\text{O} \cdot m \text{H}_2\text{O}$, $\text{As}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ และ GaAsO_4 ไม่ให้เคลื่อนเข้ามาในอุปกรณ์ตัวเก็บประจุได้หรือในทางกลับกันฉนวนที่เป็นสารประกอบ $\text{Ga}_2\text{O} \cdot m \text{H}_2\text{O}$, $\text{As}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ และ GaAsO_4 จะทำหน้าที่กั้นประจุในฉนวนที่เป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบผสมกับทินเนอร์ไม่ให้วิ่งเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้ค่าความจุของฉนวนคงที่ ตลอดค่าความต่างศักย์ที่ใช้ ตามที่กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยการทำรอยต่อแบบ MIS มาแล้ว

2. เนื่องจากการอบ อาจทำให้เกิด ฉนวนของสารประกอบออกไซด์ชั้นบาง ๆ คลุมอยู่บนผิวหน้าของ GaAs ซึ่งเปรียบเหมือนกับการทำให้ ผิวหน้าชั้นผลึกกึ่งตัวนำ GaAs สกปรกเล็กน้อยก่อน ทำให้แรงดึงผิวของน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ ซึ่งเคลือบอยู่บนผิวหน้าชั้นผลึก GaAs ตรงบริเวณขอบชั้นแผ่นผลึก GaAs ที่ติดกับจานแก้วนั้นแบนราบที่ใช้วางชั้นแผ่นผลึกลดน้อยลง ดังนั้นขณะที่น้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ เริ่มแห้งเกาะบนชั้นแผ่นผลึกแทนที่จะแห้งเกาะแบบเฉพาะบางตำแหน่ง บนผิวหน้าชั้นแผ่นผลึกหรือแห้งเกาะด้วยความหนา

ไม่เท่ากันอันเป็นผลเนื่องมาจาก แรงดึงดูดที่มีมากเกินไป แรงที่ขึ้นฉนวนของสารประกอบ $GaO_2 \cdot nH_2O$, $AsO_3 \cdot nH_2O$ และ $GaAsO_4$ เกาะน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ ซึ่งอยู่บนผิวหน้าไว้สามารถลดแรงดึงดูดนั้นลงได้ จึงเป็นแรงคอยยึดให้น้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์เกาะแห้งบนผิวฉนวนที่เป็นสารประกอบของออกไซด์เหล่านี้ เรียบสม่ำเสมอดีขึ้น

ตั้งต้นขณะนั้นพร้อมที่จะนำชั้นผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ ไปทำอุปกรณ์รอยต่อแบบ MIS โดยเริ่มจากการสร้างฉนวนด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์เป็นขั้นตอนแรก ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

7.2 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้วัดความร้อน (hot-probe method) [5]

วิธีชี้วัดความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว เหมาะสำหรับการตรวจสอบว่าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น หรือชนิดพี ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ทั้งกรณีก่อนนำมาตัดเป็นชิ้น และหลังนำมาตัดเป็นชิ้น เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์แบบต่าง ๆ โดยอาศัยการอธิบายด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแมกเวลล์-โบลซ์มานน์ (Maxwell-Boltzmann distribution function) ดังสมการ

$$f(E) = \exp[-(E-E_F)/kT]$$

เมื่อ E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงที่โบลซ์มานน์ (Boltzmann constant)

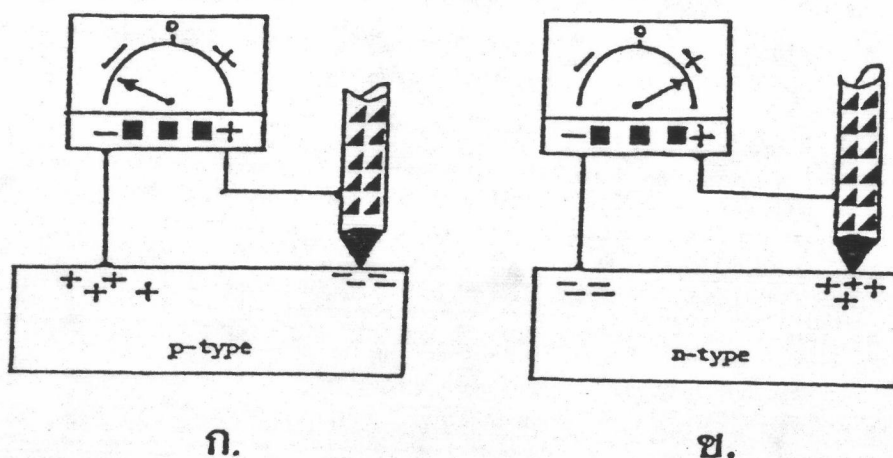
T คือ อุณหภูมิในหน่วยของค่า เคลวิน (K)

$f(E)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงของ แมกเวลล์-โบลซ์มานน์

$$\text{เมื่อ } (E-E_F) > kT$$

ความหมายของสมการนี้คือ การแพร่กระจายของพาหะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ กล่าวคือ กระแสที่เกิดจากการแพร่กระจาย (diffusion current) นี้เกิดจากพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานความร้อน จะมีพลังงานเพิ่มสูงขึ้น เคลื่อนที่แพร่กระจายออกไปยังบริเวณที่เย็นกว่า จึงจะมีพลังงานลดต่ำลง

ขั้นตอนในการปฏิบัติทำได้โดย นำชิ้นผลึกหรือก้อนผลึก (bulk crystals) ที่ต้องการตรวจสอบวางลงบนแผ่นโลหะอลูมิเนียม นำขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับแผ่นโลหะจี้หัวแรงบิดกริ่งบนชิ้นผลึก หรือก้อนผลึกโดยไม่ให้สัมผัสกับแผ่นโลหะ โยงสายไฟจากหัวแรงเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกสารกึ่งตัวนำนั้นจะเป็นชนิดเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมาก เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ ซึ่งเย็นกว่า เข็มของโวลต์มิเตอร์จึงชี้ไปทางบวก แต่ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เข็มของโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบ เนื่องจากโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบ ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้ เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังกล่าว ตามที่แสดงในรูปที่ 7.10



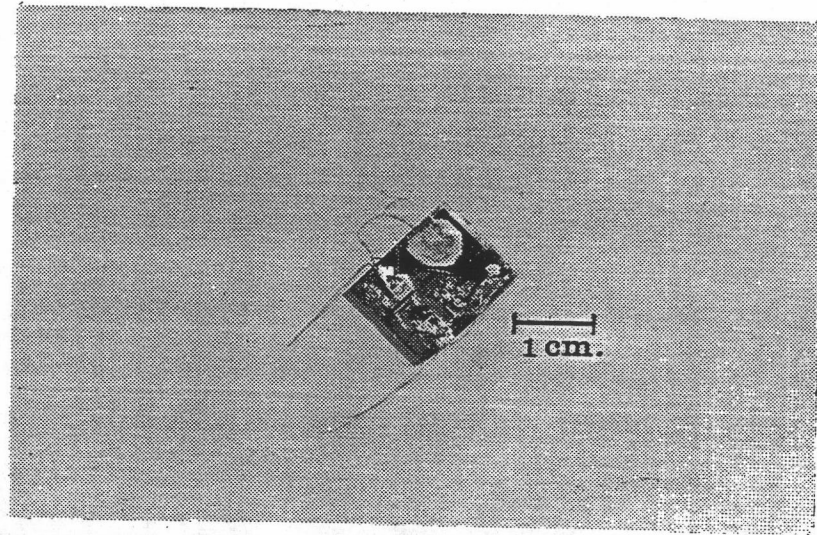
รูปที่ 7.10 แสดงการตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

ผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ โดยวิธีขั้วความร้อนจะแสดงอยู่ในตารางที่ 7.3 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุไปจากสัดส่วนตามสเตอคิโอเมตริกเล็กน้อย สามารถควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมขึ้นเองได้

7.3 การตรวจสอบรอยต่อแบบโอห์มมิก

การวิจัยเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ (ชิ้นที่กัดผิวหน้าแล้วยังไม่ได้มีการนำมาอบ) ที่เตรียมขึ้นนี้เราเลือกใช้โลหะอินเดียม (In) กับกาวนำไฟฟ้า (silver paint) เนื่องจากโลหะเหล่านี้มักใช้การรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไป แต่ก่อนที่จะนำ In มาใช้งานควรทำความสะอาด โดยการเช็ดด้วยอะซิโตนหลาย ๆ ครั้ง จึงนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อกดให้ติดบนชิ้นผลึกที่เตรียมผิวหน้าให้สะอาด

ไว้แล้ว ควรจะกด In ให้ได้จำนวน 2 จุด คือ จุดใหญ่ 1 จุด และจุดเล็ก 1 จุด ลงบนผิวหน้า
ชั้นแผ่นผลึกเหล่านี้ ดังแสดงในรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 แสดงลักษณะของโลหะอินเดียม (In) ที่ถูกกดลงบนผิวหน้าชั้นแผ่นผลึก
 CuInSe_2 และเชื่อมต่อแต่ละจุดด้วยลวดทอง ลงบนแผ่นทองแดง

ต่อจากนี้ให้นำเอาชิ้นสารที่มี In ติดบนผิวหน้า เรียบร้อยแล้วเหล่านี้ ไปแอนนัล
ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ที่ไหลถ่ายเทตลอดเวลา เตาที่ใช้แอนนัลประกอบ
ไปด้วยตัวเตา ซึ่งสามารถเลื่อนไปบนรางคู่ขนาน และมีท่อแก้วควอทซ์เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ
3 cm. ยาว 50 cm. ปลายข้างหนึ่งตัน สอดผ่านเข้าไปข้างในเตา ฮีตปลายทั้งสองข้างของ
ท่อแก้วควอทซ์ ด้วยสายรัดท่อที่ติดกับแท่นยึดให้ท่อแก้วควอทซ์อยู่นิ่ง นำไป เชื่อมต่อเข้ากับระบบ
แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ซึ่งไหลเข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ได้ทางปลายเปิด และออกทางท่อแก๊ส
อีกท่อที่อยู่ตรงปลายท่อแก้วควอทซ์ข้างเดียวกัน นำชิ้นสารวางบนผิวภาชนะที่เป็นแก้วควอทซ์
ผ่าครึ่งซีก ขนาดเล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 cm. ซึ่งทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วด้วยการ
แช่ใน อะควา-รีเจิส เจือจาง ประมาณ 1 วัน แล้วจึงล้างด้วย อะซีโตน เมททานอล
และน้ำดีไอออไนซ์อีกหลาย ๆ ครั้ง จึงเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนตามลำดับ จากนั้นจึง
ใส่เข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ ทำการดูดเอาอากาศภายในท่อแก้วควอทซ์ออก (evacuate)
ทางปั๊มโรตารี และบรรจุ (refill) แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เข้าไปแทน ทำการดูดเอาอากาศออก
และบรรจุเข้าแทนที่ซ้ำเดิมประมาณ 10 ครั้ง เพื่อให้แก๊สออกซิเจนเหลือน้อยที่สุด อันจะเป็น
การป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจน กับแก๊สไฮโดรเจน ขณะทำการแอนนัลที่อุณหภูมิสูง
หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แก๊สไฮโดรเจนไหลเข้า และปล่อยออกทิ้งด้วยอัตรา 1 ฟองอากาศต่อวินาที
การปล่อยให้แก๊สไฮโดรเจนไหลเข้าและปล่อยออกทิ้ง ทำโดยปรับให้ความดันภายในท่อแก้วควอทซ์
มากกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย ที่ต้องทำเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกรั่ว (leak)

ตามข้อต่อ (connector) เข้าสู่ระบบและขณะที่อุณหภูมิของเตาสูงขึ้น จะทำให้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในท่อแก้วควอทซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้ตัวคัปปลิง (O-ring vacuum coupling) ที่ปิดปลายท่อด้านที่แก๊สไฮโดรเจนไหลเข้า และถูกปล่อยออก หลุดออกจากท่อแก้วควอทซ์ได้ ต่อจากนั้นจึงเลื่อนเตาให้อยู่ห่างจากชิ้นสารมากที่สุด แล้วเริ่มปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อปรับให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้น สำหรับ CuInSe_2 จะปรับให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้นเป็นระยะจนถึง 500°C ภายในเวลาหนึ่งชั่วโมงแล้วปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้เตาอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน จึงเลื่อนเตาไปเพื่อให้ชิ้นสารอยู่ตรงตำแหน่งกลางเตา แอนเนลชิ้นสารเป็นเวลานาน 20 นาที จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ปล่อยให้เตาค่อย ๆ เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำเอาชิ้นสารออกมาตรวจสอบในขั้นตอนต่อไป สำหรับ GaAs จะปรับให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้นเป็นระยะจนถึง 450°C ภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง แล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้เตาอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน จึงเลื่อนเตาไป เพื่อให้ชิ้นสารอยู่ตรงตำแหน่งกลางเตา แอนเนลชิ้นสารเป็นเวลานาน 20 นาที จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตา เมื่อเตาเย็นลงจึงนำเอาชิ้นสารออกมาตรวจสอบเป็นขั้นตอนต่อไป

จากการสังเกต CuInSe_2 ที่แอนเนลเสร็จแล้ว พบว่าผิวของชิ้นสารที่ได้จากการแอนเนลแล้ว จะเป็นผิว ไม่เรียบ สะท้อนแสงน้อยกว่าก่อนนำมาแอนเนล ทั้งนี้เนื่องจากมีส่วนประกอบ (component) บางอย่างหลุดออกมาจากผิวของชิ้นสาร CuInSe_2 เช่น Se_2 และ In_2Se_3 [34] ส่วน In ที่ตกลงบนชิ้นสารจะเป็นรูปครึ่งทรงกลม ผิวเป็นมันวาว มีรูพรุนบ้างเล็กน้อย ยึดติดแน่นกับเนื้อสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ได้ดี พร้อมทั้งจะนำไปเชื่อมต่อแต่ละจุดด้วยลวดทอง จากเครื่องเชื่อมลวดทองที่ใช้คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic wire bonding) เข้ากับแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 7.11 เมื่อตรวจสอบความเป็นรอยต่อแบบโฮมมิกด้วยเครื่องตรวจทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) ซึ่งเครื่องนี้จะแสดงกราฟของ I กับ V ถ้าเป็นกราฟเส้นตรงจะแสดงว่ารอยต่อที่ได้เป็นรอยต่อแบบโฮมมิก ค่ากระแสที่ทำให้ ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากันนี้ จะเท่ากับกระแสรีชาร์ดสันที่รอยต่อพื้นที่เล็ก ดังนั้นถ้ากระแสค่าสูงกว่านี้เมื่อไบอัสตรง รอยต่อของพื้นที่เล็ก จะเริ่มขัดขวางการไหลของกระแส แต่ขณะเดียวกันถ้าสับสวิทช์เพื่อ ไบอัสกลับทางรอยต่อของพื้นที่ใหญ่ จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแส การขัดขวางการไหลของกระแสที่รอยต่อพื้นที่เล็ก เปรียบเสมือนเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมความต้านทานของรอยต่อ ซึ่งเป็นผลให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงไม่เท่ากับขณะ ไบอัสกลับทาง ถ้าให้กระแสมีค่าสูงกว่ากระแสรีชาร์ดสันของรอยต่อพื้นที่เล็ก ความต่างศักย์ดังกล่าวนี้ จะยังมีค่าต่างกันมากขึ้น ดังจะแสดงผลการตรวจสอบให้ทราบในหัวข้อถัดไป

สำหรับ GaAs ผิวหน้าของชิ้นสารที่ได้จากการแอนเนลมาแล้วจะยังคงเรียบ สะท้อนแสงเหมือนก่อนนำมาแอนเนล และ In ที่ตกลงบนชิ้นสาร จะเป็นรูปครึ่งทรงกลม ผิวเป็นมันวาว

มีรูพรุนเล็กน้อย ยึดติดแน่นกับเนื้อสารกึ่งตัวนำ GaAs พร้อมทั้งจะนำไปเชื่อมต่อระหว่างจุดด้วยลวดทอง เข้ากับแผ่นทองแดงเพื่อตรวจสอบความเป็นรอยต่อ แบบโหม้มิกด้วยเครื่องตรวจทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) ต่อไปดังเช่น ชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2

การวิจัยเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโหม้มิก ระหว่างกาวนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs สามารถทำได้ตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

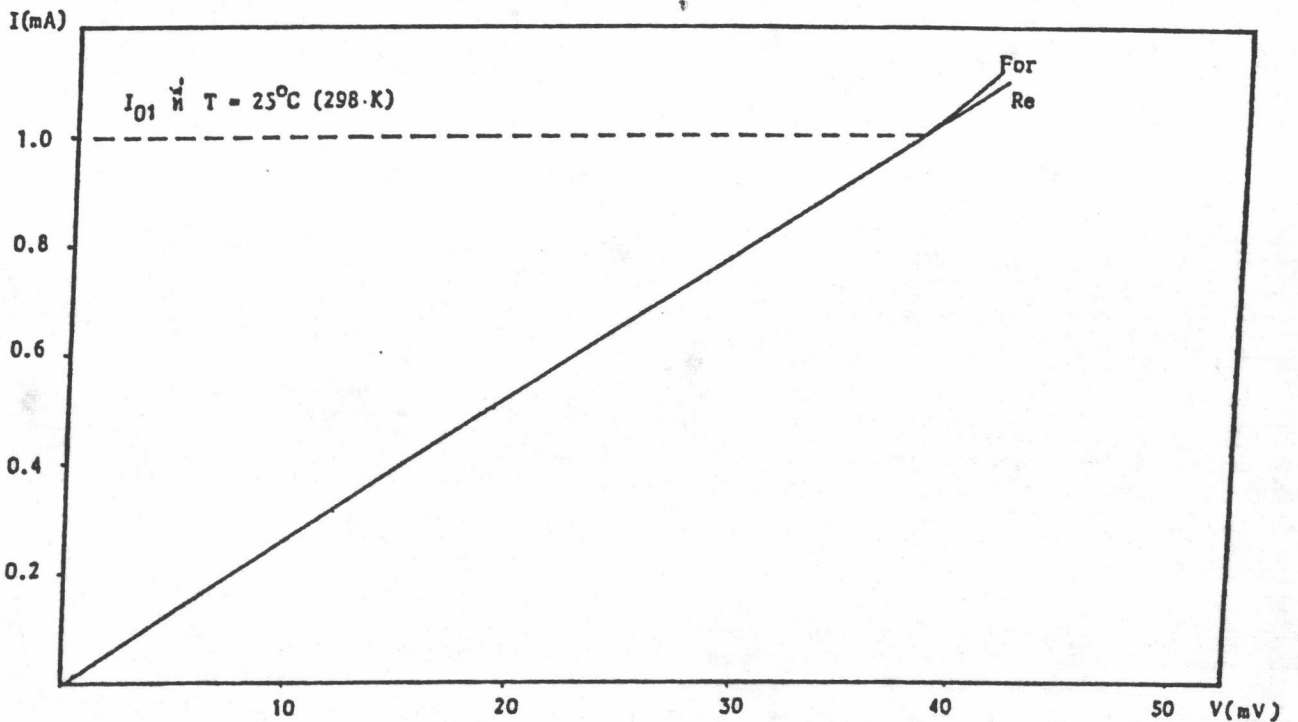
1. ชัดด้านหนึ่งของชั้นสารที่ถูกกัดด้วยสารละลายเคมีแล้ว ด้วยกระดาษทรายละเอียดเบา ๆ
2. ล้างชั้นแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ขัดด้วยกระดาษทราย ให้สะอาดด้วยอะซิโตน ที่อุณหภูมิห้อง 2 ครั้ง เมทธานอลที่อุณหภูมิห้อง 2 ครั้ง น้ำดีไอออไนซ์หลายครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ตามลำดับ
3. หยดกาวนำไฟฟ้าลงบนชั้นแผ่นสารกึ่งตัวนำทางหน้าที่ขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด จำนวน 2 จุด คือจุดใหญ่ และจุดเล็ก (ดังลักษณะจุดของ In ในรูปที่ 7.11) อย่างละ 1 จุด
4. ขณะที่กาวไหลจะแห้งให้ต่อสายลวดทองแดงเปลือยเส้นเล็ก ๆ สั้น ๆ ติดเข้าไป ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งได้บัดกรีติดเข้ากับแผ่นทองแดงไว้แล้วสองเส้น แล้วปล่อยให้กาวนำไฟฟ้าแห้งสนิท เมื่อเสร็จจะนำไปตรวจสอบสภาพรอยต่อแบบโหม้มิก ด้วยเครื่องตรวจทรานซิสเตอร์ ต่อไป

ซึ่งในการทำการรอยต่อแบบโหม้มิกของอุปกรณ์ระบบ MIS สำหรับงานวิจัยนี้ เราจะทำโดยใช้ กาวนำไฟฟ้าป้ายเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ปกคลุมตลอดบริเวณผิวหน้า ชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมด จึงทำให้แน่ใจได้ว่า จะได้รอยต่อโหม้มิกที่ดีที่สุดสำหรับวิธีการนี้แล้ว เพราะการทำลักษณะรอยต่อแบบนี้จะขจัดปัญหา เรื่องการมีพื้นที่เล็ก ขัดขวางการไหลของกระแส และปัญหาเรื่องผิวหน้าสารกึ่งตัวนำถูกทำลายอันเนื่องมาจากการทำการรอยต่อแบบโหม้มิกด้วย In ต้องมีการแอนเนลที่อุณหภูมิสูง ซึ่งนอกจากจะมีอะตอมของธาตุหลุดออกมาจากผิวหน้าสารประกอบแล้ว ยังเป็นเหตุให้ชั้นฉนวนที่เป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบที่ผสมกับทินเนอร์ถูกทำลายด้วย เมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบรอยต่อแบบโหม้มิก จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ ของการไบอัสตรงและไบอัสกลับทาง ในช่วงกระแสตั้งแต่ค่าเป็นศูนย์ จนถึงค่าที่ทำให้ความต่างศักย์ทั้งสองแยกออกจากกันบนจอภาพของเครื่องตรวจทรานซิสเตอร์ กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 7.12 ค่ากระแสที่ทำให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากันนี้ จะเท่ากับกระแสริชาร์ดสันที่รอยต่อนั้นที่เล็ก ซึ่งคือ ค่าความหนาแน่นของกระแสสูงสุด ณ อุณหภูมิห้อง ที่ใช้ได้สำหรับรอยต่อแบบโหม้มิกนั่นเอง ตัวอย่างเช่นจากกราฟรูปที่ 7.12 จะอธิบายได้ว่า ที่อุณหภูมิห้องรอยต่อของ In กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิดนี้ จะแสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแสเมื่อกระแสมีค่าสูงกว่า

1 mA หรือความหนาแน่นของกระแสเกินกว่า 0.2 A/cm^2 โดยประมาณ นั่นคือ รอยต่อระหว่างโลหะ In กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิดนี้ จะไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแสที่ความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 0.2 A/cm^2 ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแสที่เราเรียกว่ารอยต่อแบบโอห์มมิก ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับผลการตรวจสอบรอยต่อแบบโอห์มมิก จะได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.3 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ก็เกือบไม่มีผลต่อความหนาแน่นกระแสเลย จากการทดลองพบว่า รอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ที่ทำโดยใช้โลหะ In สามารถใช้ได้ในช่วงความหนาแน่นของกระแสสูงกว่ารอยต่อแบบโอห์มมิกที่ทำโดยใช้กาวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง แต่อย่างไรก็ตามรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ทำโดยใช้โลหะ In ก็ยังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือ ยังใช้ได้เพียงช่วงความหนาแน่นของกระแสไม่สูงนักที่จะทำให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ที่สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งในการที่จะให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ใช้งานได้ดี ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ ตลอดจนที่ความหนาแน่นของกระแสค่าสูง ๆ เราอาจเลือกใช้โลหะผสมของอินเดียมที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึง ความสามารถติดแน่นของโลหะผสมกับผิวสารกึ่งตัวนำ และความยากง่ายต่อการเชื่อมต่อระหว่างจุดติดเข้ากับแผ่นทองแดงโดยใช้ ลวดทองหรือลวดทองแดงเปลือยด้วย

โลหะที่ใช้ทำรอยต่อ	ชื่อของสารประกอบกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	สมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก ความหนาแน่นของกระแสที่อุณหภูมิห้อง (300K) (A/cm ²)
In การนำไฟฟ้า	CuInSe ₂	p	0.2 0.2
In การนำไฟฟ้า	CuInSe ₂ (In 0.3%)	n	0.2 0.04
In การนำไฟฟ้า	CuInSe ₂ (Se 0.3%)	p	0.2 0.2
In การนำไฟฟ้า	CuInSe ₂ (Se 0.3%)	n	0.2 0.2
In การนำไฟฟ้า	CuInSe ₂ (Cu 0.3%)	p	0.2 0.2
In การนำไฟฟ้า	GaAs	n	800 60

ตารางที่ 7.3 แสดงผลของการศึกษารอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะ In และการนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ กรณีต่าง ๆ และ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง (300 K)



รูปที่ 7.12 แสดงค่ากระแสรีเวิร์ดสั้นของรอยต่อพื้นที่เล็กที่สุดของห้องจากราระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และกาวนำไฟฟ้ากับ p-CuInSe₂ (For คือ ไบอัสตรง และ Re คือ ไบอัสกลับทาง)

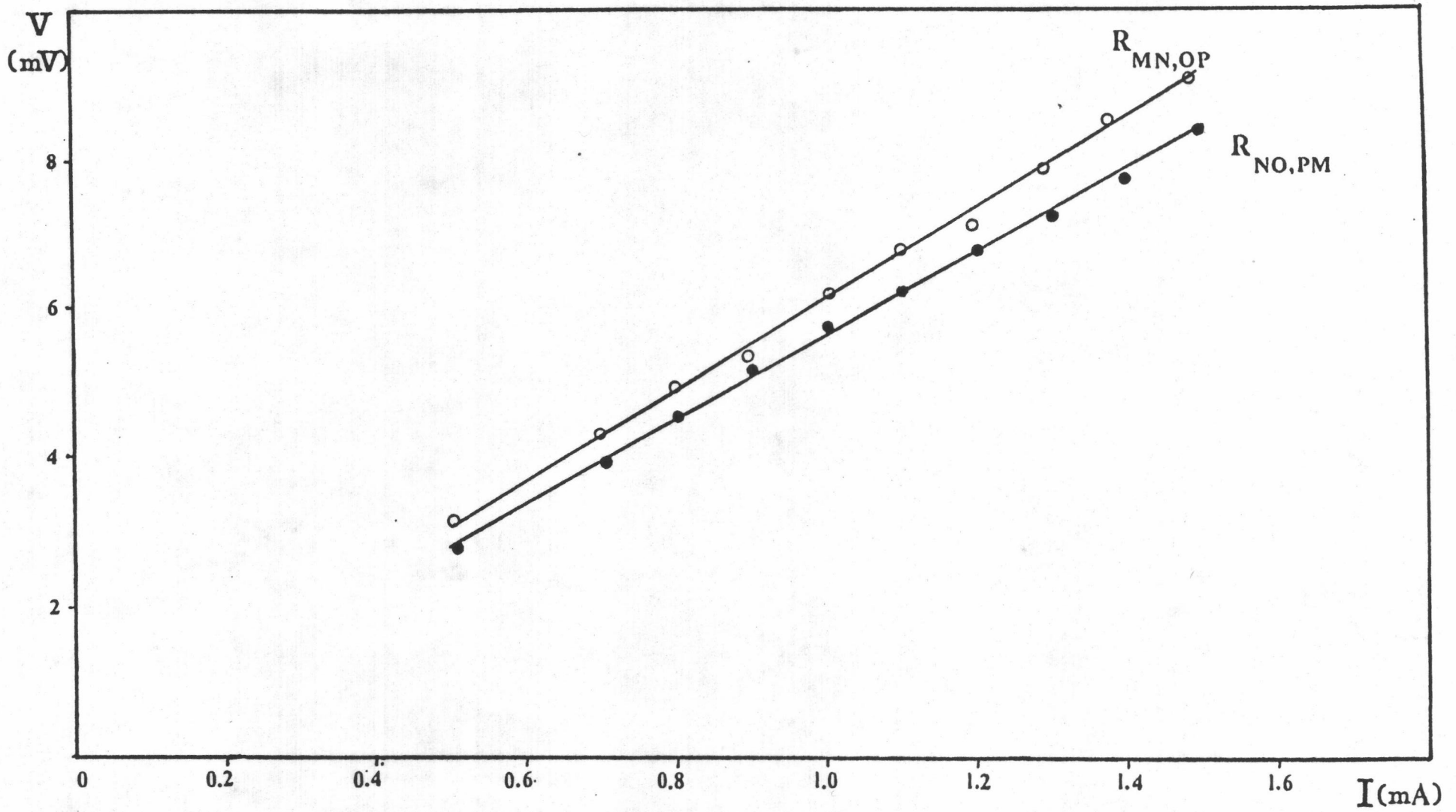
7.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์ และการคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน และ โฮล

จากการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกขึ้นมาก่อน เพราะเราไม่สามารถวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำได้โดยตรง เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารกึ่งตัวนำน้อยมากจนกระทั่งวัดค่าได้ยากลำบาก ทั้งนี้เกิดจาก มีความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อของปลายเข็มโลหะที่ใช้ทำขั้วสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ รอยต่อนี้จึงขัดขวางการไหลของกระแส สำหรับในที่นี่จะใช้โลหะอินเดียมหรือกาวนำไฟฟ้ามาทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ และ GaAs (รายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อที่ 7.3) โดยทำรอยต่อเป็นจุดจำนวนสี่จุด ที่ขอบของชั้นสาร สิ่งสำคัญก็คือต้องพยายามทำให้ได้จุดที่มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชั้นสารเพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของเส้นสัมผัส จากนั้นจึงใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนแผ่นทองแดงที่ถูกทำขั้วไว้แล้วสี่ขั้วด้วยการโยงลวดทองหรือลวดทองแดงเปลือยเส้นสั้น ๆ จากขั้วทั้งสองของแผ่นทองแดงเข้ากับจุดทั้งสองของโลหะอินเดียม

หรือการนำไฟฟ้า ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.10 ก (ในหัวข้อ 5.4 บทที่ 5) วัดกระแส I_{MN} ค่าต่าง ๆ และความต่างศักย์ V_{PO} รวมทั้งค่ากระแส I_{NO} และความต่างศักย์ V_{MP} แล้วนำข้อมูลที่ได้ มาเขียนกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ เพื่อหาค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ดังรูปที่ 7.13 จากการวัดค่าความหนาของชั้นสาร (d) จะสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการ

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{MN,OP} + R_{NO,PM})}{2} f\left(\frac{R_{NM,OP}}{R_{NO,PM}}\right)$$

จากการศึกษา รอยต่อระหว่างโลหะอินเดียม และการนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ ด้วยเครื่องตรวจทรานซิสเตอร์นั้นพบว่ารอยต่อระหว่างโลหะอินเดียม และการนำไฟฟ้าที่ใช้ทำรอยต่อแบบโอห์มมิก จะเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกในช่วงกระแสค่าไม่สูงนัก แต่อย่างไรก็ตาม トラバドที่ผลของรอยต่อที่เริ่มขัดขวางการไหลของกระแสไม่ไปรบกวนเส้นสมมติจะจนทำให้ค่าความต่างศักย์ V_{OP} และ V_{MP} ที่วัดได้มีค่าผิดไปเราก็จะยังสามารถวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้เสมอ



รูปที่ 7.13 กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของสารกึ่งตัวนำ p-CuInSe₂ ตัวอย่างที่ T4 (ความหนาเท่ากับ 0.10 cm) ที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน และ โฮลของชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs แสดงอยู่ในตารางที่ 7.4 ซึ่งจะพบว่า ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

หมายเลขสารตัวอย่าง	ชื่อของสารประกอบกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) (Ω -cm)	สภาพนำไฟฟ้า(σ) (Ω -cm) ⁻¹
#T1	CuInSe ₂	p	5.9	0.2
#T2	CuInSe ₂	p	6.1	0.2
#T3	CuInSe ₂ (In 0.3%)	n	3.4-2.2	0.3-0.5
#T4	CuInSe ₂ (Se 0.3%)	p	3.8	0.3
#T5	CuInSe ₂ (Se 0.3%)	p	5.5	0.2
		n	1.4	0.7
#T6	CuInSe ₂ (Cu 0.3%)	p	5.7	0.2
#T7	GaAs	n	0.0019-0.0010	526.3-1000.0

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) และค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน และ โฮล ของชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ และ GaAs

7.5 วิธีการเตรียม และศึกษารอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของรอยต่อที่อุณหภูมิห้อง

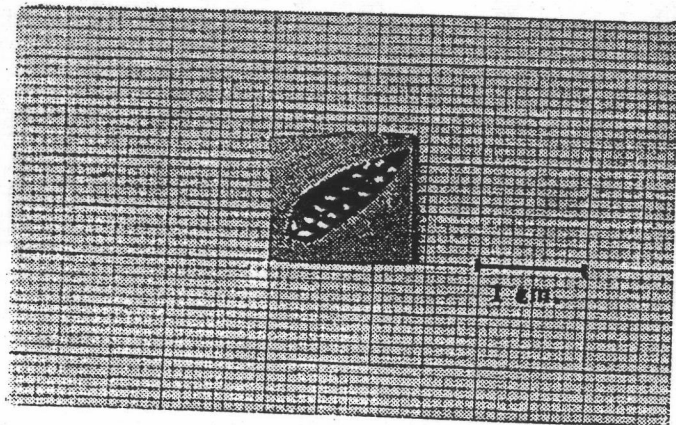
จากหัวข้อ 7.1.7, 7.1.8 และ 7.3 ได้กล่าวถึงวิธีการขัดมันผิวหน้าชั้นสารกึ่งตัวนำ การกัดผิวหน้าชั้นสารด้วยสารละลายเคมี และการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่าง กาวนำไฟฟ้ากับ ชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs อย่างละเอียด วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้เป็นขั้นตอนสำคัญ สำหรับการเตรียมรอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs เพื่อนำตัวเก็บประจุ แบบ MIS มาศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่ค่าความถี่ที่ เท่ากับ 1 MHz ณ. อุณหภูมิห้อง โดยจะใช้สารกึ่งตัวนำ GaAs ที่มีการนำไฟฟ้า ชนิดเอ็น เป็นสารเทียบมาตรฐานเครื่องมือ และวิธีทำการทดลองเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้กราฟ กรณีอุดมคติ (ideal curve) เปรียบเทียบความถูกต้องของผลการทดลองเนื่องจากในทางปฏิบัติ การเตรียมรอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จะใช้วิธีการแบบง่าย ๆ ซึ่งยากแก่การ ควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดนี้ จึงเป็นเหตุให้ ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปจากกรณียุคอุดมคติ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียม และการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถทำตามขั้นตอน ต่าง ๆ ดังนี้

1. นำชั้นสารที่เตรียมผิวหน้าแล้วมาจุ่มน้ำยาไวแสงที่ผสมกับทินเนอร์ทันที เพื่อให้ได้ ผิวหน้าสะอาดที่สุด โดยใช้เวลารจุ่มประมาณ 8 วินาที และ 24 วินาที สำหรับชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ตามลำดับ เมื่อนำชั้นสารขึ้นมาจากน้ำยาไวแสงแล้วให้นำผิวหน้าที่ต้องการ ให้ชั้นของน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ คว่ำลงบนจานแก้วที่แบบราบที่ทำความสะอาดด้วย TCE อะซิโตน เมทธานอล น้ำดีไอออไนซ์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์แล้ว ตามลำดับ ปลอ่ยทิ้งไว้จนกระทั่งผิวด้านบนใกล้จะแห้ง จึงพลิกผิวหน้าด้านล่างขึ้นมาปลอ่ยให้แห้งเองตามธรรมชาติ กล่าวคือ ขณะทำผิวหน้าด้านนี้ให้แห้งไม่ควรเป่า หรือเอียงชั้นสารอย่างอื่น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความหนา ของน้ำยาไวแสง เรียบสม่ำเสมอ ที่บริเวณผิวหน้าแผ่นสารมากที่สุด สถานที่เหมาะสำหรับ เคลือบน้ำยาไวแสงนี้ ควรเป็นที่ปราศจากการหมุนเวียนของอากาศ และที่ปราศจากฝุ่นละออง เมื่อน้ำยาไวแสงเคลือบแห้งสนิทแล้ว จะสังเกตได้ว่าสีของน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนสารกึ่งตัวนำ ทั้งสองชนิดเป็นสี เขียวตลอดทั่วบริเวณผิวหน้านั้น แสดงว่าเราได้ความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงที่ สามารถนำมาใช้ศึกษาสมบัติรอยต่อแบบ MIS ตามต้องการ เหตุที่เราต้องสังเกตสีของน้ำยาไวแสง ที่เคลือบบนสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดแทนการวัดค่าความหนา เพราะเราไม่ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของน้ำยาไวแสงที่ผสมกับทินเนอร์ เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาความหนาของชั้นน้ำยาไวแสง ที่ถูกต้องได้ในทางปฏิบัติมีวิธีการหนึ่ง ที่สามารถใช้คำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำยาไวแสงนี้คือ

การอาศัยสมบัติทางแสงมาคำนวณ แต่เนื่องจากเป็นงานที่ยุ่งยากมาก จึงไม่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้
 สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเกี่ยวกับน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ที่ใช้ทดลองคือ

- 1.1 ไม่ควรนำน้ำยาที่ผสมไว้นานเกินไปมาใช้ในภากรทดลอง เนื่องจากทินเนอร์เป็นสารระเหยง่าย ถ้าทิ้งน้ำยาไว้นาน อัตราส่วนผสมจะผิดไปจากที่ต้องการ
- 1.2 ความสกปรก และสิ่งเจือปนในน้ำยา เป็นสาเหตุทำให้เกิดประจุชนิดต่าง ๆ ขึ้นในเนื้อฉนวน
2. ชัดผิวหน้าด้านที่ไม่ใช้งานออกด้วยกระดาษทรายละเอียดเบาๆจนกระทั่งน้ำยาไวแสงที่เคลือบติดอยู่หมดไป
3. ทำความสะอาดผิวหน้าที่ขัดด้วยกระดาษทรายด้วยเมทานอล
4. เมื่อผิวหน้าข้อ 3 สะอาดแห้งดีแล้ว จึงนำมาทำรอยต่อแบบโอห์มมิก ระหว่างกาวนำไฟฟ้ากับชั้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ โดยการป้ายกาวนำไฟฟ้า ลงบนแผ่นทองแดงให้มีขนาดพื้นที่เท่าพื้นที่ผิวหน้าด้านนี้ แล้วจึงวางชั้นสารด้านนี้ประกบลงไป ขณะที่กาวนำไฟฟ้ายังไม่แห้งใช้อุปกรณ์ที่ไม่ทำลายผิวหน้าน้ำยาไวแสง กดชั้นสารเบา ๆ เพื่อให้ชั้นสารเกิดรอยต่อกับกาวนำไฟฟ้าสม่ำเสมอ ตลอดทั่วพื้นที่ผิว ข้อควรระวังคือ ขณะกดต้องไม่ให้กาวนำไฟฟ้าเลอะบริเวณขอบของชั้นสาร อันจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลได้ ขณะไปอัสค่าความต่างศักย์แก่อุปกรณ์ตัวเก็บประจุแบบ MIS และต้องไม่ทำให้ชั้นของน้ำยาไวแสงทะลุด้วย เพราะจะทำให้ได้รอยต่อแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เราไม่พิจารณาในงานวิจัยนี้
5. เมื่อทำรอยต่อแบบโอห์มมิกเสร็จแล้ว จึงนำแผ่นทองแดงที่มีชั้นสารติดอยู่มาทำชั้นโลหะ โดยการหยดโลหะผสม In-Ga (เตรียมได้จากการหลอม Ga ให้เหลว แล้วค่อย ๆ เติม In ลงไปจนกระทั่งสารละลายอิมตัว) หรือ In-Hg (เติม In ลงใน Hg จนกระทั่งเกิดสารละลายอิมตัว) ลงบนชั้นน้ำยาไวแสงที่เคลือบบนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด ให้มีลักษณะเป็นจุดกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 0.40 mm. และ 0.20 mm. สำหรับ $CuInSe_2$ และ $GaAs$ ตามลำดับ ดังรูป 7.14



รูปที่ 7.14 แสดงตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs บนแผ่นทองแดง

6. จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องวัด ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ - ความต่างศักย์ ดังรูป (รูปที่ 3 ภาคผนวก ค.) นำตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่เตรียมได้จากข้อ 5 มาวัดความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

6.1 เลือกช่วงค่าความต่างศักย์ไฟตรง ที่จะป้อนให้กับตัวเก็บประจุ MIS ที่ต้องการวัดจากค่าความต่างศักย์ต่ำสุดถึงค่าความต่างศักย์สูงสุด กล่าวคือ สำหรับตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ CuInSe_2 และของ GaAs ใช้ค่าความต่างศักย์ในช่วง -9 ถึง $+9\text{V}$ และ -20 ถึง $+20\text{V}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเป็นค่าความต่างศักย์ที่ยังไม่ถึงค่าที่ทำให้เกิดสภาวะการพังทลายของ ตัวเก็บประจุเหล่านี้

6.2 ส่งสัญญาณควบคุมเครื่องวัด ให้เริ่มทำการวัดโดยใช้ความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 1 MHz เริ่มวัดจากค่าความต่างศักย์ไบอัส 0 V ไปยังค่าจำกัดความต่างศักย์ไบอัสต่ำสุด โดยลดค่าความต่างศักย์ลงทีละ ประมาณ 0.2 V และรอเป็นเวลานานเท่ากับ 1 วินาที ก่อนที่จะวัดความจุและเปลี่ยนค่าแต่ละครั้ง เพื่อให้ประจุต่าง ๆ ทั้งในชั้นฉนวนน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ และที่ผิวสัมผัสตอบสนองได้ทัน เมื่อถึงนิกิตค่าความต่างศักย์ต่ำสุดแล้วก็จะเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็นขั้น ๆ (step) ดังที่ได้กล่าวข้างต้นไปถึงค่าจำกัดความต่างศักย์สูงสุด การวัดนี้เป็นหารวัดเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด และสูงสุด เพื่อใช้ในการคำนวณขนาดสเกลของแกน y ซึ่งเป็นแกนของค่าความจุไฟฟ้า (แกน x เป็นแกนของค่าความต่างศักย์ไฟตรงที่ใช้ไบอัส) ให้เหมาะสมพร้อมที่จะแสดงผลการวัดด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ บนจอภาพและเก็บข้อมูลไว้ในระบบความจำของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ แอปเปิลทู

6.3 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่ได้ (C_{\max} , C_{\min}) โปรแกรมจะคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ค่าต่าง ๆ ตามสมการที่ (5.11), (5.12), (6.23), (6.38), (6.39), (6.40), (6.43), (6.46), (6.49), (6.53), (6.55), (6.57), (6.60), (6.61) และโดยอาศัยข้อมูลเหล่านี้ ประกอบด้วยคือ

$$\epsilon_0 \text{ ของสุญญากาศ} = 8.86 \times 10^{-14} \text{ pF/cm.}$$

$$\epsilon_{\text{CuInSe}_2} \text{ ของ } \text{CuInSe}_2 = 1.20 \times 10^{-12} \text{ pF/cm.}$$

$$\epsilon_{\text{GaAs}} \text{ ของ GaAs} = 1.16 \times 10^{-12} \text{ pF/cm.}$$

$$E_g \text{ ของ } \text{CuInSe}_2 = 1.02 \text{ eV}$$

$$E_g \text{ ของ GaAs} = 1.42 \text{ eV}$$

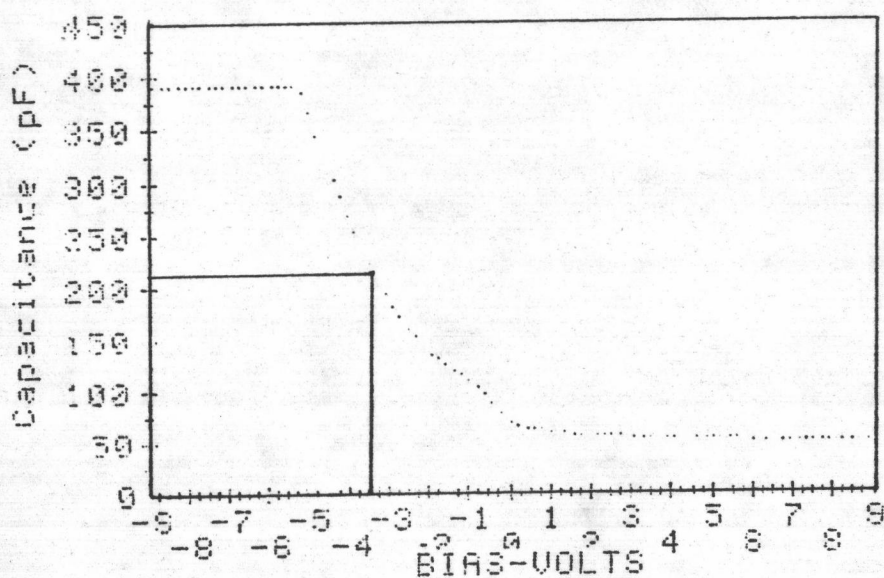
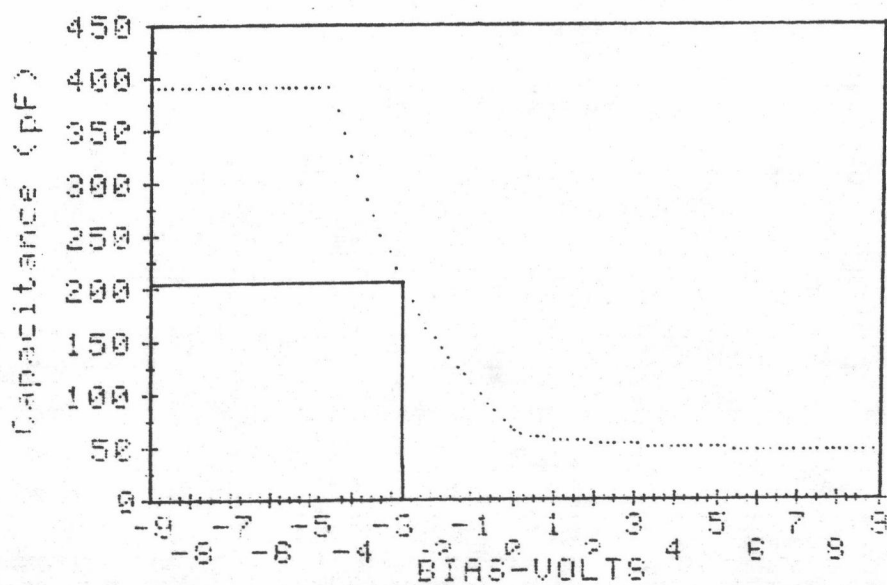
$$T = 300 \text{ K}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

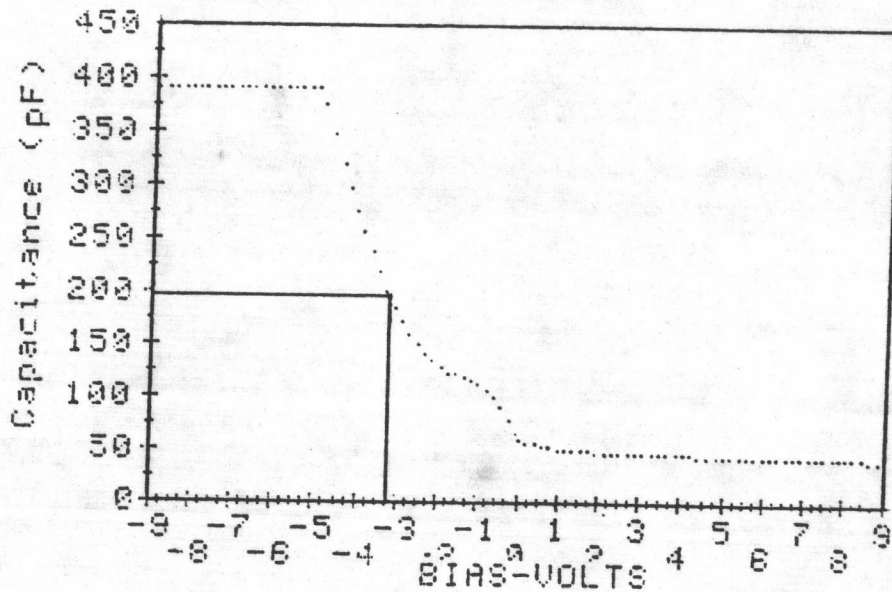
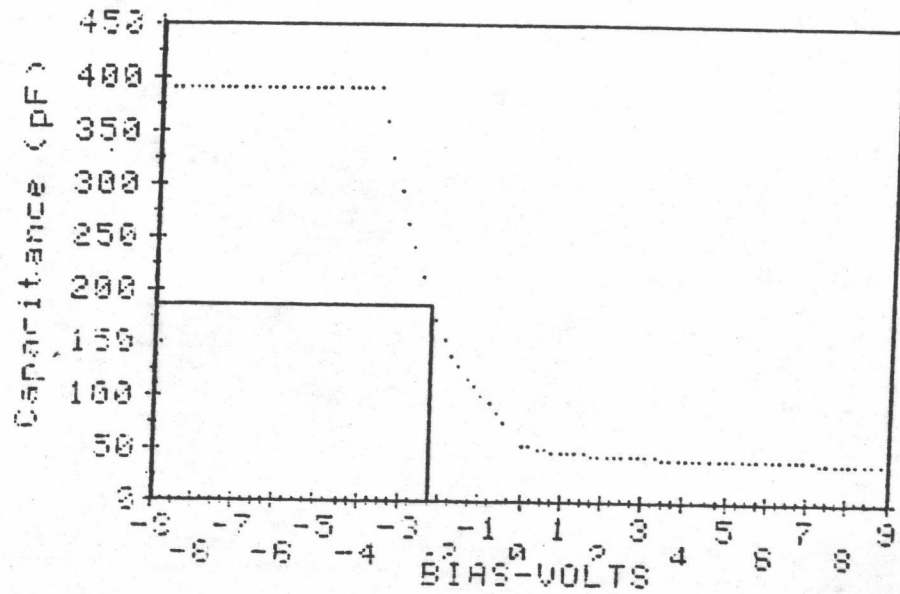
$$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

ซึ่งในช่วงกลับทลายอย่างมาก ψ_n และ ψ_p ของ $\text{CuInSe}_2 = 1.02, 0.51 \text{ eV}$
และ ψ_n และ ψ_p ของ $\text{GaAs} = 1.42, 0.71 \text{ eV}$ ตามลำดับ

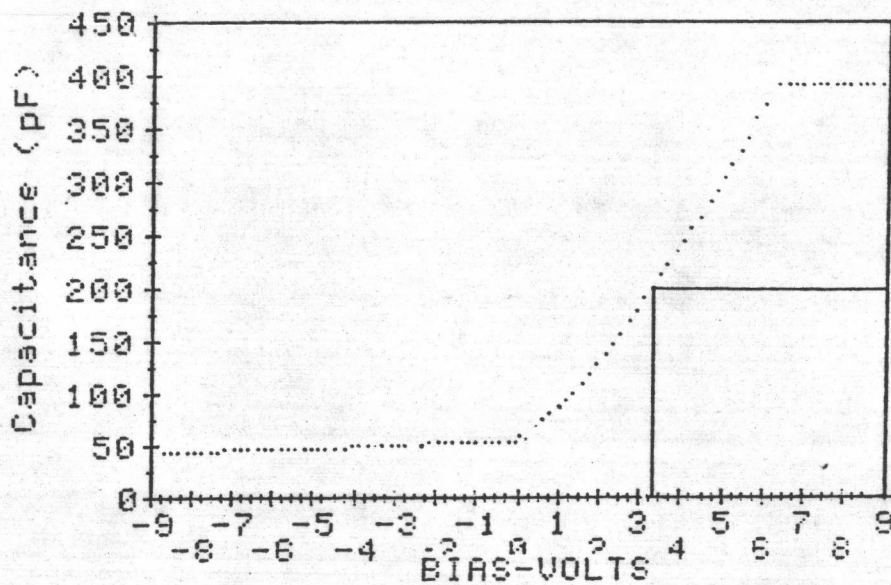
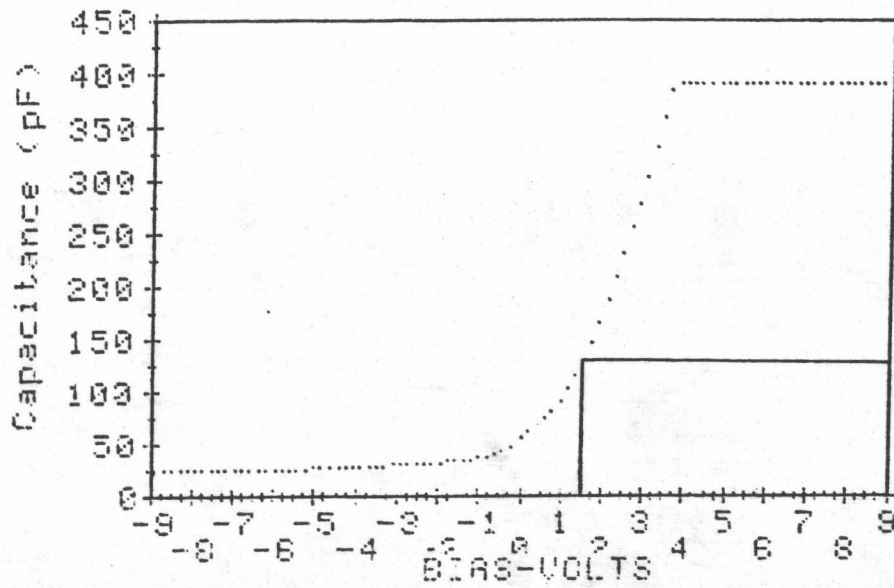
7. แสดงผลการทดลอง ดังรูป ที่ 7.15-7.20 และตารางที่ 7.5



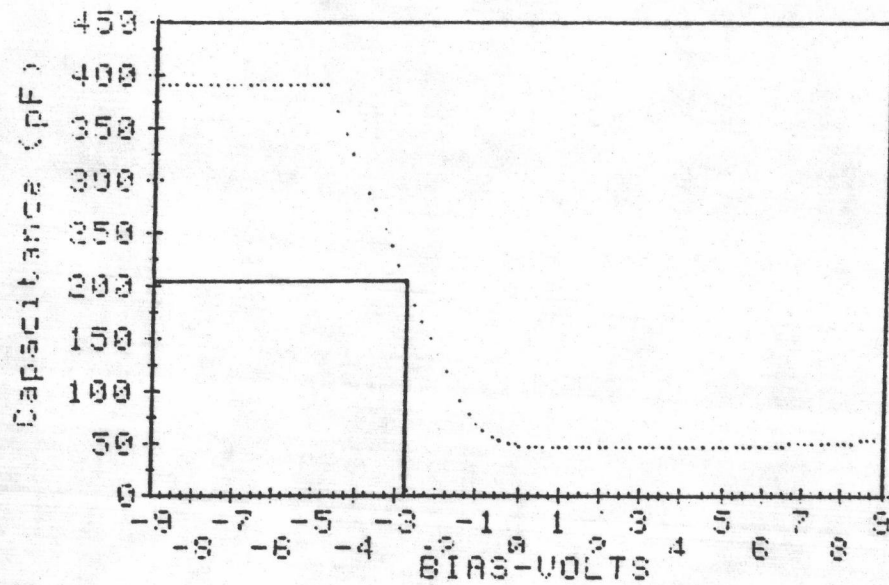
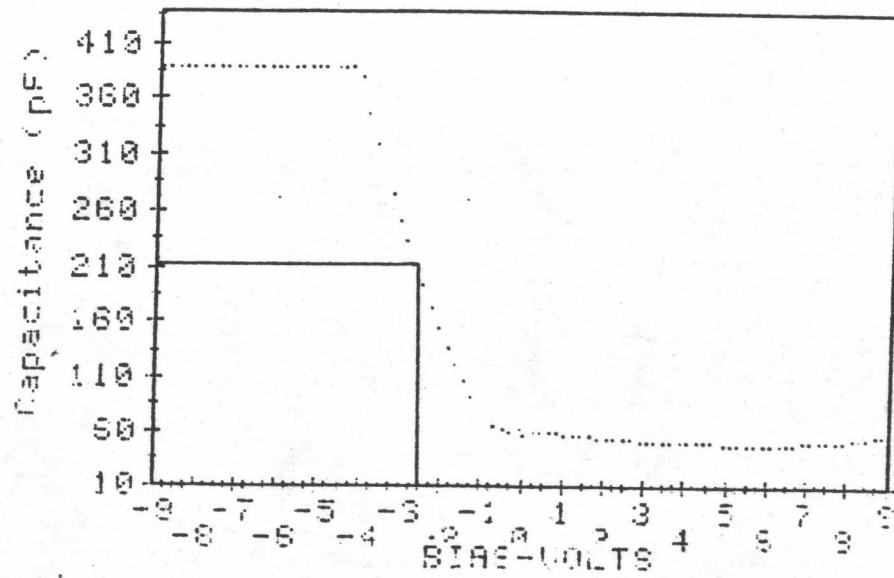
รูปที่ 7.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของ p-CuInSe₂ มีอุณหภูมิห้อง (300 K) เมื่อใช้โลหะเหลว In-Ga และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง)



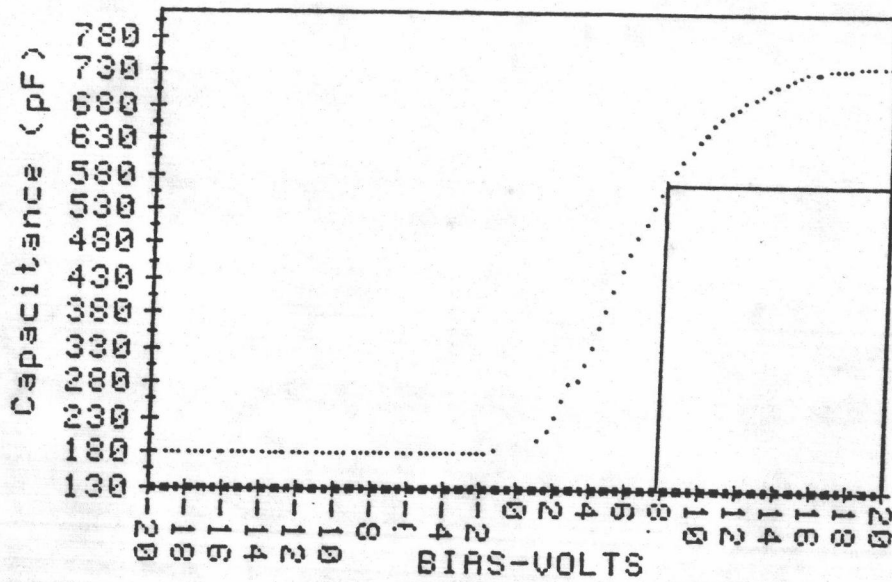
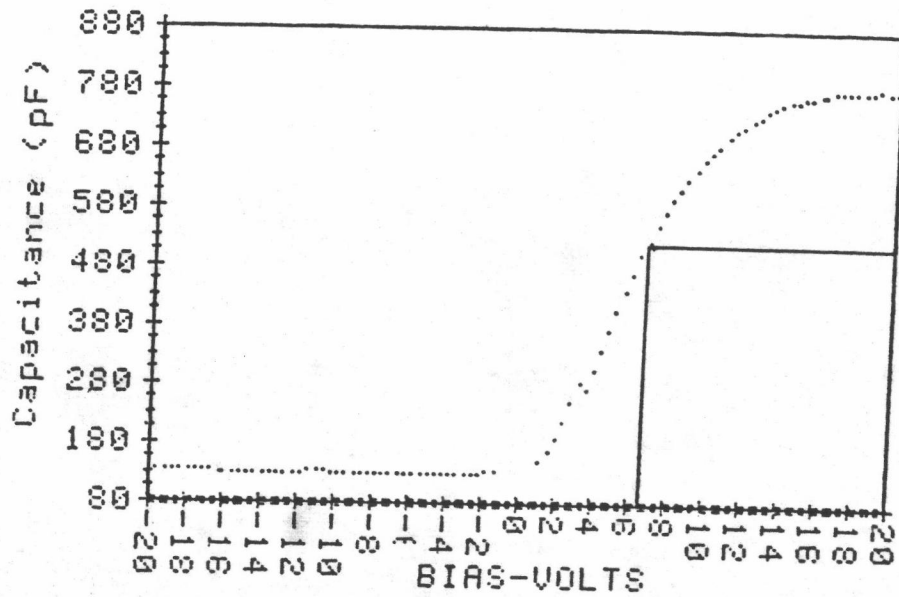
รูปที่ 7.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ $p\text{-CuInSe}_2$ ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) เมื่อใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนที่จะเปลี่ยนน้ำยาไวแสง ผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง)



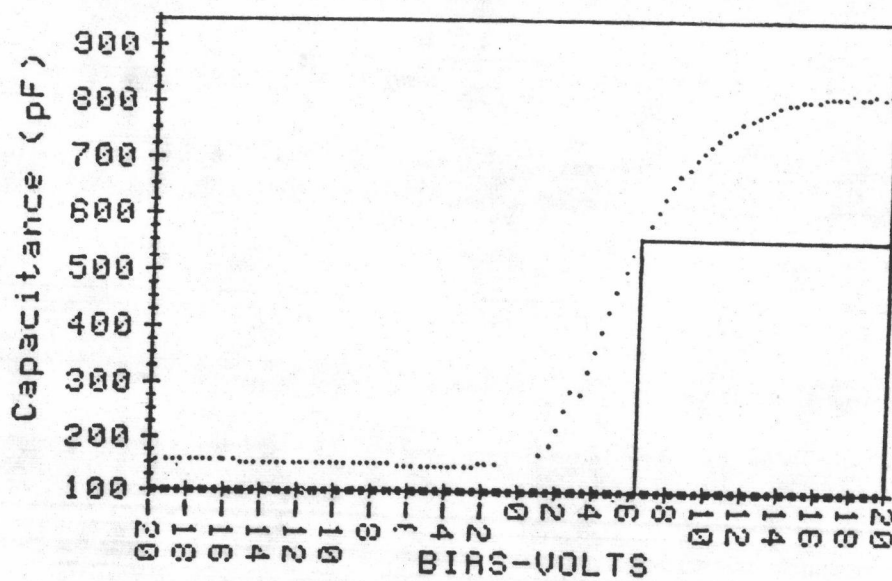
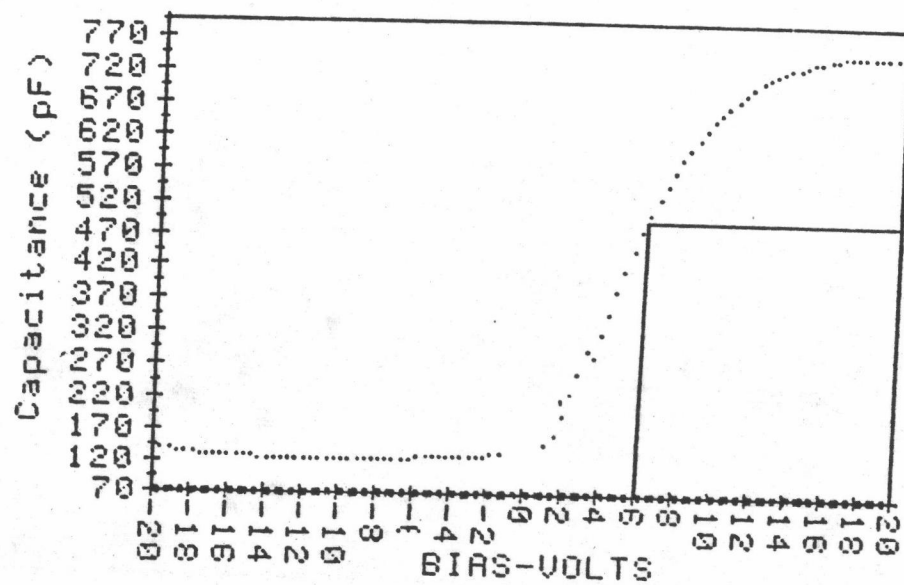
รูปที่ 7.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ n-CuInSe₂ (In 0.3 %) (รูปบน) และของ n-CuInSe₂ (Se 0.3 %) (รูปล่าง) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านภาครอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์



รูปที่ 7.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ $p\text{-CuInSe}_2$ (Se 0.3 %) (รูปบน) และของ $p\text{-CuInSe}_2$ (Cu 0.3 %) (รูปล่าง) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้โลหะเหลว In-Hg และผ่านภาครอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลื่อนด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์



รูปที่ 7.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ n-GaAs ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โลหะ In-Hg และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลื่อนด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และ ไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง)



รูปที่ 7.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ MIS ของ n-GaAs ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โลหะเหลว In-Ga และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ (รูปบน) และไม่ผ่านการอบ (รูปล่าง)

สมบัติทาง ฟิสิกส์	หน่วย	#T1				#T2		#T3		#T4	
		In-Ga		In-Hg		In-Ga	In-Hg	In-Ga	In-Hg	In-Ga	In-Hg
		อบที่ T=70 °C	ไม่อบ	อบที่ T=70 °C	ไม่อบ	อบที่ T=70 °C		อบที่ T=70 °C		อบที่ T=70 °C	
$C_{max} (C_i)$	pF	390.00	390.00	389.90	390.00	389.90	390.60	389.90	389.90	388.50	388.30
C_{min}	pF	44.80	38.20	40.30	40.30	54.20	58.80	28.80	21.80	51.80	48.00
C_d	pF	50.61	42.34	44.94	44.94	62.95	69.22	31.90	23.09	59.76	54.77
W_{max}	$\mu m.$	0.309	0.360	0.348	0.348	0.248	0.226	0.503	0.678	0.262	0.286
$ N_A - N_D $	cm^{-3}	1.6×10^{16}	1.1×10^{16}	1.2×10^{16}	1.2×10^{16}	2.5×10^{16}	3.0×10^{16}	6.0×10^{15}	3.3×10^{15}	2.2×10^{16}	1.9×10^{16}
n_i	cm^{-3}	4.4×10^7	3.0×10^7	3.3×10^7	3.3×10^7	6.8×10^7	8.2×10^7	1.6×10^7	1.1×10^7	6.1×10^7	5.2×10^7
L_{DP} หรือ L_{Dn}	\AA	348.3	420.0	402.1	402.1	278.6	254.3	568.7	766.8	297.0	319.5
C_d (flat-band)	pF	344.53	285.71	298.40	298.43	430.73	471.88	211.00	156.49	404.04	375.58
C_{FB}	pF	208.74	191.37	187.64	197.18	229.63	238.77	161.57	143.32	224.24	215.85
Q_n	C/cm^2	7.9×10^{-8}	6.5×10^{-8}	6.7×10^{-8}	6.7×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.1×10^{-8}	4.8×10^{-8}	3.6×10^{-8}	9.2×10^{-8}	8.7×10^{-8}
E_n	V/cm.	6.6×10^4	5.4×10^4	5.6×10^4	5.6×10^4	8.3×10^4	9.2×10^4	4.0×10^4	3.0×10^4	7.7×10^4	7.3×10^4
V_i	V	0.25	0.21	0.21	0.22	0.32	0.36	0.15	0.12	0.30	0.28
V_T	V	1.27	1.23	1.23	1.24	1.34	1.38	1.17	1.14	1.32	1.30
V_{FB}	V	-2.80	-3.20	-2.20	-3.20	-5.00	-4.60	+1.75	+1.42	-3.00	-2.50
Q_n	C/cm^2	-2.9×10^{-7}	-7.1×10^{-7}	-2.9×10^{-7}	-6.1×10^{-7}	-4.3×10^{-7}	-3.8×10^{-7}	$+4.8 \times 10^{-7}$	$+7.1 \times 10^{-7}$	-2.9×10^{-7}	-3.7×10^{-7}
μ_p หรือ μ_n	$cm^2/(v-s)$	66.2	96.3	88.3	88.3	40.9	34.2	306.7-473.5	577.0-860.9	74.8	86.6

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการคำนวณสมบัติทางฟิสิกส์ค่าต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้และของสารกึ่งตัวนำ $GaAs$ ที่ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง (300 K)

สมบัติทาง ฟิสิกส์	หน่วย	#T5		#T6		GaAs				GaAs ที่ใช้สอบเทียบ มาตรฐาน
		In-Ga	In-Hg	In-Ga	In-Hg	In-Ga		In-Hg		
		อุณหภูมิ T=70°C		อุณหภูมิ T=70°C		อุณหภูมิ T=70°C	ไม่อบ	อุณหภูมิ T=70°C	ไม่อบ	
$C_{max} (C_i)$	pF	390.30	390.10	390.50	390.30	754.00	815.00	781.00	740.00	-
C_{min}	pF	44.80	42.20	44.80	44.70	123.30	146.30	128.50	178.70	-
C_d	pF	50.60	47.30	50.60	50.00	147.40	178.30	153.80	235.59	-
W_{max}	μm.	0.300	0.311	0.309	0.305	0.024	0.020	0.023	0.015	-
$ N_A - N_D $	cm. ⁻³	1.6×10^{16}	1.4×10^{16}	1.6×10^{16}	1.6×10^{16}	3.5×10^{16}	5.1×10^{16}	3.8×10^{16}	4.8×10^{16}	$3.2 \times 10^{16} - 4.8 \times 10^{16}$
n_i	cm. ⁻³	4.4×10^7	3.9×10^7	4.4×10^7	4.4×10^7	4.2×10^6	6.2×10^6	4.6×10^6	7.0×10^6	-
L_{DP} หรือ L_{Dn}	Å	348.3	372.3	348.3	348.3	23.5	19.5	22.6	18.3	-
C_d (flat-band)	pF	344.53	322.32	344.53	344.53	493.61	594.87	513.27	633.88	-
C_{FB}	pF	306.15	202.20	208.87	208.85	509.65	570.56	529.15	571.69	-
Q_n	C/cm. ²	7.7×10^{-6}	7.0×10^{-6}	7.9×10^{-6}	7.8×10^{-6}	1.3×10^{-6}	1.6×10^{-6}	1.4×10^{-6}	1.4×10^{-6}	-
E_n	V/cm.	6.4×10^4	5.8×10^4	6.6×10^4	6.5×10^4	1.1×10^6	1.4×10^6	1.2×10^6	1.2×10^6	-
V_1	V	0.25	0.23	0.25	0.25	2.17	2.47	2.25	2.37	-
V_T	V	1.27	1.25	1.27	1.27	3.59	3.89	3.67	3.79	-
V_{FB}	V	+6.00	+3.25	-2.80	-2.78	+6.00	+6.10	+6.80	+7.50	-
Q_n	C/cm. ²	-7.8×10^{-7}	-6.1×10^{-7}	-4.7×10^{-7}	-4.6×10^{-7}	$+5.7 \times 10^{-6}$	$+5.7 \times 10^{-6}$	$+8.0 \times 10^{-6}$	$+8.2 \times 10^{-6}$	-
μ_p หรือ μ_n	cm. ² (v-s)	279.0 (μ_n) 66.8 (μ_p)	318.9 (μ_n) 56.8 (μ_p)	68.5	68.5	939.8-1785.7	645.0-1225.5	865.6-1644.7	567.2-1077.6	1041-1326

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) แสดงผลการคำนวณสมบัติทางฟิสิกส์ค่าต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ ที่เตรียมได้และของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่ทำการทดลอง ณ. อุณหภูมิห้อง (300 K)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษารอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของรอยต่อที่อุณหภูมิห้องซึ่ง สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ทั้งที่มีสัดส่วนตามสโตยคิโอเมตตรี และที่มีสัดส่วนต่างไปจากสโตยคิโอเมตตรี ที่เตรียมแบบไดเรกชันแนลฟรีซซิง โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ เป็นจำนวนทั้งหมด 400 ตัวอย่าง และทำตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดอื่นซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐานสอบเทียบผลการทดลอง เป็นจำนวนทั้งหมด 150 ตัวอย่าง พบว่าประสบความสำเร็จ สำหรับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมจากเงื่อนไขทุกกรณีทั้งหมด 216 ตัวอย่าง สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดอื่นทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ทั้งนี้ปัญหาสำคัญที่พบในการทำตัวเก็บประจูดังนี้ได้แก่ การควบคุมความหนาของชั้นฉนวน ลักษณะรูปร่างของโลหะเหลว ความสะอาดของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ ความไม่เสถียรของตัวเก็บประจุ ซึ่งพบว่าเมื่อทิ้งไว้นานประมาณ 30 วัน ตัวเก็บประจุจะเกิดสภาวะพังทลายทันที ในการเคลือบชั้นฉนวนให้เรียบสม่ำเสมอตลอดทั่วผิวหน้าสารกึ่งตัวนำจะทำได้ยากมาก ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการต่ออนุกรมของค่าความต้านทานของปลายเข็มที่สัมผัสกับแผ่นทองแดง (ด้านรอยต่อแบบโหนดมิกระหว่างสารกึ่งตัวนำกับกาน้ำไฟฟ้า) และปลายเข็มที่สัมผัสกับชั้นโลหะเหลว ได้สารปลอมปนที่อยู่ในน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุทำให้ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในการเตรียมตัวเก็บประจุแบบ MIS ขึ้นมา ไม่ประสบผลตามลักษณะสมบัติกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS และทำให้ไม่ได้ลักษณะกราฟของตัวเก็บประจุแบบ MIS กรณีอุดมคติ แม้จะใช้ GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำก็ตาม ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงเทียบมาตรฐานความถูกต้องจากผลการทดลองของ GaAs ที่วัดได้กับผลที่ทราบค่าอยู่แล้วแทนการใช้กราฟของตัวเก็บประจุแบบ MIS กรณีอุดมคติ

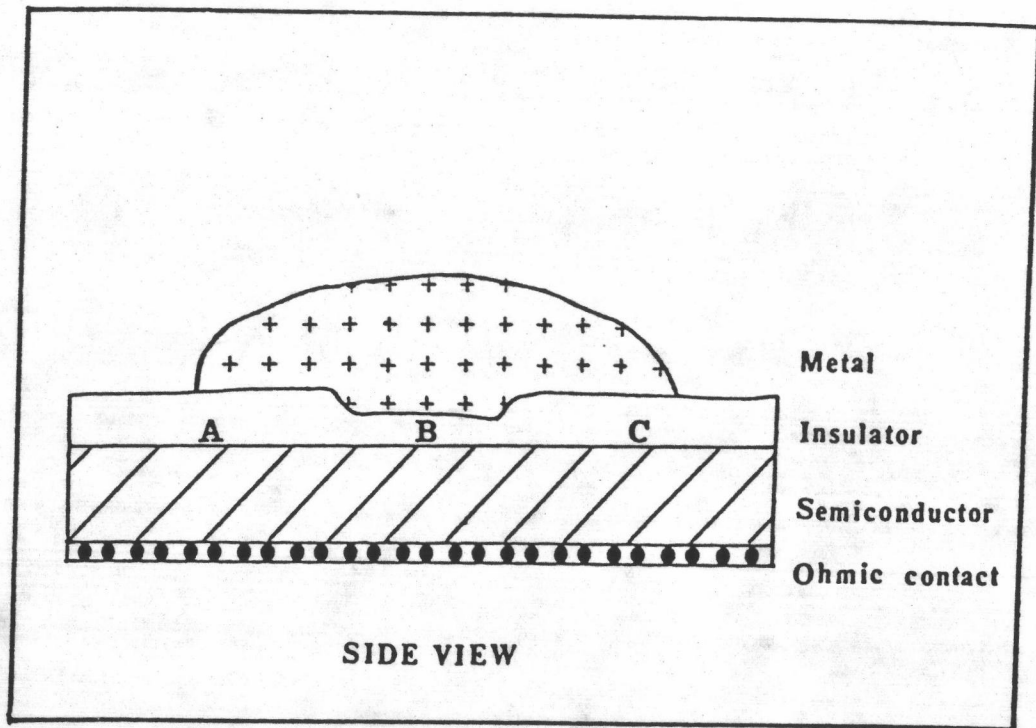
เมื่อพิจารณารูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-ความต่างศักย์ ที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการคำนวณค่าที่วัด ได้พบว่า

1. ถ้าความหนาของน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์มีค่าน้อยเกินไป ค่าความจุจะน้อยมีค่ามาก ซึ่งเมื่อไบอัสตรงจนถึง 20 V ค่าความจุยังไม่ถึงค่าคงที่จึงทำนายได้ว่าต้องไบอัสค่าสูงกว่านี้อีกจึงจะได้กราฟความจุคงที่ แต่จากการทดลองพบว่าเมื่อไบอัสสูงเกิน 20 V จะเกิดสภาวะพังทลายทันทีทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากมีประจุในฉนวนและประจุที่ถูกปล่อยออกมาจากกับดักประจุที่รอยต่อ กับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง เคลื่อนที่ลอดผ่านรอยต่อของตัวเก็บประจุแบบ MIS เป็นกระแสรั่วไหลออกสู่วงจรภายนอก

2. ถ้าความหนาของน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ มีค่ามากเกินไปค่าความจุจะน้อยมีค่าน้อยมาก

ทั้งข้อหนึ่ง และข้อสองจะสอดคล้องกับทฤษฎีคือ ถ้าพื้นที่ของโลหะมีขนาดเล็กมากและมีขนาดคงที่ความจุจะแปรผกผันกับ ขนาดความหนาของชั้นฉนวน ดังสมการที่ (6.49)

แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นกรณีที่ขนาดพื้นที่ของชั้นโลหะมีขนาดใหญ่เกินไปและสัมผัสอยู่บนชั้นฉนวนที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 7.21 จากสมการที่ (6.49) จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดพื้นที่ของโลหะทั้งหมดประกอบด้วยขนาดพื้นที่ของโลหะย่อยๆ บนชั้นฉนวนที่มีความหนาสม่ำเสมอ แต่ละบริเวณคือ บริเวณ A, B และ C แล้วเราไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่า ความจุของฉนวนตลอดทั่วพื้นที่ทั้งหมดของโลหะขึ้นกับขนาดพื้นที่ทั้งหมดของโลหะ หรือความหนาของชั้นฉนวนที่พื้นที่ทั้งหมดของโลหะสัมผัสอยู่อย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 7.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIS ในกรณีที่ขนาดพื้นที่ของชั้นโลหะที่อยู่บนชั้นฉนวนซึ่งมีความหนาไม่สม่ำเสมอมีขนาดใหญ่เกินไป

ถ้าความหนาชั้นฉนวนในรูปที่ 7.21 เป็นตามเงื่อนไขที่ว่า $d_A = d_C$ แต่ $d_B < d_A$ และ $d_B < d_C$ และให้บริเวณ A, B, C มีขนาดพื้นที่ของโลหะเท่า ๆ กัน จะเห็นได้ว่า ภาวการณ์ความจุฉนวนบริเวณ B จะมีค่ามากกว่าบริเวณ A และ C เนื่องจากความหนา d_B มีค่าน้อยกว่าความหนา d_A และ d_C ภาวการณ์นี้เป็นผลให้ความจุฉนวนทั้งหมดในบริเวณที่มีโลหะที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่สัมผัสอยู่ จะขึ้นกับขนาดความหนาของฉนวนที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่ขึ้นกับขนาดพื้นที่ของโลหะทั้งหมด

แต่ถ้าบริเวณ A, B, C มีขนาดพื้นที่ของโลหะไม่เท่ากัน การที่มีความจุของฉนวนบริเวณ A, B, C อาจมีค่าเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทั้งขนาดพื้นที่ของโลหะ และความหนาของฉนวนของแต่ละบริเวณ ซึ่งจะส่งผลให้ความจุฉนวนทั้งหมดในบริเวณที่มีโลหะที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่สัมพันธ์อยู่กับทั้งขนาดพื้นที่ทั้งหมดของโลหะขนาดใหญ่และความหนาของฉนวนที่ไม่สม่ำเสมอ

นอกจากนี้ถ้าบริเวณใดบริเวณหนึ่งไม่มีฉนวนเคลือบติดอยู่บริเวณนั้นจะกลายเป็นรอยต่อแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ แทนที่จะเป็นรอยต่อแบบ MIS กรณีนี้ ความจุของฉนวนที่ได้จะไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ที่เราต้องการนิยาม และไม่สามารถคาดได้ว่าความจุฉนวนที่วัดได้ ผิดพลาดไปจากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ เกิดเนื่องจาก ขนาดพื้นที่โลหะทั้งหมดที่สัมพันธ์อยู่กับฉนวนที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ หรือความหนาของฉนวนที่ไม่สม่ำเสมอ หรือความจุของรอยต่อแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีฉนวนเคลือบติดอยู่

สำหรับกรณีที่ เป็นผลึก ไม่สมบูรณ์ ถ้าพื้นที่ของโลหะมีขนาดใหญ่เกินไปตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะมีคุณภาพไม่ดี ค่าความจุที่วัดได้ในกรณีที่ช่วงกลีบกลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีอุดมคติ เนื่องมาจากผลของกับดักประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ที่มีมืออยู่ตรงบริเวณขอบของเกรนผลึกเดี่ยวแต่ละเกรน ตรงช่องว่าง ตรงทวิน และตรงรอยแยกขนาดเล็ก หรือขนาดใหญ่ ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 6.2.3

ดังนั้นจึงควรพยายามทำให้ได้ชั้นโลหะที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะรูปร่างแบบใดแบบหนึ่ง เช่น กลม สี่เหลี่ยม วงรี เป็นต้น สามารถสัมพันธ์อยู่กับผิวหน้าฉนวนได้ดี และสามารถทำได้หลาย ๆ ตำแหน่งซ้ำ ๆ กันโดยที่ผิวหน้าฉนวนไม่เสียหายขณะทำการวัด ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดได้แก่การใช้หลอดบรรจุก๊าซปรอทขนาดเล็ก (a small-size Mercury probe) [64] แล้วต่อสายไฟลงไปยังสารปรอท วิธีนี้จะทำให้ได้ลักษณะรูปร่างของโลหะแบบใดแบบหนึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายหลอดที่ใช้สัมพันธ์กับผิวฉนวน ทำให้ทราบขนาดพื้นที่ของโลหะ ได้ถูกต้องจากขนาดพื้นที่ของปลายหลอดที่ใช้สัมพันธ์กับผิวฉนวน สามารถกำหนดขนาดพื้นที่โลหะ ได้ตามต้องการด้วยการเลือกขนาดของปลายหลอดที่ใช้สัมพันธ์กับผิวฉนวน และสามารถทำซ้ำได้หลายจุดบนผิวหน้าฉนวนโดยที่ผิวหน้าฉนวนไม่เสียหาย

3. จากการวัดค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ทุกตัวอย่างพบว่าได้ค่าโดยประมาณ 999.99 $\text{M}\Omega$ จึงถือได้ว่าตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นทุกตัวมีค่าความต้านทานสูงมากสอดคล้องตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.1

4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ที่ได้จากการวัดนั้นพบว่าจะเลื่อนไปจากกรณีอุดมคติเพียงเล็กน้อย มีทั้งกรณีที่เลื่อนไปทางซ้าย และเลื่อนไปทางขวา ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก ประจุในฉนวนชนิดต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 6.4.2 ค่าเว็รกิ้งฟังก์ชันของโลหะกับ

สารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน ในหัวข้อที่ 6.4.1 และกับดักประจุที่รอยต่อ เราไม่สามารถกล่าวได้ชัดเจนว่าการเลื่อนของกราฟเกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง ทั้งนี้เพราะการสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIS ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีง่ายๆ แต่ควบคุมผลดังกล่าวได้ยากมากอีกทั้งเราไม่ทราบค่าเวริกฟังก์ชันของโลหะเหลว In-Hg, In-Ga และ Ga เลยเพียงแต่คาดเดาได้จากแนวโน้มของค่าเวริกฟังก์ชันของ In, Hg, Ga เท่านั้นซึ่งพบว่าค่าเวริกฟังก์ชันของโลหะเหลวเหล่านี้ควรมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากรูปกราฟและผลการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าจึงพบว่าค่าต่างๆ ที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกันมากสำหรับกรณีที่ใช้โลหะเหลวต่างชนิดกัน แม้จะทราบว่าผลการแอนเนลช่วยลดปริมาณกับดักประจุที่รอยต่อและประจุในฉนวน แต่ในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถนำเงื่อนไขมาใช้ได้เนื่องจากน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ จะเสื่อมสภาพทันทีถ้าได้รับความร้อนสูง (ประมาณ 80°C) สำหรับงานวิจัยนี้จึงแก้ไขอิทธิพลที่ทำให้ กราฟเลื่อนไปจากกรณีอุดมคติที่เกิดจากประจุเหล่านั้นด้วยการนำสารกึ่งตัวนำมาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสถานะปิดสนิทแทน เพื่อให้เกิดสารประกอบออกไซด์หรือสารประกอบไฮไดรด์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำก่อนนำมาเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ดังที่กล่าวมาแล้วว่า สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs อาจเกิดสารประกอบออกไซด์ชนิดใดชนิดหนึ่งเช่น $\text{Ga}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{As}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ และ GaAsO_4 เป็นต้นส่วนสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 เกิดสารประกอบชนิดใดเคลือบอยู่บนนั้น ยังไม่เคยมีรายงานมาก่อน จึงไม่อาจอธิบายได้ในที่นี้ แต่คาดว่าต้องมีสารประกอบเกิดขึ้นจริงเพราะสังเกตพบลักษณะผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ภายหลังจากอบขึ้นเหนียวที่เคลือบผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ GaAs ภายหลังจากการกราฟที่วัดได้พบว่ามีลักษณะต่างไปจากกรณีอุดมคติน้อยลงและเลื่อนไปจากกรณีกราฟเชิงอุดมคติน้อยลงด้วยดังเช่นกราฟของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่ผ่านการอบแล้วทั้งนี้เพราะสารประกอบออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะกั้นไม่ให้ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้เช่น Na^+ , K^+ เป็นต้นเคลื่อนที่ผ่านไปยังผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ หรือเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างฉนวนที่เป็นสารประกอบออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำได้ การทำเช่นนี้จะทำให้ได้ตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่มีเสถียรภาพคงทนถาวรดีขึ้นด้วย (สำหรับกรณีที่ไม่ได้อบสารกึ่งตัวนำเมื่อทิ้งไว้ประมาณหนึ่งเดือนตัวเก็บประจุแบบ MIS จะเกิดสถานะนั่งทลายทันที) เนื่องจากความคงทนถาวรของตัวเก็บประจุแบบ MIS เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำตรงที่ทำการรอยต่อกับชั้นฉนวนและสารเจือปนในฉนวน ที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิด ประจุในชั้นฉนวนและกับดักประจุที่รอยต่อ[63] ความคงทนถาวรนั้นนอกจากจะสังเกตได้จากการเกิดสถานะนั่งทลายแล้วยังสามารถสังเกตได้จาก การเลื่อนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ - ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ที่วัดภายหลังจากได้รับการฉายรังสี ส่วนสาเหตุอีกประการที่ทำให้เกิดกับดักประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำคือ จำนวนพันธะที่ไม่สมบูรณ์บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ทำให้เมื่อเคลือบชั้นฉนวนลงบนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำนั้นทำให้เกิดระหว่างฉนวนและสารกึ่งตัวนำจะเกิดไม่สมบูรณ์ปัญหาต่างๆ เหล่านี้จะลดน้อยลงถ้าใช้ขบวนการสร้างชั้นฉนวนที่ควบคุม ได้ดีถูกต้องแม่นยำ เช่น ขบวนการสปัตเตอริง (sputtering) ขบวนการระเหย (evaporation) ขบวนการเคลือบ

ชั้นฉนวนจากสารละลายด้วยไฟฟ้า (anodic oxidation) และการเคลื่อนชั้นฉนวนโดย
 ขบวนการพาดด้วยไอระเหยสารเคมี (CVD process) เป็นต้น แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาใช้
 ให้เหมาะสมกับชนิดของฉนวนและชนิดของสารกึ่งตัวนำด้วย สำหรับงานวิจัยนี้เราจำเป็นต้องสร้าง
 ชั้นฉนวนโดยวิธีการที่กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 7.5 เนื่องจากน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ เสื่อมสภาพ
 เมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 80°C สารประกอบกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ประกอบด้วยธาตุ Se และ In
 ซึ่งมีจุดเดือดต่ำ ดังนั้นที่ค่าพลังงานสูง ๆ หรือที่อุณหภูมิสูง ๆ ธาตุเหล่านี้จะหลุดออกมา หรือ
 ระเหยออกมาได้ง่าย ทำให้สัดส่วนของธาตุเหล่านี้ในสารประกอบกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ผิดไปจาก
 เงื่อนไขที่พิจารณา และเป็นสาเหตุสำคัญ ของการเกิดความไม่สมบูรณ์ที่บริเวณผิวหน้า
 ของสารกึ่งตัวนำด้วย

การสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIS ในงานวิจัยนี้ ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความสะอาด
 ของสถานที่ และขบวนการกัดผิวหน้าสารกึ่งตัวนำด้วยสารละลายเคมี ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดประจุ
 ในฉนวน และกับดักประจุที่รอยต่อ นอกจากนี้ในขบวนการกัดผิวหน้าสารกึ่งตัวนำสำหรับงานวิจัยนี้
 ต้องการให้ได้ลักษณะผิวหน้าเรียบเนียนมากเท่านั้น จึงใช้ระยะเวลาการกัดผิวหน้าน้อยมาก และ
 ใช้สารละลายเคมีเจือจางกว่า กรณีกัดผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้งานด้านอื่น ๆ เช่น
 การศึกษารอยต่อแบบโฮมมิก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่นำมาทำรอยต่อกับฉนวน
 จะยังคงมีความไม่สมบูรณ์ผลึกปรากฏให้เห็นอยู่บ้างเล็กน้อย แต่จะมีปริมาณน้อยกว่าก่อนกัดผิวหน้า
 ด้วยสารละลายเคมี และข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ การกัดผิวหน้าด้วยวิธีดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ
 7.1.8 ยากแก่การควบคุมให้การกัดผิวหน้าเป็นไปได้อย่างเรียบ สม่ำเสมอและการทำซ้ำ แล้ว
 ได้ผลที่ดีเหมือนเดิม วิธีการแก้ไขวิธีหนึ่งได้แก่ วิธีการกัดผิวหน้าสารกึ่งตัวนำด้วยสารละลายเคมี
 ทางไฟฟ้า (electrochemical etching) [62] เป็นต้น วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถควบคุม
 ปริมาณผิวหน้าที่ต้องการกัดออกไป บริเวณพื้นที่ที่ต้องการกัดออกไป ทำให้การกัดเป็นไปได้อย่าง
 เรียบสม่ำเสมอ และไม่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) ไหลซึมสะสม
 ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำด้วย [62] จึงช่วยลดปัญหาความสกปรก สารเจือปน เป็นผลทำให้ความกว้าง
 ของช่วงคลื่นที่ขึ้นสมมูลกับระยะความยาวเดอบาย (คือทำให้ $L_D \ll \lambda_{max}$) และค่าคงที่ของ
 ความหนาแน่นพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือทำให้
 สอดคล้องตามทฤษฎีการประมาณค่าตัวแปรเฉพาะในช่วงคลื่นสั้น และที่สำคัญคือ ช่วยลดปัญหา
 การเกิดสภาวะพังทลายในกรณีที่ช่วงกลับกลายเมื่อไบอัสกลับทางค่าสูง ๆ ที่เกิดเนื่องจาก
 ประจุในฉนวนที่เคลื่อนที่ได้ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 6.2.2.4 ดังนั้นจากการพิจารณา
 เหตุผลที่กล่าวมานี้ ทำให้สรุปได้แต่เพียงว่า กรานที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติเกิดเนื่องจาก
 ประจุในฉนวนชนิดต่าง ๆ ค่าเวอร์กฟังก์ชันของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน และ
 กับดักประจุที่รอยต่อ

5. จากการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโลหะด้วยกล้องเวอริเฟียร์ ไมโครสโคป พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโลหะบนตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.40 mm. (ตั้งพื้นพื้นที่ของโลหะมีค่าประมาณ $1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) และของโลหะบนตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.20 mm. (พื้นที่ของโลหะมีค่าประมาณ $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$) ซึ่งค่าที่วัดได้อาจผิดพลาดไปบ้าง เนื่องจากการทำขึ้นโลหะในงานวิจัยนี้ด้วยวิธีการหยดโลหะเหลว In-Hg, In-Ga, Ga ลงบนชั้นฉนวนน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ ไม่สามารถทำลักษณะรูปร่างกลมแบบมาตรฐานได้ค่าที่วัดได้จึงเป็นเพียงผลการประมาณเท่านั้น

6. เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสกลับทางแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ค่าสูง ๆ จะทำให้ ψ_p มีค่ามากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนหรือโฮล ในแถบวาเลนซ์ และพาหะข้างน้อยที่ถูกไอออนไนซ์แล้ว จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเคลื่อนที่ลอดผ่านชั้นฉนวนไปยังโลหะเกต เป็นกระแสรั่วไหลออกสู่วงจรรภายนอก ทำให้ความจุที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ถูกต้อง และถ้าเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นอีกจนเกิดสภาวะพังทลายค่าความจุที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ทันที

7. พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะพังทลายของตัวเก็บประจุแบบ MIS สำหรับงานวิจัยนี้คือ

7.1 ปลายเข็มที่ใช้สัมผัสกับชั้นโลหะเหลว ขณะวัดค่าความจุ กดแท่งทะลุชั้นฉนวนลงไปยังผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

7.2 ขณะหยอดชั้นโลหะเหลว อุปกรณ์ที่ใช้ทำให้มีน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ทะลุ

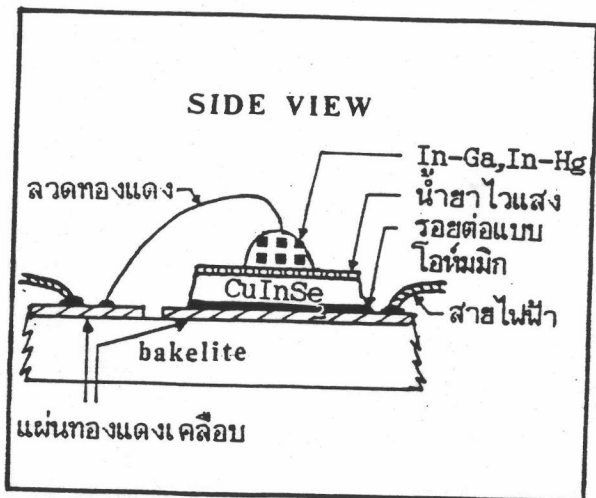
7.3 ความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสมีค่าสูงเกินกว่าที่ตัวเก็บประจุแบบ MIS เหล่านี้จะสามารถทนได้

7.4 ชั้นฉนวนบางมากเกินไป

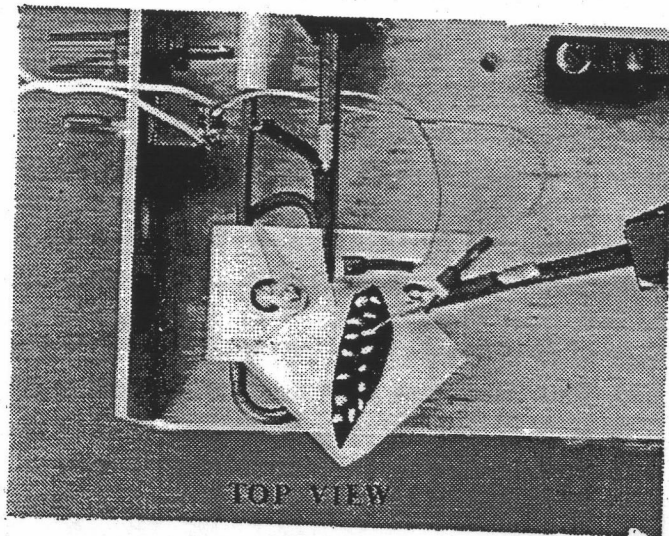
8. กรณีที่เกิดรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ ยึดออกจากกรณีช่วงกลับกลายในกรณีอุดมคติ ซึ่งเป็นผลทำให้ความชันของกราฟลดลง ลักษณะของกราฟนี้จะคล้ายกับลักษณะของกราฟกรณีที่ช่วงดัดโค้งชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติเมื่อ $\psi_p = 2 \psi_0$ ดังรูปที่ 6.11 ค. ในหัวข้อที่ 6.1.3 อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกับดักประจุที่รอยต่อ ดังที่อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 6.2.2.1 [55] หรือ เกิดจากกรณีที่ช่วงดัดโค้งชันกว้างมากกว่ากรณีปรกติ เมื่อ $\psi_p = 2 \psi_0$ ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 6.1.3 นอกจากนี้กับดักประจุที่รอยต่อ ยังมีอิทธิพลทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ กรณีช่วงชันนูนพาหะคงที่ค่าไบอัสตรงสูงมากด้วย [55]

9. ความต้านทานที่ต่อแบบอนุกรม ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ความต้านทานปลายเข็มที่สัมผัสกับแผ่นทองแดง (ด้านรอยต่อแบบโอห์มมิก ระหว่างสารกึ่งตัวนำกับภาวน้ำไฟฟ้า) ความต้านทานปลายเข็มที่สัมผัสกับชั้นโลหะเหลว จะมีผลทำให้ค่าความจุที่อ่านได้น้อยกว่าค่าที่ถูกต้อง ซึ่งจะสามารถลดปัญหานี้ได้ถ้าเปลี่ยนจาก การใช้ปลายเข็มสัมผัสเป็นสายลวดทองแดงเปลือยขนาดเล็กและสั้นมาก ๆ แทนการทำเข็มสัมผัสกับชั้นโลหะเหลว แล้วโยงมาเชื่อมบัคกรีติดบนแผ่นทองแดงข้างหนึ่ง ส่วนอีกข้างหนึ่ง

บนแผ่นทองแดง จะเป็นขั้วสัมผัสของแผ่นทองแดงกับด้านที่เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก ขดกวีสายไฟ ขนาดเล็กและสั้นมากกับขั้วทั้งสองของแผ่นทองแดง เพื่อเสียบต่อเข้ากับ ขั้วอินพุทของ เครื่องวัดค่าความจุ บุตัน 72 เอ ต่อไป ดังรูปที่ 7.22 แต่สำหรับงานวิจัยนี้เราใช้โลหะเหลว ดังนั้นจึงมิได้แก้ไขตามวิธีที่กล่าวมานี้ เนื่องจากโลหะเหลวสามารถไหลกลิ้งไปมาได้



ก.



ข.

รูปที่ 7.22 แสดงการเชื่อมขั้วสัมผัสของตัวเก็บประจุแบบ MIS เข้ากับแผ่นทองแดงด้วย ก. สายไฟขนาดเล็ก และสั้นมาก ข. ปลายเชื่อมโลหะ

10. ในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกถ้ามีชั้นฉนวนเคลือบติดอยู่ หรือมีสารเจือปนติดอยู่บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำก่อนป้ายกาวนำไฟฟ้า จะทำให้ได้ รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ใช้ได้กับความหนาแน่นของกระแสไม่สูงนัก กล่าวคือ ที่ความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสสูงถึงค่าหนึ่ง จะเกิดความต้านทานตกคร่อมตรงรอยต่อ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ ควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแสในช่วงความต่างศักย์เท่ากับ $\pm 9V$ สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และเท่ากับ $\pm 20V$ สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs และบริเวณแผ่นทองแดงที่ต้องการนำตัวเก็บประจุแบบ MIS ด้านที่ทำรอยต่อแบบโอห์มมิกมาประกอบติดด้วยกาวนำไฟฟ้า ไม่ควรมีสารเจือปนเคลือบอยู่ หรือมีชั้นออกไซด์บาง ๆ เคลือบด้วย เนื่องจากสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดความจุต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุแบบ MIS อิทธิพลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะทำให้ความจุที่วัด ได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ถูกต้อง ในกรณีอุดมคติ [52,55]

11. ในกรณีที่ มีความชื้นที่อาจเนื่องจากมีน้ำหรือไอน้ำซึมแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนซึ่งมักเกิดกับฉนวนที่เป็นสารประกอบออกไซด์ แต่สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีการนำเอาอบที่อุณหภูมิสูงหรือการกัดด้วยสารละลายเคมี [55] ความชื้นจะไม่มีผลต่อ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ในกรณีช่วงขุมขนาดและช่วงดินลิ้น แต่ทว่าเมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสกลับทาง

ถึงความต่างศักย์วิกฤติ (V_T) ความชื้นในฉนวนจะทำให้แรงไฟฟ้าสถิต ที่ยึดเหนี่ยวสารประกอบเคมีต่าง ๆ เช่น เกลือแกง (NaCl) เป็นต้น เข้าไว้ด้วยกันมีค่าน้อยพอที่ว่าสารประกอบเหล่านี้สามารถถูกไอออนไนซ์แยกออกเป็นไอออนบวก และไอออนลบ ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้เมื่อถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเกิดเป็นกระแสไหลตามผิวหน้าฉนวน (แต่ขบวนการที่เกิดขึ้น ยังไม่มีรายงานยืนยันอย่างชัดเจน) [55] จึงคล้ายกับเกิดแผ่นประจุข้างใต้โลหะเกตเพิ่มขึ้นมา เป็นผลทำให้ช่วงดิลลิชันกว้างมากขึ้น ความจุของช่วงดิลลิชันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความจุกรณในช่วงกลับกลาย ลดน้อยลงกว่า กรณียุคมคติ (C_{ox}) ดังนั้นความชื้นจึงกลายเป็นปัญหาของช่วงกลับกลายเท่านั้น ด้วยเหตุนี้การศึกษาตัวเก็บประจุแบบ MIS จึงควรมุ่งศึกษาในระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีต่ำกว่า 27°C ซึ่งจะมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50% เนื่องจากตามรายงานที่ผ่านมาพบว่าถ้าระบบมีอุณหภูมิสูงกว่า 27°C ความจุช่วงกลับกลาย จะมีค่าลดน้อยลงกว่ากรณียุคมคติ เพราะปัญหาของความชื้นในฉนวน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ เราไม่สามารถทราบได้ชัดเจนว่าความชื้นในฉนวน มีผลต่อความจุในช่วงกลับกลายหรือไม่ เนื่องจาก ระบบที่ทำการทดลองมีอุณหภูมิประมาณ $27-29^\circ\text{C}$

12. จากรูปกราฟที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS พบว่าสำหรับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะที่ปิดสนิท ก่อนนำมาเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์จะได้ลักษณะรูปกราฟคล้ายกรณียุคมคติ จะแตกต่างออกไปอย่างสังเกตเห็นได้ชัดเจนคือ ลักษณะการเลื่อนของกราฟเท่านั้น ส่วนสำหรับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ GaAs ที่ไม่ได้นำมาอบ ประมาณ 200 ตัวอย่าง นอกจากจะพบว่า มีรูปกราฟเลื่อนไปจากกรณียุคมคติแล้ว ยังมีลักษณะคล้ายเกิดการแผ่แสดงสมบัติของตัวเก็บประจุแบบ MIS สองรูปพร้อม ๆ กันด้วยดังแสดงในรูปที่ 7.16 (ล่าง) มีรายงาน [65] กล่าวว่าเมื่อฉายแสงแก่ตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ HgCdTe ที่มีฉนวนเป็นสารประกอบออกไซด์ (ซึ่งมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นน้อยกว่า 5000 \AA) ขณะเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ไบอัสตัวเก็บประจุ จะทำให้เกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกจากกับดักประจุในฉนวน (ที่อยู่เป็นแนวตามทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าภายในฉนวน) หรือออกจากกับดักประจุที่รอยต่อ แล้วเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เข้าไปสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้จะมีการสร้างพาหะข้างน้อยที่ถูก ไอออนไนซ์แล้วขึ้นมากมาจากรับกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำด้วย จึงทำให้เกิด ช่วงกลับกลายอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเมื่อค่าไบอัสสูงขึ้นอีก การรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮล จะเกิดขึ้นทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัส จึงทำให้ความกว้างช่วงดิลลิชันกว้างต่อไปได้อีกเล็กน้อย ความจุที่วัดได้ จึงมีค่าลดลงอีกเล็กน้อย แล้วจึงมีค่าคงที่อีกครั้งเมื่อค่าไบอัสสูงขึ้นอีก กราฟที่ได้ จึงเกิดค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง (V_{FB}) สองค่า ปัญหาข้อนี้ถือว่าเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมาก สำหรับทั้งกรณีที่ใช้โลหะ โปร่งแสงและโลหะทึบแสง แต่สามารถแก้ไขได้ถ้าแอนนูลชั้นฉนวนที่อุณหภูมิและบรรยากาศของแก๊สที่เหมาะสม และวัดในระบบที่ไม่มีการฉายแสง ดังนั้นปัญหาในกรณีที่พบในงานวิจัยนี้

อาจอธิบายได้ว่าชั้นน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ มีความไวต่อแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (คือมีความยาวคลื่นในช่วง $4000-7000 \text{ \AA}$) ปฏิกิริยาการนี้ ควรจะเกิดกับตัวอย่างทุกตัวที่เตรียมขึ้นมาแต่ในกรณีที่ไม่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่นำมาอบก่อนเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์นี้ เนื่องจากภายหลังอบ ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีสารประกอบออกไซด์ หรือสารประกอบไนไตรด์ หรือสารประกอบชนิดหนึ่งเคลือบอยู่ สารประกอบเหล่านี้จึงเปรียบเสมือนฉนวนชั้นบาง ๆ ที่ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุในฉนวน ที่ถูกสร้างขึ้นมาจาก ขบวนการปลดปล่อยประจุออกจากกับดักประจุในฉนวน ที่เป็นน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ ไม่ให้เข้ามาสะสมอยู่ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำร่วมกับพาหะข้างน้อยที่ถูกไอออไนซ์แล้วในบริเวณนี้ ช่วงกลับกลายจึงเกิดช้ากว่า กรณีสารกึ่งตัวนำที่ไม่ได้อบ ลักษณะกราฟที่ได้ จึงแตกต่างไปจากกรณีอุดมคติ เพียงมีการเลื่อนไปเท่านั้นที่เห็นได้ชัดเจนดังกล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุแบบ MIS ทั้งที่อบและไม่ได้อบ ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำก่อนนำมาเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ ต่างก็มีสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 7.5 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน GaAs แล้ว พบว่ากรณีที่ผ่านการอบ จะได้ผลการวัดและผลการคำนวณถูกต้องที่สุด

13. จากตารางที่ 7.5 เมื่อค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้เคียง ๆ ผิวรอยต่อ มีค่าประมาณ 10^{15} cm^{-3} , 10^{16} cm^{-3} และ 10^{18} cm^{-3} ความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นจะมีค่าเท่ากับ 1 เท่าของช่วงคลื่นสั้นที่กว้างมากที่สุด นั่นคือ L_{DP} หรือ $L_{DN} \ll W_{max}$ เนื่องจากมีรายงาน [54] กล่าวว่าไว้ว่า สำหรับสารกึ่งตัวนำ Si ชนิดที่มี SiO_2 เคลือบเป็นฉนวนชั้นบาง ๆ เมื่อค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้เคียง ๆ ผิวรอยต่อมีค่าประมาณ 10^{18} cm^{-3} ช่วงคลื่นสั้นที่กว้างมากที่สุดมีค่าประมาณ 5000 \AA ความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยกว่า 400 \AA จึงถือได้ว่า $L_D \ll W_{max}$ ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่า C_u (flat-band) มีค่ามากกว่าความจุของฉนวนมาก ๆ ค่าความจุรวม (C_{FB}) กรณีที่ค่าไบอัสไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง จะมีค่าเท่ากับความจุของฉนวน (C_u) (มีค่ามากที่สุด) ดังแสดงในรูปที่ 6.13 สำหรับงานวิจัยนี้จึงควรได้ค่า $C_{FB} = C_u = C_{max}$ ดังสมการที่ (6.64) และลักษณะของกราฟที่ค่าความต่างศักย์ที่วัดค่าความจุในช่วงช่วงมุมพาหะ (C_{max}) และช่วงกลับกลาย (C_{min}) ควรได้รูปกราฟเป็นเส้นตรงขนานแกนความต่างศักย์ไม่ควรเป็นเส้นโค้งดังกราฟที่คิดว่า มีประจุสะสมอยู่ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ (กรณีที่ $\psi_s = 0$) ในกรณีอุดมคติ ข้อสังเกตคือค่า C_{FB} ที่คำนวณได้สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับความจุของช่วงมุมพาหะ (C_{max}) การที่ค่า C_{FB} ไม่เท่ากับ C_{max} นี้ อธิบายได้ว่า เกิดเนื่องจากกราฟเลื่อนไปจากกรณีกราฟเชิงอุดมคติตามสาเหตุต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4 นั้นเอง

14. จากตารางที่ 7.5 และรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs และ CuInSe_2 (ที่เตรียมโดยใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 7.1.3) พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่วัดและคำนวณได้ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และไม่ว่าสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จะเตรียมโดยใช้

เงื่อนไขใด ค่าที่วัดและคำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กรณีใช้สัดส่วนของธาตุ In มากกว่า สัดส่วนตามสโตยคิโอเมตริ 0.3 % ความหนาแน่นของพาหะสุมิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้เคียง ๆ ผนวกรวมต่อมีค่าประมาณ 10^{15} cm^{-3} กล่าวคือ มีค่าลดลงจากกรณีสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมจากสัดส่วนของธาตุต่าง ๆ ตามสโตยคิโอเมตริ ส่วนกรณีใช้สัดส่วนของธาตุ Se และ Cu มากกว่าสัดส่วนตามสโตยคิโอเมตริ 0.3 % ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากัน ที่น่าสนใจคือ ความหนาแน่นของพาหะสุมิชนิดอินทรีนลิกของสารกึ่งตัวนำ (n_i) CuInSe_2 ทุกตัวอย่าง มีค่าเท่ากันหมด ทำนองเดียวกันของสารกึ่งตัวนำ GaAs ทุกตัวอย่างก็มีค่าเท่ากันหมด ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐาน และสอดคล้องกับรายงานที่เคยมีมาดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4 ค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอนหรือโฮลของสารกึ่งตัวนำทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับที่รายงานไว้ในตารางที่ 5.1 ในหัวข้อ 5.4 สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs พบว่า ค่าสภาพเคลื่อนได้ ที่คำนวณจากค่าความหนาแน่นของพาหะสุมิ และสภาพต้านทานในหน้าที่วัดได้ มีค่าผิดพลาดไปจากค่ามาตรฐานเท่ากับ 16.91 % - 34.99 % นั้น เกิดเนื่องจากสภาพเคลื่อนได้ที่คำนวณวิธีนี้ เป็นเพียงการประมาณโดยสมมุติว่า สภาพเคลื่อนได้ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของพาหะสุมิที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น มิได้พิจารณาเงื่อนไขอื่น ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.3

เมื่อนิยามจากรูปที่ 6.9 ในหัวข้อ 6.1.2 จะเห็นได้ว่าช่วงดิสลิชันที่กว้างมากที่สุดของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่มีความหนาแน่นของพาหะสุมิใกล้เคียง ๆ ผนวกรวมต่อประมาณ 10^{18} cm^{-3} จะมีค่าประมาณ $0.04 \mu\text{m}$. ขณะที่ผลจากการคำนวณในตารางที่ 7.5 มีค่าประมาณ $0.02 \mu\text{m}$. นั่นคือมีค่าผิดพลาดไปจากกรณีจากการนิยามคิดเท่ากับ 50% หรือกล่าวได้ว่า ช่วงดิสลิชันที่กว้างมากที่สุดของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่วัดได้ มีค่าน้อยกว่ากรณีอุดมคติ จึงแสดงให้เห็นว่าความจุในช่วงกลับกลายอย่างมาก (C_{min}) ที่วัดได้นี้ มีค่ามากกว่ากรณีอุดมคติ (เพราะว่าความจุช่วงดิสลิชันที่วัดได้มีค่ามากกว่ากรณีอุดมคติ) ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากอิทธิพลของแสงดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2.4.1 หรือ 6.2.4.2

เมื่อนิยามารายงานที่ผ่านมา [54] ความยาวเดอบายชนิดอินทรีนลิกของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าเท่ากับ $2250 \mu\text{m}$. ดังนั้น ผลการคำนวณความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นในตารางที่ 7.5 จะมีค่าน้อยกว่ามาก จึงแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปด้วยสารอสุมิมาก ๆ จะมีความยาวเดอบายน้อยลง

จากตารางที่ 7.5 สามารถสรุปดังนี้คือ จากค่า C_{max} , C_{min} ที่วัดได้จากการประมาณค่าตัวแปรในช่วงดิสลิชัน และจากการประมาณว่า $\psi = E_g$ ในช่วงกลับกลายอย่างมากสามารถคำนวณค่า $|N_A - N_D|$ ได้สอดคล้องกับค่าของสารที่ใช้สอบเทียบมาตรฐาน และตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันที่ผ่านขั้นตอนการประดิษฐ์เหมือนกัน ผลที่วัดและคำนวณได้

จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลทำให้สรุปได้ต่อไปว่า

$$W_{\max} \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{C_d}$$

$$W_{\max} \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{(N_A - N_D)^{1/2}}$$

$$L_{Dn} \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{(N_D)^{1/2}}$$

หรือ $L_{DP} \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{(N_A)^{1/2}}$

$$C_{FB} \text{ และ } C_d \text{ (flat-band) เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{L_{DP}}$$

หรือ $C_{FB} \text{ และ } C_d \text{ (flat band) เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{L_{Dn}}$

$$Q_n \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } q(N_A - N_D)^{1/2}$$

$$E_n \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } Q_n \text{ และเป็นปริมาณโดยตรงกับ } W_{\max}$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก

$$V_i \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } Q_n \text{ และความหนาของฉนวน}$$

และมีค่าเกือบคงที่ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน

$$V_T \text{ เป็นปริมาณตรงกับ } (N_A - N_D)^{1/2} \text{ และมีค่าใกล้เคียงกัน}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน

$$\mu_n \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{N_D}$$

หรือ $\mu_p \text{ เป็นปริมาณโดยตรงกับ } \frac{1}{N_A}$

และ Q_n ซึ่งเป็นความหนาแน่นประจุในชั้นกลับกลาย (ในช่วงความต่างศักย์

$V - V_T$) จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง ความหนาแน่นประจุที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำทั้งหมดกับ ความหนาแน่นประจุในช่วงดีพลีชัน ในกรณีที่ช่วงกลับกลายอย่างมาก ซึ่งพบว่า $Q_n > q(N_A - N_D)w$ นั่นคือความกว้างของชั้นกลับกลายมีค่าน้อยกว่าความกว้างช่วงดีพลีชันมาก ๆ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับ วิธีการเตรียมตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นเอง แบบโคเวเลนต์ชนิด พีวีซี โดยวิธีลดอุณหภูมิเตา ในแนวเฉียง 5 องศา กับแนวราบ และตัวเก็บประจุแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่ใช้เป็น สารสอบเทียบมาตรฐานข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้หาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เหล่านี้ โดยใช้ลำแสงอินฟราเรดผสมกับเนอร์เคลือบเป็นฉนวนชั้นบาง ๆ และใช้โลหะเหลว In-Hg, In-Ga และ Ga เป็นโลหะเกต แล้วนำมาวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุ-ความต่างศักย์ ด้วยความถี่สูงเท่ากับ 1 MHz โดยการใส่สมการปัวซองใน 1 มิติ จึงสามารถหาค่ารามิเตอร์ ต่าง ๆ ได้ในที่สุด บทต่อไปจะเป็นการสรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะที่ จะเป็นแนวทางนำไปใช้ปรับปรุงงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาทางด้านนี้สืบต่อไป