บทที่ 5

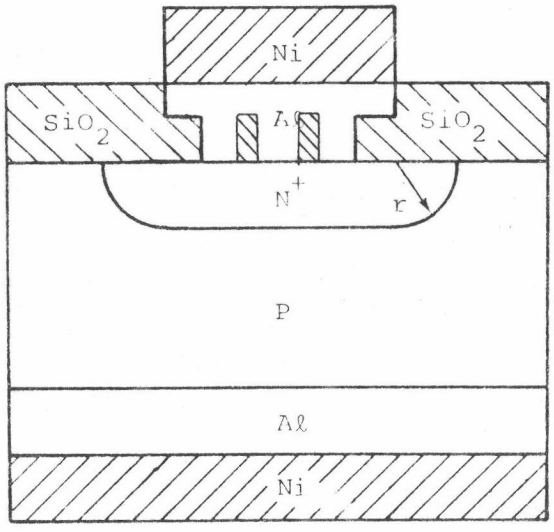
การวัดและผลการทดลอง

การวัดและผลการทดลองของไดโอดที่ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นนี้จะแสดงผลทางด้านฟิสิกส์และทางด้านไฟฟ้า ซึ่งผลทางด้านฟิสิกส์แสดงให้เห็นถึงวิธีการเลือกวัสดุที่จะนำมาประดิษฐ์ไดโอดและแนวทางในการสร้างไดโอดเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าที่ดีขึ้นตรงกับความต้องการ

ในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้านั้นได้นำเอาไดโอดที่มีขายในท้องตลาดมาทดสอบเปรียบเทียบด้วย

5.1 ขอบข่ายและคุณลักษณะที่ต้องการ

ในการประดิษฐ์ไดโอดโดยมีโครงสร้างที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าโลหะที่ใช้ทำขั้วต่อ (ohmic contact) คือ อลูมิเนียม แต่อลูมิเนียมนี้ไม่สามารถที่จะบัดกรีด้วยตะกั่วได้ง่าย ดังนั้นจึงนำนิเกิล (Ni) มาฉาบอีกทีด้วยวิธีการของการชุบ (Ni - electroless) เพื่อให้สามารถบัดกรีด้วยตะกั่วง่ายขึ้น



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของไดโอดหัวต่อพี-เอ็น แบบชัน

ในการทดลองประดิษฐ์ไดโอดนี้ ได้ใช้แว่นผลึกซิลิกอนชนิดพี เป็นแว่นผลึก ที่มีความ เข้ม-ข้น 1.8×10^{15} อะตอม/ลูกบาศก์ เซนติ เมตร จากนั้นได้ทำการแพร่ซึมสารฟอสฟอรัสลงไปบนแว่นผลึกโดยให้มีความ เข้มข้นสูง (10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์ เซนติ เมตร เพื่อให้ได้หัวต่อแบบชัน (one-side step junction) ซึ่งการแพร่ซึมสารฟอสฟอรัสนี้ได้ใช้วิธีการแพร่ซึมสาร เจือปน และ drive-in เพื่อให้การแพร่ซึมของสารชนิดเอ็นซึมลงไปในเนื้อแว่นผลึกมากๆ (โดยปกติมากกว่า 25 ไมโครเมตร สำหรับไดโอดกำลัง) การแพร่ซึมสาร เจือปนที่ลึกๆ จะได้ส่วนโค้งที่บริเวณปลอดพาหะมาก เป็นเหตุให้สนามไฟฟ้าบริเวณส่วนโค้งจางลงซึ่งเท่ากับว่าการพังทะลุจะเกิดที่แรงดันพังทะลุสูงขึ้น จากการคำนวณโดยอาศัยความ เข้มข้นของพาหะดังกล่าวและได้ทำการแพร่ซึมสาร เจือปนลงไปได้ลึกประมาณ 3.52 ไมโครเมตร จะได้แรงดันพังทะลุที่จ่ายให้กับไดโอดอยู่ในช่วง 80-120 โวลท์ และกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าประมาณ 2.3×10^{-12} แอมแปร์ ดังนั้นไดโอดที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นจึงมีคุณลักษณะที่ต้องการทั่วๆ ไปดังนี้

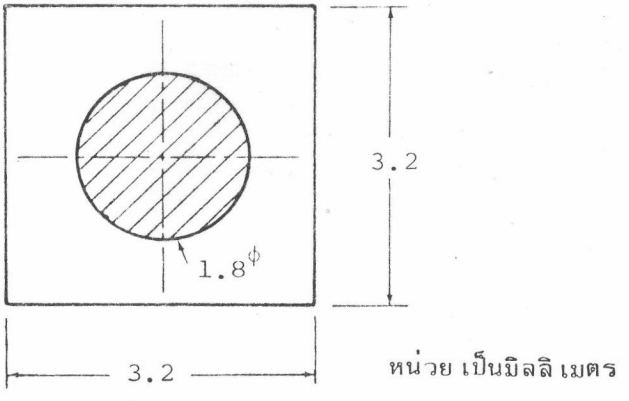
5.1.1 ด้านหน้าและด้านหลังฉาบด้วยอลูมิเนียม ด้วยวิธี Evaporation โดยให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 3000 อังสตรอม

5.1.2 ความลึกของชั้นแพร่ซึมอยู่ในช่วง 3 ± 1 ไมโครเมตร

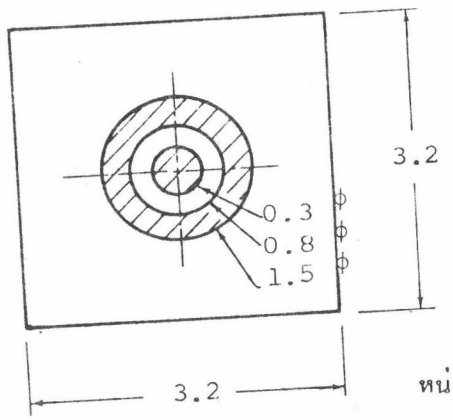
5.1.3 ความหนาของแว่นผลึก 230 ± 20 ไมโครเมตร

5.1.4 ส่วนโค้งของชั้นแพร่ซึมจะต้องเป็นแบบ cylindrical หรือแบบ spherical

5.1.5 ขนาดของหน้ากากเป็นไปดังรูปที่ 5.2 เพื่อให้ทนกระแสตามกำหนด (current rating) ได้ถึง 3 แอมแปร์



รูปที่ 5.2 แสดงขนาดของหน้ากากที่ใช้ในการเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการแพร่ซึมสารฟอสฟอรัส ในขั้นตอน predeposition



รูปที่ 5.3 แสดงขนาดของหน้ากากที่ใช้เปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการฉาบอลูมิเนียม

5.2 การทดสอบ

การทดสอบไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ได้แบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ การทดสอบทางด้านฟิสิกส์ และการทดสอบทางด้านไฟฟ้า

5.2.1 การทดสอบทางด้านฟิสิกส์

5.2.1.1 การทดสอบความไม่สมบูรณ์ของแว่นผลึกซิลิกอน

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กล้องขยาย
2. ถ้วยตวงสาร เคมี
3. ถ้วยผสมสาร เคมี
4. ถาดวางแว่นผลึกสำหรับจุ่มลงในสาร เคมี

ข) สารละลาย (Dash Etch Solution)

1. HF (48 %) 1 ส่วน
2. CH_3COOH 10 ส่วน
3. HNO_3 (70 %) 3 ส่วน

ค) ชิ้นทดสอบ

1. แว่นผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะ เหมือนกับแว่นผลึกที่จะนำไปประดิษฐ์ไดโอด

ง) วิธีการ

1. ทำความสะอาดผิวหน้าแว่นผลึกโดยจะต้องไม่มีคราบไขมันติดอยู่
2. นำแว่นผลึกใส่ถาด
3. จุ่มแว่นผลึกลงในสารละลายประมาณ 15 นาที
4. นำแว่นผลึกล้างให้สะอาดและเป่าให้แห้ง
5. นำแว่นผลึกไปนับจำนวนจุดบกพร่องบนผิวหน้าของแว่นผลึก โดยดูจากกล้องขยายต่อหน่วยพื้นที่

จ) ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเมื่อมองด้วยกล้องไมโครสโคปจะ เห็นแว่นผลึกที่ใช้ประดิษฐ์ไดโอดมีจุดบกพร่องอยู่ประมาณ 10 จุดต่อ ซม.^{2} ถ้าพื้นที่ของการใช้ทำหัวต่อพี-เอ็น มาก โอกาสที่จะพบจุดบกพร่องบริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะมีมาก ทำให้ไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้นมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และแรงดันพังทะลุต่ำ

5.2.1.2 การทดสอบการทำ Mesa Pattern

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. น้ำยาไวแสง 1 ชุด
2. ถ้วยตรงน้ำยาเคมี

3. ถ้วยผสมน้ำยาเคมี

4. Scanning Microscope JSM-T20 ของ JEOL (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ)

5. เครื่องกัดแว่นผลึกซิลิกอน

ข) สารละลาย

1. HF 50 % 70 มิลลิลิตร

2. HNO_3 70 % 10 มิลลิลิตร

3. CH_3COOH 99.7 % 30 มิลลิลิตร

ค) ชิ้นทดสอบ

1. แว่นผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเหมือนกับแว่นผลึกที่จะนำไปประดิษฐ์ไดโอด

2. ผิวของแว่นผลึกซิลิกอนถูกปกคลุมด้วยซิลิกอนไดออกไซด์หนา 5500 อังสตรอม

ง) วิธีการ

1. ใช้หน้ากากดังรูปที่ 5.2 ถ่ายแบบและทำการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ออกจนได้แบบที่กำหนดเอาไว้

2. นำแว่นผลึกซิลิกอนจุ่มลงในสารละลายประมาณ 15 นาที

3. ทำการล้างแว่นผลึกให้สะอาดและเป่าให้แห้งด้วย N_2

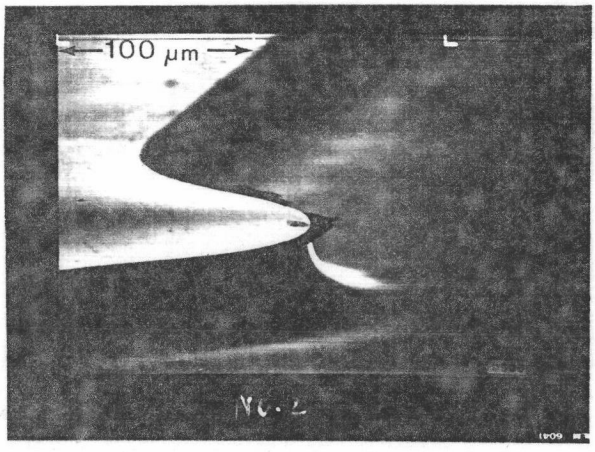
4. นำแว่นผลึกไปทำการกัดและตัดเพื่อการทดสอบ

5. นำแว่นผลึกไปดูด้วยกล้อง scanning microscope

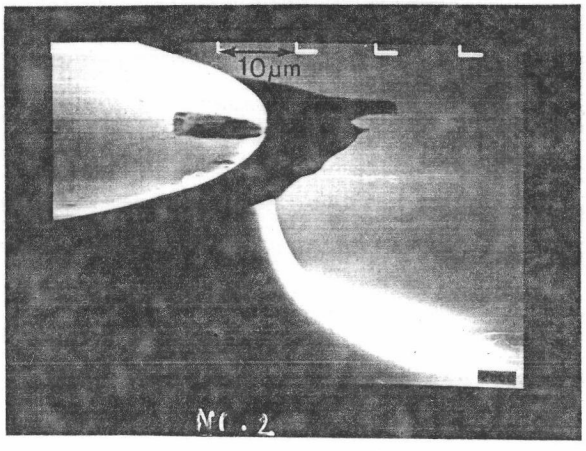
จ) ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าสารละลายที่ใช้สามารถกัดเนื้อซิลิกอนได้เร็วกว่าเนื้อของซิลิกอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 3-10 ไมโครเมตร/วินาที ต่อ 20 อังสตรอม/วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการกัดทำ mesa pattern ได้ผลดีตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 ดังนั้นจึง

อาจนำเอาสารละลายนี้ไปทำการกัดขอบของหัวต่อบริเวณที่เป็นส่วนโค้งออก เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับไปเกิดที่บริเวณตรงกลาง ซึ่งจะได้แรงดันพังทะลูที่สูงขึ้น แต่จากการทดลอง เนื่องจากบริเวณหัวต่ออยู่ใกล้กับผิวมาก (ประมาณ 3 ไมโครเมตร) ทั้งยังใช้แว่นผลึกแบบหยาบจึงทำให้บริเวณหัวต่อถูกกัดไม่เรียบสม่ำเสมอทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ป้องกันบริเวณหัวต่อไม่สม่ำเสมอไปด้วย จึงทำให้ผลของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นและแรงดันพังทะลูมีค่าต่ำลง ซึ่งมีผลจากบริเวณนี้แทน



รูปที่ 5.4 ภาพถ่าย Si และ SiO_2 ที่ถูกสารเคมีกัดออกเพื่อทำ mesa pattern



รูปที่ 5.5 ภาพถ่าย Si และ SiO_2 (mesa pattern) ที่ถูกขยายขึ้นโดยใช้กล้องขยาย scanning microscope

5.2.1.3 การทดสอบความต้านทานของน้ำ DI

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. มัลติมิเตอร์
2. กระบอกวัดความต้านทานน้ำรูปทรงกระบอก แผ่นโลหะเป็นรูปวงแหวน 2 วง วางห่างกัน 1 เซนติเมตร

ข) ชิ้นทดสอบ

1. น้ำ DI

ค) วิธีการ

1. นำน้ำ DI ใส่ในกระบอกวัดความต้านทาน
2. นำมัลติมิเตอร์วัดความต้านทานของน้ำ
3. ความต้านทานที่ได้จะมีหน่วยเป็น โอห์ม-ซม.

ง) ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่า ความต้านทานจำเพาะของน้ำ DI ที่ใช้ในการประดิษฐ์ไดโอดอยู่ในช่วงระหว่าง 1-2 เมกกาโอห์ม เซนติเมตร เพื่อที่จะทำไดโอดให้มีกระแสรั่วไหลน้อยที่สุด ดังนั้นน้ำ DI ที่ใช้จะมีค่าความต้านทานสูงกว่า 10 เมกกา-โอห์ม-เซนติเมตร ด้วยเหตุนี้ไดโอดที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นจึงมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมาก 1 มิลลิแอมแปร์ และทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปลูกขึ้นมีคุณภาพไม่ดี เท่ากับการใช้น้ำ DI ที่มีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10 เมกกาโอห์ม-เซนติเมตร

5.2.2 การทดสอบทางด้านไฟฟ้า

5.2.2.1 การทดสอบคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. มัลติมิเตอร์
2. เครื่องวัดค่าประจุ (Boonton)

3. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง

4. เครื่องกัดตัดแว่นผลึก

5. ค้ำแร้งและตะกั่วบัดกรี

6. Curve Tracer (Leader รุ่น LTC-905)

ข) ชิ้นทดสอบ

1. แว่นผลึกที่ผ่านการแพร่ซึมโดยให้ได้ความลึกประมาณ 3.5 ไมโครเมตร

2. ฉาบแว่นผลึกด้วยอลูมิเนียมหนาประมาณ 5500 อังสตรอม

3. เลือกไดโอดกำลังด้วย curve tracer

ค) วิธีการ

1. ตัดแว่นผลึกและตัดตามรอยที่ได้กำหนดไว้ จะได้ไดโอดเป็นตัวๆ

2. ใช้ curve tracer คัดเลือกไดโอดกำลังที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นโดยให้มีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับน้อยที่สุด

3. นำไดโอดที่ได้ไปติดด้วยการบัดกรีดังรูปที่ 5.6

4. วัดค่าประจุตัวถ้ง ทรานซิสเตอร์ เปล่าๆ ก่อน

5. นำไดโอดดังรูปที่ 5.6ไปทำการวัดและทดสอบคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ ดังตัวอย่างรูปที่ 5.7

6. [illegible]ึกค่าประจุกับแรงดันย้อนกลับ

ง) วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ (N_B) จากสมการที่ 2.23 คิดความจุที่บริเวณปลอดพาหะในหน่วยพื้นที่

$$\frac{d(A/C_j)^2}{dV} = \frac{2}{q\varepsilon_S N_B}$$

$$N_B = \frac{2}{q\varepsilon_S} \cdot \frac{dV}{d(\frac{C_j}{A})^{-2}} \cdot (10^{-12} \cdot 100)^2$$

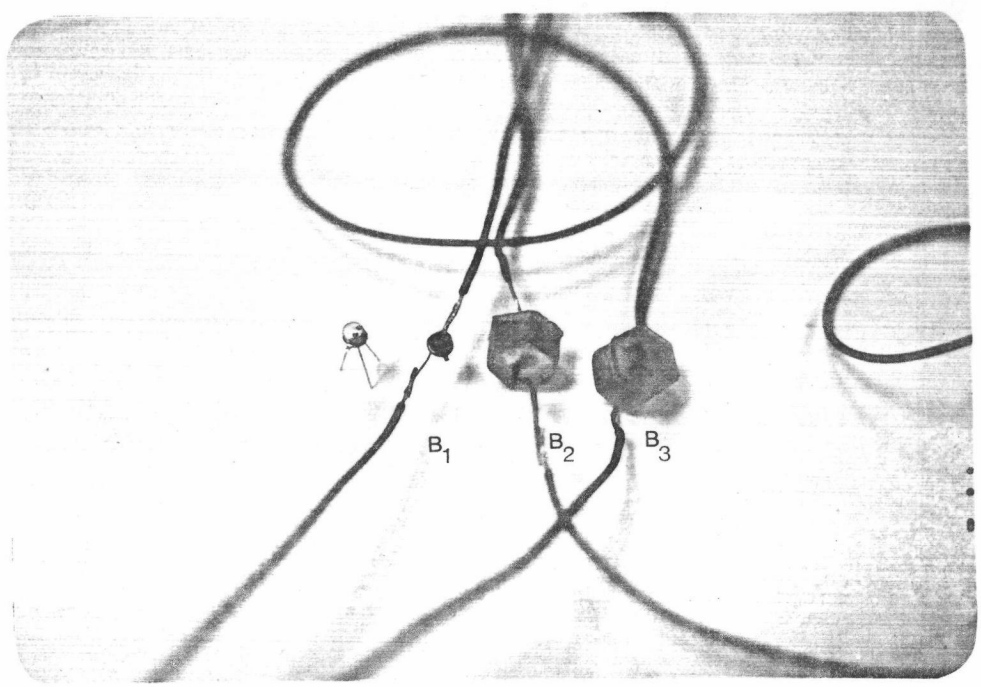
$$N_B = \frac{2(10^{-10})^2}{1.60219\times10^{-19}\times11.8\times8.85\times10^{-14}} \cdot \frac{dV}{d(\frac{C_j}{A})^{-2}}$$

$$N_B = 1.195\times 10^{11} \cdot \frac{dV}{d(\frac{C_j}{A})^{-2}}$$

ตัวอย่างจากตารางที่ 5.3 ค่าของ B_1 ช่องระหว่าง 1 ถึง 1.5 โวลท์, $dV = 0.5$ V, $d(\frac{C_j}{A})^{-2} = 3.923 \times 10^{-5}$

$$N_B = 1.195 \times 10^{11} \times \frac{0.5}{3.923 \times 10^{-5}}$$

$$= 1.5 \times 10^{15} \text{ อะตอม / ลูกบาศก์เซนติเมตร } \#$$



รูปที่ 5.6 แสดงไดโอดที่เตรียมไว้สำหรับการวัดคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ

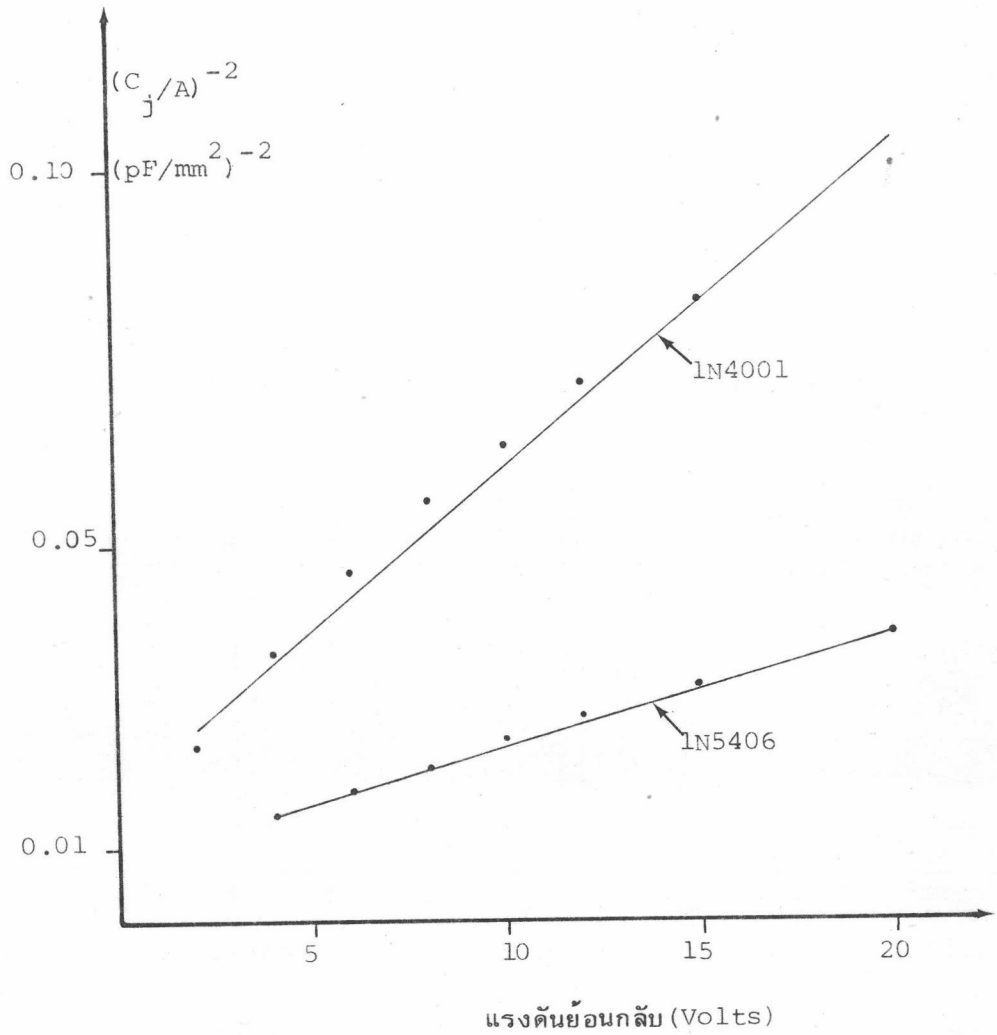
รูปที่ 5.7 แสดงเครื่องมือที่นำมาทดสอบคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ

จ) ผลการทดสอบ

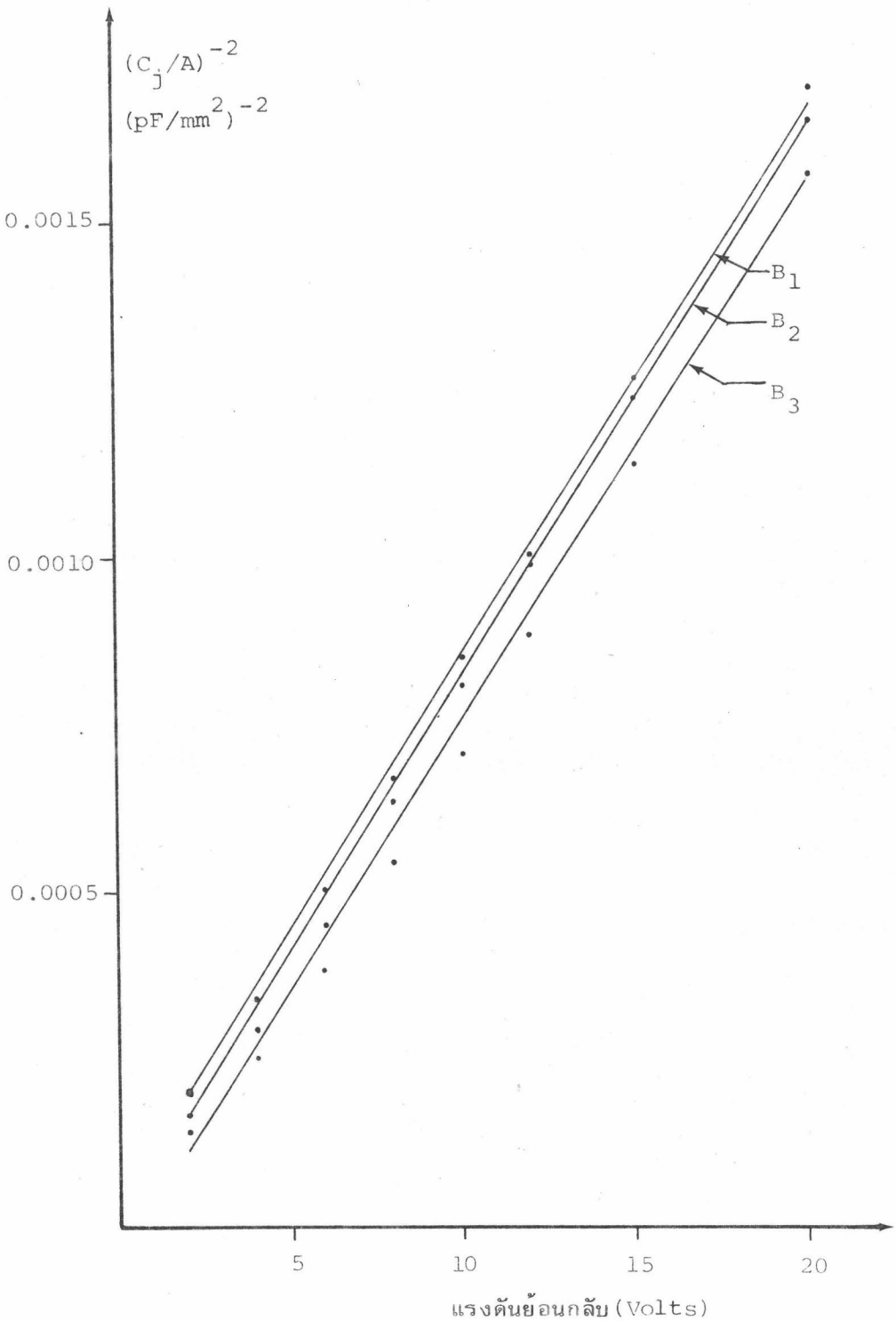
เนื่องจากไดโอดที่ได้เตรียมขึ้นได้ติดอยู่บนตัวถังของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจึงทดสอบค่าประจุของตัวถังทรานซิสเตอร์ได้เท่ากับ 0.77 พิโคฟารัด (stay capacitance) ที่แรงดัน - 15 โวลท์ จากนั้นจึงนำไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นและไดโอดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (1N4001 และ 1N5406) นำมาวัดค่าประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.8 ก) และรูปที่ 5.8 ข) โดยที่แกนนอนเป็นแกนของแรงดันย้อนกลับ ส่วนแกนตั้งเป็นแกนของพื้นที่หน้าตัดของไดโอด ต่อค่าประจุที่บริเวณปลอดพาหะยกกำลังสอง $(C_j/A)^{-2}$

ในกราฟรูปที่ 5.8 ก) และรูปที่ 5.8 ข) สามารถหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (V_{Bi}) เมื่อค่าของ $(C_j/A)^{-2}$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 ข. แสดงคุณสมบัติแรงดันย้อนกลับกับค่าประจุบริเวณปลอดพาหะ ของไดโอด 1N4001 และ 1N5406



รูปที่ 5.8 ก. แสดงคุณสมบัติแรงดันย้อนกลับกับค่าประจุบริเวณปลอดพาหะ ของไดโอด B_1, B_2, B_3

ประมาณศูนย์ และผลของความชันของกราฟที่ได้จะสามารถหาค่าของความหนาแน่นของพาหะ (N_B) ได้ในขนาด 10^{13} ซม.$^{-3}$ สำหรับไดโอด 1N4001, 1N5046 และขนาด 10^{15} ซม.$^{-3}$ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 สำหรับไดโอดที่มีค่าความหนาแน่นของพาหะ 10^{13} ซม.$^{-3}$ และ 10^{15} ซม.$^{-3}$ นี้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.9 สามารถนำมากำหนดค่าแรงดันพังทะลุของไดโอดได้ประมาณ1000 โวลท์ และ 100 โวลท์ ตามลำดับ กรณีที่เป็นการพังทะลุแบบ เพลน

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า เส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณการแพร่ซีม (D) ความหนาแน่นของพาหะ (N_B) และแรงดันที่ตกคร่อมหัวต่อ (V_{Bi}) ของไดโอด

	1N4001	1N5406	B1	B2	B3	หน่วย
V_{Bi}	~0.6	~0.6	~0.6	~0.6	~0.6	V.
D	1.6	2.5	1.8	1.8	1.8	mm.
N_B	$\sim 2.6\times10^{13}$	$\sim 7.2\times10^{13}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$	cm^{-3}

5.2.2.2 <u>การทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดัน</u>

ก) <u>เครื่องมือและอุปกรณ์</u>

1. มัลติมิเตอร์
2. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง
3. เตาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิได้
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ

5. แผ่นระบายความร้อน (heat sink)

6. curve tracer (LEADER และLTC-905)

ข) ชิ้นทดสอบ

1. แว่นผลึกที่ผ่านการแพร่ซึมความลึกประมาณ 3.5 ไมโครเมตร

2. ฉาบแว่นผลึกด้วยอลูมิเนียมหนาประมาณ 5500 อังสตรอม

3. เลือกไดโอดกำลังด้วย curve tracer

ค) วิธีการ

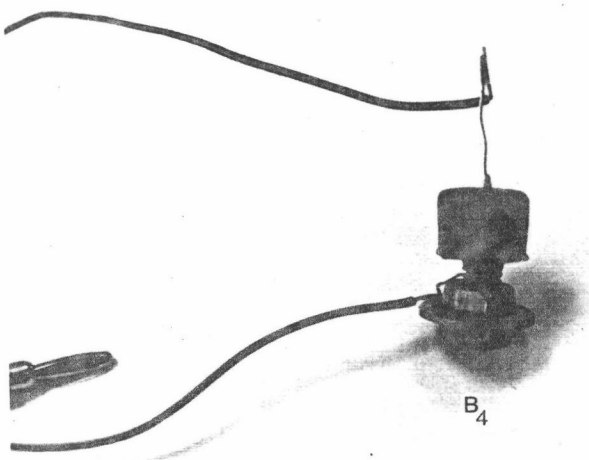
1. ใช้ curve tracer คัดเลือกไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น โดยให้มีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับน้อยที่สุด

2. นำไดโอดที่ได้ไปบัดกรี ดังรูปที่ 5.9

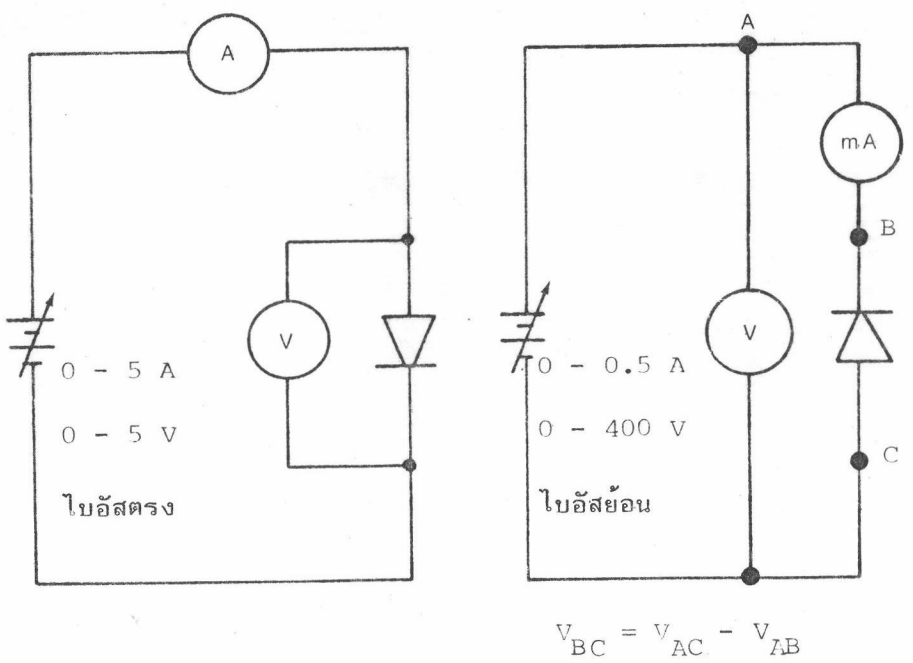
3. ทำการต่อวงจร ดังรูปที่ 5.10

4. ทำการวัดกระแสและแรงดันทั้งทางด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อน ที่อุณหภูมิต่างๆ

5. ทำการบันทึกค่ากระแส แรงดันและอุณหภูมิ



รูปที่ 5.9 แสดงไดโอดที่เตรียมไว้เพื่อทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดัน



รูปที่ 5.10 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ง) วิธีคำนวณ

1. การคำนวณหาแฟคเตอร์ n จากผลการทดลอง

จากสมการที่ 2.33 หาค่าแฟคเตอร์ n

$$n = \frac{q}{KT}(V_1 - V_2) \;/\; \ln\frac{J_1}{J_2}$$

$$n = \frac{38.7\,(V_1 - V_2)}{\ln\left(\frac{J_1}{J_2}\right)}$$

ตัวอย่างจากกราฟรูปที่ 5.11 ค่าแรงดันตาม

ในช่วงระหว่าง 0.45-0.65 โวลท์

$$n = \frac{38.7\times(0.45-0.65)}{\ln\left(\frac{74.3\times10^{-6}}{25\times10^{-3}}\right)} = 1.3 \;\#$$

2. การคำนวณหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

จากสมการที่ 2.34 หาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

ต่อพื้นที่ 2.5 ตารางมิลลิเมตร

$$J_s = \frac{J}{(\exp\frac{qV}{nKT}) - 1}$$

โดยที่ $\frac{q}{nKT} = 29.1$ ที่อุณหภูมิ $T = 300^{o}K$

ตัวอย่างจากกราฟรูปที่ 5.11 ค่าแรงดันตาม

ของ B_3 เท่ากับ 0.65 โวลท์

$$Js = \frac{25\times10^{-3}}{((\exp 29.1\times0.65)-1) \times 2.5\times10^{-2}}$$

$= 6\times10^{-9}$ แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร

จ) ผลการทดสอบ

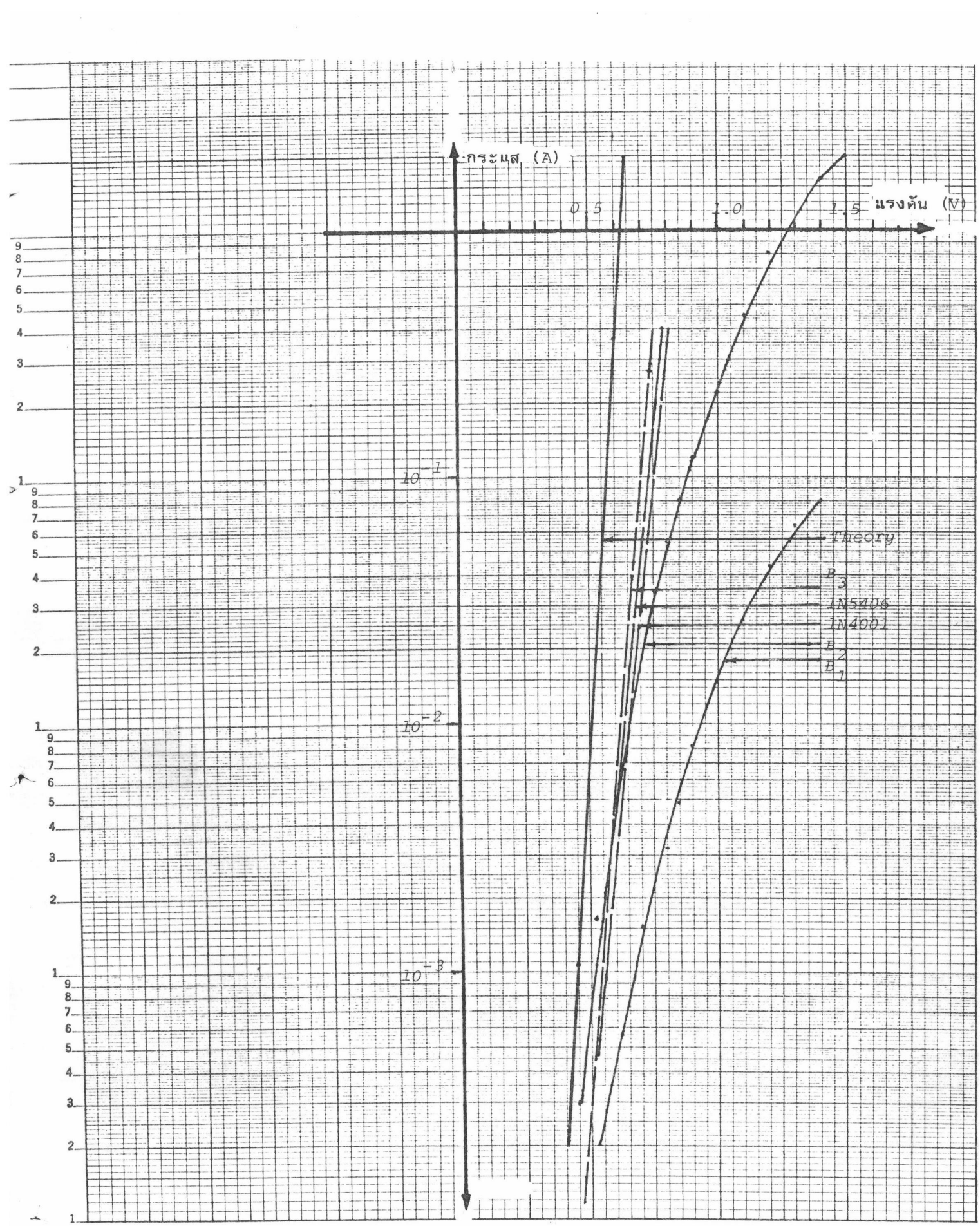
จากการทดสอบวัดกระแสตามและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ดังรูปที่ 5.13 ค่าของแฟคเตอร์ n และกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดกำลัง (B_3) มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีของไดโอดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ดังนั้นจากการชักตัวอย่างมาทำการคำนวณโดยใช้ค่าของ B_3 ได้ค่าแฟคเตอร์ n ประมาณ 1.3 ได้ค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับประมาณ 6×10^{-9} แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร แต่จากการคำนวณค่าทางทฤษฎีโดยอาศัยค่าความเข้มข้นของแว่นผลึก 1.8×10^{15} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตรและแฟคเตอร์ n เท่ากับ 1 ได้ค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับประมาณ 3×10^{-11} แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าค่าของ B_3 มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีมากและไดโอด B_3 ยังมีค่าใกล้เคียงกับไดโอดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ดังแสดงให้เห็นในกราฟรูปที่ 5.11 อย่างไรก็ตามกราฟของไดโอด B_1 และ B_2 ได้แตกออกจากเส้นทฤษฎีมาก ทั้งนี้เพราะไดโอดดังกล่าวมีความต้านทานอนุกรมสูงนั่นเอง ถ้าความต้านทานอนุกรมไม่สูง เส้นกราฟที่ได้ก็จะเสมือนกับเส้นของไดโอด B_3 ดังนั้นไดโอดที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นถ้าขั้วต่อที่ใช้ทำดีมากๆ ความต้านทานอนุกรมก็จะต่ำลง ทำให้ได้ไดโอดที่มีคุณสมบัติกระแสและแรงดันใกล้เคียงกับทฤษฎีมากขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 5.13 แล้วจะเห็นได้ว่าที่แรงดันย้อน -20 โวลท์ จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับวัดได้ประมาณ 0.9 มิลลิแอมแปร์/2.5 ตารางมิลลิเมตร หรือมีค่าเท่ากับ 3.6×10^{-2}

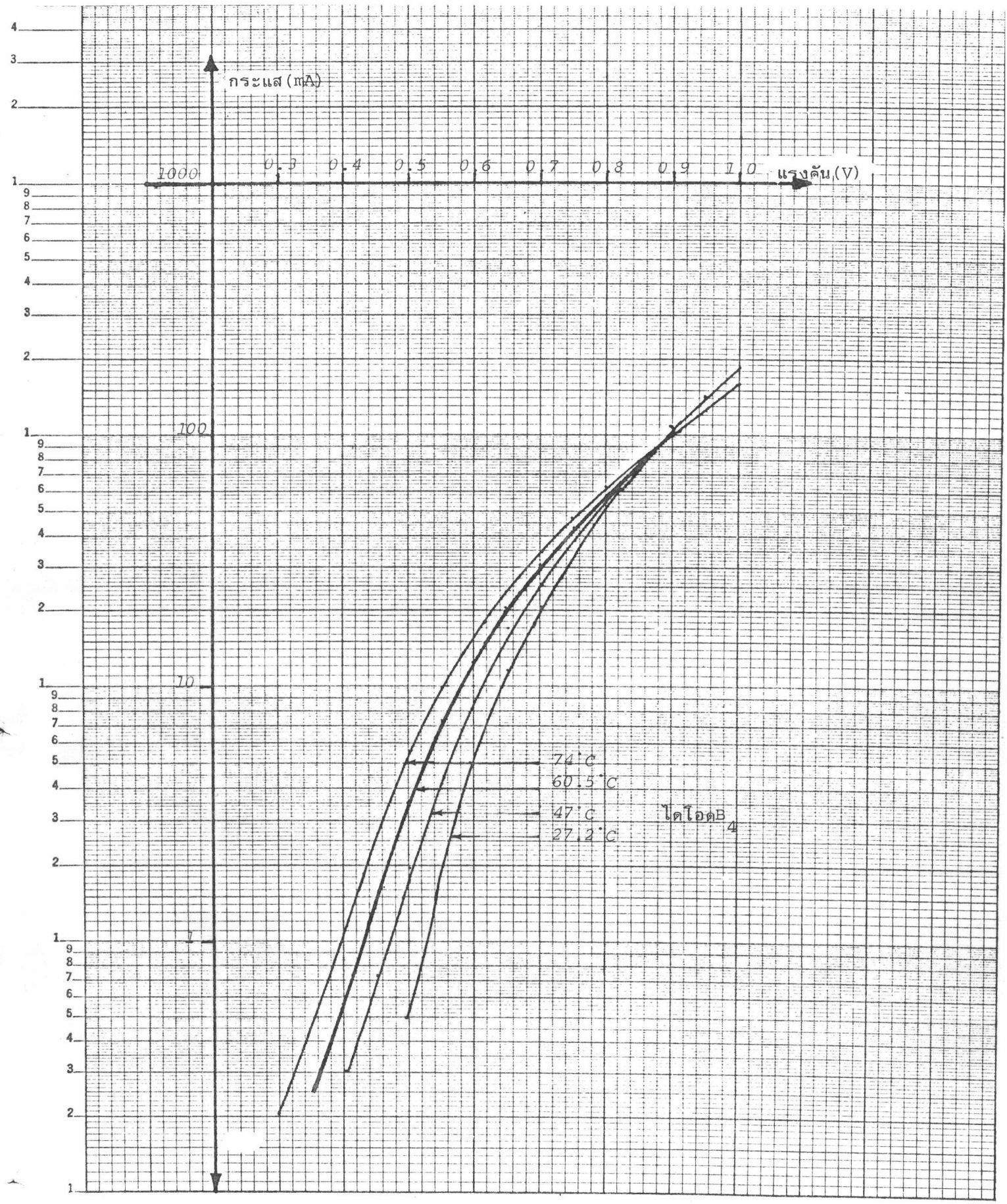
แอมแปร์/ตาราง เซนติ เมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าที่ได้ในข้อ 2 หน้า 70 อยู่มาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการประดิษฐ์ไดโอดนี้ได้ใช้แว่นผลึกที่เป็นแบบ Lap และขั้นตอนการถ่ายแบบและเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ไม่คมพอ จึงทำให้บริเวณขอบที่จะทำการแพร่ซึมเกิดรอยขยักและจะเกิดกระแสรั่วตามขอบและรอยขยักดังกล่าวมาก

แว่นผลึกใดๆ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในเนื้อแว่นผลึกมากและทำขั้นตอน Drive-in นานๆ ความสามารถของการแพร่ซึมจะต่างกันทำให้บริเวณหัวต่อ พี-เอ็น ไม่เรียบซึ่งจะทำให้เกิดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

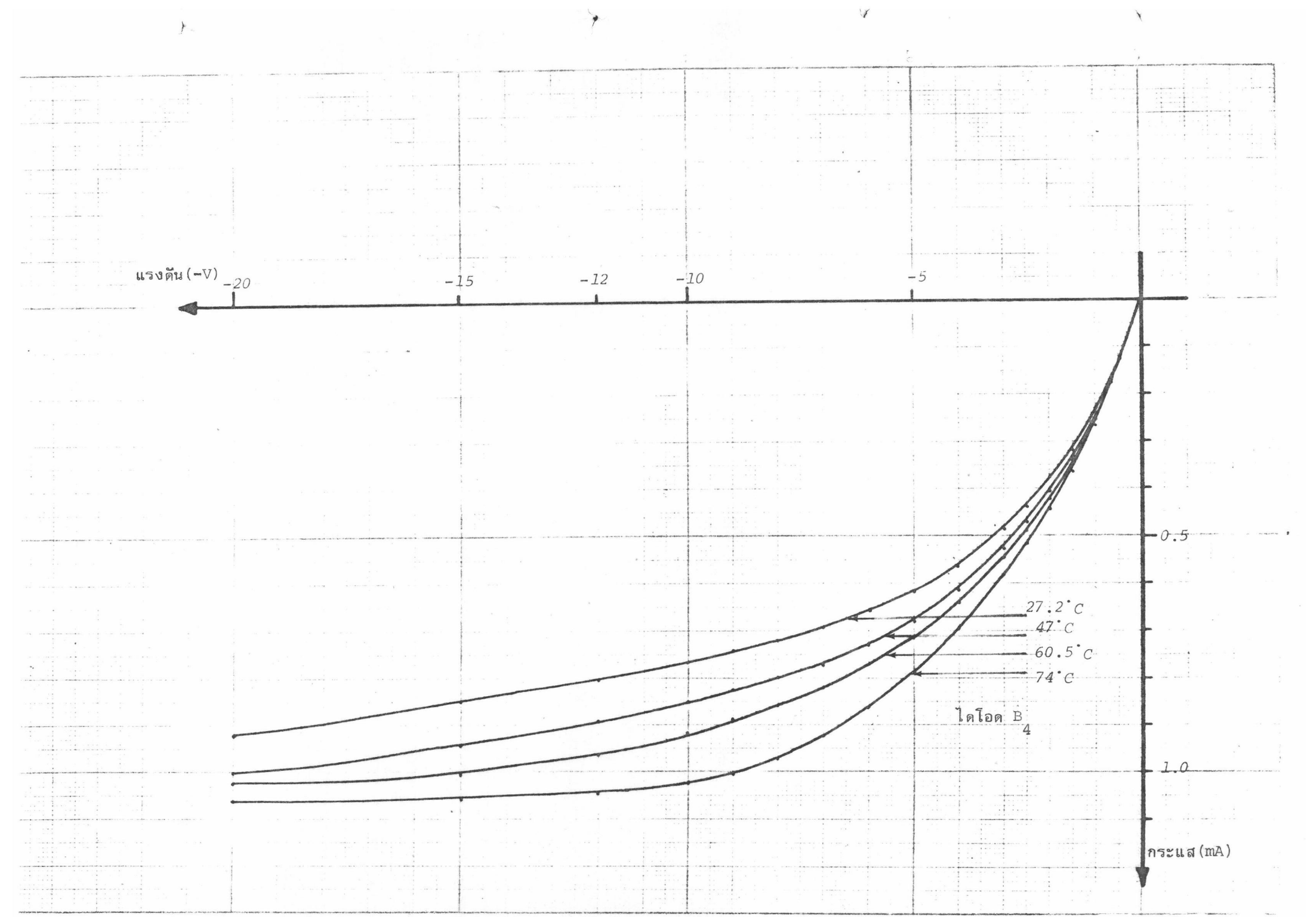
กราฟรูปที่ 5.12 และ 5.13 เป็นกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันแบบไบอัสตรงและไบอัสย้อนโดยแสดงวิธีการทดลอง ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งการทดลองนี้ได้นำเอาไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นไปติดบนหัวน็อต เพื่อทำให้อุณหภูมิของน็อตกับแว่นผลึกของไดโอดมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจถือได้ว่าอุณหภูมิบริเวณหัวน็อตมีค่าประมาณใกล้เคียงกับแว่นผลึกไดโอดที่ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกระแสตามและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นตาม เป็นการแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงจะมีคู่อิเล็คตรอนและโฮลมากทำให้กระแสตามและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับสูงขึ้น



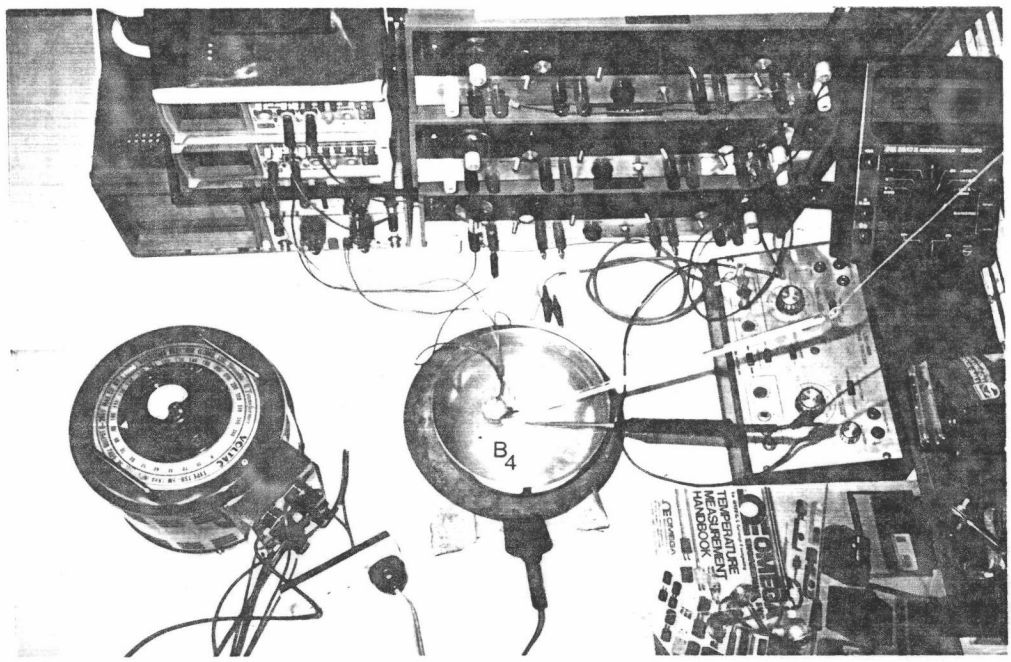
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดที่อุณหภูมิ 27.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดในรูปที่ 5.9 ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดในรูปที่5.9ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.14 แสดงวิธีทดลองหาคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2.2.3 การทดสอบหากระแสกำหนด (current rating)

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. มัลติมิเตอร์
2. แท่นยึดเพื่อการทดสอบ
3. thermo-couple
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ
5. เตาไฟฟ้าที่สามารถปรับอุณหภูมิได้
6. curve tracer
7. copper bar ขนาด 30x30x2 มิลลิเมตร

ข) ชิ้นทดสอบ

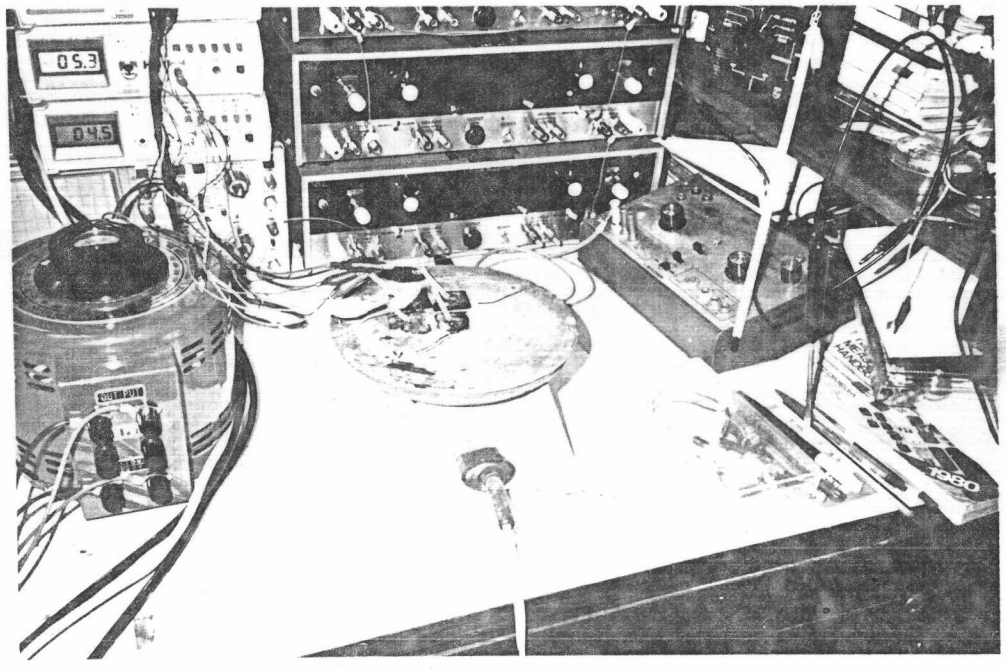
1. แว่นผลึกที่ได้ผ่านขบวนการแพร่ซึม การฉาบอลูมิเนียม และการชุบนิเกิลพร้อมที่จะนำมาบัดกรีเพื่อเตรียมการทดสอบ

2. ใช้ curve tracer คัดเลือกไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น โดยให้มีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับน้อยที่สุด

ค) วิธีการ

1. ตัด copper bar ขนาด 30 × 30 × 2 มิลลิเมตร
2. เซาะร่องที่ผิวตรงกลางแผ่น copper bar ลึกประมาณ 0.5 มิลลิเมตร
3. นำ thermo-couple ไปฝังและทำการบัดกรีด้วยเงิน
4. ทดสอบวัดแรงดัน thermo-couple ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 5.15
5. นำไดโอดไปติดลงบน copper bar ตรงบริเวณที่ thermo-couple ติดอยู่
6. นำไดโอดที่ได้จากข้อ 5 ไปยึดด้วยแท่นยึดเพื่อการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ก)
7. ต่อสายไฟเพื่อการทดสอบดังวงจรรูปที่ 5.16 ข) และทำการบันทึกค่ากระแสแรงดันและอุณหภูมิ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.15 แสดงการหาอุณหภูมิและแรงดันของ thermo-couple ที่ฝังลงในแผ่น copper bar

ง. การคำนวณหาอุณหภูมิที่หัวต่อ

ในรูปที่ 6.4 และรูปที่ 7.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างทองแดงถึงหัวต่อ (ΔT_{JCu}) สามารถ เขียน เป็นสมการได้ 3

$$T_{JCu} = R_{\theta JCu} \times P_{avg}$$

$$R_{\theta} = \frac{1}{K} \cdot \frac{L}{A}$$

เมื่อ P_{avg} = กำลังไฟ (W)

R_{θ} = ความต้านทานความร้อน (°C/W)

K = ความนำความร้อน (°C-cm/W)

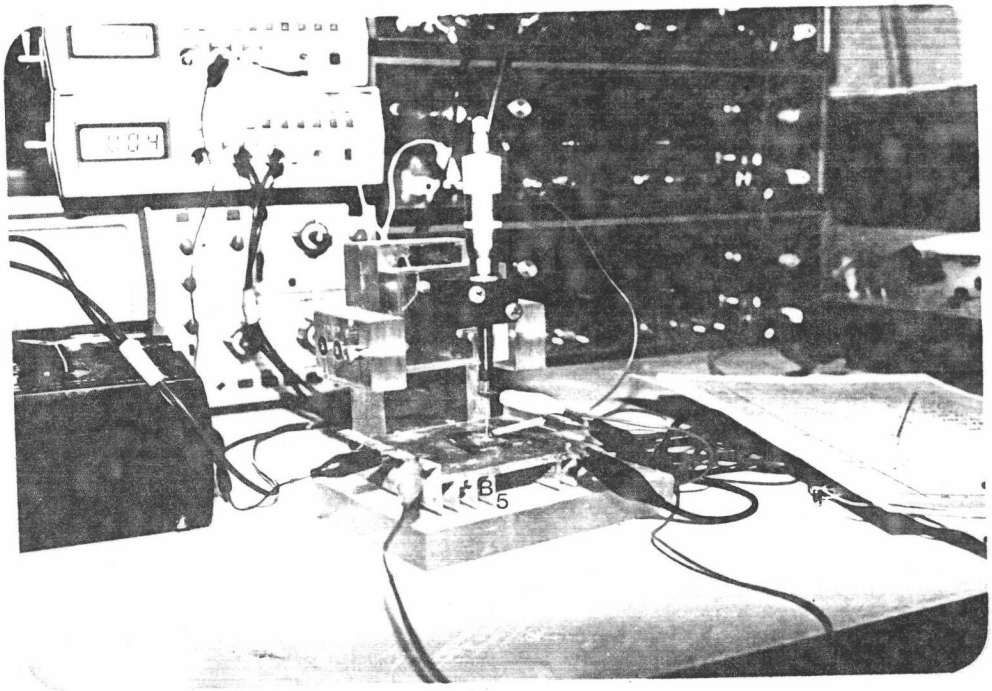
L = ความยาว (cm)

A = พื้นที่ (cm^2)

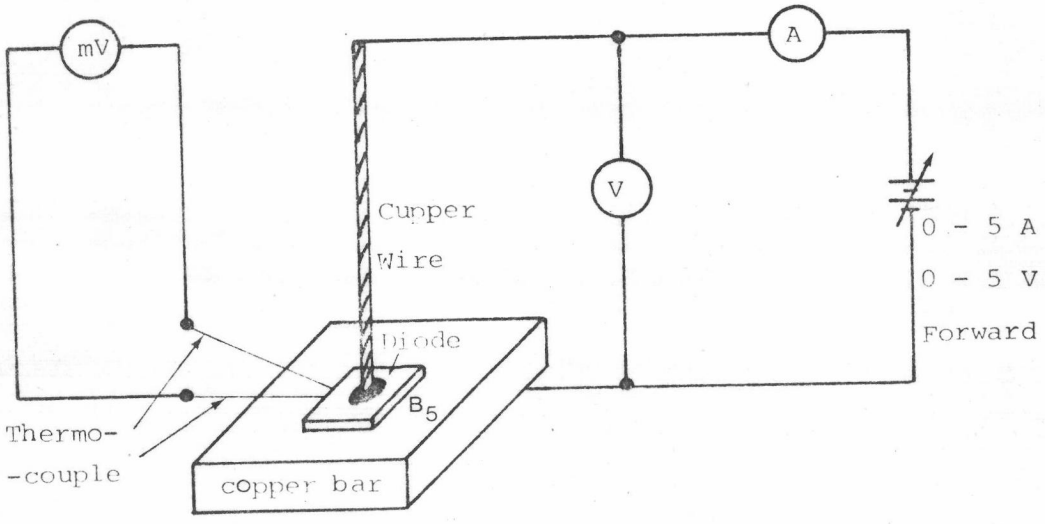
จากการคำนวณโดยใช้ตารางที่ 6.1 รูปที่ 6.4 และรูปที่ 7.1 จะได้ค่า R_{JCu} = 1.7 (องศา เซล เซียส/วัตต์) P_{avg} = 4.2 วัตต์ ถ้าอุณหภูมิที่บริ เวณทองแดง 100 องศา เซล เซียส จะได้อุณหภูมิที่หัวต่อประมาณ เท่ากับ 107 องศา เซล เซียส

จ. ผลการทดสอบ

จากการทดลองได้นำเอา copper bar ที่ฝังด้วย thermo-couple ไปวางไว้บนเตาที่ปรับอุณหภูมิได้ ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 5.15 ถูกนำมาเขียนดังกราฟรูปที่ 5.17 โดยประมาณเป็นเส้นตรงจากค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส และที่ค่าอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะให้แรงดันเท่ากับ 2.4 มิลลิโวลท์ จากการวัดไดโอดกำลังสามารถนำกระแสตรงได้3แอมแปร์ที่อุณหภูมิบริเวณแผ่นทองแดง เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส (ทั้งนี้ได้ใช้ copper bar ขนาด 30x 30x2 มิลลิเมตรทำหน้าที่เป็นสพานไฟและเป็นตัวระบายความร้อนให้แก่ไดโอดกำลังที่ประดิษฐ์ขึ้นในเวลาเดียวกัน) หรือคำนวณเป็นอุณหภูมิที่บริเวณหัวต่อประมาณเท่ากับ 107 องศาเซลเซียส โดยมีแรงดันตามเท่ากับ 1.4 โวลท์



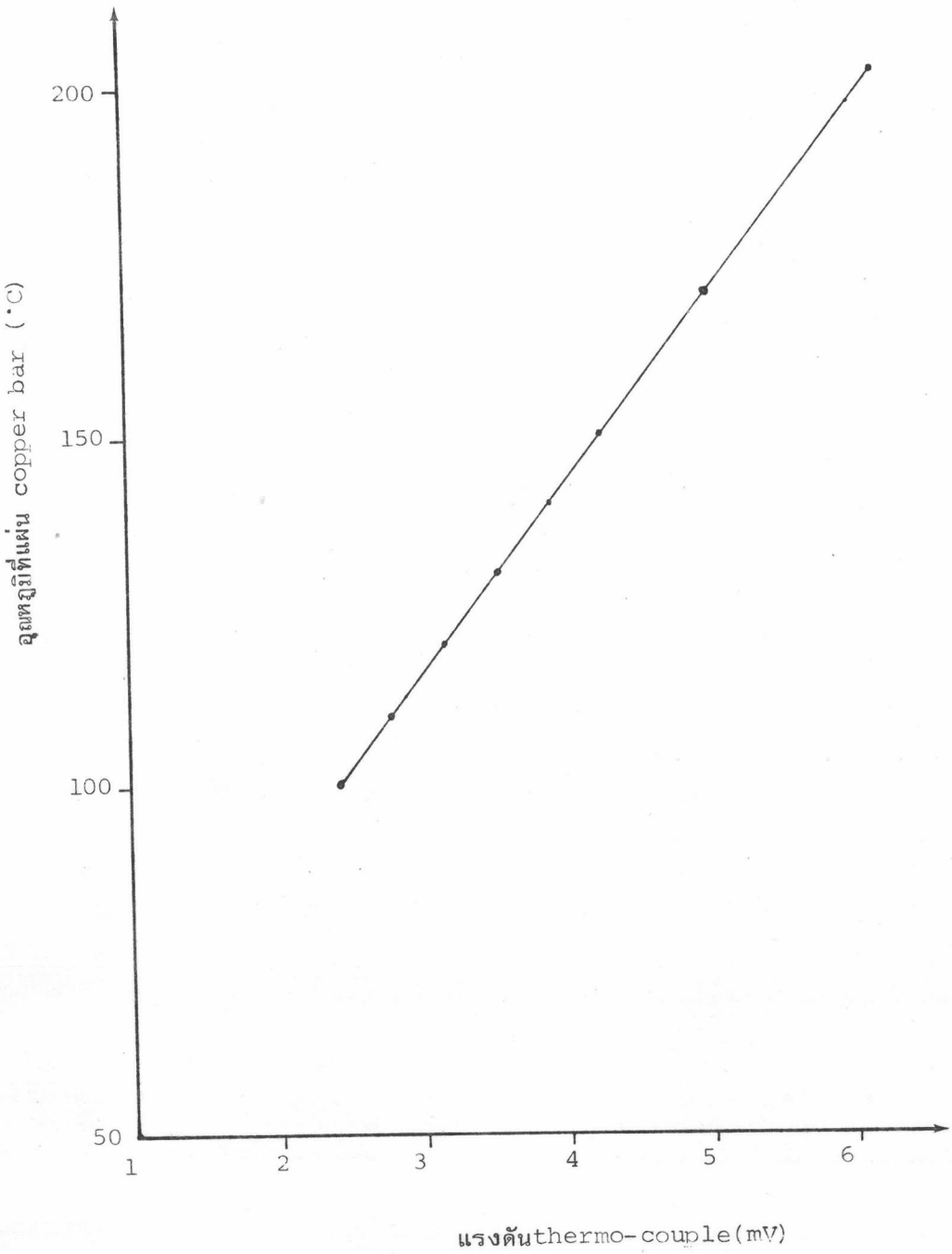
ก)



ข)

รูปที่ 5.16 ก) ภาพถ่ายแสดงการวัดหากระแสจำกัด (current rating)

ข) แสดงการต่อวงจร เพื่อการวัดค่าหากระแสจำกัด (current rating)



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอุณหภูมิและแรงดันที่ได้จาก thermo-couple ที่ฝังในแผ่น copper bar

5.2.2.4 การทดสอบหาเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave)
2. ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)
3. ความต้านทาน 100 โอห์ม

ข) ชิ้นทดสอบ

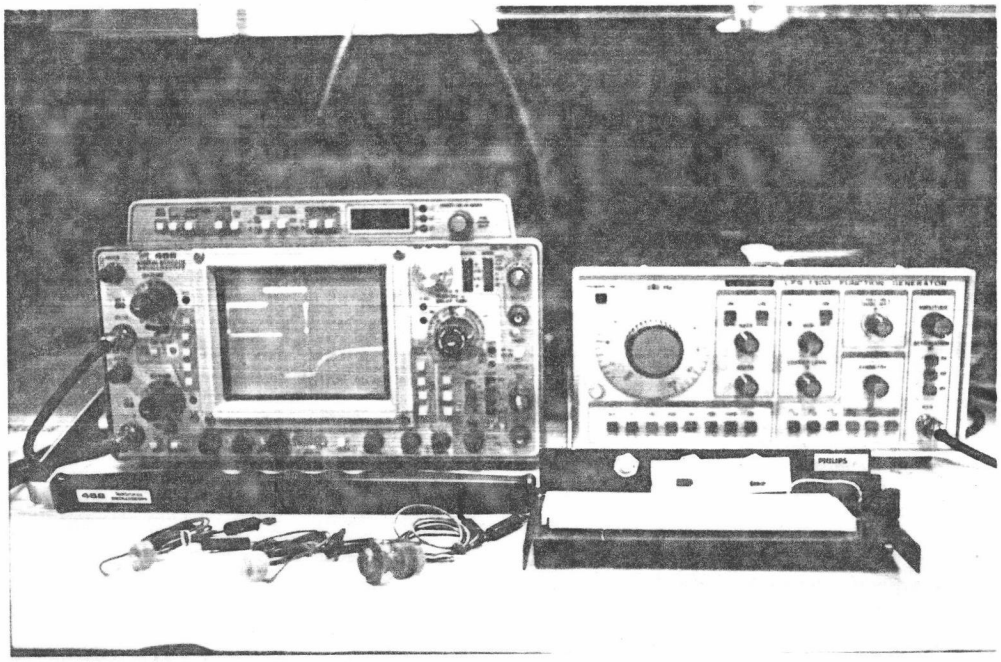
1. ไดโอด 1N4001, 1N5406, B_4

ค) วิธีการ

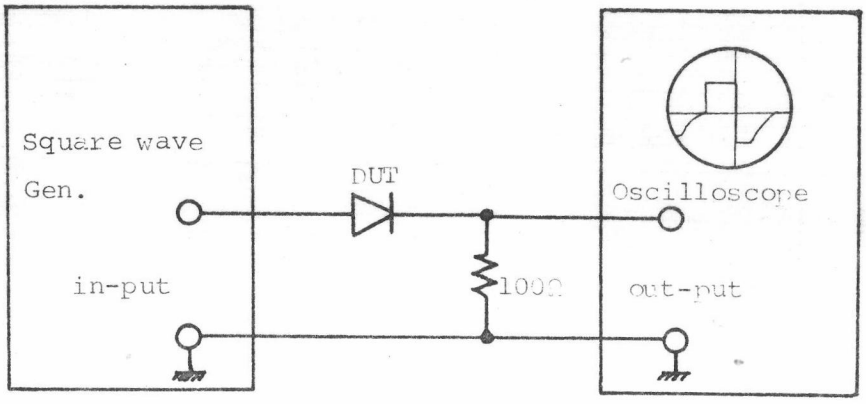
1. นำไดโอดกำลังมาต่อวงจรและทดสอบดังรูปที่ 5.18 และ 5.19
2. อ่านค่าเวลา t_1, t_2 และ t_{rr} จากออสซิลโลสโคป

ง) ผลการทดสอบ

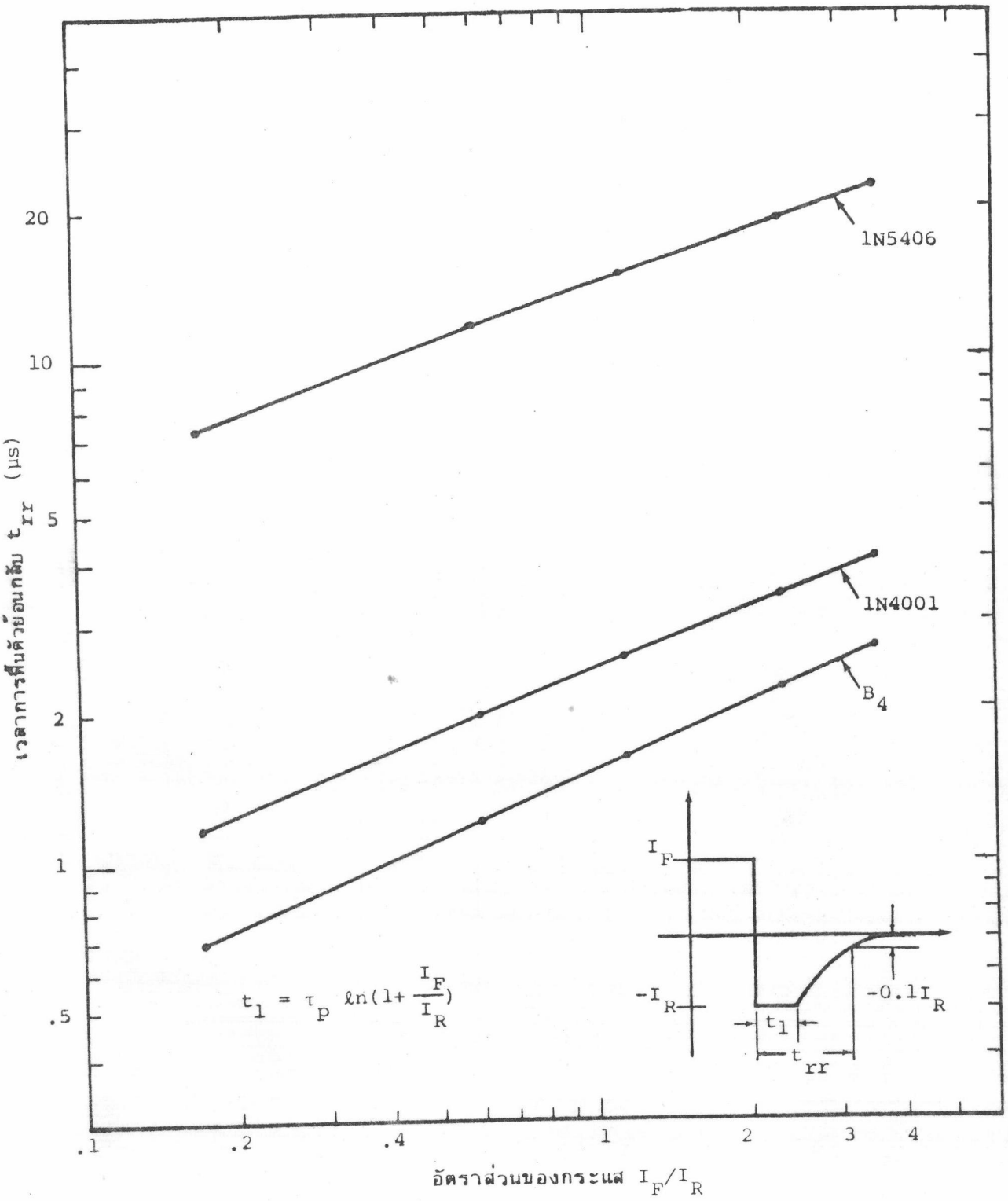
ผลการทดสอบ เมื่อวัดค่าแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนที่ตกคร่อมความต้านทาน100 โอห์ม มีค่าเท่ากับ 7.8 และ 5 โวลท์ ตามลำดับ วัดค่าเวลาของ t_1 ของไดโอด 1N4001, 1N5406, และ B_4 มีค่าเท่ากับ 4.7, 9.7 และ 1.4 ไมโครวินาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบนี้ เมื่อนำค่าไปแทนลงในสมการที่ 2.49 สามารถคำนวณหาเวลาชีวิตพาหะ (τ_p) ได้เท่ากับ 5, 10.3, 1.5 ไมโครวินาที ตามลำดับ ตามรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าไดโอดกำลังที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น (B_4) ให้ค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่ำกว่าไดโอด 1N4001 และ 1N5406 ทำให้ไดโอดกำลังที่ประดิษฐ์ขึ้น (B_4) สามารถทำงานได้มีความถี่สูงกว่า



รูปที่ 5.18 แสดงรูปการทดสอบหา เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ



รูปที่ 5.19 แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบหา เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด 1N4001, 1N5406 และ B_4 ที่อุณหภูมิ 27.2 องศาเซลเซียส

5.3 สรุป

ในการทดสอบไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้นได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองทาง คือ การทดสอบคุณสมบัติของไดโอดทางด้านฟิสิกส์ และการทดสอบคุณสมบัติของไดโอดทางด้านไฟฟ้า ผลในการทดสอบทางด้านฟิสิกส์พบว่า ความไม่สมบูรณ์ของแว่นผลึกมีส่วนทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และแรงดันพังทะลุต่ำลง ซึ่งได้ใช้สารละลาย (dash etch solution) ทดสอบพบจุดบกพร่องอยู่ประมาณ 10 จุดต่อซม.^{2} ในการประดิษฐ์ไดโอดได้ใช้พื้นที่ 2.5 ตารางมิลลิเมตรดังรูปที่ 5.2ซึ่งโอกาสที่พบจุดบกพร่องประมาณ 0.25 หรือในการประดิษฐ์ไดโอดโดยใช้พื้นที่ดังกล่าว 100 ตัว จะได้ไดโอดที่ใช้ได้ประมาณ 75 ตัว และเสียประมาณ 25 ตัว การทดสอบทำ mesa pattern สามารถกัดซิลิกอนได้ลึกประมาณ 40 ไมโครเมตร โดยใช้เวลาในการกัด (etching) 15 วินาที และแว่นผลึกที่ผิวเป็นเงามันจะได้ความคมของขอบที่ถูกกัดออกดีกว่าแว่นผลึกที่มีผิวหยาบ ในการใช้น้ำ DI ที่มีค่าความต้านทานต่ำเพื่อทำความสะอาดแว่นผลึกก็เป็นสิ่งหนึ่งที่ทำให้ไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้นมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับสูงและคุณภาพของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปลูกขึ้นไม่ดี

ผลในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับไดโอด 1N4001 และ 1N5406 ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ 1N4001 และ 1N5406

ข้อมูล	1N4001	1N5406	ไดโอด B_4	หน่วย
แรงดัน (V_{Bi})	~0.6	0.6	~0.6	V
เส้นผ่าศูนย์กลาง	1.6	2.5	1.8	mm
ความเข้มข้นพาหะ (N_B)	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{15}$	cm^{-3}
แฟคเตอร์ n	~1.5	~1.7	~1.4	-
กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ	$\sim 4.3\times10^{-10}$	$\sim 3.7\times10^{-9}$	$\sim 6 \times 10^{-9}$	A/cm^2
เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) (I_F = 78 mA, I_R = 50 mA)	1.9×10^{-6}	10.2×10^{-6}	1.3×10^{-6}	s

นอกจากนี้กระแสจำกัด (current rating) ของไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้น (ณ พื้นที่ 2.5 ตารางมิลลิเมตร) มีขนาดถึง 3 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิหัวต่อ 107 องศาเซลเซียส และหัวต่อแบบโอห์มมิคสามารถทนแรงดึงได้ถึง 78 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร