บทที่ 4
เทคโนโลยีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด อันประกอบไปด้วย ความหมายของเอพิแทกซี อุปกรณ์สำหรับเอพิแทกซีสถานะของเหลว การเตรียมแผ่นฐานและวัสดุที่จะปลูกผลึก กระบวนการเอพิแทกซีสถานะของเหลว การทำผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) และการทำโครงสร้างเมซา (Mesa structure)

4.1 เอพิแทกซี (Epitaxy)

เอพิแทกซีหมายถึงเทคโนโลยีการปลูกชั้นบางๆของผลึกเดี่ยว (Single crystal) บนผลึกเดี่ยวหรือแผ่นฐานที่มีการเรียงตัวของผลึกเป็นอย่างดี โดยสามารถปลูกซ้อนทับกันหลายๆชั้นในกระบวนการเดียวกัน และในแต่ละชั้นยังสามารถกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำ การเติมสารเจือ และความหนาได้ด้วย โดยมีข้อจำกัดคือชั้นผลึกที่อยู่ประชิดกันจะต้องมีค่าคงตัวของโครงผลึก (Lattice constant) ใกล้เคียงกัน เพื่อไม่ให้ความไม่เข้ากันของโครงผลึก (Lattice mismatch) มีค่ามากเกินไป ซึ่งความไม่เข้ากันของโครงผลึกจะมีผลต่อประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์เป็นอย่างมาก

เอพิแทกซีแบ่งกว้างๆได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) โฮโมเอพิแทกซี (Homoepitaxy) ชั้นสารกึ่งตัวนำที่ปลูกเป็นชนิดเดียวกันกับแผ่นฐาน เช่นการปลูกชั้นบางๆของ GaAs บน GaAs
2) เฮเทอโรเอพิแทกซี (Heteroepitaxy) ชั้นผลึกเดี่ยวที่ปลูกและแผ่นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน เช่น การปลูกชั้นบางๆของ GaAlAs บน GaAs

เทคนิคเอพิแทกซีที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เอพิแทกซีสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy, VPE) เอพิแทกซีสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy, LPE) และการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE) ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อเด่นและข้อด้อย ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ LPE เป็นเทคโนโลยีการผลิตโครงสร้างหลายๆชั้นของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

โดย LPE เป็นรูปแบบหนึ่งของการปลูกผลึกด้วยสารละลาย หลักการคือการควบคุมให้เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) ในสารละลายที่อุณหภูมิหนึ่งๆ กล่าวคือทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ซึ่งในกรณีของ GaAs ได้แก่ As มีค่ามากกว่าความสามารถในการถูกละลาย (Solubility) โดยตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือ Ga เมื่อในสารละลายมีผิวหน้าแว่นผลึกเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัส ผิวหน้าแว่นผลึกนั้นจะเป็นแหล่งรองรับตัวถูกละลายส่วนกิน ซึ่งสารละลายต้องการกำจัดเพื่อกลับคืนสู่สภาวะอิ่มตัวซึ่งเสถียรกว่า ในทางปฏิบัตินั้นสภาพอิ่มตัวยิ่งยวดสามารถทำให้เกิดได้โดยการทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวก่อนที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง หลังจากนั้นทำการลด

อุณหภูมิลงอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตราและภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม เมื่อแผ่นฐานเป็นผลึกเดี่ยวและค่าคงตัวของโครงผลึกของวัสดุที่ตกผลึกมีค่าเท่ากันหรือเกือบเท่ากันกับของแผ่นฐาน วัสดุที่ตกผลึกจะก่อรูปขึ้นเป็นชั้นบนผิวของแผ่นฐาน ซึ่งต่อขึ้นไปจากเนื้อผลึกเดี่ยวของแผ่นฐาน

เอพิแทกซีสถานะของเหลวมีข้อได้เปรียบกว่าเอพิแทกซีแบบอื่นดังนี้ [11]

- เครื่องมือที่ใช้ไม่ซับซ้อน
- ราคาถูก
- โดยทั่วไปให้อัตราการปลูกผลึกสูงกว่าวิธี VPE และ MBE
- ปราศจากอันตรายจากการใช้ Reactive gases และ Reactive products ซึ่งโดยปกติจะเป็นพิษ ไวไฟ และมีอำนาจกัดกร่อน
- สามารถเลือกชนิดสารเจือได้หลากหลาย
- ไม่ต้องใช้อุปกรณ์สำหรับทำระบบสุญญากาศดีเยี่ยม

อย่างไรก็ดี ข้อจำกัดของการปลูกผลึกด้วย LPE ได้แก่

- ยากที่จะปลูกชั้นที่มีความแตกต่างของค่าคงตัวของโครงผลึกกับแผ่นฐานเกินกว่า 1% ได้
- การเติมสารเจือและส่วนประกอบของสารมักไม่สม่ำเสมอในทิศทางการปลูกผลึก ยกเว้นชั้นที่ปลูกบางเพียงพอ
- ชั้นที่ปลูกได้โดยทั่วไปมีลักษณะพื้นผิว (Surface morphology) ไม่ดีเท่าวิธี VPE หรือ MBE

รูปที่ 4.1 แสดงส่วนต่างๆของเตาเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy) ซึ่งติดตั้งที่ห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อันประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ ดังนี้

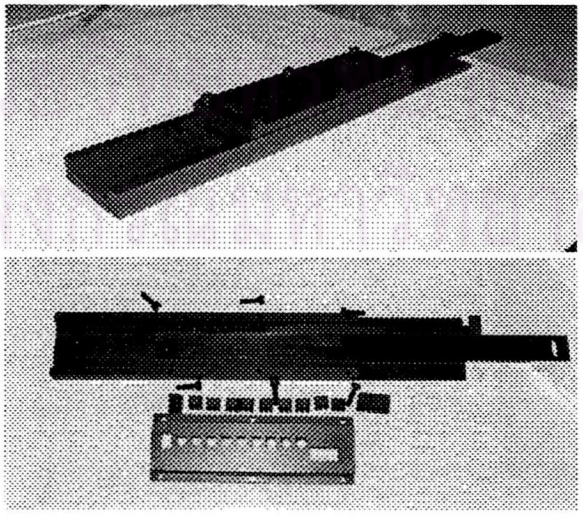
1) เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้ (Computerized temperature controller) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 0.05 °C และสามารถลดหรือเพิ่มอุณหภูมิด้วยความชันที่กำหนดให้ (0 ถึง 9.99 °C/min)
2) เตาความต้านทานซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform heated length) 200 mm.
3) ท่อควอทซ์ยาว 2400 mm. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 74 mm.
4) ระบบก๊าซ และ Hydrogen purifier
5) เครื่องวัดความชื้น (Hygrometer) ซึ่งสามารถวัดละเอียดถึง 0.1 ppm.
6) Nitrogen hood เพื่อป้องกันฝุ่นละออง และหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์กับวัสดุต่างๆก่อนเริ่มทำงาน
7) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

8) เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite boat) ซึ่งสามารถสร้างชั้นของผลึกได้มากที่สุด 9 ชั้น ในกระบวนการ 1 ครั้ง

9) ก้านแก้ว (Quartz rod) สำหรับเลื่อน (Slide) แว่นผลึกไปใต้หลุมของสารละลาย

อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำหมู่ III-V มักประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำมากกว่า 1 ชั้น ซึ่งในเทคนิค LPE ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Multibin boat แสดงดังรูปที่ 4.2 ด้วยวิธีนี้จะสามารถสร้างชั้นของสารกึ่งตัวนำหลายๆชั้นติดต่อกันได้เป็นลำดับบนผิวหน้าของแผ่นฐานในระหว่างหนึ่งกระบวนการปลูกผลึก ซึ่งอาจเป็นชั้นสารต่างชนิดกันหรือเติมสารเจือแตกต่างกัน

รูปที่ 4.1 เตาเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy)



รูปที่ 4.2 เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite boat)

4.2 เทคโนโลยีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

4.2.1 การเตรียมแผ่นฐานและวัสดุที่จะปลูกผลึก

การเตรียมแผ่นฐานและวัสดุที่จะปลูกผลึกนับเป็นขั้นตอนแรกสุดที่สำคัญมากต่อการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

4.2.1.1 แว่นผลึก (Wafer)

แว่นผลึกที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด ซึ่งแยกตามวัตถุประสงค์ คือใช้เป็นแผ่นฐานและแผ่นชดเชย โดยจะแตกต่างกันทั้งการเติมสารเจือและขนาด

1) แผ่นฐานรองรับชั้นผลึกเดี่ยวที่ปลูก ใช้แว่นผลึก n^+ -GaAs, Si-doped 10^{18} cm^{-3} ตัดให้ได้ขนาด 11*11 mm^2 และสามารถใส่แผ่นฐานได้ 2 แผ่นในหนึ่งกระบวนการปลูกผลึก

2) แผ่นชดเชยสำหรับแต่ละหลุมของเบ้ารองรับสารละลาย ใช้แว่นผลึก Undoped-GaAs ตัดเป็นขนาด 6*11 mm^2 จำนวนเท่ากับจำนวนหลุมที่ใส่สารละลายในเบ้ารองรับสารละลาย

ขั้นตอนการเตรียมแว่นผลึก เพื่อขจัดสิ่งแปลกปลอม คราบไขมัน และออกไซด์ ซึ่งเป็นการเตรียมผิวหน้าก่อนการปลูกผลึก เป็นไปตามลำดับในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมแว่นผลึก

อันดับที่	สารละลายที่ใช้	เวลา
1	H_2O-DI	
2	Acetone ต้มเดือด	5 นาที
3	Methyl alcohol (Ultrasonic)	5 นาที
4	Acetone ต้มเดือด	5 นาที
5	H_2O-DI	
6	HCl (50%)	5 นาที
7	H_2O-DI, เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2	
8	H_2SO_4:H_2O_2:H_2O ในอัตราส่วน 4:1:1	
	- สำหรับแผ่นฐาน ใช้ที่อุณหภูมิ 75 °C	20 วินาที
	- สำหรับแผ่นชดเชย ใช้ทันทีหลังผสมสารละลาย	8 นาที
9	H_2O-DI, เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2	
10	HCl (50%)	> 5 นาที
11	H_2O-DI, เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2	

4.2.1.2 วัสดุที่ใช้ปลูกผลึก

ในเทคนิค LPE วัสดุขณะเริ่มปลูกผลึกจะอยู่ในรูปของสารละลาย ในการปลูกชั้นสารกึ่งตัวนำ GaAs และ GaAlAs มักใช้ Ga เป็นตัวทำละลาย ส่วน As, Al และสารเจือจะเป็นตัวถูกละลาย การเติมสารเจือชนิดเอ็นโดยทั่วไปจะใช้ Sn หรือ Te ส่วนการเติมสารเจือชนิดพีปกติจะใช้ Ge หรือ Zn โดยในขั้นตอนการเตรียมสารวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในรูปของของแข็ง ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักที่ใช้ได้ด้วยความสัมพันธ์ของกฎทรงมวล (Law of mass conservation)

$$X_{Ga} + X_{As} + X_{Al} + X_{im} = 1 \tag{4.1}$$

เมื่อ X คือเศษส่วนโมล (Mole fraction) ของสารนั้นๆที่มีในสารประกอบ หากเขียนน้ำหนักของ As (W_{As}) ให้อยู่ในเทอมของน้ำหนัก Ga (W_{Ga}) โดยที่ M คือน้ำหนักอะตอม (Atomic weight) ของสารแต่ละชนิด จะได้ว่า

$$W_{As} = (X_{As} / X_{Ga})(M_{As} / M_{Ga}) * W_{Ga} \tag{4.2}$$

เนื่องจากในการผลิตโฟโตไดโอดจะใช้ GaAs แทนการใช้ As โดยตรง จึงทำการคำนวณน้ำหนัก GaAs (W_{GaAs}) ได้จากสมการ

$$W_{GaAs} = (X_{GaAs} / X_{Ga})(M_{GaAs} / M_{Ga}) * W_{Ga} \tag{4.3}$$

สำหรับน้ำหนักของ Al (W_{Al}) และน้ำหนักของสารเจือ (W_{im}) คำนวณได้จาก

$$W_{Al} = (X_{Al} / X_{Ga})(M_{Al} / M_{Ga}) * W_{Ga} \tag{4.4}$$

$$W_{im} = (X_{im} / X_{Ga})(M_{im} / M_{Ga}) * W_{Ga} \tag{4.5}$$

เมื่อ

$$M_{Ga} = 67.92$$

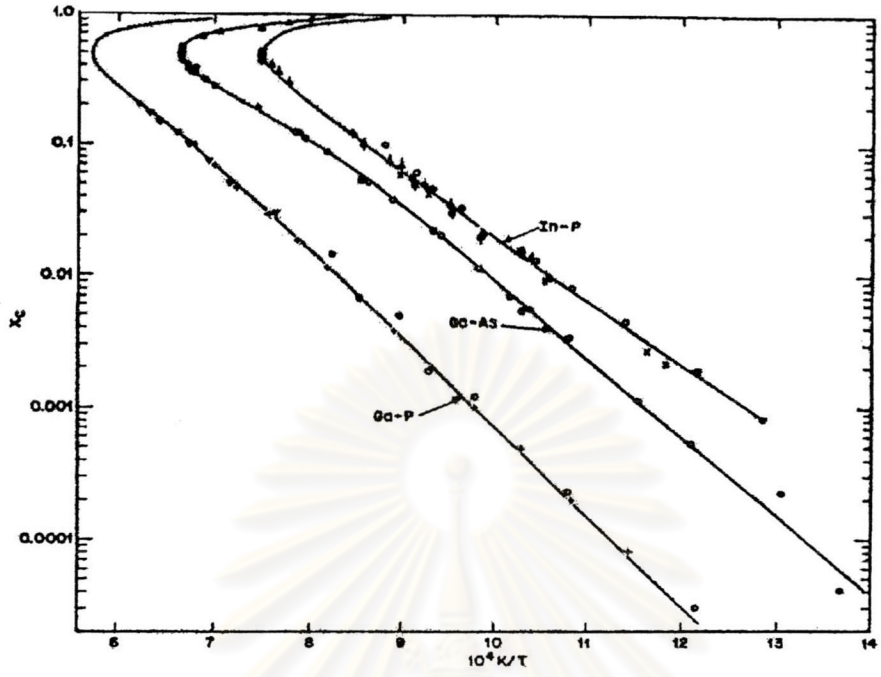
$$M_{As} = 74.92$$

$$M_{Al} = 36.98$$

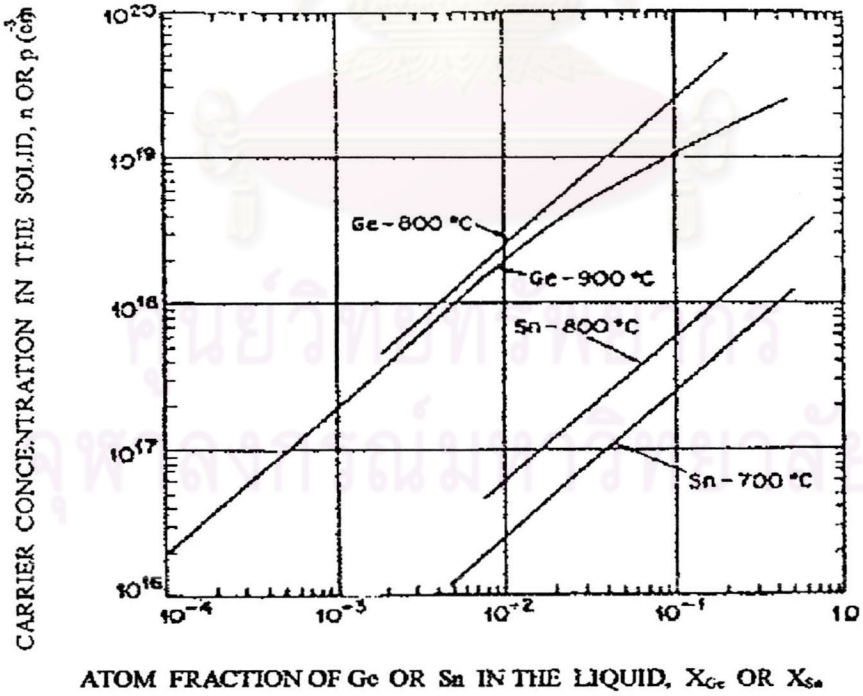
$$M_{Ge} = 72.59$$

$$M_{GaAs} = 144.64$$

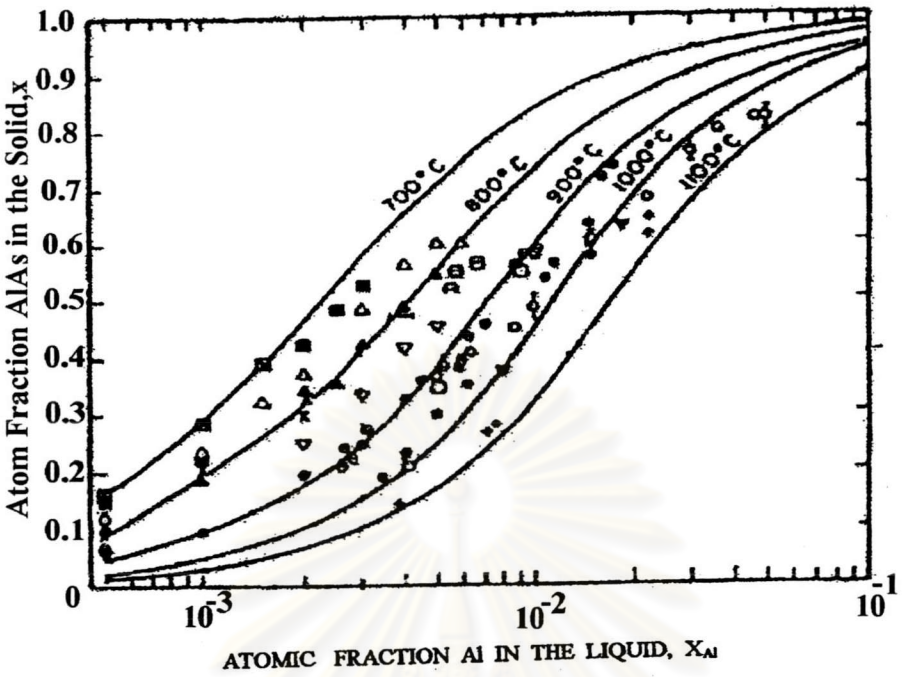
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



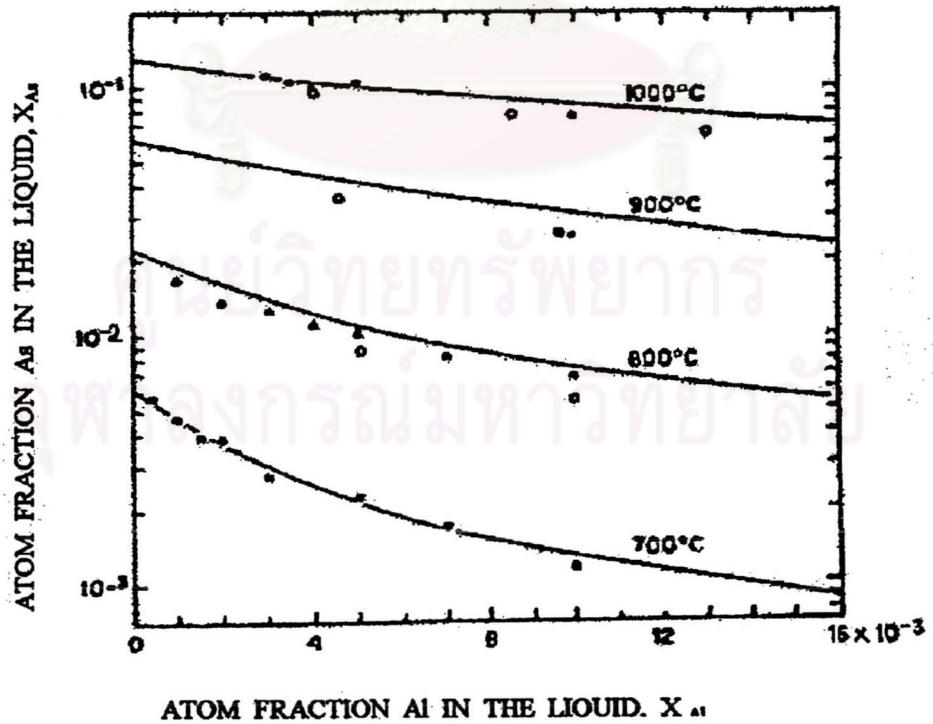
รูปที่ 4.3 กราฟ Liquidus composition พล็อตกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของสารเจือ Ge และ Sn กับระดับความเข้มข้นของการเติมสารเจือที่อุณหภูมิต่างๆของการปลูกผลึก



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของ AlAs กับเศษส่วนอะตอมของ Al ใน GaAlAs ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.6 กราฟ Liquidus isotherms ในระบบ Al-Ga-As

4.2.2 การคำนวณน้ำหนักสารที่ใช้เป็นวัสดุปลูกผลึก

การคำนวณน้ำหนักสารที่ใช้ปลูกผลึกจะอ้างอิงข้อมูลจากราฟในรูปที่ 4.3-4.6 [12] โดยชั้นสารกึ่งตัวนำของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ได้ผลิตเพื่อทดลองในงานวิจัยนี้ได้แก่ P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ เติมสารเจือ Ge $5*10^{18}$ cm^{-3}, P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ เติมด้วยสารเจือ Ge $5*10^{18}$ cm^{-3} และ Undoped-GaAs โดยสำหรับสาร Undoped-GaAs เมื่อนำมาปลูกผลึกด้วยวิธี LPE จะได้ชั้นผลึกเดี่ยวของ n^- -GaAs เนื่องจากการมี LPE background concentration ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{15} cm^{-3} ทำการสรุปน้ำหนักสารที่ใช้เป็นวัสดุปลูกผลึกไว้ในตารางที่ 4.2

- **P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}**

เมื่อเศษส่วนอะตอมของ AlAs ในสถานะของแข็งเท่ากับ0.2 ที่อุณหภูมิ 800 °C จากรูปที่ 4.5

$$X_{Al} = 0.0011$$

ตามข้อมูลในรูปที่ 4.6 โดย $X_{Al} = 0.0011$ ที่อุณหภูมิ 800 °C จะได้ว่า

$$X_{As} = 0.018$$

จากการเติมสารเจือ Ge ด้วยความเข้มข้น $5*10^{18}$ cm^{-3} ที่อุณหภูมิ 800 °C พิจารณารูปที่ 4.4

$$X_{Ge} = 0.01$$

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} - X_{Al} - X_{Ge}$$

$$X_{Ga} = 0.9709$$

อาศัยสมการที่ 4.3-4.5 คำนวณน้ำหนักสารเมื่อใช้ Ga ปริมาณ 3 กรัมได้เป็น

$$W_{Ga} = 3\ g.$$

$$W_{Al} = 1.315\ mg.$$

$$W_{GaAs} = 115.342\ mg.$$

$$W_{Ge} = 32.16\ mg.$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **P^{+}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}**

เมื่อเศษส่วนอะตอมของ AlAs ในสถานะของแข็งเท่ากับ0.4 ที่อุณหภูมิ 800 °C จากรูปที่ 4.5

$$X_{Al} = 0.003$$

ตามข้อมูลในรูปที่ 4.6 โดย $X_{Al} = 0.003$ ที่อุณหภูมิ 800 °C จะได้ว่า

$$X_{As} = 0.015$$

จากการเติมสารเจือ Ge ด้วยความเข้มข้น $5*10^{18}$ cm^{-3} ที่อุณหภูมิ 800 °C พิจารณารูปที่ 4.4

$$X_{Ge} = 0.01$$

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} - X_{Al} - X_{Ge}$$

$$X_{Ga} = 0.972$$

อาศัยสมการที่ 4.3-4.5 คำนวณน้ำหนักสารเมื่อใช้ Ga ปริมาณ 3 กรัมได้เป็น

$$W_{Ga} = 3\ g.$$
$$W_{Al} = 3.583\ mg.$$
$$W_{GaAs} = 96.045\ mg.$$
$$W_{Ge} = 32.133\ mg.$$

- **Undoped-GaAs**

จากรูปที่ 4.3 ที่อุณหภูมิ 800 °C จะได้

$$X_{Ga} = 0.978 \quad , \quad X_{Ga} = 0.978$$

สำหรับการใช้Ga ปริมาณ 3 กรัม จะได้ว่า

$$W_{GaAs} = 140\ mg.$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักสารที่ใช้เป็นวัสดุปลูกผลึก

น้ำหนักสารที่ได้จากการคำนวณ

สารในหลุมของเบ้ารองรับสารละลาย	Ga (g)	GaAs (mg)	Ge (mg)	Al (mg)
หลุม Etching	3	140	-	-
Undoped-GaAs	3	140	-	-
P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	3	*96.045*	32.133	3.583
P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	3	*115.372*	32.16	1.315

น้ำหนักสารที่ชั่งจริงและใช้ในการผลิตโฟโตไดโอด

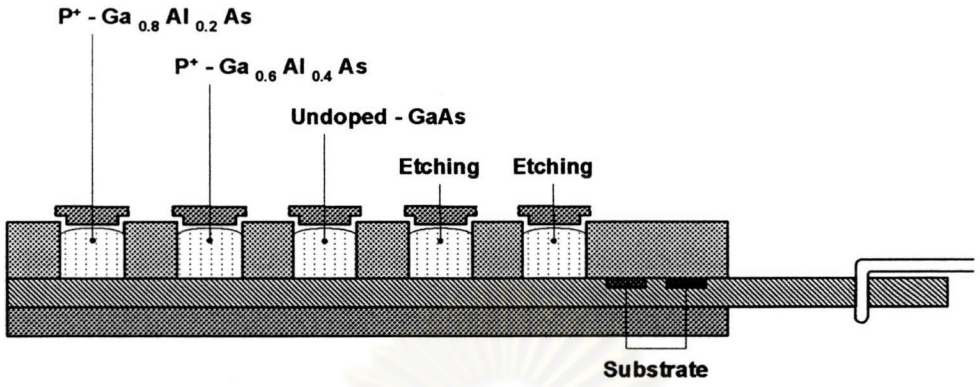
สารในหลุมของเบ้ารองรับสารละลาย	Ga (g)	GaAs (mg)	Ge (mg)	Al (mg)
หลุม Etching	3	140	-	-
Undoped-GaAs	3	140	-	-
P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	3	*67.254* *	32.133	3.583
P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	3	*90.446* *	32.16	1.315

* น้ำหนักสารที่ชั่งจริง = 1.2*(น้ำหนักสารที่ได้จากการคำนวณ - น้ำหนักแผ่นชดเชย 40 mg)

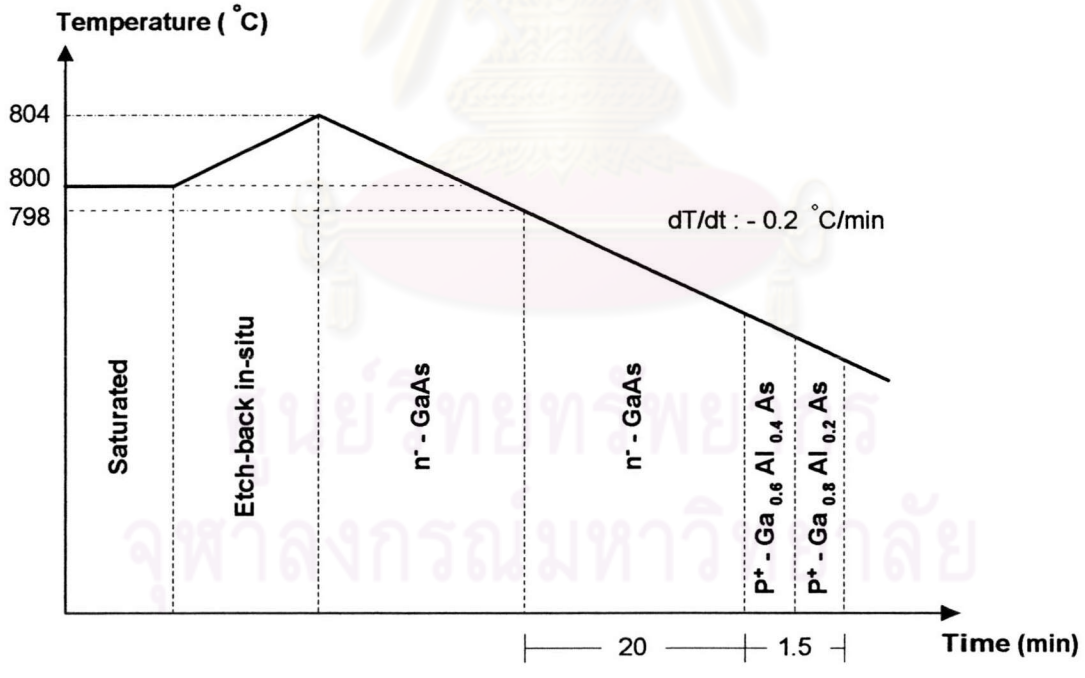
4.2.3 กระบวนการปลูกผลึก

อัตราการปลูกผลึก (Growth rate) ซึ่งส่งผลต่อความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ได้ จะขึ้นอยู่กับวิธีการปลูกผลึกเอพิแทกซีสถานะของเหลว โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆคือ แบบทรานเซียนต์ (Transient) และแบบสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Supercooling อันเป็นวิธีหนึ่งในการปลูกผลึกแบบบทรานเซียนต์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้คุณภาพผลึกดีที่สุด [13] โดยผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่สารละลายอิ่มตัวกับอุณหภูมิที่ผิวหน้าแว่นผลึกเริ่มสัมผัสกับสารละลาย (ΔT) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และความชันช่วงลดอุณหภูมิ (dT/dt) น้อยกว่าศูนย์

หลังจากเตรียมวัสดุเรียบร้อยแล้ว ทำการเผาเบ้ารองรับสารละลายเปล่าภายในเตาเอพิแทกซีที่อุณหภูมิ 900 °C ประมาณ 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน เพื่อขจัดความชื้นและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นใส่วัสดุที่เตรียมไว้ลงในเบ้ารองรับสารละลายภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ตัวอย่างการใส่สารในหลุมต่างๆของเบ้ารองรับสารละลายชนิด Multi bin แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การใส่สารในหลุมต่างๆของเบ้ารองรับสารละลายชนิด Multi bin



รูปที่ 4.8 แผนผังระหว่างอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซีและเวลาการปลูกผลึก

เริ่มกระบวนการปลูกผลึกด้วยการทำให้สารในหลุมหลอมเป็นสารละลายและอยู่ในสภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 800 °C นานกว่า 4 ชั่วโมง แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 804 °C พร้อมกับเลื่อนให้แผ่นฐานสัมผัสกับสารละลายในหลุม Etching เพื่อเป็นการกัดทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นฐานแบบ Etch-back in-situ หลังจากอุณหภูมิเริ่มอิ่มตัวที่ 804 °C ทำการลดอุณหภูมิลงให้อยู่ในสภาวะ Supercool ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 0.2 °C/min จนถึงประมาณ 798 °C ก็เลื่อนแผ่นฐานเข้าสัมผัสกับสารละลายในหลุมถัดไปเพื่อเริ่มปลูกชั้นผลึกเดี่ยว ในขณะที่ระหว่างนั้นอุณหภูมิก็ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการลดอุณหภูมิคงที่เท่าเดิมตลอดกระบวนการปลูกผลึก แสดงแผนผังระหว่างอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซีและเวลาการปลูกผลึกในรูปที่ 4.8 และเมื่อปลูกผลึกจนได้ชั้นต่างๆครบตามต้องการแล้ว นำชิ้นงานไปกัดออกไซด์และขจัดเศษ Ga ที่ติดออกด้วยสารละลาย HCl (50%) ทำความสะอาดโดย Ultrasonic ด้วยน้ำ DI อีกครั้งแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชั่นกับเวลาในการปลูกผลึก ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.6 [14] แต่อย่างไรก็ดี หลังจากปลูกผลึกเสร็จครบกระบวนการแล้วควรนำชิ้นงานไปวัดความหนาของแต่ละชั้นสารกึ่งตัวนำด้วย Scanning electron microscope (SEM) แล้วนำผลมาเทียบปรับเวลาในการปลูกผลึก เพื่อให้การผลิตโฟโตไดโอดมีโครงสร้างที่แม่นยำเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้มากยิ่งขึ้น

$$d = K\left(\Delta T\, t^{1/2} + \frac{2}{3}\alpha\, t^{3/2}\right) \tag{4.6}$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของ As ในของเหลว

ΔT คือ อุณหภูมิช่วง Supercool ในที่นี้เท่ากับ 2 °C

α คือ อัตราการลดอุณหภูมิ

4.2.4 การสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกด้วยการฉาบผิวของชิ้นงานทั้งสองด้านด้วยฟิล์มบางของโลหะนำไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Evaporator ชนิด Vacuum deposition ชนิดของโลหะที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารแต่ละด้าน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ฉาบผิวด้านแผ่นฐาน n^+-GaAs ด้วย AuGe หนา 2500 Å และ Ni หนา 500 Å ตามลำดับ แล้วทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 475 °C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสม H_2 (10%) + N_2 (90%)
2) ด้านชั้นรับแสง P^+-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ของโฟโตไดโอด ฉาบผิวด้วย AuZn หนา 2500 Å โดยยังไม่ต้อง Anneal เนื่องจากต้องกัดโลหะบางส่วนของด้านนี้ออกให้ได้ตามแบบ อันจะนำไปสู่กระบวนการในหัวข้อถัดไป

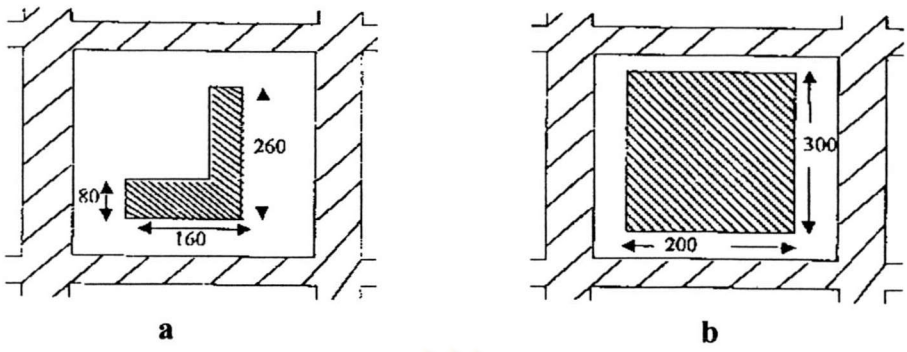
4.2.5 กระบวนการถ่ายแบบ (Photolithography)

สำหรับด้านรับแสงจะต้องผ่านกระบวนการถ่ายแบบ เพื่อกัดโลหะที่ฉาบไว้บางส่วนออกให้มีพื้นที่รับแสง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

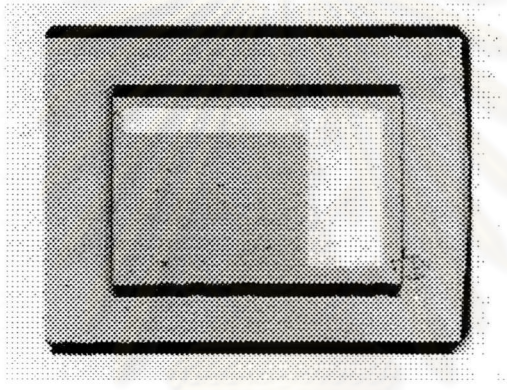
1) ทำความสะอาดชิ้นงานและขจัดความชื้นที่ผิวด้วยการอบที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 3 นาที
2) เคลือบ Positive resist ด้วยวิธี Spinning โดยความหนาของชั้นที่เคลือบขึ้นกับความเร็วรอบของ Spinner และความหนืดของ Resist
3) อบ Softbake หรือ Prebake ที่อุณหภูมิต่ำ 90 °C นาน 7 นาที เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกไป
4) ใช้เครื่อง Mask aligner ทำการจัดวางหน้ากาก (Mask) ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และฉายแสง UV ผ่านหน้ากากไปยัง Resist ใช้เวลาประมาณ 30วินาที ขั้นตอนนี้ใช้หน้ากากในรูปที่ 4.9 a)
5) ละลาย Resist ส่วนที่ถูกแสง UV ออกโดยใช้น้ำยา Developer ประมาณ 20 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง
6) ทาด้านหลังของชิ้นงานซึ่งเป็นด้านแผ่นฐานด้วย Positive resist เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะที่ฉาบไว้ด้านหลังหลุดร่อนในขั้นตอนการกัดโลหะตามข้อ 8)
7) อบ Hardbake หรือ Postbake ที่อุณหภูมิ 120 °C นาน 25 นาที เพื่อเพิ่มแรงยึดของ Resist บนแว่นผลึก และระเหยตัวทำละลายที่ยังเหลืออยู่
8) กัดโลหะ AuZn ส่วนที่ไม่ถูกคลุมด้วย Resist ออกด้วยสารละลาย KI + I_2 ประมาณ 30 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ควรตรวจดูด้วยว่าสามารถกัดโลหะ AuZn ส่วนที่ไม่ต้องการออกได้สมบูรณ์หรือไม่
9) ละลาย Resist ออกทั้งหมดด้วย Acetone จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10) Anneal อีกครั้งที่อุณหภูมิ 375 °C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสม H_2 (10%) + N_2 (90%)

4.2.6 การกัด Mesa

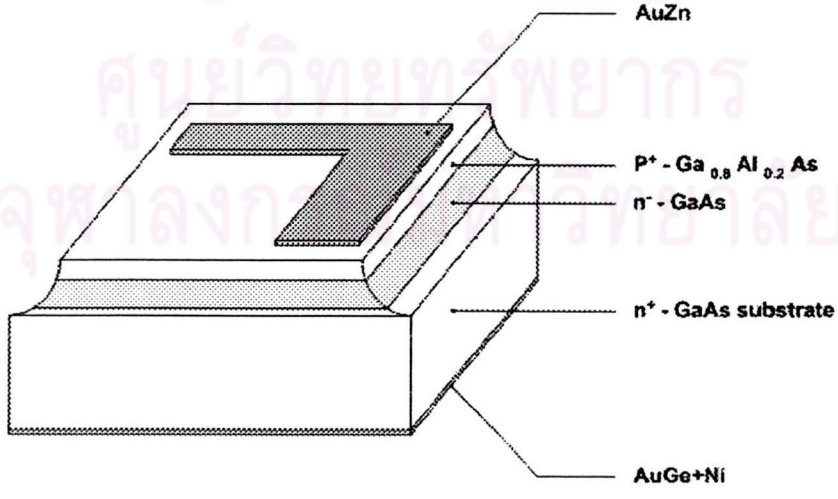
การกัด Mesa เป็นการแยกทางไฟฟ้าให้โฟโตไดโอดแต่ละตัวที่อยู่บนแผ่นฐานเดียวกัน และเพื่อกำหนดพื้นที่ทำงานของหัวต่อ เริ่มจากทำกระบวนการถ่ายแบบในหัวข้อที่ 4.2.5 แต่ใช้หน้ากากตามรูปที่ 4.9 b) กัดเนื้อสารส่วนที่ไม่ถูกคลุมด้วย Resist ให้ลึกจนถึงแผ่นฐานเล็กน้อยโดยใช้สารละลาย $NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$ ในอัตราส่วน 1:1:15 นาน 11 นาที จากนั้นละลาย Resist ออกทั้งหมดด้วย Acetone แล้วล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน รูปที่ 4.10 คือภาพถ่ายโฟโตไดโอดที่ผลิตเมื่อมองจากทางด้านบน และรูปที่ 4.11 แสดงเป็นรูปวาดในลักษณะ 3 มิติ



รูปที่ 4.9 หน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในกระบวนการถ่ายแบบ หน่วยเป็นไมครอน (μm)



รูปที่ 4.10 โฟโตไดโอดที่ผลิตได้เมื่อมองจากทางด้านบน



รูปที่ 4.11 รูปวาดในลักษณะ 3 มิติของโฟโตไดโอดที่ผลิตได้