บทที่ 6

การทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

วัตถุประสงค์ของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ สำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลตอบสนองของการนำไฟฟ้าในขณะที่มีแสงตกกระทบสารตัวอย่าง โดยการวัดความเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน ที่ความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงที่พลังงานโฟตอนใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงานของผลึกสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อจะนำข้อมูลจากผลการทดลอง ไปอธิบายลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ นอกจากนี้ จากการทดลองในลักษณะดังกล่าวข้างต้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 11 ถึง 300 เคลวิน จะทำให้ได้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิอีกด้วย ในบทนี้ จะได้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างและเครื่องมือในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง และผลที่ได้จากการวัด

การเตรียมสารตัวอย่าง

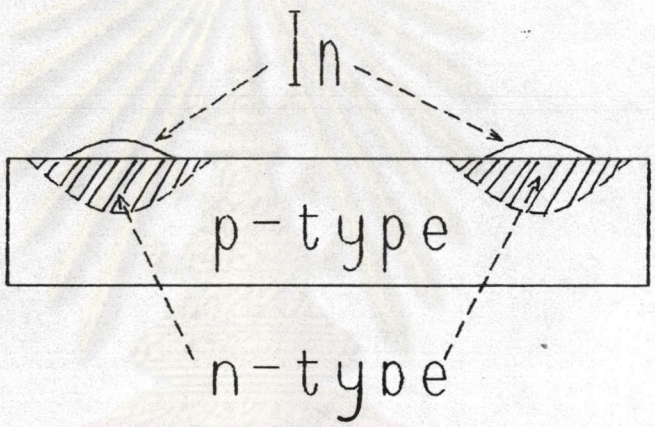
ผลึกสารตัวอย่าง $CuInSe_2$ ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารที่ได้จากการหลอมเหลว [26,27] โดยชิ่งธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Cu, In, และ Se ตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ บรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ สูบอากาศออกจนมีความดันต่ำกว่า 10^{-5} ทอรร์ จากนั้นหลอมปลายหลอดปิดให้สนิท และใส่หลอดแก้วควอทซ์ที่ใหญ่กว่าอีกชั้นหนึ่งเพื่อกันการระเบิดเวลาเตรียม นำไปหลอมในเตาไฟฟ้า จากนั้นลดอุณหภูมิของเตาลงอย่างช้า ๆ ด้วยเครื่องควบคุม จะได้แท่งสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ บรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ สารที่ได้เป็นผลึกเดี่ยวที่มีขนาดของผลึกใหญ่กว่า 10x10x5 ซม.^{3} จากการทดสอบโดยวิธีขั้วร้อน (hot probe) พบว่าเป็นสารชนิดพี

นำชิ้นสารที่ได้มาตัดเป็นแว่น หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดสารแบบลวด (string saw) ขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ละเอียดที่สุดจนได้ชิ้นสารที่มีผิวหน้าเรียบพอสมควร ทำการขัดเช่นนี้ทั้งสองข้าง จะได้ชิ้นสารที่มีความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นสารที่ได้มาทำความสะอาดด้วยเมธานอล (methanol) เทเมธานอลออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้งให้สะอาด เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน ก็พร้อมที่จะนำสารตัวอย่างไปสร้างรอยต่อพี-เอ็นได้

โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้จากการหลอมเหลว มักได้ผลึกสารตัวอย่างที่มีความต้านทานจำเพาะค่อนข้างต่ำ (~0.01-15 Ω-cm) [26,27] เมื่อสร้างรอยต่อแบบโอห์มิก (Ohmic contact) เพื่อวัดความต้านทานจะไม่สามารถสังเกตเห็นสภาพตอบสนองเชิงแสงได้ เนื่องจากสภาพความต้านทานของเนื้อสารต่ำ ทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อสารเมื่อป้อนความต่างศักย์ให้ชิ้นสารมีค่าน้อย เมื่อแสงตกกระทบชิ้นสารและกำเนิดคู่อิเลกตรอน-โฮลขึ้น สนามไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแยกคู่อิเลกตรอน-โฮลออกจากกันได้น้อย ทำให้เกิดกระแสจากแสงขึ้นน้อย จึงสังเกตสภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ยาก จึงต้องหาวิธีที่จะแยกคู่อิเลกตรอน-โฮลได้มากขึ้น วิธีที่ใช้ในการทดลองนี้คือ สร้างรอยต่อพี-เอ็นขึ้นบนชิ้นสาร

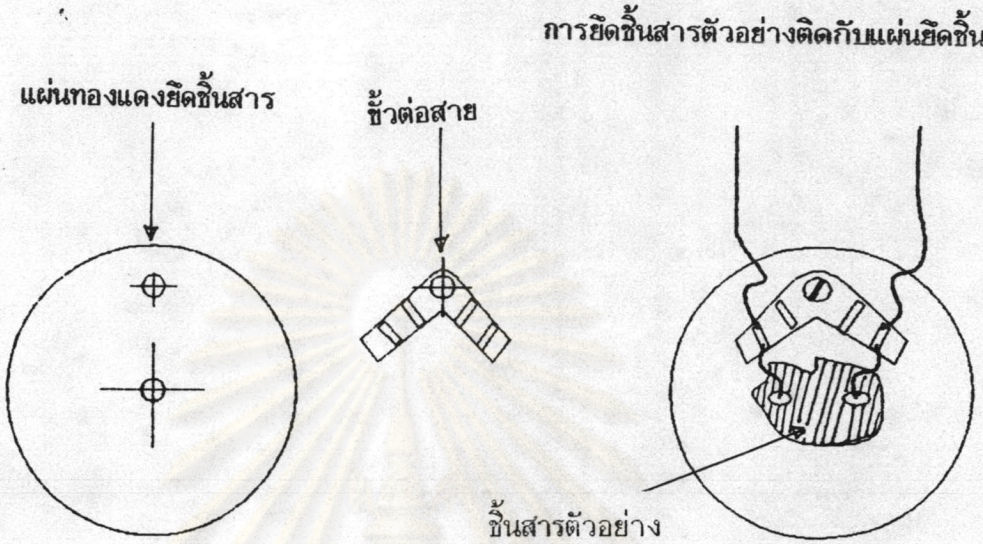
เราเลือกสร้างรอยต่อพี-เอ็นบนชิ้นสาร 2 จุด เมื่อป้อนความต่างศักย์คร่อมชิ้นสารแล้วรอยต่อข้างหนึ่งจะเป็นไบแอสกลับ อีกข้างจะเป็นไบแอสตรง ด้านไบแอสกลับจะมีสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อสูงมาก เพียงพอที่จะแยกคู่อิเลกตรอน-โฮลได้ ทำให้สามารถสังเกตเห็นผลตอบสนองต่อแสงได้ง่าย และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมาก การฉายแสงจะกระทำอีกด้านของรอยต่อ ซึ่งชิ้นสารตัวอย่างมีความหนาพอสมควร จึงถือได้ว่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่วัดได้เป็นผลของสารตัวอย่าง ไม่ใช่ผลของรอยต่อที่สร้างขึ้น

การสร้างรอยต่อพี-เอ็นจะกระทำโดยติดชิ้นอินเดียมชิ้นเล็ก ๆ ลงบนผิวหน้าของชิ้นสารตัวอย่างโดยการกด แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้อินเดียมแพร่เข้าไปในชิ้นสาร และเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น หลังจากการให้ความร้อนแล้วชิ้นอินเดียมบนผิวสารจะมีลักษณะเรียบ มน และเป็นเงา[27] จากนั้นนำชิ้นสารที่ได้มาต่อสายโดยใช้ลวดทองแดงขนาดเล็กวางบนอินเดียมที่เกาะติดชิ้นสารอยู่ แล้วใช้อินเดียมชิ้นเล็ก ๆ อีกชิ้นกดให้ลวดทองแดงติดกับชิ้นสาร การสร้างรอยต่อนี้จะสร้างประมาณ 4 ถึง 5 จุด แล้วแต่ขนาดของชิ้นสาร ภาพที่ 6.1 แสดงลักษณะของรอยต่อที่สร้างได้บนชิ้นสาร



ภาพที่ 6.1 แสดงรอยต่อพี-เอ็นที่เตรียมได้บนชิ้นสารตัวอย่าง

นำชิ้นสารที่ได้สร้างรอยต่อแล้วไปติดตั้งบนที่ยึดชิ้นสาร ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยต่อสายจากชิ้นสารเข้ากับขั้วต่อบนที่ยึดชิ้นสาร (sample holder) ที่ยึดชิ้นสารเป็นแผ่นทองแดงหนา 0.5 มิลลิเมตร ตัดเป็นจานกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.25 เซนติเมตร เจาะรู ขนาด 1 มิลลิเมตรไว้ตรงกลาง มีขั้วต่อสายซึ่งทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดหน้าเดียว ตัดเป็นรูปตัวแอล (L) ขนาดความยาวข้างละประมาณ 1 เซนติเมตร แต่ละข้างมีแถบทอง-แดงหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตรข้างละ 2 แถบ ใช้เป็นจุดบัดกรีขั้วต่อของชิ้นสาร ยึดติดกับแผ่นทองแดงด้วยน็อตขนาดเล็ก ขัดแต่งและทำความสะอาดก่อนติดชิ้นสารด้วยครีมซิลิโคนเพื่อนำความร้อน บัดกรีเส้นลวดทองแดงที่ต่อกับชิ้นสารเข้ากับแถบทองแดงบนที่ยึดชิ้นสารนี้ และแถบทองแดงดังกล่าวยังต่อกับสายต่อออกมาจากเครื่องลดอุณหภูมิ เพื่อต่อกับวงจรวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ภาพที่ 6.2 แสดงที่ยึดชิ้นสาร และขั้วต่อสาย

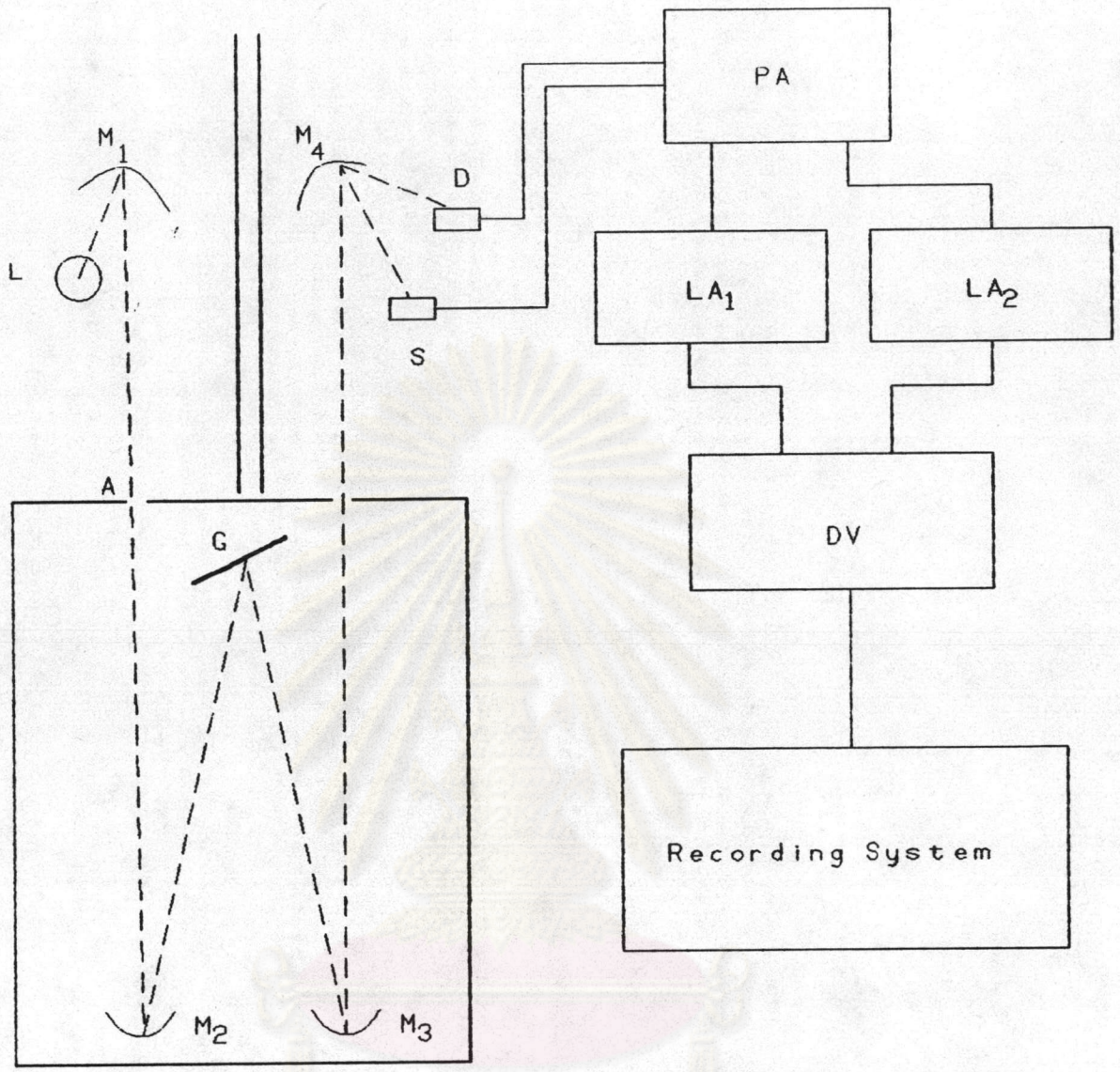


ภาพที่ 6.2 แสดงภาพที่ยึดชิ้นสาร, ขั้วต่อสาย, และการติดชิ้นสารตัวอย่าง เพื่อการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

<u>อุปกรณ์สำหรับวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง</u>

ในการทดลองนี้ได้จัดเครื่องมือเป็นระบบ เพื่อวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ดังภาพที่ 6.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 6.3 แสดงระบบที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงในการวิจัยนี้

ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยว ในที่นี้ ใช้เครื่องสเปคโตรมิเตอร์ SPEX ซึ่งเป็นเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ที่ใช้เกรติง (grating) เป็นตัวกระจายแสง มีแหล่งกำเนิดแสง L เป็นหลอดไฟแบบทังสเตน-ฮาโลเจน (tungsten-halogen lamp) ขนาด 250 วัตต์

2. เครื่องตัดแสง (light chopper) เป็นตัวตัดแสงให้ออกไปเป็นจังหวะ ขณะเดียวกันก็ส่งสัญญาณแจ้งให้เครื่องขยายสัญญาณแบบลอกอิน (lock-in ampliflier) รู้ถึงจังหวะการตัดแสงด้วย

3. เครื่องลดอุณหภูมิ (cryogenic pump) ของ Air Products ซึ่งทำงานด้วยฮีเลียมเหลวในระบบปิด เพื่อลดและควบคุมอุณหภูมิของชิ้นสารเพื่อให้อยู่ในช่วง 11 ถึง 300 เคลวิน

4. หัววัดแสงแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile) เพื่อวัดความเข้มของแสง

5. เครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น (pre-amplifier) เพื่อขยายสัญญาณที่ออกมาจากชิ้นสารตัวอย่าง และจากหัววัดแสง

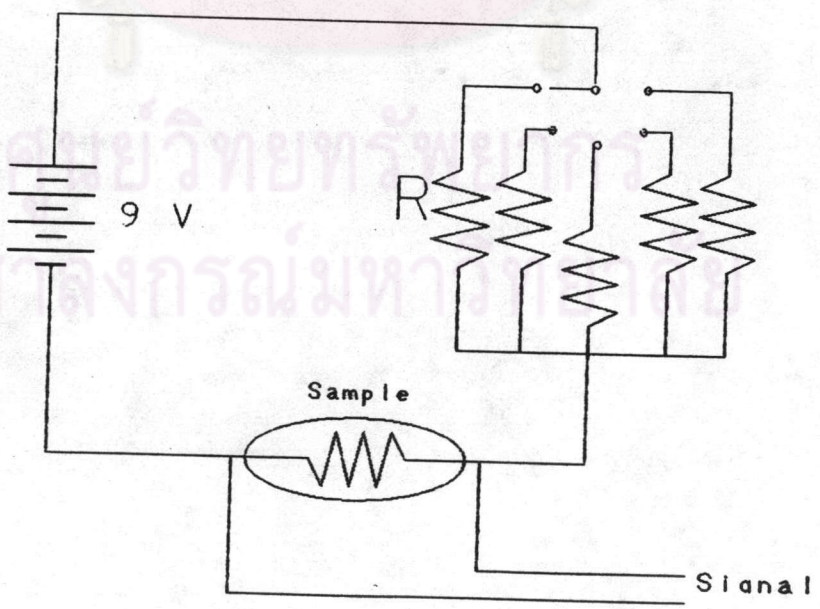
6. เครื่องขยายสัญญาณแบบลอกอิน เพื่อวัดขนาดของสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น โดยจะวัดเฉพาะสัญญาณที่มีจังหวะสอดคล้องกับเครื่องตัดแสงเพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

7. เครื่องหารสัญญาณ เป็นตัวหารสัญญาณจากสารตัวอย่าง ด้วยสัญญาณจากหัววัดแสงแบบเทอร์โมไพล์ เพื่อลดผลจากลักษณะส่ของแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่อง two-channel-amplifier/devider PAR Model 188

8. ระบบเก็บข้อมูล อันประกอบด้วย เครื่องแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (analog-to-digital converter) และเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แบบแอปเปิลทู

แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง L (หลอดไฟทังสเตน-ฮาโลเจน) จะถูกสะท้อนด้วยกระจก M_1 เพื่อรวมแสงและจัดให้ผ่านช่อง (slit) A เพื่อให้มีความเข้มแสงสูงสุด จากนั้นจะสะท้อนโดยกระจก M_2 จากภายในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จนตกลงบนเกรติง G และแสงจะเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เมื่อสะท้อนจากเกรติง และไปสะท้อนที่กระจก M_3 ออกมาที่ช่องทางออกเป็นแสงความยาวคลื่นเดียว เกรติงในเครื่องสเปกโตร-มิเตอร์นี้สามารถหมุนให้ทำมุมต่าง ๆ ได้ เพื่อให้ได้แสงความยาวคลื่นเดียวที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน

แสงความยาวคลื่นเดียวที่ออกมาจะถูกจัดโดยกระจก M_4 ซึ่งจะแบ่งแสงเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งถูกปรับให้ตกลงบนชิ้นสารตัวอย่าง S ซึ่งได้ต่อวงจรสำหรับวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงไว้แล้วดังภาพที่ 6.4 อีกส่วนหนึ่งถูกจัดให้ตกลงบนหัววัดแสงแบบเทอร์โมไพล์ D เพื่อวัดความเข้มของแสงขณะนั้น สัญญาณที่ได้จากสารตัวอย่าง และจากหัววัดแสงจะนำไปผ่านเครื่องขยายสัญญาณชั้นต้น PA เพื่อให้มีความแรงพอที่จะป้อนเข้าเครื่องเครื่องขยายสัญญาณแบบลอกอิน LA_1 และ LA_2 ต่อไป



ภาพที่ 6.4 แสดงวงจรที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

สัญญาณที่ออกจากเครื่องเครื่องขยายสัญญาณแบบลอกอินทั้งสอง จะนำไปหารกัน เพื่อตัดผลจากลักษณะส่อของหลอดไฟ ด้วยเครื่องหาร DV สัญญาณที่ได้นำไปเก็บไว้ในระบบเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ร่วมกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แบบแอปเปิลทู การทำงานของระบบเก็บข้อมูลควบคุมโดยชุดคำสั่งที่เขียนขึ้นอย่างเหมาะสม (ดูภาคผนวก ข. และ ค.) ข้อได้เปรียบของระบบนี้คือ สามารถนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ได้ง่าย และรวดเร็วขึ้น รวมทั้งสามารถนำมาดูเฉพาะบางส่วนที่สนใจเป็นพิเศษได้ เพราะเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูง ขึ้นกับชุดคำสั่งที่ใช้ นอกจากนี้เรายังสามารถใช้เครื่องบันทึกแบบกราฟได้ในกรณีที่ต้องการ

<u>การทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง และผลการทดลอง</u>

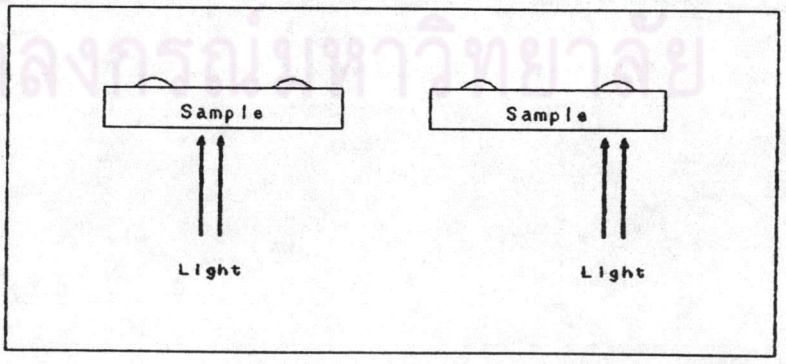
ในการวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 11, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, และ 300 เคลวิน ตามลำดับ โดยการปรับอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ การวัดแต่ละครั้งจะเก็บค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทุก ๆ 4 อังสตรอม แต่ละจุดเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 200 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ เก็บเป็นข้อมูลดิบไว้ในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เมื่อการวัดเสร็จสิ้นลงก็เก็บข้อมูลทั้งหมดไว้ในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อคำนวณต่อไป กระบวนการดังกล่าวต้องอาศัยเวลาระยะหนึ่ง ดังนั้นขณะทำการทดลองไม่ควรเดินเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เร็วเกิน 4 อังสตรอมต่อวินาที หรือเก็บข้อมูล 1 ครั้งต่อวินาที

เมื่อเริ่มทำการวัดแต่ละชุด ต้องทำการสูบอากาศออกจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จนมีความดันต่ำกว่า 10^{-3} ทอรร์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้มีละอองน้ำเกาะที่หน้าต่างที่แสงส่องผ่านขณะทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้ผิดพลาดไป เมื่อได้ความดันต่ำเพียงพอ

แล้วก็เริ่มเดินเครื่องลดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 70 เคลวินก็ปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระบบกับปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากระบบสามารถรักษาสุญญากาศไว้ได้ด้วยตนเอง ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนต่ำสุดเท่าที่จะเป็นได้ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองจากอุณหภูมิต่ำขึ้นมาที่อุณหภูมิสูง ขณะที่อุณหภูมิของชิ้นสารเปลี่ยนแปลงไป พบว่าความต้านทานเปลี่ยนไปด้วย จึงต้องพยายามปรับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชิ้นสารให้อยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1.2 โวลท์ เพื่อหลีกเลี่ยงผลเนื่องจากความต่างศักย์เปลี่ยนไป

ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ตั้งแต่ความยาวคลื่น 11000 อังสตรอม จนถึง 15000 อังสตรอม และเก็บข้อมูลทุก ๆ 4 อังสตรอม ได้ข้อมูลทั้งหมด 1001 จุด ต่อการวัด 1 ชุดที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

จากการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดังกล่าว พบว่าในสเปกตรัมของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ได้ มีส่วนที่สูงขึ้นมาเป็นยอดแหลม (peak) เห็นได้อย่างชัดเจน จำนวน 2 แห่ง และยังพบว่าทั้งสองยอดมีการเลื่อนตำแหน่งไปกับอุณหภูมิ ในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงนี้ได้กระทำ 2 กรณี ได้แก่ เมื่อฉายแสงตกระหว่างรอยต่อทั้งสอง และเมื่อฉายแสงตกลงบริเวณด้านหลังรอยต่อข้างหนึ่ง ดังภาพที่ 6.5 ก. และ ข. ได้ผลที่แตกต่างกันในรูปร่างของสเปกตรัม ดังภาพที่ 6.6 ก., ข., ค., และ ง. โดยทั้งสองกรณีมีตำแหน่งของแต่ละยอดใกล้เคียงกัน แต่ความเข้มสัมพัทธ์ไม่เท่ากัน



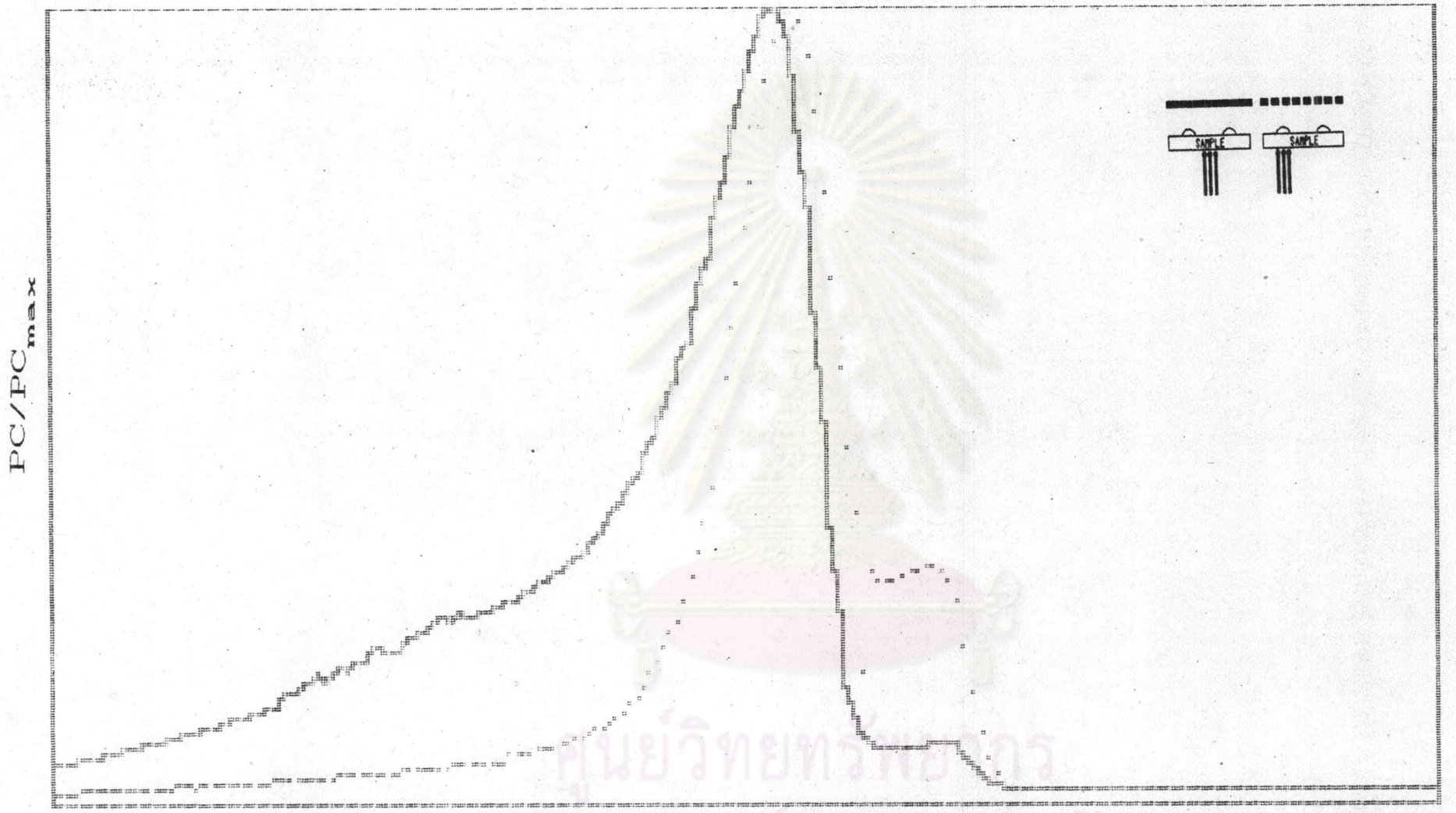
ภาพที่ 6.5 แสดงตำแหน่งที่แสงตกกระทบชิ้นสารด้านหลัง
ก. ระหว่างรอยต่อ และ ข. ตรงกับรอยต่อข้างหนึ่ง

นอกจากนั้นยังพบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดทั้งสอง กับอุณหภูมิ โดยพบว่าตำแหน่งของยอดทั้งสองลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 6.7 ซึ่งได้สรุปภาพสเปกตรัมของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อให้เห็นการเลื่อนของจุดยอดทั้งสองสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และได้สรุปตำแหน่งของยอดทั้งสองกับอุณหภูมิ ดังตารางที่ 6.1

อุณหภูมิ	ตำแหน่งของยอด (eV)	
(K)	ยอดที่ 1	ยอดที่ 2
11	0.983	1.022
25	0.983	1.018
50	0.982	1.012
75	0.979	1.011
100	0.975	1.010
125	0.970	1.008
150	0.967	1.007
175	0.963	1.007
200	0.957	1.006
225	0.948	1.005
250	0.942	1.004
275	0.938	1.003
300	0.931	1.002

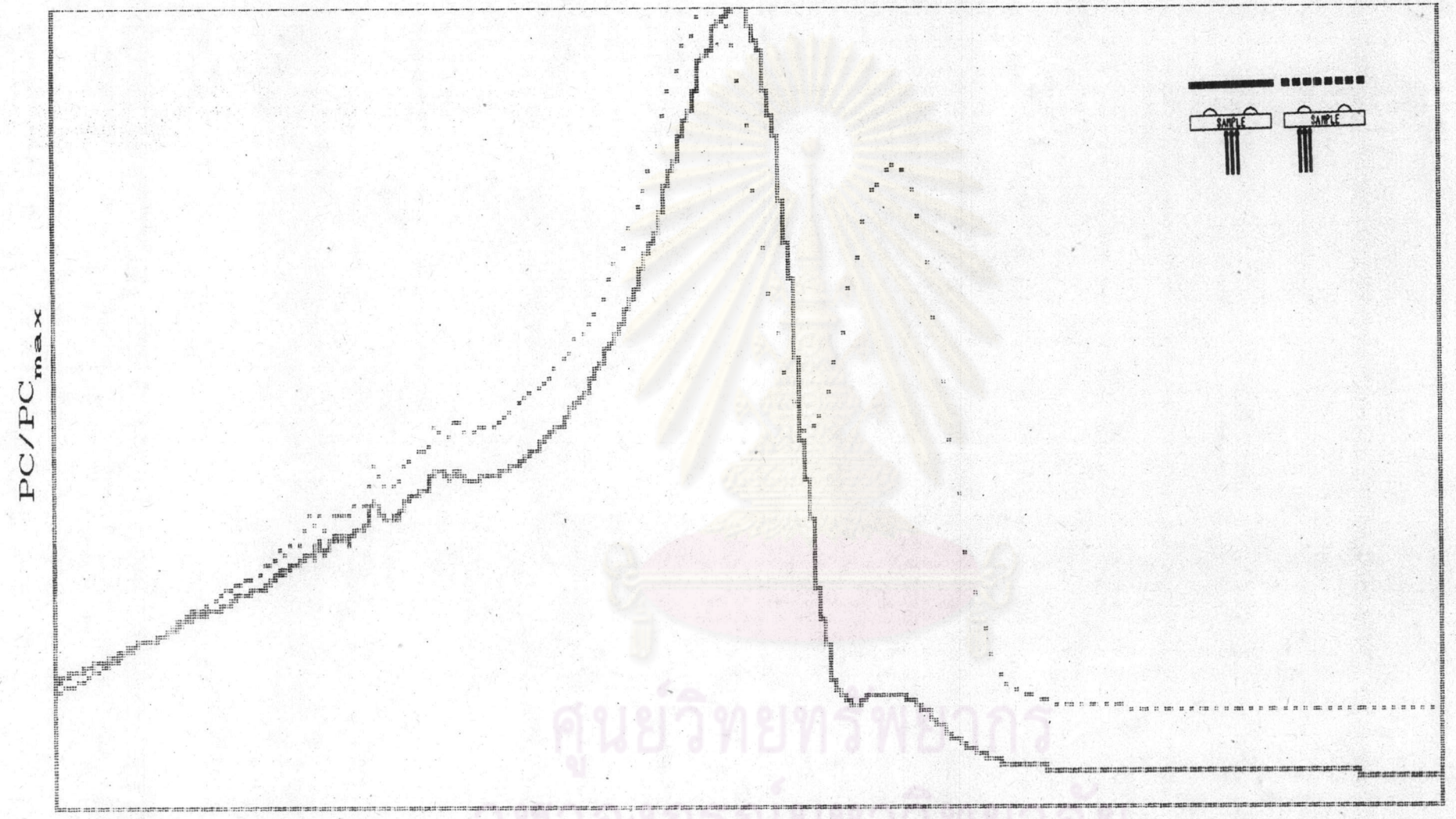
ตารางที่ 6.1 แสดงตำแหน่งของยอดทั้งสองที่อุณภูมิต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



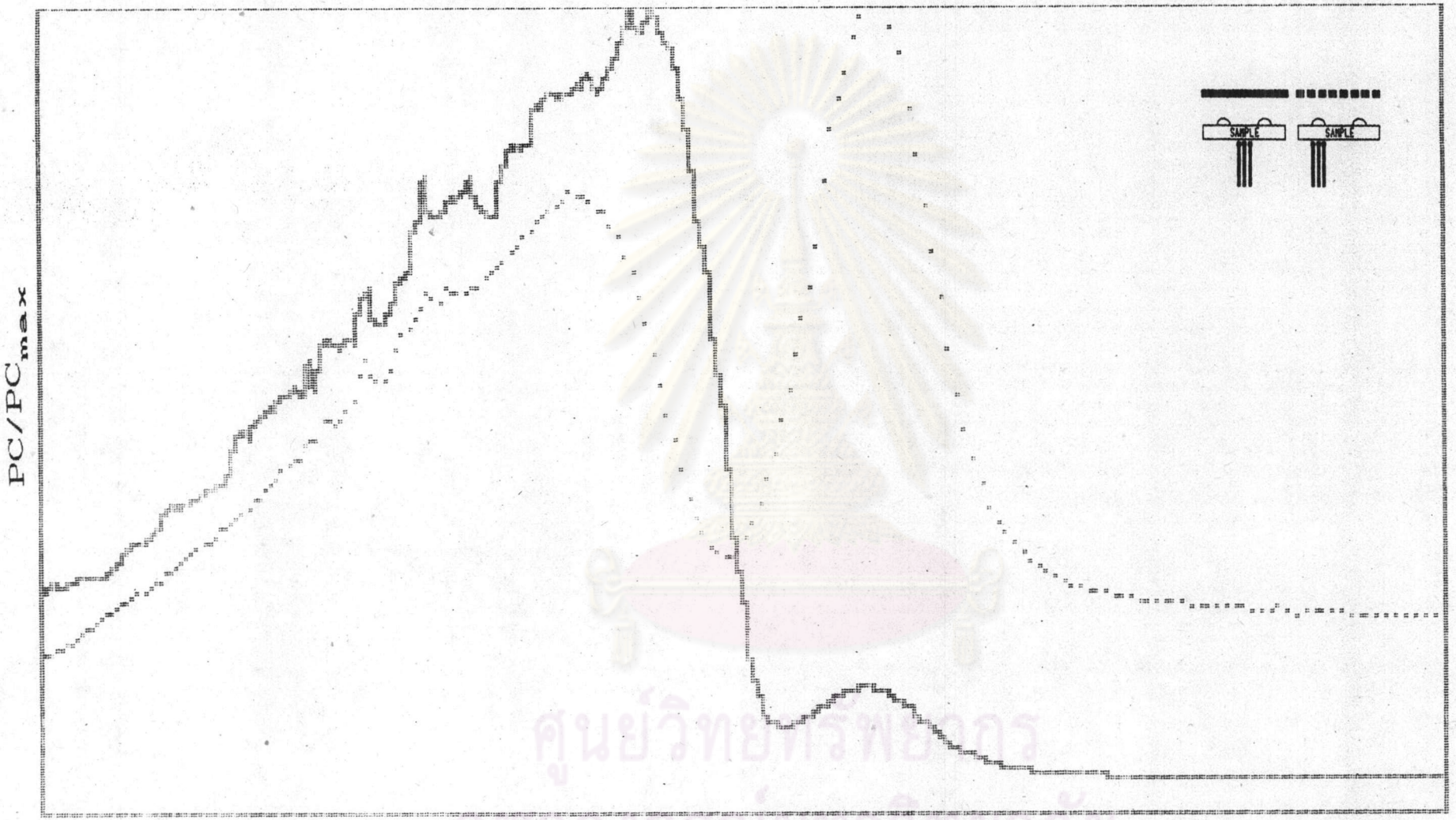
ภาพที่ 6.6 ก. แสดงสเปกตรัมของผลตอบสนองเชิงแสงของสาร $CuInSe_2$ ที่ 11 เคลวิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

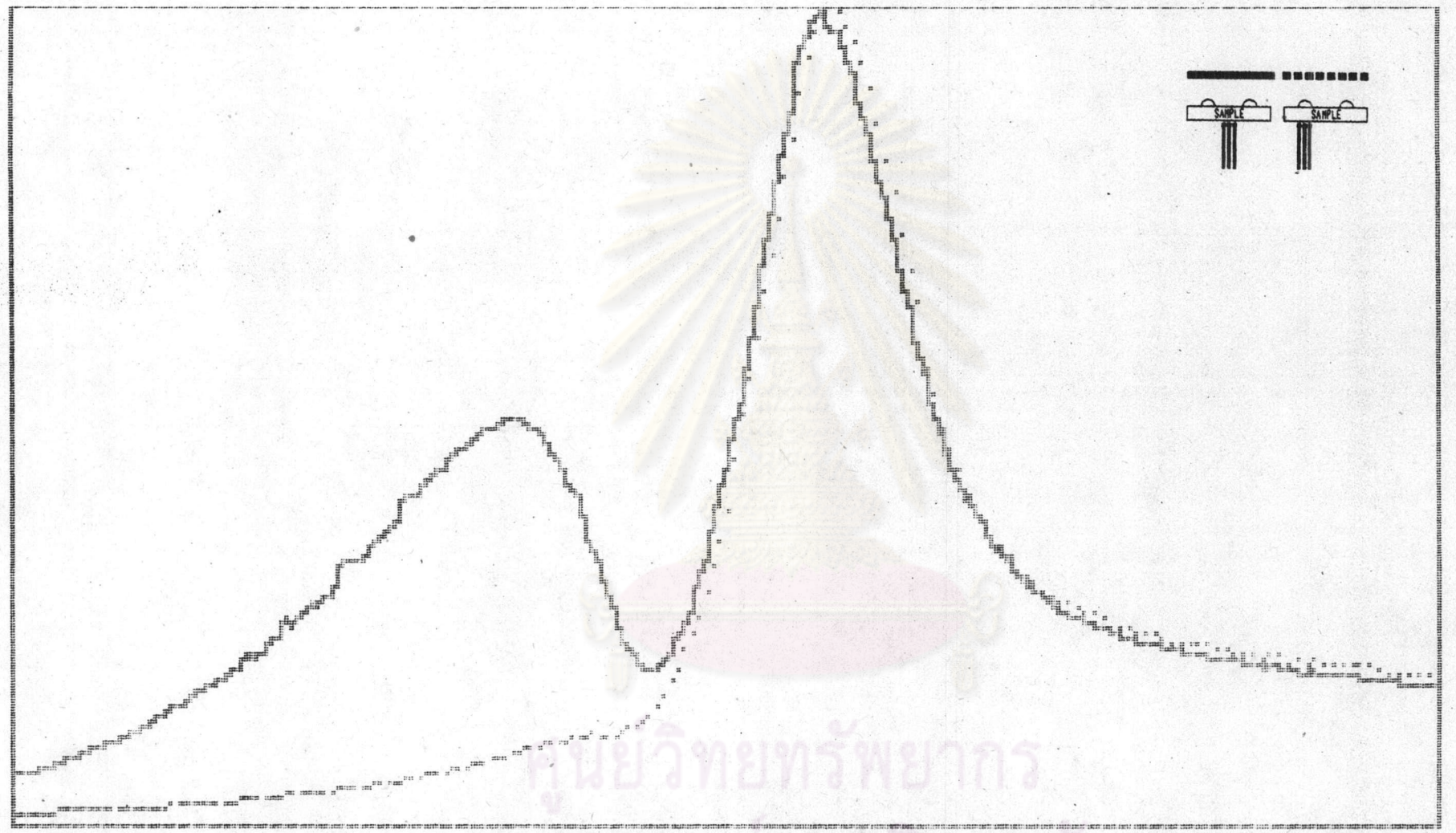


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 6.6 ข. แสดงสเปกตรัมของผลตอบสนองเชิงแสงของสาร $CuInSe_2$ ที่ 100 เคลวิน

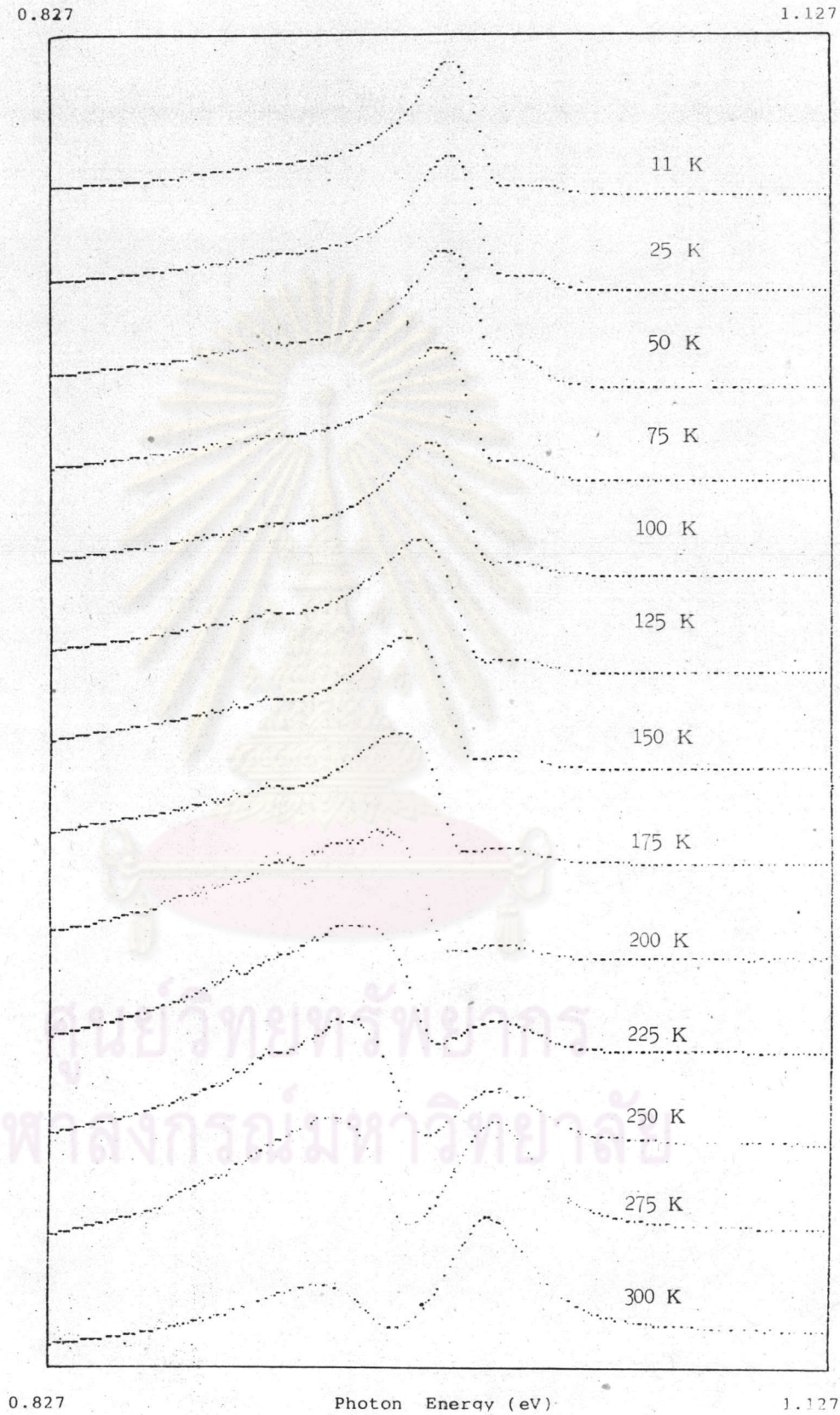


ภาพที่ 6.6 ค. แสดงสเปกตรัมของผลตอบสนองเชิงแสงของสาร $CuInSe_2$ ที่ 200 เคลวิน



ภาพที่ 6.6 ง. แสดงสเปกตรัมของผลตอบสนองเชิงแสงของสาร $CuInSe_2$
ที่ 300 เคลวิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 6.7 สรุปภาพผลตอบสนองเชิงแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 11 ถึง 300 เคลวิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย