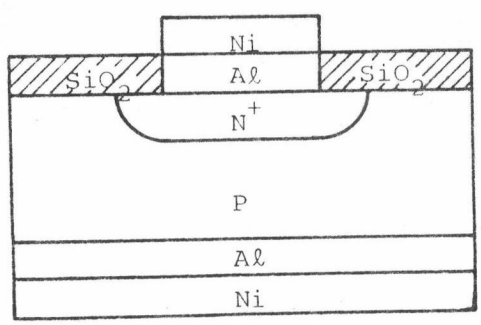
บทที่ 4

การประดิษฐ์ไดโอด

ในการประดิษฐ์ไดโอดจำเป็นที่จะต้องมีขั้นตอนที่แน่นอน เพื่อในการทำครั้งต่อๆ ไปจะได้ไดโอดที่มีคุณสมบัติเหมือนกับครั้งเดิม ดังนั้นการประดิษฐ์ไดโอดจึงได้ทำการแบ่งขั้นตอนออกเป็น 24 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ยังไม่ได้รวมถึงวิธีการห่อหุ้มไดโอด (Encapsulation and packaging) ซึ่งจะบรรยายในหัวข้อที่4.5.6ใน24ขั้นตอนนี้จะเน้นหนักถึงวิธีการประดิษฐ์ไดโอดเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยได้บรรยายถึงวิธีคำนวณวิธีการแพร่สารเจือปน การใช้น้ำยาสารเคมี ตลอดจนข้อควรระวังในขณะทำการประดิษฐ์ไดโอด วิธีการที่แสดงให้เห็นในตัวอย่างของบทนี้ เพื่อที่ต้องการให้ได้ไดโอดที่มีความลึกของหัวต่อประมาณ 3.8 ไมโครเมตรโดยให้มีความหนาแน่นของพาหะประมาณ 10^{19} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.1 ลำดับขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอด

ลักษณะโครงสร้างของไดโอด (diode) ที่จะประดิษฐ์นี้มีแสดงดังรูปที่ 4.1 แว่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นเป็นชนิดพี (P-type) จากนั้นจึงทำการแพร่สารเจือปนชนิดเอ็น (N-type) ลงไปและใช้อลูมิเนียม (Aℓ) ทำขั้วต่อแบบโอห์มมิคโดยใช้นิเกิล (Ni) วางซ้อนอีกชั้นเพื่อช่วยเชื่อมบัดกรีให้ง่ายขึ้น การประดิษฐ์นี้ต้องใช้หน้ากาก 2 แผ่น คือ แผ่นสำหรับขั้นตอนก่อนแพร่สารเจือปน และแผ่นสำหรับขั้นตอนก่อนทำการฉาบอลูมิเนียม



รูปที่ 4.1 แสดงรูปโครงสร้างของไดโอด

ลำดับขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดมีดังนี้

4.1.1 คัดเลือกแว่นผลึกโดยใช้เครื่องมือวัดโพรบสี่เข็ม

4.1.2 ทำความสะอาดแว่นผลึก

4.1.3 ปลูกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส

4.1.4 ถ่ายแบบเปิดช่อง SiO_2 สำหรับเตรียมแพร่สารเจือปนฟอสฟอรัส

4.1.5 ทำการแพร่สารเจือปนฟอสฟอรัสลงบนแว่นผลึกซิลิกอนโดยมีปฏิกริยาเคมีขณะทำการแพร่สารเจือปน $POCl_3$ ดังนี้

$$4POCl_3 + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5 + 6Cl_2 \uparrow$$

$$2P_2O_5 + 5Si \rightarrow 5SiO_2 + 4P \downarrow$$

4.1.6 วัดค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นเอ็นด้วยโพรบสี่เข็ม

4.1.7 ทำการ drive-in เพื่อให้ได้ชั้นเอ็นหนาประมาณ 3.8 ไมโครเมตร

4.1.8 ถ่ายแบบเปิดช่อง SiO_2 สำหรับเตรียมฉาบอลูมิเนียม

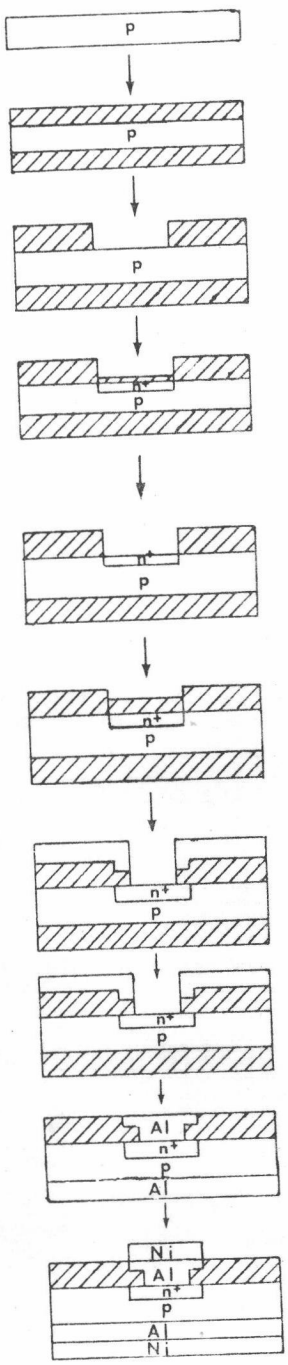
4.1.9 ทำการฉาบอลูมิเนียมในสูญญากาศ (ประมาณ 10^{-6} ทอร์ร)

4.1.10 ทำ annealingเพื่อให้ได้หัวต่อแบบโอห์มมิค

4.1.11 ทำการชุบนิเกิล (Ni) เพื่อให้หน้าสัมผัสของไดโอดกำลังบริเวณอลูมิเนียมสามารถบัดกรีด้วยตะกั่วได้

4.1.12 ทำการต่อสายไฟและวัดคุณสมบัติของไดโอด

4.2 ไฟว์ชาร์ทของขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอด



เลือกแว่นผลึก ขัดผิว และทำความสะอาด	- มี Defect น้อย , ความต้านทานจำเพาะสูง
ปลูกซิลิกอนไดออกไซด์	- 1050 องศาเซลเซียส
ถ่ายแบบและเปิดช่อง SiO_2	- ใช้หน้ากากรูปที่ 4.2 - HF (800 อังสตรอม / นาที)
แพร่ซึมสารเจือปน ด้วย $POCl_3$	- 950 องศาเซลเซียส 30 นาที
กัดความสกปรกของหลังการแพร่ซึมสารเจือปน $POCl_3$ ออก	- HF (800 อังสตรอม/ นาที) 5 วินาที
ทำความสะอาดผิว และ Drive-in	- 1050 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง
ถ่ายแบบและเปิดช่องออกไซด์	- ใช้หน้ากากรูปที่ 4.3 - HF (800 อังสตรอม / นาที)
ทำความสะอาด	- น้ำ DI, 10 นาที, เป่าให้แห้งโดยใช้ N_2
ฉาบโลหะ Al โดยวิธี evaporation	- ความดัน 10^{-6} ทอร์ร หนา 5500 อังสตรอม
ชุบโลหะ Ni โดยวิธี electroless	- ภาคผนวก ข. - ให้มี pH ≈ 8-9 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
ตัดแว่นผลึกเพื่อทดสอบ	- ตัดตามรูปที่กำหนดไว้
นำไปต่อสายเพื่อทดสอบ	- ต่อสายไฟ

4.3 ขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดอย่างละเอียด

หัวข้อ การปลูกซิลิกอนไดออกไซด์

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
1	ทำความสะอาดเริ่มต้น	Trichloroethylene 5 นาที Acetone 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 5 นาที HNO_3 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 5 นาที HF 2 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที	*เวลาของการจุ่ม HF ต้องให้พอดี 2 นาที
2	ปลูก SiO_2	Furnace No A3 อุณหภูมิเตา 1050 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซ O_2,N_2,O_2(น้ำ) 450,450,700 มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิของน้ำ 80 องศาเซลเซียส เวลาของการปลูก SiO_2 แบบเปียก 2 ชั่วโมง แบบแห้ง 0.5 ชั่วโมง	
	ตรวจสอบ	ความหนาที่ต้องการ 5500 อังสตรอม ดูสี SiO_2 แล้วเปรียบเทียบได้ความหนา 5020 อังสตรอม สี สีน้ำเงิน-เขียว	สีของ SiO_2 เปรียบเทียบกับความหนาแสดงในภาคผนวก ก.

หัวข้อ การถ่ายแบบ เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับ เตรียมแพร่สาร เจือปนฟอสฟอรัส

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
3	ถ่ายแบบ เปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์	อบด้วยอุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส 30 นาที หยดน้ำยาไวแสงแล้ว เข้า เครื่อง spin 5000 รอบ/นาที 20 วินาที อบ น้ำยาไวแสง 60 องศา เซลเซียส 15นาที	
		นำหน้ากากวางทาบแล้วฉายด้วย แสงอุลต้าไวโอเลตเป็นเวลา 13 วินาที ล้างน้ำยาไวแสงออกด้วย developer 30 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที (จนสะอาด) เป่าให้แห้งด้วย N_2 แล้วอบด้วยอุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส 30 นาที	ใช้หน้ากากรูปที่ 4.2
4	ตรวจสอบ	ตรวจสอบความคมชัดที่ได้ด้วยกล้อง ขยาย และจะต้องไม่มีน้ำยาไวแสง หลงเหลืออยู่บริเวณที่ต้องการเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์	ถ้าน้ำยาไวแสงยัง คงหลงเหลืออยู่ให้ ทำการล้างน้ำยาไว แสงออกให้หมด และ กลับไปทำขั้นตอนที่ 3 ซ้ำอีกครั้ง

หัวข้อ การเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
5	เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์	$HF : NH_4F : H_2O$ 6 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
6	ตรวจสอบ	ตรวจสอบความคมชัดที่ได้ด้วยกล้องขยาย โดยช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดออกจะต้องสะอาด	การตรวจสอบขั้นแรกโดยการตรวจสอบว่าน้ำ DI จะไม่เกาะผิว Si แต่จะเกาะผิว SiO_2 ถ้าเป็นเช่นนี้แสดงว่าบริเวณช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดออกสะอาดและถูกกัดออกจนหมด

หัวข้อ ทำความสะอาดแว่นผลึกหลังการ เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
7	ล้างน้ำยาไวแสง ที่เหลืออยู่ออกให้หมด	Acetone 5 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
8	ตรวจสอบ	ตรวจสอบด้วยกล้องขยายจะต้องไม่มีน้ำยาไวแสงตกค้างอยู่	ถ้ายังคงมีน้ำยาไวแสงตกค้างอยู่ให้กลับไปทำความสะอาดใหม่อีกครั้งตามขั้นตอนที่7

หัวข้อ การแพร่สารเจือปนฟอสฟอรัสในขั้นตอนpredeposition

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
9	ทำความสะอาดแว่น-ผลึกก่อนเข้าเตา	ใช้น้ำยากัด SiO_2 5 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
10	แพร่สารเจือปนฟอสฟอรัส	เตาหมายเลขที่ Al อุณหภูมิเตา 950 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ O_2,N_2,$N_2(POCl_3)$ 190,860,190 มิลลิลิตร/นาที 30 นาที	
	ตรวจสอบ	1. ความลึกที่ต้องการ 0.34 ไมโครเมตร วัดความลึกได้ 0.3 ไมโครเมตร 2.วัดความต้านทานจำเพาะได้ 5.8 มิลลิโอห์ม-เซนติเมตร หรือประมาณ 10^{19} อะตอม/ลูก-บาศก์เซนติเมตร	วิธีวัดความลึกให้ดูได้ในภาคผนวก ช.

หัวข้อ การ Drive-in

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
11	ทำความสะอาด	จุ่มในน้ำยากัด SiO_2 2 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
12	Drive-in	เตาหมายเลขที่ B_2 อุณหภูมิเตา 1050 องศาเซลเซียส อุณหภูมิน้ำ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซ O_2,N_2 450,450 มิลลิลิตร/นาที 4 ชั่วโมง	
	ตรวจสอบ	1. ความลึกที่ต้องการ 3.8 ไมโครเมตร วัดความลึกได้ 3.5 ไมโครเมตร 2. วัดความต้านทานจำเพาะได้ 6.5 โอห์ม-เซนติเมตร หรือประมาณ 10^{19} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	การวัดความลึกให้ดูได้ที่ภาคผนวก ช.

หัวข้อ การถ่ายแบบ เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับ เตรียมฉาบอลูมิ เนียม

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
13	ถ่ายแบบ เปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์	อบด้วยอุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส 30 นาที หยดน้ำยาไวแสงแล้ว เข้า เครื่อง spin 5000 รอบ/นาที 20 วินาที อบ น้ำยาไวแสง 60 องศา เซลเซียส 15นาที	
		นำหน้ากากวางทาบแล้วฉายด้วย แสงอุลต้าไวโอเลตเป็นเวลา 13 วินาที ล้างน้ำยาไวแสงออกด้วย developer 30 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที (จนสะอาด) เป่าให้แห้งด้วย N_2 แล้วอบด้วยอุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียส 30 นาที	ใช้หน้ากากรูปที่ 4.3
14	ตรวจสอบ	ตรวจสอบความคมชัดที่ได้ด้วยกล้อง ขยาย และจะต้องไม่มีน้ำยาไวแสง หลงเหลืออยู่บริเวณที่ต้องการเปิดช่อง ซิลิกอนไดออกไซด์	ถ้าน้ำยาไวแสงยัง คงหลงเหลืออยู่ให้ ทำการล้างน้ำยาไว แสงออกให้หมด และ กลับไปทำขั้นตอนที่ 13 ซ้ำอีกครั้ง

หัวข้อ การ เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
15	เปิดช่องซิลิกอน-ไดออกไซด์	$HF : NH_4F : H_2O$ 6 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
16	ตรวจสอบ	ตรวจสอบความคมชัดที่ได้ด้วยกล้องขยาย โดยช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดออกจะต้องคมชัด	การตรวจสอบขั้นแรกโดยการตรวจสอบที่น้ำ DI จะไม่เกาะผิว Si แต่จะเกาะผิว SiO_2 ถ้าเป็นเช่นนี้แสดงว่าบริเวณช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเปิดออกสะอาดและถูกกัดออกจนหมด

หัวข้อ การฉาบอลูมิเนียมในสุญญากาศ

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
17	ทำความสะอาด	ใช้น้ำยากัด SiO_2 2 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	
18	ฉาบอลูมิเนียม	ความดันในครอบแก้ว ~ 10^{-6} ทอร์ร ฉาบด้านหน้าหนา 5500 อังสตรอม ฉาบด้านหลังหนา 5500 อังสตรอม	ค่าของความหนาและแรงดันในครอบแก้วอ่านได้ที่เครื่องมือฉาบอลูมิเนียม ในขั้นตอนนี้น้ำยาไวแสงยังถูกเคลือบที่SiO_2แต่Siจะไม่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่

หัวข้อ การเอาอลูมิเนียมที่เกาะอยู่บนผิวน้ำยาไวแสงออก

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
19	นำเอาอลูมิเนียมที่เกาะอยู่บนผิวน้ำยาไวแสงออก	Acetone (ultra-sonic) 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI 10 นาที เป่าให้แห้งด้วย N_2	ขั้นตอนที่ 18 ยังมียาไวแสงฉายอยู่บน SiO_2 ดังนั้นจึงใช้ Acetone ล้างออก
20	ตรวจสอบ	ตรวจสอบความคมชัดได้ด้วยกล้องขยายโดย Al ที่ติดอยู่บนน้ำยาไวแสงจะหลุดออกมาพร้อมๆ กับน้ำยาไวแสงซึ่งทำให้ Al ติดเฉพาะส่วนที่ได้เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ในขั้นตอนที่ 13 เท่านั้น	ถ้ายังมีอลูมิเนียมติดอยู่บนซิลิกอนไดออกไซด์ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 19 ซ้ำอีกครั้ง วิธีการเช่นนี้เป็นวิธีการหนึ่งของการทำขั้วต่อเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการถ่ายแบบหลายๆ ครั้ง ทั้งยังง่าย สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งเหมาะกับแว่นผลึกที่มีผิวหยาบแต่ถ้าต้องการกัดอลูมิเนียมให้คมชัดควรมีการถ่ายแบบอีกครั้งแล้วจึงกัดด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งเหมาะกับแว่นผลึกที่มีผิวมัน

หัวข้อ การannealing

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
21	Annealing	เตาเลขที่ B6 อุณหภูมิเตา 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ N_2 450 มิลลิลิตร/นาที 10 นาที	ดูอุณหภูมิและอัตรวส่วนผสมของ Aℓ กับ Si ในรูปที่ 2.23 ใช้ N_2
22	ตรวจสอบ	วัดค่าความต้านทานจำเพาะต้องต่ำกว่า 10 โอห์ม-เซนติเมตร	ถ้าใช้เวลาในการ Annealing นานเกินไปจะทำให้ค่าความต้านทานสูงกว่า 10 โอห์ม-เซนติเมตร แสดงว่า Aℓ มีความต้านทานที่สูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมสูงขึ้นตาม

หัวข้อ ทำการชุบนิเกลโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

ชื่อชิ้นงาน Power Diode

ลำดับที่	ขั้นตอนการทำ	วิธีการ	หมายเหตุ
23	ชุบนิเกิล	$NiCl_2.6H_2O$ 30 กรัม $(NH_4)_2.HC_6H_5O_7$ 65 กรัม $NaH_2PO_2.H_2O$ 10 กรัม NH_4Cl 50 กรัม น้ำ DI 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร NH_4OH เติมจนได้ pH ≃ 8-9 อุ่น Solution จนได้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส	สีของ Solution จะเป็นสีน้ำเงินเมื่อ pH ประมาณ 8-9 และก่อนที่จะเติม NH_4OH ให้นำเอา Solution ไปกรองให้สะอาดเสียก่อน
24	อบแว่นผลึก	อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง	เป็นการอบไล่ความชื้นออกให้หมด เพื่อ contact จะได้แน่นและแข็งแรง

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาความลึกของหัวต่อ X_j

ขั้นตอน predeposition กำหนดให้ $N(0,t)\big|_{POCl_3} = 10^{19}$ cm^{-3}

$T = 950^{\circ}C$

$N(\chi,t) = 10$ Ω-cm

$\simeq 1.8 \times 10^{15}$ cm^{-3}

$\sqrt{D} = 0.045$ $\mu/hr^{\frac{1}{2}}$

$t = \frac{1}{2}$ hr

จากสมการที่ 2.57

$$\frac{N(\chi,t)}{N(0,t)} = \text{erfc}\ \frac{X_j}{2\sqrt{D}\sqrt{t}}$$

แทนค่า

$$\frac{1.8 \times 10^{15}}{1 \times 10^{19}} = \text{erfc}\ \frac{X_j}{2 \times 0.045\sqrt{t}}$$

$$\text{erfc}\ \frac{X_j}{0.09\sqrt{t}} = 1.8 \times 10^{-4}$$

จากกราฟรูปที่ 2.16 จะได้ว่า

$$\frac{X_j}{0.09\sqrt{t}} = 2.65$$

$$X_j = 2.65 \times 0.09\sqrt{\tfrac{1}{2}}$$

$$= 0.34 \quad \mu m. \quad \#$$

ขั้นตอนการ drive-in กำหนดให้ $N_o = 10^{19}$ cm^{-3}

$N_A(\chi,t) = 1.8 \times 10^{15}$

$D_p = 0.045$ $\mu/hr^{\frac{1}{2}}$

$D_d = 0.15$ $\mu/hr^{\frac{1}{2}}$

$T = 1050^{o}C$

$t_p = \frac{1}{2}$ hr

$t_d = 4$ hr

จากสมการที่ 2.61 จะได้ว่า

$$\frac{N_A(\chi,t_d)}{N_o} = \frac{2\sqrt{D_p t_p}}{\pi\sqrt{D_d t_d}} \exp\left[-\frac{\chi_j^2}{4D_d t_d}\right]$$

$$\frac{1.8 \times 10^{15}}{1 \times 10^{19}} = \frac{2 \times 0.045\sqrt{\frac{1}{2}}}{\pi \times 0.15\sqrt{4}} \exp\left[-\frac{\chi_j^2}{4 \times 0.15 \times 4}\right]$$

$$\exp\left[-\frac{\chi_j^2}{2.4}\right] = 2.666 \times 10^{-3}$$

$$-\frac{\chi_j^2}{2.4} = \ln 2.666 \times 10^{-3}$$

$$\chi_j = 3.8 \quad \mu m \quad \#$$

จากผลการทดลองและได้ใช้เครื่องขัดเซาะร่องดูความลึกของการแพร่ซึมปรากฏว่า ได้ความลึกหลังจากการ predeposition เท่ากับ 0.3 ไมโครเมตร ได้ความลึกหลังการ drive-in เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร และมีความเข้มข้นผิวของการแพร่ซึมประมาณเท่ากับ 1×10^{19} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความลึกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณมาก ทั้งยังได้ความเข้มข้นเป็นแบบเข้มข้นสูง (heavily dope) ได้หัวต่อแบบซัน (one-side step junction)

ตารางของเตาหมายเลขที่ A1 (Predeposition)

$POCl_3$	Furnace temperature	$950^{o}C$	
	N_2	430	mℓ/min
	O_2	0.14	mℓ/min
	$N^{*}(POCl_3)$	430	mℓ/min
	Predeposition time	30	min

Step	time (min)	temp	in-out	N_2	N_2*	O_2
00	0 0 0 0	950		N_2		
01	0 0 1 0	950		N_2		
02	0 0 0 5	950	in	N_2		O_2
03	0 0 3 0	950		N_2	N_2	O_2
04	0 0 0 5	950		N_2		O_2
05	0 0 1 0	950	out	N_2		O_2
06	0 0 1 0	950		N_2		

ในขั้นตอนที่ 01 ถึงขั้นตอนที่ 06 เมื่อใช้อุณหภูมิตามที่ได้แสดงไว้ สามารถคำนวณหาความลึกของการแพร่ซึมเท่ากับ 0.34 ไมโครเมตร แต่จากการทดลองได้ความลึกเท่ากับ 0.3 ไมโครเมตร และวัดค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวหน้าของแว่นผลึกได้ประมาณ 1×10^{19} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้หัวต่อแบบชัน

ตารางของเตาหมายเลข B_2 (Drive-in)

Phosphorus Drive-in	Furnace temperature	1050°C	
	Water temperature	80°C	
	N_2	450	mℓ/min
	O_2	450	mℓ/min
	O_2^* (water)	450	mℓ/min
	Drive-in time	4	hr

Step	time (min)	temp	in-out	N_2	O_2	O_2^*
00	0 0 0 0	1050		N_2		
01	0 0 1 0	1050			O_2	
02	0 0 0 5	1050	in		O_2	
03	0 0 9 0	1050				O_2^*
04	0 0 3 0	1050			O_2	
05	0 1 2 0	1050		N_2		
06	0 0 1 0	1050	out	N_2		
07	0 0 1 0	1050		N_2		

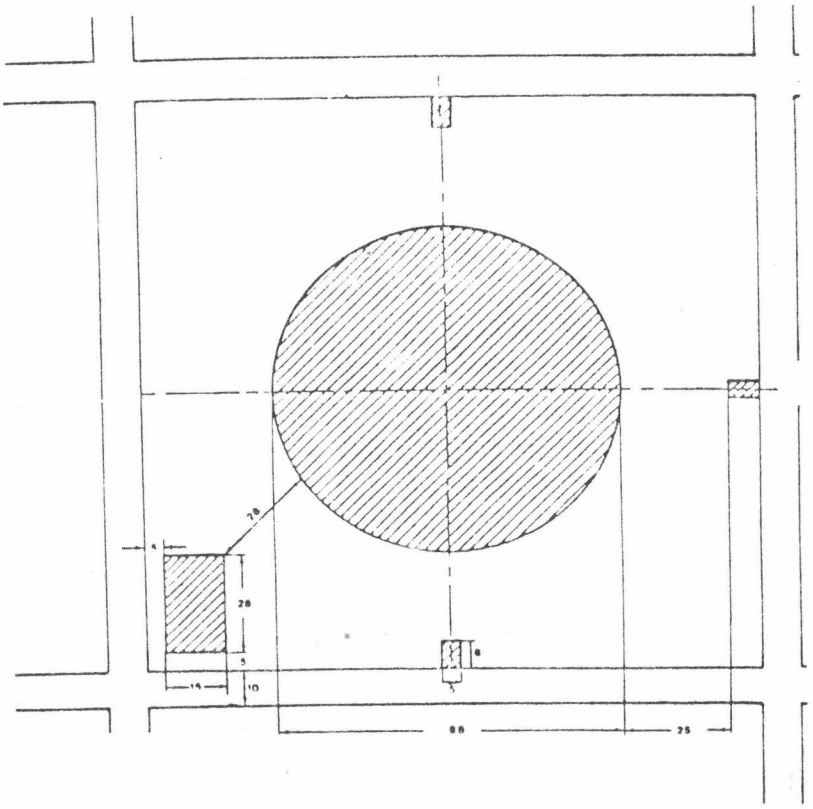
ในขั้นตอนที่ 01 ถึงขั้นตอนที่ 07 เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาดังได้แสดงไว้จะสามารถคำนวณหาความลึกของการ drive-in เท่ากับ 3.8 ไมโครเมตร แต่จากการทดลองได้ความลึกที่วัดได้เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร และวัดค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวหน้าของแวนผลึกได้ประมาณ 1×10^{19} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้หัวต่อแบบชัน

4.4 หน้ากากที่ใช้ทำไดโอด (mask)

ในขั้นตอนการทำไดโอดนี้ได้ใช้หน้ากากที่ไว้ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ 2 แบบ ดังรูปที่ 4.2 เป็นหน้ากากสำหรับเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการแพร่ซึมสาร เจือปนฟอสฟอรัส ส่วนรูปที่ 4.3 เป็นหน้ากากสำหรับเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการฉาบอลูมิเนียม (Al-metalization) ซึ่งขนาดหน้ากากของรูปที่ 4.2 จะโตกว่าขนาดหน้ากากของรูปที่ 4.3 เพื่อให้การซ้อนรูปทั้งสองตรงกัน ดังนั้นขนาดและจุดศูนย์กลางจะต้องเท่ากันและตรงกัน ซึ่งถ้าซ้อนกันไม่ดีแล้วจะทำให้วงแหวนที่ได้เบี้ยวไปด้านหนึ่ง แล้วจะทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงซึ่งจะทำให้เกิดการพังทะลุ (breakdown) ได้ง่ายขึ้น

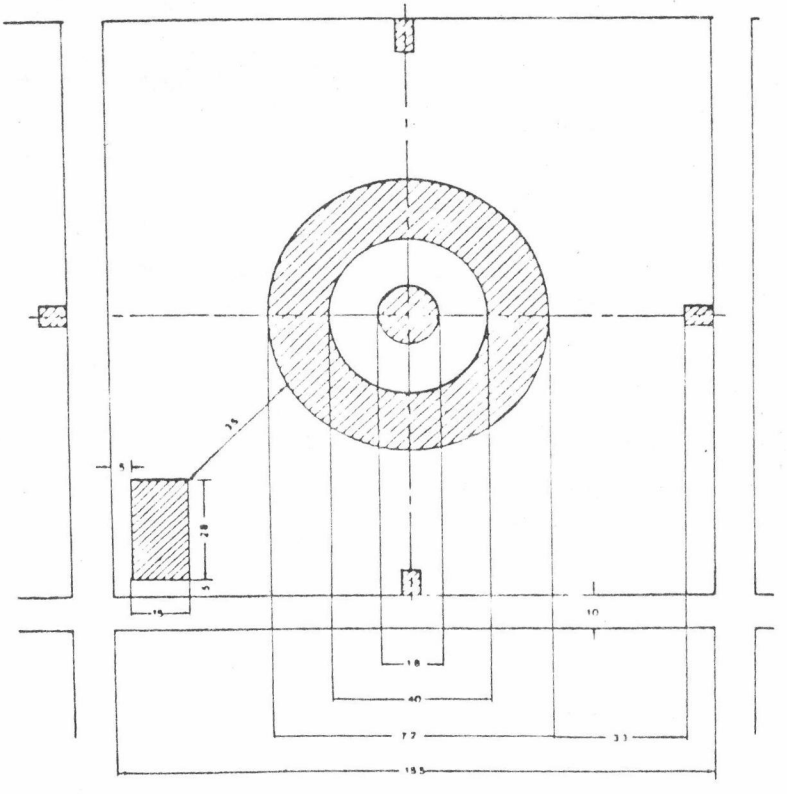
จากการทดลองได้ใช้หน้ากากที่ถูกขยายจากหน้ากากของทรานซิสเตอร์ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการขยายแล้วดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะทำให้ขนาดเยื้องกันอยู่ประมาณ 2 มิลลิเมตร ทุกๆ 100 มิลลิเมตร เป็นเหตุทำให้การซ้อนหน้ากากมีโอกาสที่เกิดการเบี้ยวขึ้นได้ อย่างไรก็ตามถ้าใช้กระดาษไขเขียนแบบแล้วมาสร้างหน้ากากขึ้นเองจากนั้นได้ใช้กล้องถ่ายรูป (ขนาดฟิล์ม 35 มิลลิเมตร) นำมาถ่ายรูปที่ได้ก็จะไม่สมดุลย์อยู่แล้ว เนื่องจากเลนซ์ของกล้อง และยิ่งนำรูปมาขยายและซ้อนกันก็ยิ่งทำให้วงแหวนที่ได้มีโอกาสเบี้ยวมากด้วย ดังนั้นหน้ากากของไดโอดกำลังนี้ จึงได้นำเอาหน้ากากของทรานซิสเตอร์ซึ่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีอยู่แล้วมาทำการขยาย

หลังจากที่ได้หน้ากากแล้วขั้นตอนการถ่ายแบบเพื่อเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการแพร่ซึมสารเจือปนฟอสฟอรัส จะต้องถ่ายแบบให้ตรง plane ของแว่นผลึกเพื่อเวลาการกรีดและตัดแว่นผลึกจะได้ง่ายขึ้น เมื่อทำการแพร่ซึมสารเจือปน แล้วในขั้นตอน drive-in นี้จำเป็นจะต้องมีการปลูกซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการ drive-out (ดูรูปที่ 4.4) ดังนั้นความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) บริเวณ 1 จึงมีความสำคัญมาก โดยความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ค่าต่างๆ กันจะมีการหักเหของแสงที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เห็นซิลิกอนไดออกไซด์มีสีต่างๆ (ดูภาคผนวก ก.) ถ้าให้สีของบริเวณ 1 และ 2 แตกต่างกันมากๆ จะทำให้การถ่ายแบบเปิดช่องออกไซด์สำหรับการฉาบอลูมิเนียม เห็นได้ชัดขึ้นทำให้การถ่ายแบบได้จุดศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามการเคลือบน้ำยาไวแสงก็มีผลทำให้ความแตกต่างของสีในบริเวณ 1 และบริเวณ 2 ผิดไป และยิ่งเคลือบน้ำยาไวแสงหนามากๆ ก็จะทำให้สภาพการมองเห็นความแตกต่างของสียิ่งเลวลง การใช้แว่นผลึกผิวขัดมันจะช่วยให้สภาพการมองเห็นดียิ่งขึ้น ดังนั้นสภาพผิวของซิลิกอนไดออกไซด์,



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

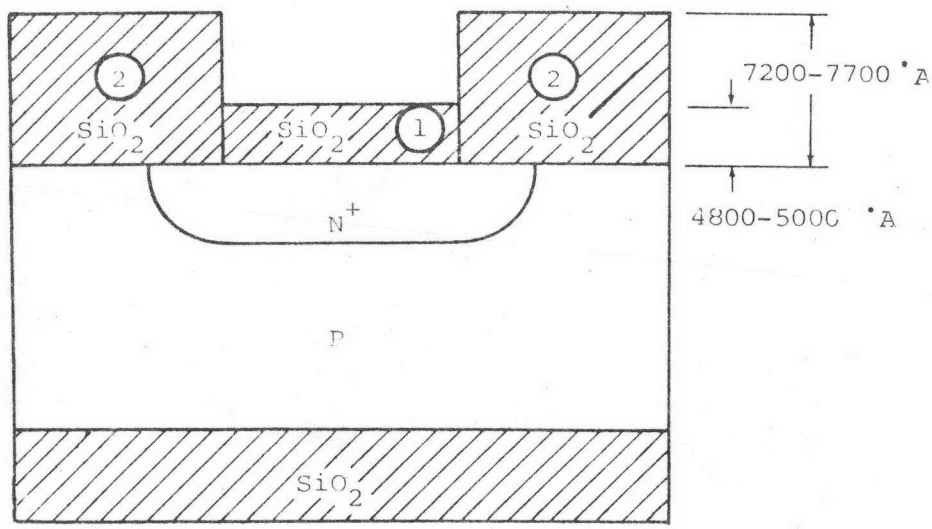
รูปที่ 4.2 แบบสำหรับ เปิดช่อง SiO_2 เพื่อ เตรียมการแพร่ซึมสาร เจือปนฟอสฟอรัส



รูปที่ 4.3 แบบสำหรับ เปิดช่อง SiO_2 เพื่อ เตรียมการฉาบอลูมิ เนียม เป็นหน้ากากของทรานซิส เตอร์ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่ง ประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ และความเที่ยงตรงของหน้ากากจะมีผลต่อ yield ของการประดิษฐ์มาก

จากการทดลองได้ทำการปลูกซิลิกอนไดออกไซด์ (ในขั้นตอน drive-in) สำหรับบริเวณ 1 หนา 4800-5000 อังสตรอม ทั้งยังป้องกันการ drive-out และสำหรับบริเวณ 2 จะได้ความหนาเพิ่มขึ้นมาเป็น 7200-7700 อังสตรอม ซึ่งความหนาที่ได้นี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการปลูกซิลิกอนไดออกไซด์แบบเปียกและแบบแห้งในขั้นตอนการ drive-in ทั้งสิ้น



รูปที่ 4.4 ซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการ drive-in

4.5 สรุปผลการประดิษฐ์และปัญหาในทางปฏิบัติ

ในการประดิษฐ์ไดโอดนี้ได้ใช้วิธีการของ planar technology โดยได้ใช้แว่นผลึกสำหรับทำเซลแสงอาทิตย์ ซึ่งมีผิวหยาบ (ความต้านทานจำเพาะประมาณ 10 โอห์ม-ซม. ชนิด P) นำมาเป็นแว่นผลึกเริ่มต้นสำหรับทำไดโอดกำลัง หลังจากที่ผ่านขั้นตอน drive-in แล้วจะได้ความลึกของ N-type ประมาณ 3.8 ไมโครเมตร และฉาบอลูมิเนียมด้วยความหนาประมาณ 5500 อังสตรอม จากขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดดังกล่าวปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งเป็นข้อๆ ดังนี้

4.5.1 แว่นผลึก

ในการประดิษฐ์ไดโอดนี้ได้ใช้แว่นผลึกสำหรับทำเซลแสงอาทิตย์ซึ่งมีผิวหยาบ ความต้านทานจำเพาะตลอดแผ่นไม่สม่ำเสมอและมี Defect มาก ทำให้การทำในขั้นตอนเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเตรียมทำการฉาบอลูมิเนียมของเห็นไม่ชัดเจน และพื้นที่นำกระแสของไดโอดต้องมีขนาดเล็กลง เพื่อลดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current)

4.5.2 น้ำ DI

น้ำ DI ที่ใช้มีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ 1 เมกกาโอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำหนดมาก (ปกติจะประมาณ 10 เมกกาโอห์ม-เซนติเมตร ขึ้นไป) ดังนั้นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดจึงมีผลเนื่องมาจากการใช้น้ำ DI ที่มีค่าต่ำๆด้วย

4.5.3 สารเคมี

ในขณะที่ทำความสะอาดแว่นผลึกและกัดซิลิกอนไดออกไซด์ออกควรที่จะล้างด้วยน้ำ DI จนแน่ใจว่าสารเคมีเหล่านั้นจะหลุดไปหมดจากแว่นผลึกก่อนที่จะนำเอาแว่นผลึกไปเข้าเตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่แว่นผลึกถูกทำความสะอาดด้วย Trichloroethylene ไม่ควรให้แว่นผลึกถูกน้ำเลย เพราะจะทำให้เกิดฝ้าติดอยู่บนแว่นผลึกและล้างไม่ออก ดังนั้นจึงต้องใช้ actoneทำการล้าง Trichloroethylene ออกเสียก่อน จนแน่ใจว่าสะอาดแล้วจึงล้างด้วยน้ำ DI จนสะอาดและทำการเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

4.5.4 การถ่ายแบบ (masking)

การถ่ายแบบเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเตรียมทำการฉาบอลูมิเนียม ถ้าความแตกต่างของสีของซิลิกอนไดออกไซด์ในขั้นตอนหลัง drive-in มีไม่มากจะทำให้การถ่ายแบบยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีการเคลือบน้ำยาไวแสงที่หนาๆ ยิ่งทำให้มองเห็นความแตกต่างยากยิ่งขึ้น ดังนั้นในการปลูกซิลิกอนไดออกไซด์ในขณะทำการ drive-in (เพื่อป้องกัน out-diffusion) จึงจำเป็นจะต้องทราบถึงความหนาที่ต้องการและสีของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น มิฉะนั้นการมองด้วยกล้องเพื่อทำการถ่ายแบบ จะเล็งให้ได้ซ้อนกับรูปแรกเป็นไปได้ยาก และหน้ากากรูปที่ 4.3 ควรเป็นหน้ากากที่สามารถเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ได้หมดเช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 แต่มีเส้นผ่าศูนย์กลางแคบกว่า

4.5.5 ความต้านทานอนุกรมและความแข็งแรงของขั้วต่อแบบโอห์มมิค

ความต้านทานอนุกรมที่เกิดจากเนื้อแว่นผลึกซิลิกอนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (4.1)$$

กำหนดให้ ρ = 10 โอห์ม-ซม. L = 220 ไมโครเมตร A = 2.5 ตารางมิลลิเมตร แทนค่าจะได้ความต้านทาน (R) เท่ากับ 8 โอห์ม จะเห็นว่าความต้านทานที่ได้นี้ยังไม่รวมความต้านทานที่เกิดจากขั้วต่อแบบโอห์มมิค ซึ่งในการประดิษฐ์ไดโอดนี้ได้ใช้อลูมิเนียมทำเป็นขั้วต่อแบบโอห์มมิค โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส ทำการหลอมอลูมิเนียมและซิลิกอนเข้าด้วยกันโดยใช้ไนโตรเจนเป็นตัวป้องกันออกซิเจนรวมตัวกับอลูมิเนียม หลังจากการแอลนีลแล้วสีของอลูมิเนียมจะหมองเล็กน้อย เนื่องจากมีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกริยากลายเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ติดอยู่บริเวณผิวหน้าทำให้การชุบนิเกิลโดยไม่ใช้ไฟฟ้าชุบติดยาก เพื่อให้นิเกิลไปเกาะติดกับอลูมิเนียมอย่างเหนียวแน่นเป็นเป็นไปได้ลำบาก ดังนั้นหลังจากที่ได้ทำการชุบนิเกิลแล้วจึงต้องนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นบริเวณรอยต่อของอลูมิเนียมกับนิเกิล ซึ่งถ้าทำการชุบนิเกิลไม่ดีและอบไล่น้ำออกไม่หมดแล้วถ้าทำการต่อบัดกรีเพื่อเชื่อมสายไฟจะทำให้นิเกิลร่อนและหลุดออกมาได้ จากการทดสอบแรงยึดของขั้วต่อแบบโอห์มมิค โดยทำการบัดกรีขั้วต่อและเข้าเครื่องวัดแรงดึงประกฏว่าสามารถทนแรงดึงตั้งฉาก ได้ประมาณ 2 กิโลกรัมต่อ 2.5 ตารางมิลลิเมตรหรือประมาณ 78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.5.6 การห่อหุ้มไดโอด (Encapsulation and Packing)

ในการห่อหุ้มไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นได้ทำการห่อหุ้มตามสถานะของการนำไปทดสอบ เช่น ห่อหุ้มไดโอดเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติ กระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ การห่อหุ้มไดโอดเพื่อทดสอบหา current rating ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถทำการหาผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ง่ายขึ้น และการห่อหุ้มไดโอดนี้ได้ใช้ high voltage resin เป็นตัวห่อหุ้ม ซึ่งไม่มีผลกระทบทั้งทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไดโอดที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นแต่อย่างไร