



บทที่ 5

วิธีทดลอง

การทดลองที่ทำ เป็นการแพร่ซึมสารเจือปนจากตัวเดิมสารเจือปน 3 ชนิด คือ  $B_2O_3$ ,  $BBr_3$  และ BN โดยการใช้ระบบแพร่ซึมที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมของตัวเดิมสารเจือปนแต่ละชนิด ทั้งนี้โดยใช้เงื่อนไขในการแพร่ซึมเหมือนกัน จากนั้นเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ทีละตัว เช่น ให้อุณหภูมิคงที่โดยให้เวลาในการแพร่ซึมเปลี่ยนไป สำหรับตัวเดิมสารเจือปนทั้ง 3 ชนิด เป็นต้น จากนั้นจึงนำแว่นผลึกที่ผ่านการแพร่ซึมมาวัดชนิดของชั้นที่แพร่ซึม ความต้านทานแผ่น การลอกผิวแว่นผลึกด้วย anodic oxidation เพื่อดูโพลีไฟลของการแพร่ซึมที่เกิดจากตัวเดิมสารเจือปนแต่ละชนิด การย้อมสีเพื่อหาความลึกของหัวต่อพี-เอ็น การวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อที่ได้จากการสร้างลิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ผ่านการแพร่ซึมด้วยสารเจือปนทั้ง 3 ชนิด เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองแพร่ซึมมาเปรียบเทียบในแง่มุมต่างๆ

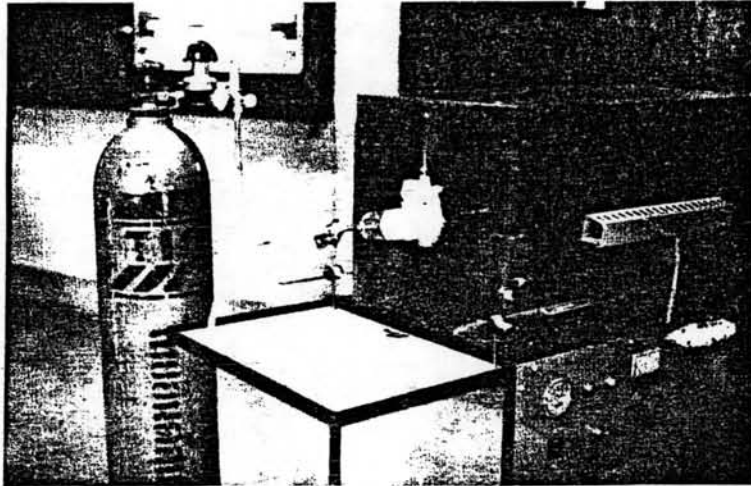
### 5.1 ขั้นตอนและเงื่อนไขการแพร่ซึมโดยใช้สารเจือปนแต่ละชนิด

หลังจากที่แว่นผลึกได้ผ่านการวัดความต้านทานจำเพาะและการทำความสะอาดแล้ว สามารถนำมาแพร่ซึมได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น โดยที่ขอกล่าวแยกสำหรับการใช้ตัวเดิมสารเจือปนแต่ละชนิด

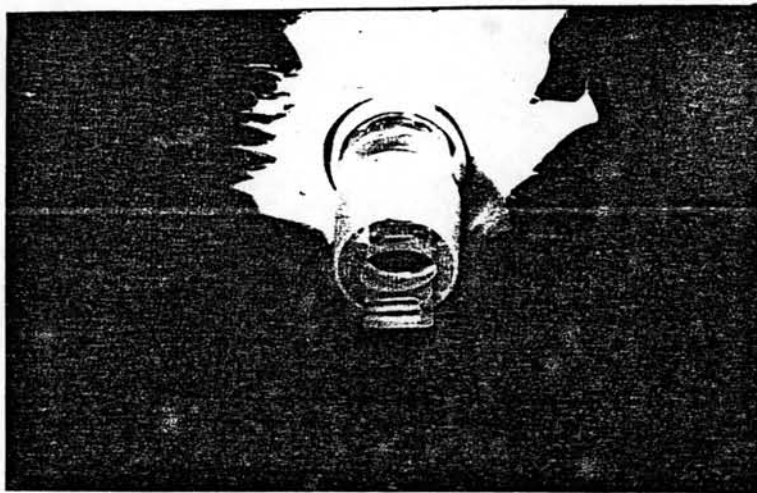
#### 5.1.1 $B_2O_3$

นำผง  $B_2O_3$  ละลายใน Methyl Alcohol จนเริ่มอึดตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวทาบนแว่นผลึกซิลิกอนแบบเอ็น ถ้าต้องการให้ผลการแพร่ซึมดี ควรหาสารละลายที่เริ่มอึดตัวพอดี โดยทาแต่เพียงบางๆ เพราะถ้ามีสารเจือปนบนผิวหน้าซิลิกอนมากเกินไป ทำให้เกิด strain บนแว่นผลึก และการแพร่ซึมเกิดช้า นำแว่นผลึกที่ทาสารละลายแล้วเข้า anneal ต่อในเตาแพร่ซึม โดยขณะที่เลื่อนแว่นผลึกเข้าเตาควรค่อยๆ เลื่อนทีละน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของ

ซิลิกอนเกิด damage มาก จากนั้นแพร่ซึมด้วยเวลาและอุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ  $\approx 0.7$  l/min คงที่ตลอดการแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$  ได้แสดงระบบแพร่ซึมตามรูปที่ 5.1



รูป ก.



รูป ข.

- รูปที่ 5.1 ก. แสดงการจัดระบบแพร่ซึมด้านทางเข้าของก๊าซที่ใช้ในการทดลองแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$
- ข. แสดงการวางแวนผลึกบน boat ที่ใช้ในการทดลองแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$

### เงื่อนไขของการแพร่ซึมด้วย $B_2O_3$

เนื่องจากใช้วิธีทาสารละลายบนแว่นผลึก อัตราการไหลของก๊าซจึงไม่มีผลต่อการแพร่ซึม เพราะฉะนั้นการแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$  จึงมีตัวแปร 2 ตัว คือ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้แพร่ซึม

สำหรับ  $B_2O_3$  แบ่งชุดการแพร่ซึมออกเป็น

1. การทดลองแพร่ซึมเพื่อหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์และความลึกของหัวต่อพี-เอ็น

โดยใช้แว่นผลึกซิลิกอนแบบเอ็น ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในช่วง 6 ถึง 10

โอห์ม-ซม. แพร่ซึมที่อุณหภูมิ

1,000°ซ. ใช้เวลาแพร่ซึมเป็น 5,10,20,30,40 และ 60 นาที ตามลำดับ

1,050°ซ. ใช้เวลาแพร่ซึมเป็น 5,10,20,30 และ 40 นาที ตามลำดับ

2. ทดลองแพร่ซึมเพื่อดูความสม่ำเสมอของการแพร่ซึม

ใช้ P-doped ซิลิกอนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 มม. หนา 200  $\mu\text{m}$  ทิศ <111> มีค่าความต้านทานจำเพาะที่จุดต่างๆ บนแว่นผลึกระหว่าง 12.7-15 มิลลิโอห์ม-ซม. ทำการแพร่ซึมที่ 1,050°ซ. เป็นเวลา 60 นาที การที่ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการแพร่ซึมนาน เพื่อให้แน่ใจว่าได้เกิดชั้นแพร่ซึมของสารเจือปนขึ้นบนผิวแว่นผลึก ทั้งนี้เพราะแว่นผลึกที่ใช้มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำมาก

3. ทดลองทำเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ กัน

ก. ที่ 1,100°ซ. ใช้แว่นผลึกซิลิกอนแบบเอ็นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ 4-6 โอห์ม-ซม. ทำเซลล์ฯ 6 ตัว โดยใช้เวลาในการแพร่ซึม 2,2.5,3,3.5,3.5 และ 4 นาที ตามลำดับ

ข. ที่ 1,050°ซ. ใช้แว่นผลึกที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ 2 โอห์ม-ซม. ทิศ <111> หนา 275  $\mu\text{m}$  ทำเซลล์ฯ 2 ตัว ใช้เวลาในการแพร่ซึม 20 นาที

ค. ที่ 1,000°ซ. ใช้แว่นผลึกเงื่อนไขเดียวกับข้อ ข. ทำเซลล์ฯ 3 ตัว ใช้เวลาในการแพร่ซึมเป็น 20,25 และ 28 นาที ตามลำดับ

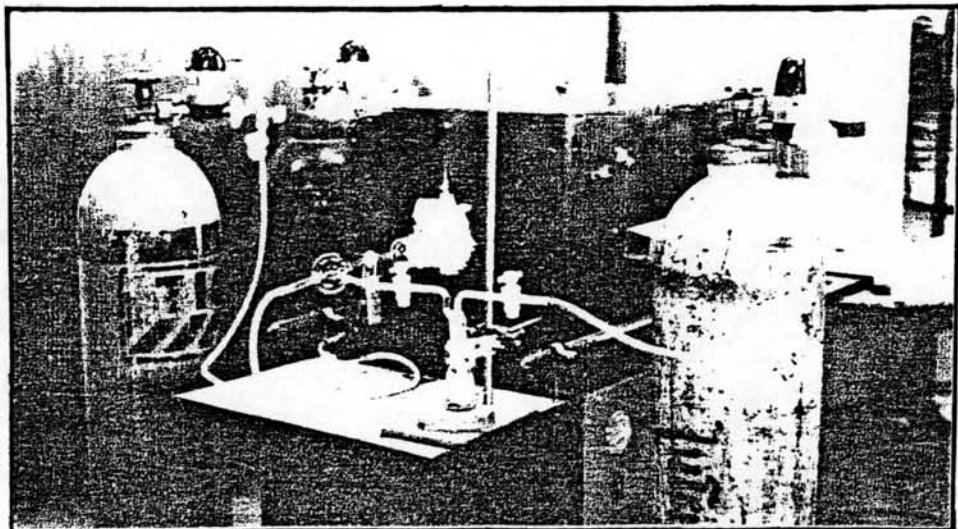
ลำดับขั้นตอนในการทำตัวเซลาที่สมบูรณ์หลังการแพร์ซิมด้วย  $B_2O_3$  คือ

1. ล้างแก้วผลึกด้วยน้ำเพื่อเอา  $B_2O_3$  ที่เหลืออยู่บนผิวซิลิกอนออก
2. ล้างใน BHF เพื่อกัดออกไซด์บนผิวหน้าซิลิกอน
3. ทำ anodic oxidation  $\approx$  500-700 อังสตรอม เพื่อเอาชั้นสีดำของ Si-B compound ที่เกิดเป็นจำนวนมากออก
4. กัดออกไซด์ออกด้วย BHF
5. ฉาบโลหะอะลูมิเนียมด้านหน้า และทำ mask เพื่อทำขั้วโลหะทางด้านผิวรับแสง
6. ฉาบโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังเพื่อทำขั้วไฟฟ้า
7. นำไปวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

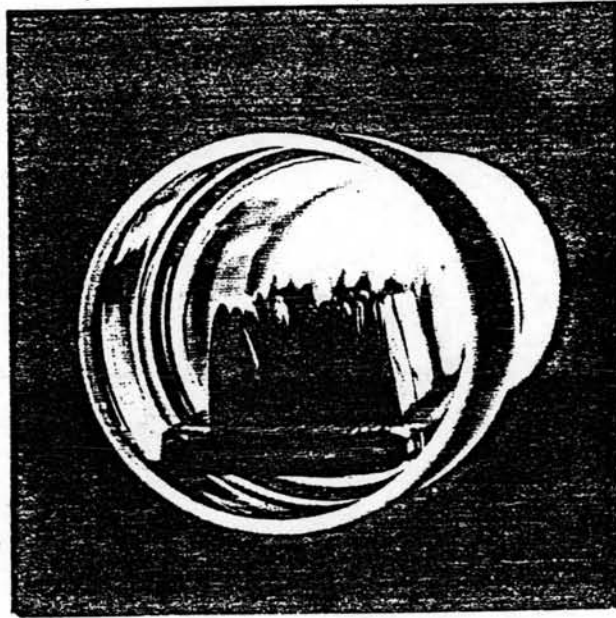
#### 5.1.2 BBr<sub>3</sub>

เมื่อจัดระบบการแพร์ซิมเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.2 นำแก้วผลึกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วเข้าเตา โดยแบ่งช่วงเวลาการแพร์ซิมเป็น 3 ขั้นตอน คือ

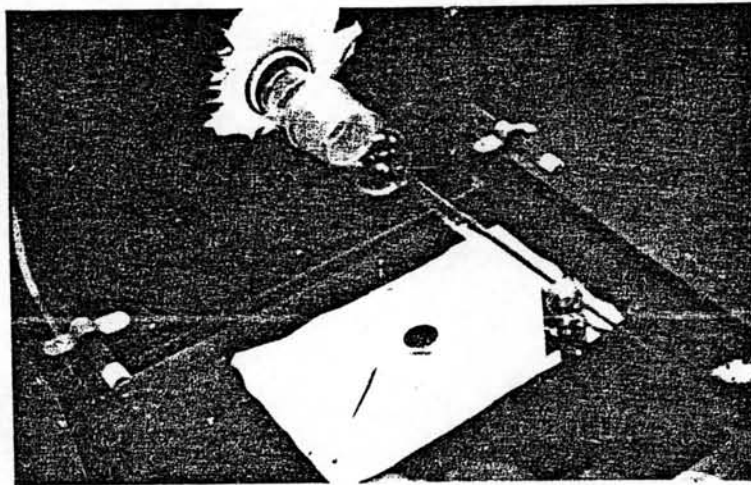
ก. preheat ช่วงนี้ใช้เวลา 5 นาที คงที่ตลอดทุกการทดลอง เพื่อทำหน้าที่สร้างชั้นออกไซด์บางๆ เพื่อช่วยให้การแพร์ซิมเกิดได้สม่ำเสมอขึ้น carrier gas ที่ไหลผ่านเตาในขณะนี้คือ main  $N_2$  และ  $O_2$  ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซทั้งสอง ปรับให้คงที่ตลอดทุกการทดลอง



รูปที่ 5.2ก.



รูป ข.



รูป ค.

- รูปที่ 5.2 ก. แสดงการจัดเรียงระบบของ carrier gas ก่อนเข้าเตา ที่ใช้ในการทดลองแพรรี่ซิมด้วย  $BBr_3$
- ข. แสดงการ load แวนผลึกในเตาแพรรี่ซิม สำหรับการแพรรี่ซิมด้วย  $BBr_3$
- ค. แสดงการจัดเรียงระบบด้านทางออกของ carrier gas ที่ใช้ในการทดลองแพรรี่ซิมด้วย  $BBr_3$

โดยเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ main  $N_2$  ไซ้  $\approx 1.3$  l/min ส่วน  $O_2$  ไซ้  $\approx 200$  ml/min

ข. predeposition time คือช่วงเวลาการเติมสารเจือปนลงบนแว่นผลึก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการทดลอง ในขณะที่นอกจากมี main  $N_2$  และ  $O_2$  ในปริมาณที่ระบุไว้ตามข้อ ก.แล้ว ยังมีการ bubble ของ  $N_2$  ผ่าน  $BBr_3$  (โดยควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ที่  $\approx 10^\circ\text{C}$ . ตลอดเวลาของการเติมสารเจือปน) เพื่อพาเอาไอของ  $BBr_3$  มารวมกับ main  $N_2$  และ  $O_2$  ใน mixer แล้วผ่านเข้าเตาแพร่ซึม การปรับอัตราการไหลของ  $N_2$  bubble นี้เปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสมเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการแพร่ซึม

ค. flush time ใช้เวลา 3 นาที คงที่ตลอดทุกการทดลอง เป็นเวลาหลังจากที่หยุดเติมสารเจือปนแล้ว และทำให้เกิดออกไซด์ต่างๆ บนผิวหน้าแว่นผลึกอีกครั้ง ทั้งนี้เพื่อผลของการจัดเรียงตัวของอะตอมสารเจือปนในซิลิกอนที่ดี และยังป้องกันการเกิด out diffusion ได้ด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้การไหลของก๊าซที่เกิดจากตัวเติมสารเจือปนที่เป็นอันตราย หมดจากเตาก่อนที่จะนำเอาแว่นผลึกออก อัตราการไหลและ carrier gas ในขณะนี้เหมือนข้อ ก.

#### เงื่อนไขของการแพร่ซึมด้วย $BBr_3$

เนื่องจากระบบแพร่ซึมที่ใช้ เป็นดังที่กล่าวแล้ว จึงเป็นการกำหนดตัวแปรสำหรับการแพร่ซึม ซึ่งในที่นี้ประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการแพร่ซึม อุณหภูมิ และอัตราการไหลของ  $N_2$  bubble ผ่าน  $BBr_3$

ดังนั้นการแพร่ซึมด้วย  $BBr_3$  จึงแบ่งชุดการทดลองเป็น

1. การแพร่ซึมเพื่อหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์และความลึกของหัวต่อพี-เอ็น

ได้ใช้แว่นผลึกซิลิกอนแบบเอ็น ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในช่วง 5 ถึง 10 โอห์ม-ซม. ทำการแพร่ซึมที่อุณหภูมิ  $1,000^\circ\text{C}$ . ใช้เวลา predeposition เป็น 5, 10, 16, 20, 30, 40 และ 60 นาที ตามลำดับ

และที่อุณหภูมิแพร่ซึมเป็น  $1,050^\circ\text{C}$ . ใช้เวลา predeposition เป็น 5, 10, 16, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ

การทดลองที่อุณหภูมิทั้ง 2 ค่านี้ ใช้อัตราการ bubble  $N_2$  อยู่ในช่วงประมาณ 80-100 ฟอง/นาที [ $\approx 20-30 \text{ ml/min}$ ] อันที่จริงค่าอัตราการไหลของ  $N_2$  นี้

ควรมีค่าคงที่สำหรับชุดการทดลองหนึ่งๆ แต่เนื่องจากใช้อัตราการไหลที่ต่ำมาก การปรับ flow meter เพื่อนับฟองอากาศให้คงที่ทุกการทดลองจึงทำได้ลำบาก

2. การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของ  $N_2$  bubble เพื่อให้ผลการแพร่ซึมที่ดีที่สุด

ใช้แว่นผลึกที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ 9-10 โอห์ม-ซม. ทำการแพร่ซึมที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$ . โดยใช้เวลาในการแพร่ซึม 20 นาที คงที่ตลอด โดยแบ่งเป็นเวลา preheat predeposition และ flush time เป็น 5, 20 และ 3 นาที ตามลำดับ ใช้อัตรา  $N_2$  bubble ต่างๆ กันคือ 56, 66, 80, 98 และ 115 ฟอง/นาที

3. การทดลองเพื่อดูความสม่ำเสมอของการแพร่ซึม

ใช้แว่นผลึกเงื่อนไขเดียวกับตอนหาความสม่ำเสมอของการแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$  และมีค่าความต้านทานจำเพาะตลอดทั้งแผ่นระหว่าง 11.5-14.5 มิลลิโอห์ม-ซม. ทำการแพร่ซึมที่  $1,050^{\circ}\text{C}$ . นาน 60 นาที ใช้  $N_2$  bubble 70 ฟอง/นาที

4. ทำเซลล์ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ กันโดยเลือกเงื่อนไขการแพร่ซึมที่เหมาะสมที่สุด

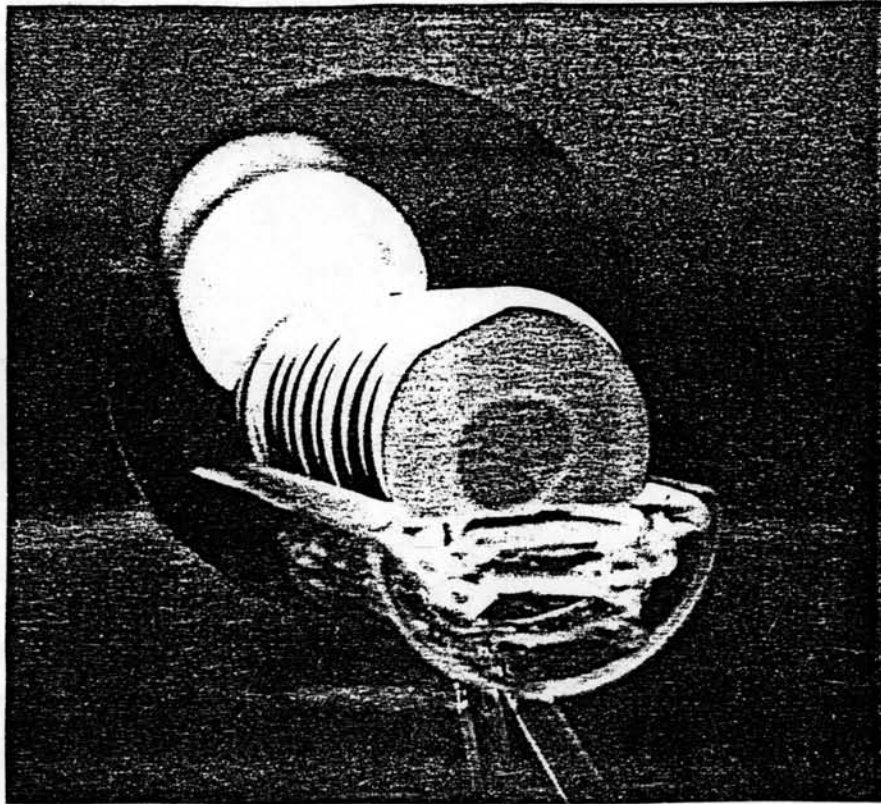
ใช้แว่นผลึกชนิดเดียวกับที่ใช้ทำเซลล์จาก  $B_2O_3$  ที่อุณหภูมิ  $1,050^{\circ}\text{C}$ .

- ก. ที่  $1,050^{\circ}\text{C}$ . ใช้เวลา 5' + 14' + 3'  $N_2$  bubble 88 ฟอง/นาที
- ข. ที่  $1,030^{\circ}\text{C}$ . ใช้เวลา 5' + 20' + 3'  $N_2$  bubble 90 ฟอง/นาที
- ค. ที่  $1,000^{\circ}\text{C}$ . ใช้เวลา 5' + 25' + 3'  $N_2$  bubble 90 ฟอง/นาที

ขั้นตอนในการทำเป็นเซลล์ที่สมบูรณ์หลังการแพร่ซึม เหมือนกันกับตอนใช้  $B_2O_3$  ทำเป็นเซลล์ แต่ในกรณีของ  $BBr_3$  นี้ไม่ต้องผ่านการล้างแว่นผลึกด้วยน้ำหลังการแพร่ซึม และไม่ต้องทำ anodic oxidation ก็สามารถลอกชั้นบางๆ ของออกไซด์ที่เกิดบนผิวซิลิกอนได้ ยกเว้นกรณีที่เป็น heavily doped จะเกิดเป็นชั้นสีดำเหมือนกรณีของ  $B_2O_3$

### 5.1.3 BN

การใช้ BN แพร่ซึม ลักษณะการวางแว่นผลึกในเตาแตกต่างไปจากการแพร่ซึมด้วย  $B_2O_3$  และ  $BBr_3$  เพราะตัวเติมสารเจือปน 2 ชนิดแรก วางผิวหน้าแว่นผลึกที่ต้องการแพร่ซึมขนานกับทิศ



รูปที่ 5.3 แสดงการ load แวนผลึกและแผ่น BN ในเตาแพร่ซึม<sup>(21)</sup>

การไหลของ carrier gas ส่วน BN การวางแวนผลึกตั้งฉากกับ carrier gas ดังแสดงรูป การ load แวนผลึกและแผ่น BN ในเตาแพร่ซึมตามรูปที่ 5.3

ในการทดลองใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง จึงเลือกใช้ BN Grade M และ M26 โดยในครั้งแรกใช้ Grade M แพร่ซึมที่ 1,000°ซ. ให้ผลของความสม่ำเสมอในการแพร่ซึมไม่ดีนัก เพราะไม่ได้สวมฝาครอบเตาทางด้านทางออกขณะแพร่ซึม ภายหลังใช้ Grade M26 โดยสวมฝาครอบเตาทางด้านทางออกขณะแพร่ซึมทุกการทดลอง การใช้ BN ต้องทำความสะอาดตามกระบวนการที่ระบุไว้ในภาคผนวก ค จากนั้น oxidize ที่ 1,000°ซ. ในบรรยากาศ O<sub>2</sub> ด้วยอัตราการไหลประมาณ 0.65 l/min (เท่ากับ 9 มม. ของ flow meter ที่ใช้) เป็นเวลา 30 นาที ต่อด้วยการ stabilization ในบรรยากาศ N<sub>2</sub> ด้วยอัตราการไหลเท่าเดิม (เท่ากับ 7 มม. ของ flow meter ที่ใช้) เป็นเวลา 1 ชม. นำแวนผลึกที่ต้องการแพร่ซึมมา load เข้าเตาในบรรยากาศ N<sub>2</sub> โดยใช้อัตราการไหล = 0.65 l/min คงที่





สำหรับการแพร่ซึมด้วย BN นั้น spacing ระหว่าง BN กับแว่นผลึกมีผลต่อการเกิด Si-B compound<sup>(22)</sup> แต่เนื่องจาก boat ที่ใช้มี spacing ขนาดเดียว จึงเปลี่ยนค่า spacing ไม่ได้

### เงื่อนไขของการแพร่ซึมด้วย BN

เนื่องจากแผ่น BN และ boat เป็นตัวกำหนดตัวแปรของการแพร่ซึม การทดลองนี้จึงเหลือตัวแปรเพียง 2 ตัว คือ อุณหภูมิและเวลาในการแพร่ซึม

เหตุนี้การแพร่ซึมด้วย BN จึงแบ่งชุดการทดลองเป็น

#### 1. การแพร่ซึมเพื่อหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์และความลึกของหัวต่อพี-เอ็น

ใช้แว่นผลึก P-doped ซิลิกอน หนา 280  $\mu\text{m}$  ทิศ <100> ค่าความต้านทานจำเพาะ 9-10 โอห์ม-ซม. แพร่ซึมที่อุณหภูมิ 1,000°C. (โดยใช้ BN Grade M และ M26) ด้วยเวลาต่างๆ กันคือ 5, 10, 20, 33, 40 และ 60 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 1,050°C. (ใช้ BN Grade M26) ด้วยเวลา 5, 11, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ

#### 2. การทดลองเพื่อดูความสม่ำเสมอของการแพร่ซึม

โดยใช้แว่นผลึกเหมือนกับตอนที่แพร่ซึมด้วย  $\text{B}_2\text{O}_3$  และ  $\text{BBr}_3$  โดยมีค่าความต้านทานจำเพาะตลอดแผ่น ระหว่าง 11.4-15.4 มิลลิโอห์ม-ซม. แพร่ซึมที่ 1,050°C. เป็นเวลา 1 ชม. นำมาวัดชนิดของชั้นแพร่ซึม ได้ผลเป็นพี แต่หลังจากกัดออกไซด์แล้วยังคงเป็นซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเป็น 185 มิลลิโอห์ม-ซม. จึงต้องนำมาแพร่ซึมใหม่อีก 2 ชม. ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องโพรบสี่เข็ม เป็นชั้นพีเกิดขึ้นจริงโดยวัดหลังจากกัดออกไซด์แล้ว

#### 3. ทำเซลาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กันโดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

ใช้แว่นผลึกชนิดเดียวกับที่ทำเซลาจาก  $\text{B}_2\text{O}_3$  และ  $\text{BBr}_3$

ก. ที่ 1,050°C. ทำเซลา 2 เงื่อนไข โดยใช้เวลาแพร่ซึม 22 และ 20 นาที

ข. ที่ 1,000°C. ทำเซลา 1 เงื่อนไข โดยใช้เวลาแพร่ซึม 30 นาที

ขั้นตอนในการทำเป็นเซลล์ที่สมบูรณ์หลังการแพร์ซิมด้วย BN ทำในลักษณะเดียวกับเซลล์ที่แพร์ซิมด้วย  $BBr_3$

## 5.2 การวัดชนิดและความต้านทานแผ่นของชั้นการแพร์ซิม

แวนผลึกทุกชั้นที่ผ่านการแพร์ซิมแล้วต้องนำมา วัดชนิดของชั้นการแพร์ซิม ด้วยโพรบสี่เข็ม model FPP-100 เมื่อผิวหน้าแวนผลึกเปลี่ยนเป็นชนิดพี จึงอ่านค่าความต้านทานแผ่นของชั้นการแพร์ซิมจากเครื่องดังกล่าว (ดังแสดงรูปเครื่องวัดโพรบสี่เข็มในภาคผนวก จ)

โดยทั่วไปการหาความต้านทานแผ่นด้วยโพรบสี่เข็ม ใช้สูตร (5.1) ช่วยในการคำนวณซึ่งใช้ได้เฉพาะในกรณีที่แวนผลึกใหญ่มากเมื่อเทียบกับ probe spacing (26)

$$R_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (5.1ก)$$

$$= 4.532 \times \frac{V}{I} \quad (5.1ข)$$

เมื่อ  $R_s$  = ค่าความต้านทานแผ่น

$V$  = ค่าแรงดันที่วัดได้จากโพรบคู่ใน

$I$  = ค่ากระแสที่ไหลผ่านแวนผลึกจากโพรบคู่นอก

ในกรณีที่แวนผลึกมีขนาดเล็ก สูตร (5.1) กลายเป็น

$$R_s = C \frac{V}{I} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $C$  คือค่า correction factor

โดยใช้หลักการในลักษณะนี้ เครื่องโพรบสี่เข็ม model FPP-100 ออกแบบมาสำหรับอ่านค่าความต้านทานแผ่นได้ถูกต้องทันที โดยการตั้ง Geometry correction ที่เครื่องให้ตรงกับ correction factor ที่ควรเป็น ซึ่งค่า correction factor หาได้จาก อัตราส่วนระหว่างความกว้างของแวนผลึก ต่อ probe spacing [S] สำหรับเครื่องนี้มี  $S = 62.5$  mil หรือ 1.58 มม.

เมื่อหา correction factor ได้จากกราฟดังแสดงในภาคผนวก จ จึงตั้ง Geometry correction ตามที่หาได้ จากนั้นอ่านค่าความต้านทานแผ่นจากการโพรบได้ทันที

### 5.3 ใช้ anodic oxidation ลอกผิวแว่นผลึกเพื่อหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์ของการแพร่ซึม (29)

การหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์ คือการดูค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนที่ตำแหน่งต่างๆ ลึกลงไปจากผิวหน้าของแว่นผลึกหลังการแพร่ซึม ค่าความเข้มข้นสารเจือปนสามารถหาได้โดยการ เปิดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะ  $[\rho(x)]$  กับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปน  $[N(x)]$  ดังแสดงในรูปที่ 5.4

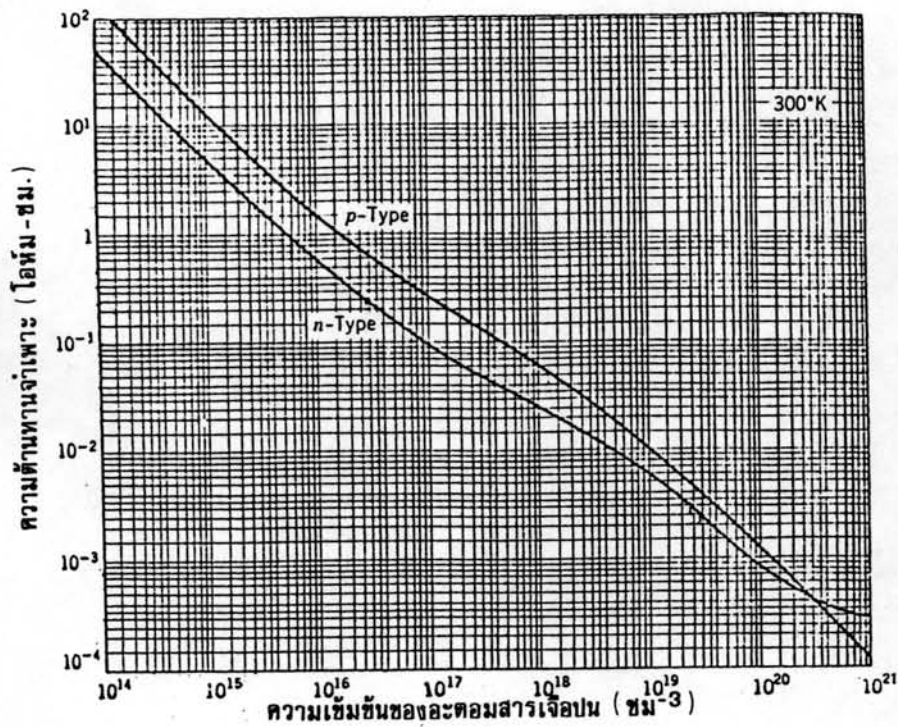
ดังนั้นสิ่งที่ต้องได้จากการวัดคือ ค่าความต้านทานแผ่นและความหนาของชั้นออกไซด์ที่ลอก โดยทำออกไซด์บางๆ และลอกออกทีละชั้น โดยวัดค่าความต้านทานแผ่นทุกครั้งทีลอกออกไซด์ จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นของชั้นที่ลอกออกจากสูตร (5.3)

$$R_s = \frac{R_i \times R_{i+1}}{R_{i+1} - R_i} \quad (5.3)$$

และ  $\rho(x) = R_s \times \Delta x \quad (5.4)$

- เมื่อ  $\rho(x) =$  ค่าความต้านทานจำเพาะของแว่นผลึกที่ความลึก  
 $R_s =$  ค่าความต้านทานแผ่นของชั้นที่ลอก  
 $R_i =$  ค่าความต้านทานแผ่นของแว่นผลึกที่ลอกไปในชั้นที่  $i$   
 $R_{i+1} =$  ค่าความต้านทานแผ่นของแว่นผลึกที่ลอกไปในชั้นที่  $i+1$   
 $\Delta x =$  ความหนาของแว่นผลึกที่ถูกลอกออกแต่ละครั้ง  
 $= 0.42$  ของความหนาของออกไซด์ที่ทำด้วยวิธี anodic

ค่า  $R_i$  และ  $R_{i+1}$  ได้จากการวัดด้วยโพรบสี่เข็มที่แก้ค่า correction factor เรียบร้อยแล้ว เมื่อทราบค่า  $\rho(x)$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแว่นผลึก ทำให้ทราบค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่แต่ละชั้นของแว่นผลึกที่ลอกออก จึงสามารถหาลักษณะโปรไฟล์ของสารเจือปนได้ (รูป เครื่องมือและตารางสำหรับแสดงค่าต่างๆ ในการทำ anodic oxidation แสดงในภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจำเพาะ  
กับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปน (5)

#### 5.4 การย่อมิติเพื่อหาความลึกของหัวต่อพี-เอ็น (26)

ส่วนที่ถือว่าเป็นความลึกของหัวต่อคือตรงจุดที่ความเข้มข้นของสารเจือปนมีค่าเท่ากับ  
ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนในเนื้อซิลิกอนเดิม

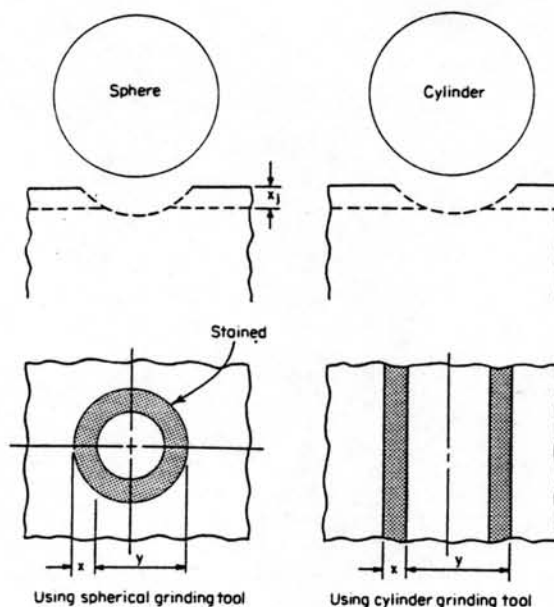
วิธีที่ใช้หาค่าความลึกของหัวต่อคือการเขาระ่องด้วยเครื่องขีดซึ่งหัวขีดเป็นรูปทรงกระ-  
บอก โดยขีดผิวแวนผลิกจนถึงหัวต่อฯ และสามารถคำนวณหาความลึกของหัวต่อฯ ได้จากสูตร

$$x_j = \frac{xy}{D} \quad (5.5)$$

โดย  $x_j$  = ความลึกของหัวต่อฯ

$x$  และ  $y$  = ระยะตามที่แสดงในรูปที่ 5.5 ที่อ่านค่าได้จากกล้องจุลทรรศน์

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขีด (สำหรับเครื่องที่ใช้  $D$  มีค่า 1 นิ้ว)



รูปที่ 5.5 แสดงการเซาะร่องบนผิวหน้าของแว่นผลึก เพื่อหาความลึกของหัวต่อฯ (26)

การอ่านค่าความลึกของหัวต่อฯอ่านจากกล้องจุลทรรศน์ภายหลังการย้อมสีแว่นผลึกที่ขัดแล้ว เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างชั้นที่แพร์ซิมกับเนื้อซิลิกอนเดิม โดยน้ำยาที่ใช้ย้อม มีส่วนผสมคือ conc.HF 10 ml + fuming HNO<sub>3</sub> 1-2 หยด ผลที่เกิดขึ้นบนแว่นผลึกหลังจากหยดน้ำยานี้ลงไป เพียงไม่กี่วินาที ทำให้เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนระหว่างส่วนที่เป็นพีและเอ็น

#### 5.5 การวัดลักษณะกระแสะ-แรงดันของหัวต่อฯที่ได้จากการแพร์ซิม

กระทำการทดสอบคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการแพร์ซิมด้วยตัวเคมสารเจือปน ทั้ง 3 ชนิด ในสภาพมืดและฉายแสง โดยใช้ curve tracer แหล่งกำเนิดแสงได้แก่ หลอดแฮ-โลเจน ซึ่งปรับความเข้มแสงไว้ที่ 100 mW/cm<sup>2</sup>

#### 5.6 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

1. สำหรับการแพร์ซิมโดยใช้เตาที่สร้างขึ้นเองมีปัญหาเรื่อง ช่วงระยะทางอุณหภูมิ-คงที่ ยังไม่ดี และปัญหาการแกว่งของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ในเตามีค่าสูง ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) ทั้งนี้เป็น เพราะ การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิไม่ดีพอ

2. สำหรับการแพร์ซิมด้วย B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ขณะที่ผสมสารละลายของ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Methyl Alcohol

ต้องผสมให้พอเหมาะ หากสารละลายมีความเข้มข้นสูงจะมีปัญหาขึ้นในระหว่างการแพร์ซิม เนื่องจากแพร์ซิมได้น้อย เพราะเกิด Si-B compound ที่หนากันการแพร์ซิม และหลังจากแพร์ซิม ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานแผ่นได้นั้นที่ ต้องทำออกไซด์ลอกผิวหน้าแว่นผลึกออก จึงวัดค่าความต้านทานแผ่นได้

สำหรับการทำสารละลาย ต้องไม่ให้สารละลายถูก boat ที่ใส่แว่นผลึก เพราะจะทำให้แว่นผลึกติดกับ boat เอาออกได้ยากหลังการแพร์ซิม

3. สำหรับการแพร์ซิมด้วย  $BBr_3$  การจัดระบบแพร์ซิมนับว่าสำคัญมาก ถ้าจัดไม่ดี ระบบรั่วได้ ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่อง flow meter เนื่องจากอ่านค่าได้หายๆ เท่านั้น ค่าที่อ่านจึงเป็นค่าโดยประมาณ โดยเฉพาะ  $O_2$  ซึ่งใช้อัตราการไหลต่ำ ความผิดพลาดยิ่งเกิดได้สูง

ในการทดลองโดยทั่วไปสำหรับระบบของ  $BBr_3$  มักเปลี่ยนอัตราการไหลของ  $O_2$  มากกว่าการเปลี่ยนอัตราการ bubble  $N_2$  ผ่าน  $BBr_3$  เพราะทำได้ง่ายกว่า แต่สำหรับในการทดลองนี้ flow meter ของ  $O_2$  ไม่ละเอียดพอที่จะปรับค่าของ  $O_2$  ได้ จึงต้องมาปรับอัตราการไหลของ  $N_2$  bubble แทน ถึงกระนั้นก็ยังมีปัญหาเรื่องการปรับ  $N_2$  bubble ให้คงที่ที่ค่าๆ หนึ่ง เมื่อต้องการเงื่อนไขของการแพร์ซิมในลักษณะที่ให้การ bubble คงที่ เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรอื่น

4. สำหรับการแพร์ซิมด้วย BN boat ที่ใส่แผ่น BN เป็นตัวกำหนดขนาดและรูปร่างแว่นผลึกที่ใช้ในการแพร์ซิม ทำให้ต้องใช้แว่นผลึกแผ่นโตในการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองและไม่สะดวกต่อการเลือกใช้แว่นผลึกที่มีอยู่ในห้องวิจัยนี้

5. ในการลอกผิวแว่นผลึกด้วย anodic oxidation ผิวหน้าแว่นผลึกที่เกิดจากการลอกแต่ละครั้ง ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ข้อมูลของอิมพีเวริตีโปรไฟล์ที่ได้จากการทำ anodic oxidation มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงบ้าง