

บทที่ 3

กระบวนการสร้าง Double Heterojunction Bipolar Transistor แบบระนาบ

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 ผนวกกับแนวคิดในบทที่ 1 สามารถทำการออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์ ตามรูปที่ 3.1 จากนั้นทำการคำนวณลักษณะสมบัติกระแสตรง เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสม ทำการศึกษาเทคโนโลยีการปลูกผลึก GaAs และ $Ga_{1-x}Al_xAs$ และเทคนิคการแพร่สารเจือสังกะสี เพื่อทำผิวสัมผัสเบสบนระนาบผิวของอิมิตเตอร์ ทำยสุดกำหนดขั้นตอนการผลิตสิ่งประดิษฐ์อย่างละเอียด

3.1 การออกแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่โครงสร้างระนาบ

เพื่อให้หัวต่ออิมิตเตอร์-เบสและหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบสมีความสมมาตร จึงกำหนดให้หัวต่อทั้งสองเป็นหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs(n) กับ GaAs(p⁺) ทั้งคู่ อาจจะต่างกันแต่ก็เพียงปริมาณของอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์กับคอลเล็กเตอร์ ชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์ (Emitter Contact) มีไว้เพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกโดยตรงกับชั้นอิมิตเตอร์ GaAlAs(n) ซึ่งทำผิวสัมผัสโอห์มมิกได้ยากกว่า ในขณะที่ทางด้านคอลเล็กเตอร์อาศัยแวนผลึก GaAs(n⁺) เป็นชั้นทำผิวสัมผัสโอห์มมิกสำหรับโลหะที่ใช้ทำผิวสัมผัสโอห์มมิกของชั้น n จะเป็น AuGe+Ni ในส่วนของขั้วโลหะเบส จะทำการแพร่ซึมโลหะ Zn ผ่านชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์และชั้นอิมิตเตอร์เข้าสู่ชั้นเบส เพื่อเปลี่ยนเนื้อวัสดุของโครงสร้างด้านข้างให้เป็นชนิด p จากนั้นทำผิวสัมผัสโอห์มมิกของขั้วเบสที่ระนาบของผิวสัมผัสอิมิตเตอร์โดยใช้โลหะ AuZn

3.2 การคำนวณลักษณะสมบัติกระแสตรงเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์

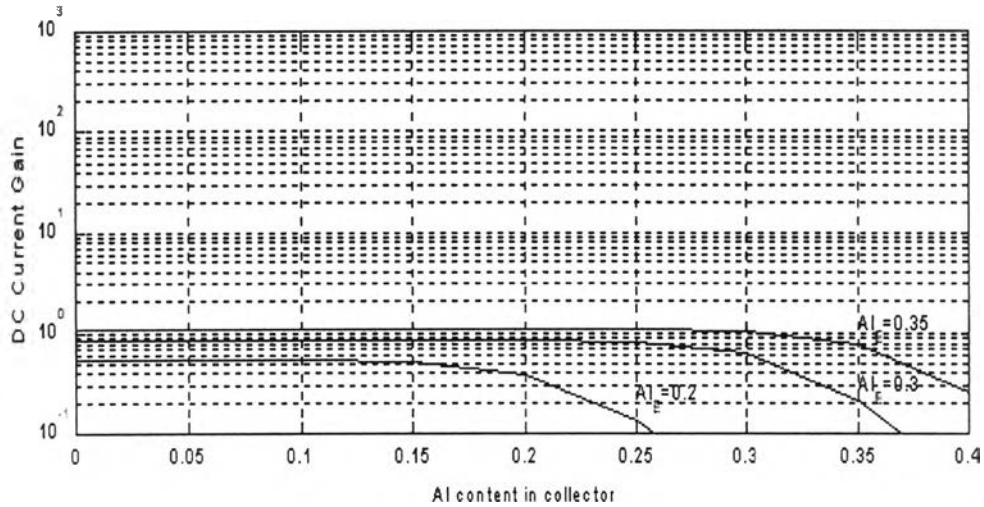
ผลการคำนวณเบื้องต้นในบทที่ 2 ซึ่งให้เห็นว่าลักษณะสมบัติกระแสตรงในโหมดปกติของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ ขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญๆ 4 ตัว คือ ปริมาณของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ ความลาดเอียงของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ปริมาณสารเจือในชั้นคอลเล็กเตอร์ และแรงดันไบแอสที่หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส และเมื่อเปลี่ยนค่าคอลเล็กเตอร์เป็นอิมิตเตอร์ ก็จะสามารถใช้ได้กับทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เมื่อทำงานในโหมดกลับทาง (Inverted Mode) ดังนั้นเพื่อให้ทรานซิสเตอร์มีลักษณะสมบัติที่สมมาตรจึงได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เป็นไปตามตารางที่ 3.1 โดยมีเหตุผลประกอบ และเพื่อยืนยันความเหมาะสมของค่าที่กำหนด จึงคำนวณอัตราขยายกระแสอินทรีนซิกตามพารามิเตอร์ที่กำหนดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.6

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	เหตุผล
ความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นอิมิตเตอร์ (N_E)	10^{17} cm^{-3} ($5 \cdot 10^{17}$)*	เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการฉีดพอร์ในโมดปกติและไม่มีผลกระทบอย่างรุนแรงในโมดกลับทาง
ความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นเบส (P_B)	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (10^{19})	เพื่อรักษาระดับการฉีดพาหะทั้งในโมดปกติและโมดกลับทาง
ความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นคอลเล็กเตอร์ (N_C)	10^{17} cm^{-3} (10^{15})	เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดในโมดกลับทาง และลดผลกระทบจาก "Spike" ในโมดปกติ
สัดส่วน Al ในชั้นอิมิตเตอร์ (x_E)	0.35, 0.3, 0.2 (0.35-0.4)	
สัดส่วน Al ในชั้นคอลเล็กเตอร์ (x_C)	0.35, 0.3, 0.2 (0)	
ความลาดชันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส (L_{gE})	50, 100, 200 Å (500)	L_{gE} น้อยกว่าหรือเท่ากับ L_{gC} เสมอสำหรับการปลูกผลึกด้วยวิธีการ Super Cooling L_g ประมาณ 500 อังสตรอม ใน SHBT เกิดจากเทคนิค Equilibrium Cooling
ความลาดชันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส (L_{gC})	100, 200 Å	
ความหนาของชั้นอิมิตเตอร์ (t_E)	~ 1 micrometer (~ 1 micrometer)	
ความหนาของชั้นเบส (t_B)	~ 0.5 micrometer (~ 0.5 micrometer)	
ความหนาของชั้นคอลเล็กเตอร์ (t_C)	~ 1 micrometer (~ 6 micrometers)	เพื่อให้สมมาตรกับอิมิตเตอร์

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ

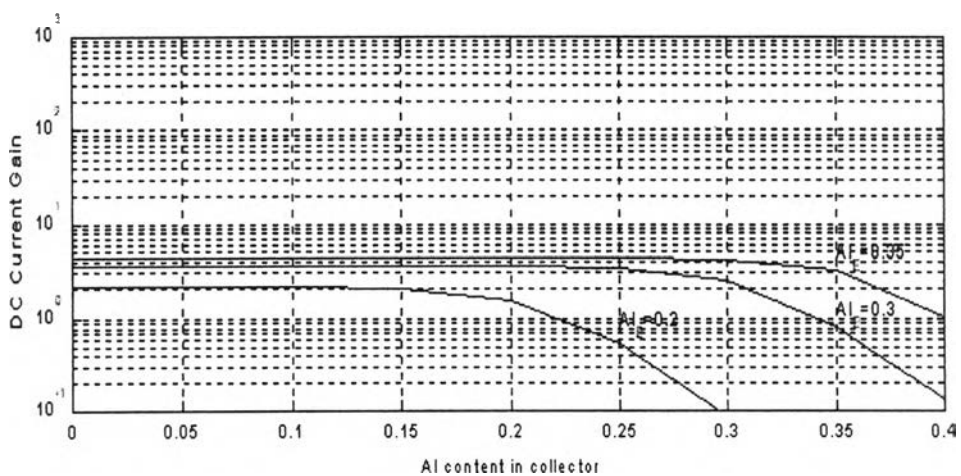
*หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดเดี่ยว (SHBT) [1]

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	50 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	50 \AA	-5 V



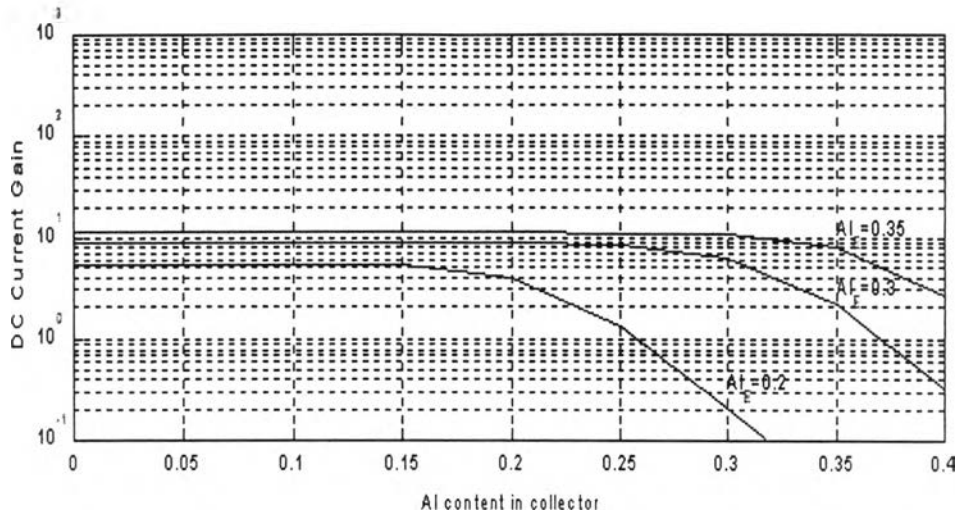
รูปที่ 3.1 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	50 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 \AA	-5 V



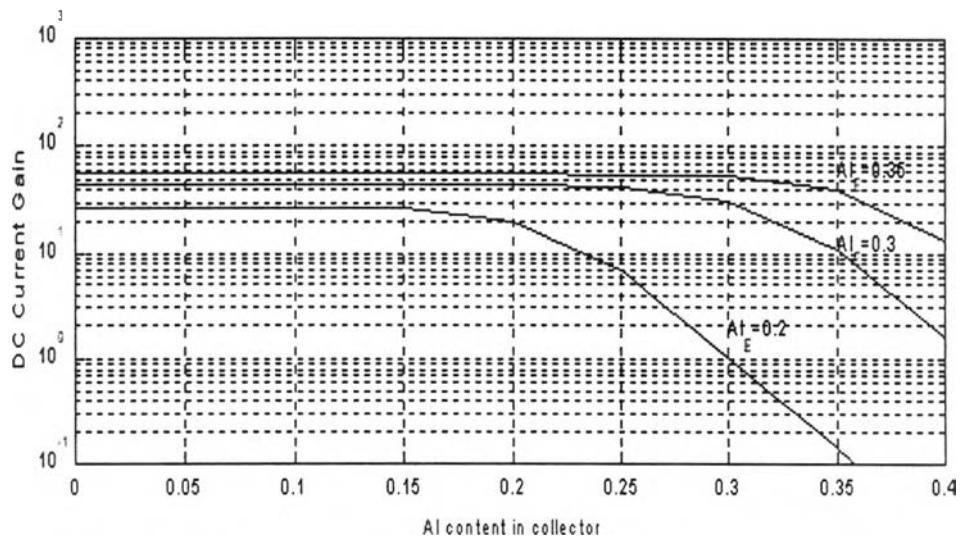
รูปที่ 3.2 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 \AA	-5 V



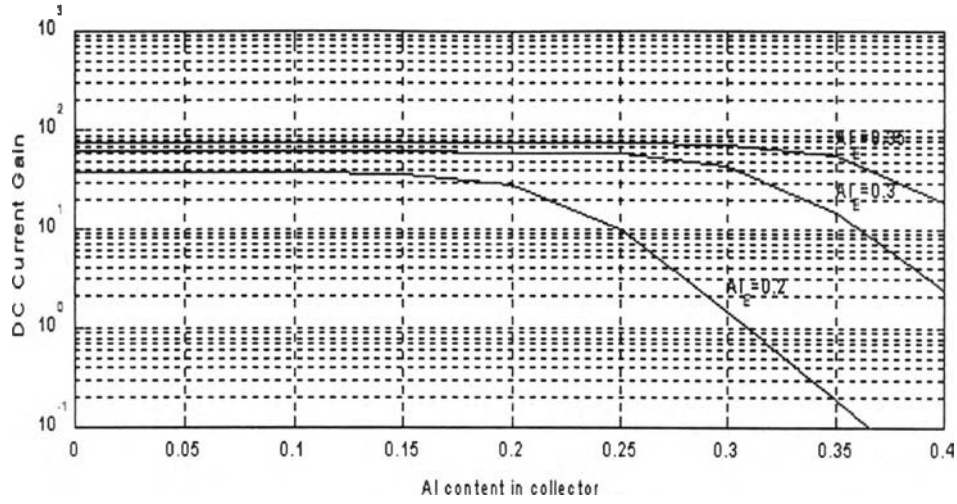
รูปที่ 3.3 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	200 \AA	-5 V



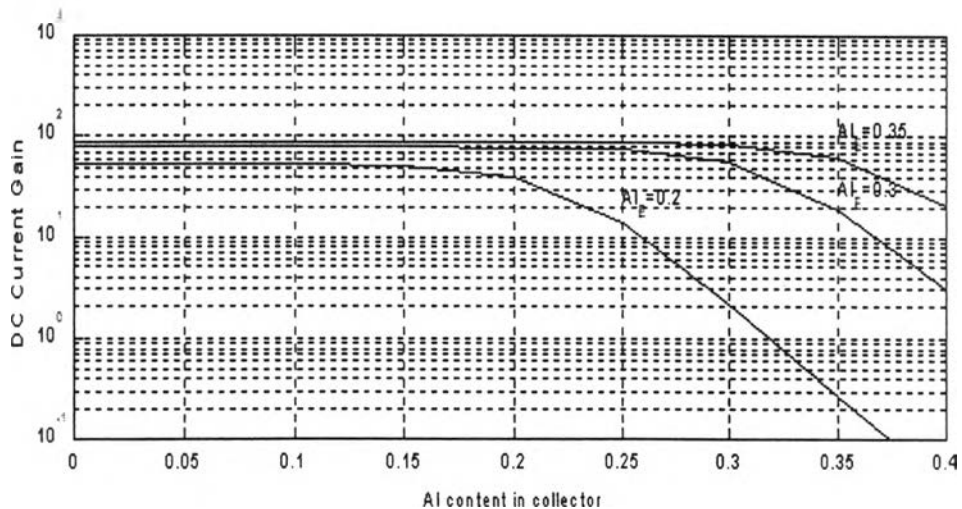
รูปที่ 3.4 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	200 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	200 \AA	-5 V



รูปที่ 3.5 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

N_{DE}	L_{gE}	N_{AB}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	500 \AA	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	100 \AA	-5 V



รูปที่ 3.6 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรินซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง

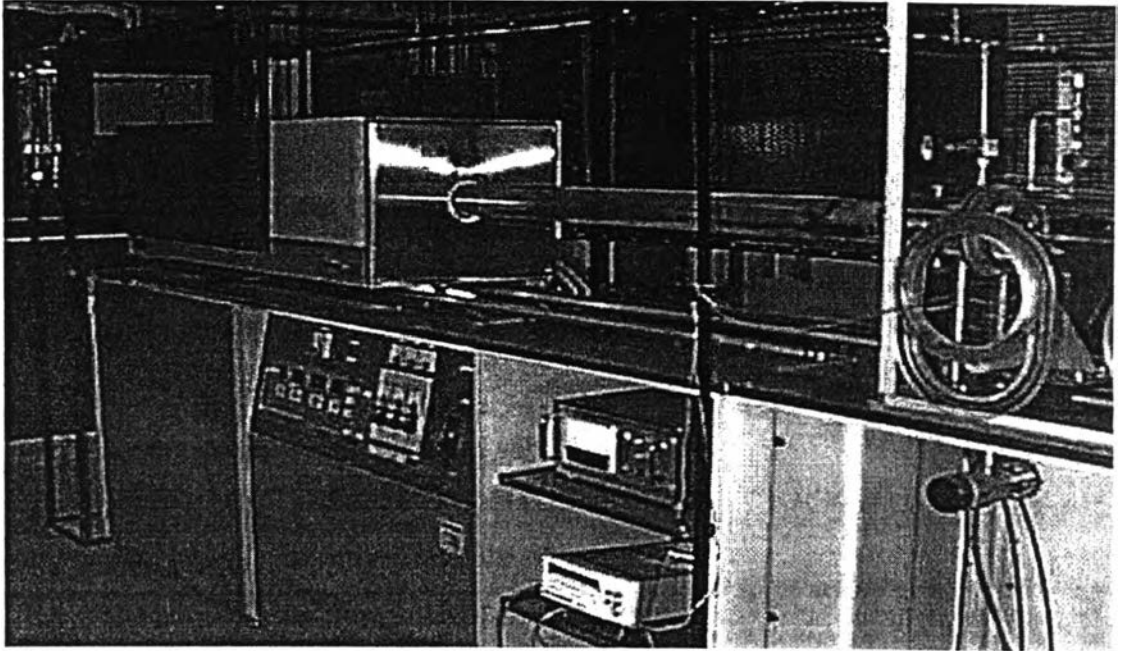
3.3 เทคโนโลยีในการปลูกผลึก GaAs และ GaAlAs

Epitaxy คือเทคโนโลยีที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นบางๆ ซึ่งสามารถปลูกซ้อนทับกันหลายๆ ชั้นในกระบวนการเดียวกัน และในแต่ละชั้นยังสามารถกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำและชนิดของสารเจือปนได้ด้วย โดยมีข้อแม้เพียงข้อเดียวก็คือ ชั้นผลึกที่อยู่ประชิดกันจะต้องมีขนาดของโครงผลึก (Lattice Constant) ใกล้เคียงกันเพื่อไม่ให้ Lattice Mismatch มีค่ามากเกินไป Lattice Mismatch มีผลต่อประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์เป็นอย่างมาก

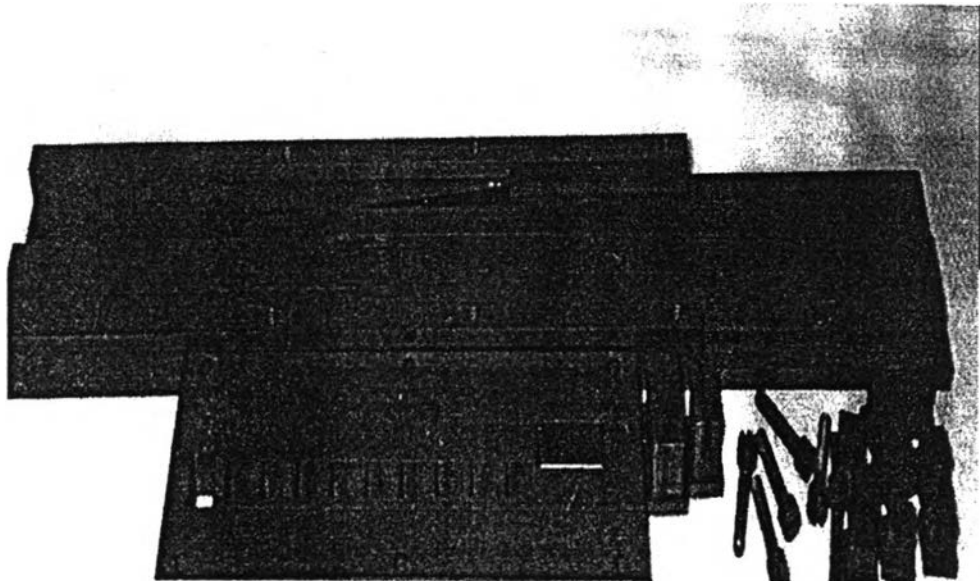
Epitaxy มีหลายชนิด เช่น Vapor Phase Epitaxy (VPE), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE) ฯลฯ แต่ละชนิดมีทั้งข้อเด่นและข้อด้อย ในงานวิจัยชิ้นนี้ เราใช้ Liquid Phase Epitaxy (LPE) เป็นเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างหลายๆ ชั้น (Multilayer Structure) ของสิ่งประดิษฐ์ด้วยเหตุผลที่ว่า LPE มีราคาถูกระบบไม่ยุ่งยาก และที่สำคัญคุณภาพของชั้นผลึกที่ปลูกได้ดีกว่าที่ได้จากวิธีการอื่นๆ เพราะการปลูกชั้นผลึกจาก LPE เป็นการปลูกภายใต้จุดสมดุลอุณหภูมิต่ำ (Thermal Equilibrium) ข้อเสียก็คือ ไม่สามารถปลูกชั้นผลึกบางมากๆ ได้ (น้อยกว่า 0.1 ไมครอน)

รูปที่ 3.7 (ก) แสดงส่วนต่างๆของเตา Horizontal Liquid Phase Epitaxy ซึ่งติดตั้งที่ห้องวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ ดังนี้

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ โปรแกรมได้ (Programmable Temperature Controller) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 0.05°C และสามารถลดหรือเพิ่มอุณหภูมิด้วยความชันที่กำหนดให้ (0 ถึง $9.99^{\circ}\text{C}/\text{Min}$)
2. เตาความต้านทานซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform Heated Length) 200 mm.
3. ท่อควอทซ์ยาว 2400 mm. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 74 mm.
4. ระบบก๊าซ และ Hydrogen Purifier
5. เครื่องวัดความชื้น (Hygrometer) ซึ่งสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.1 ppm.
6. Nitrogen Hood เพื่อป้องกันฝุ่นละออง และหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์กับวัสดุต่างๆ ก่อนเริ่มทำงาน
7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
8. เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite Boat) ซึ่งสามารถสร้างชั้นของผลึก 9 ชั้น ในกระบวนการ 1 ครั้ง ดังรูปที่ 3.7 (ข)
9. ก้านแก้ว (Quartz Rod) สำหรับเลื่อน (Slide) แวนผลึกไปได้หลุมของสารละลาย Ga+Al+As



รูปที่ 3.7 (ก) เต้าเอพีแทกซี



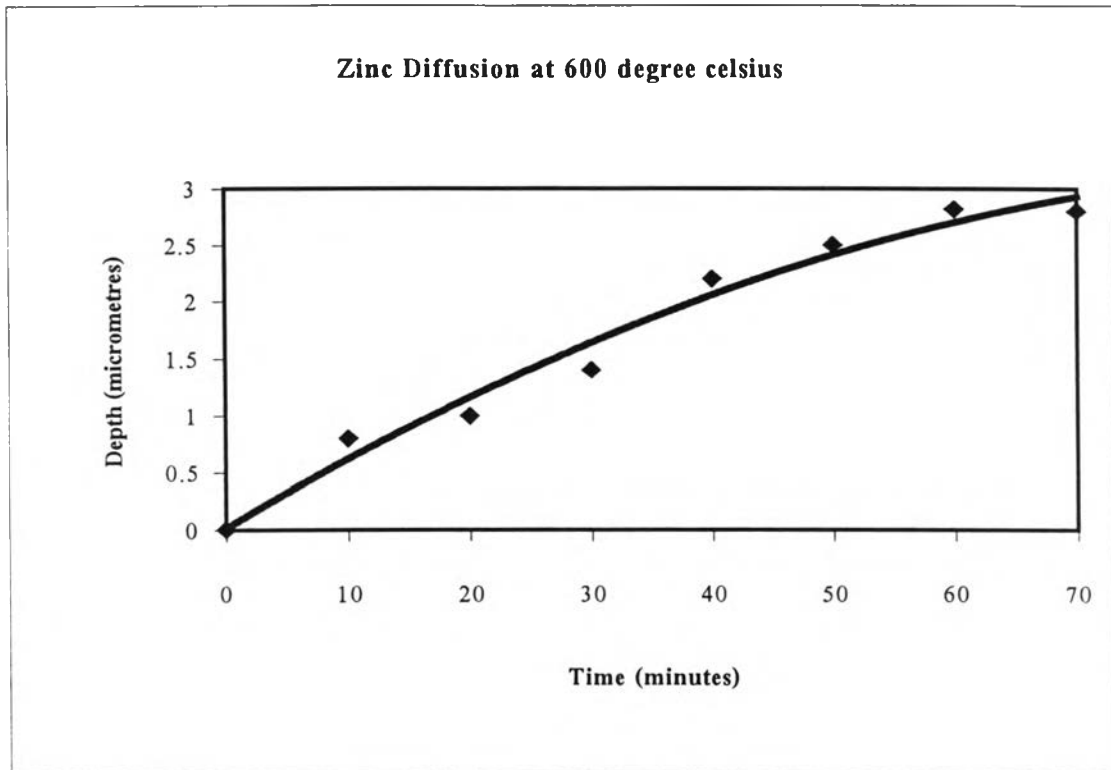
รูปที่ 3.7 (ข) แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย

สำหรับขั้นตอนในการปลูกผลึกนั้น นอกจากความพร้อมของระบบ LPE ที่กล่าวแล้ว การเตรียมวัสดุ และสารเจือต่างๆอย่างพิถีพิถันก็มีส่วนต่อคุณภาพของผลึก ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อการผลิตสิ่งประดิษฐ์

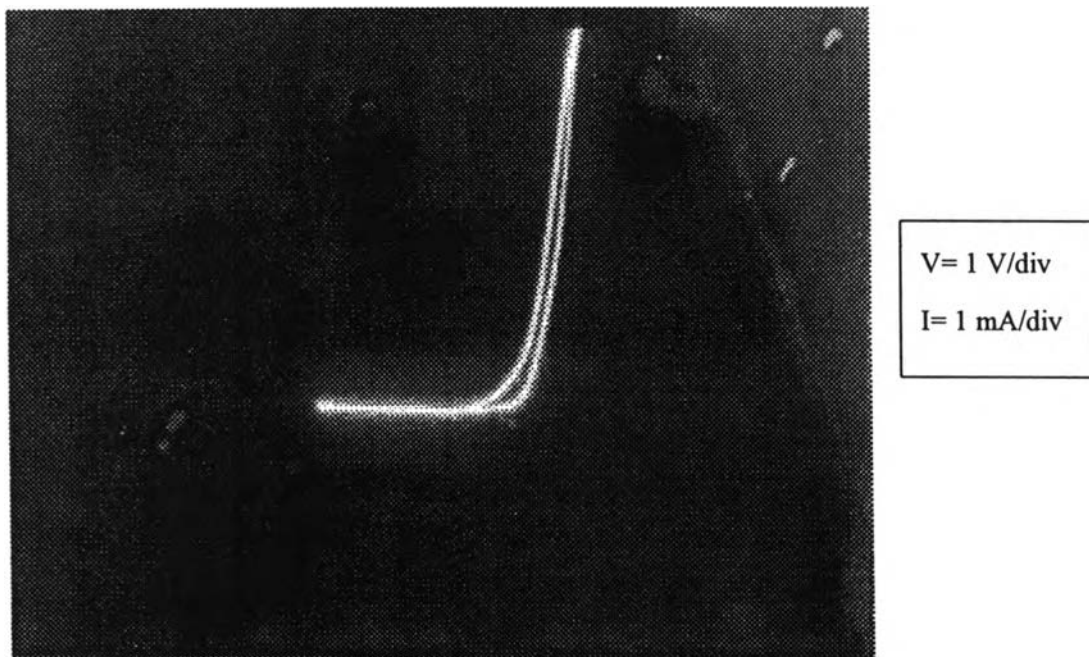
3.4 เทคโนโลยีในการแพร่ซึมสังกะสี

เนื่องจากโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่ทำการออกแบบไว้นั้นเป็นโครงสร้างแบบระนาบ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้บริเวณภายใต้ขั้วโลหะเบส ซึ่งเป็นชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์และชั้นอิมิตเตอร์ซึ่งแต่เดิมเป็น n-type ให้เป็น p-type เพื่อต่อเชื่อมถึงชั้นเบส ซึ่งวิธีการที่จะกระทำการดังกล่าวนี้ต้องทำการแพร่ซึมสังกะสี ซึ่งมีได้หลายวิธี เช่น การแพร่ซึมในท่อเปิด (Open Tube Diffusion) การใช้ไอออนพลังงานสูง (Ion Implantation) หรืออาศัยการปลูกชั้นของสารที่เป็นแหล่งกำเนิดเพื่อการแพร่ซึม (Spun-on Diffusion Source Layer) เป็นต้น [7,8] โดยในงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากกระบวนการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด (Open Tube Method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และควบคุมได้

เริ่มแรกของกระบวนการแพร่ซึมของสังกะสีนั้น อาศัยวิธีการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้เครื่อง Evaporator สร้างชั้นสังกะสีด้านบนแผ่นฐานที่ผ่านการปลูกผลึกเรียบร้อยแล้ว แต่เนื่องจากเมื่อทำการ Evaporate สังกะสีและถ่ายแบบหน้ากาก (Mask) เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการให้สังกะสีแพร่ซึมแล้ว ปรากฏว่าสังกะสีในส่วนที่ไม่ต้องการนั้นไม่สามารถคัดออกได้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า สังกะสีเป็นสารที่แพร่ซึมได้ง่ายและรวดเร็ว ดังนั้นในขณะที่ทำการ Evaporate สังกะสีก็ได้เริ่มแพร่ซึมลงในบริเวณที่ไม่ต้องการเกิดเป็นอัลลอย ทำให้ส่วนบนของชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์ทั้งหมดเป็น p-type ซึ่งรวมไปถึงบริเวณที่ต้องเป็น n-type เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะอิมิตเตอร์ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยอาศัยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นหน้ากากก่อนที่จะทำการ Evaporate โลหะสังกะสี อย่างไรก็ตามซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการใช้ Electron Beam Evaporator นั้นมีคุณภาพไม่ดีพอ มีลักษณะเป็นรูพรุน ดังนั้นเมื่อฉาบสังกะสีแล้วทำการแอนนัลที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส สังกะสีสามารถแพร่ซึมทะลุผ่านรูพรุนของซิลิกอนไดออกไซด์ลงไปยังบริเวณที่ไม่ต้องการได้ และให้ผลเช่นเดียวกันกับวิธีแรก และถ้าถ่ายหน้ากากอีกครั้งหลังจาก Evaporate โลหะสังกะสี เพื่อที่จะกัดสังกะสีบริเวณที่ไม่ต้องการออกก่อนจะทำการแอนนัล ซึ่งจะแก้ปัญหานี้ในเรื่องของคุณภาพของซิลิกอนไดออกไซด์ได้ แต่ก็เกิดปัญหาอื่นตามมา นั่นก็คือกรดไฮโดรคลอริกจะกัดเซาะด้านข้าง ทำให้สังกะสีในบริเวณที่ต้องการถูกกัดออกไปด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องยกเลิกกระบวนการนี้ สำหรับผลการแพร่ซึมสังกะสีวิธีนี้กับเวลาแอนนัล และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 (ก) และ (ข)

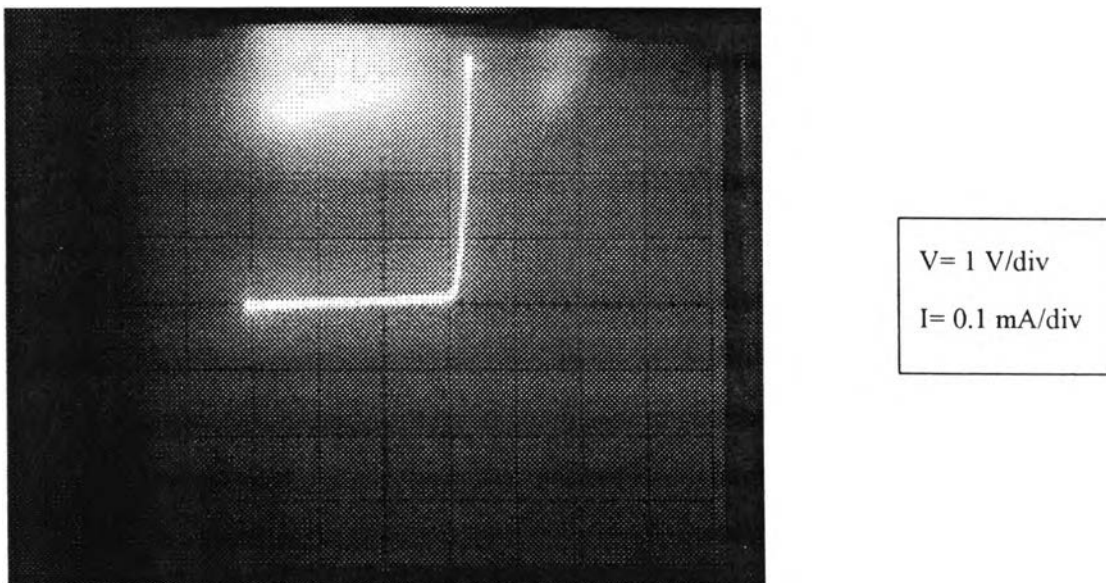


รูปที่ 3.8(ก) กราฟแสดงความลึกของการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด ที่อุณหภูมิ 600°C ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.8(ข) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นที่อาศัยวิธีการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

กระบวนการแพร่ซึมสังกะสีที่สามารถทำได้สำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างระนาบ อาศัยแนวคิดง่ายๆจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสังกะสีที่มีสัมประสิทธิ์การกระจายสูง (Distribution Coefficient) เมื่อเปรียบเทียบกับสารเจือชนิดอื่นๆ ดังนั้นการปลูกผลึกใดๆที่มีการเจือสังกะสีในปริมาณที่สูงพอ สารเจือสังกะสีก็จะแพร่เข้าสู่ชั้นผลึกด้านล่างได้ไม่มากนักน้อย แนวคิดนี้มีปรากฏให้เห็นแล้วกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ [9] ดังนั้นในกระบวนการปลูกผลึกโครงสร้างทรานซิสเตอร์ ซึ่งปกติมีชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์ของ GaAs (n^{++}) เป็นชั้นสุดท้าย เราจะปลูกชั้นผลึกของ $Ga_{1-x}Al_xAs$, $x > 0.4$ หนากว่า 6 ไมครอนอีก 1 ชั้นเพื่อใช้เป็นชั้นหน้ากัก เพื่อป้องกันการแพร่ของสังกะสีบริเวณขั้วโลหะอิมิตเตอร์ แต่จะกักชั้นหน้ากักบริเวณที่กำหนดให้เป็นขั้วโลหะเบสออก เพื่อให้สังกะสีสามารถแพร่ซึมถึงชั้นเบสได้ แล้วนำแว่นผลึกกลับเข้าสู่เตาปลูกผลึกอีกครั้งหนึ่งเพื่อสร้างชั้นผลึกของ $Ga_{1-x}Al_xAs$, $x > 0.4$ ที่มีการเจือสังกะสีอย่างเข้มข้น ขณะที่ทำการปลูกผลึกสังกะสีจะแพร่ซึมลงสู่ชั้นผลึกด้านล่างทั่วบริเวณผิวแว่นผลึกตกลงไปเท่าๆกัน แต่ไม่ให้เกิน 6 ไมครอน โดยควบคุมจากเวลาในการปลูกผลึก ดังนั้นบริเวณขั้วโลหะอิมิตเตอร์ซึ่งมีชั้นหน้ากักอยู่สังกะสีจะไม่สามารถแพร่ซึมถึงชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์ได้ หลังจากการปลูกผลึกครั้งที่ 2 ชั้นผลึก $Ga_{1-x}Al_xAs$ (p^{++}) สำหรับแพร่ซึมสังกะสีและชั้นผลึก $Ga_{1-x}Al_xAs$ สำหรับกำบังชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์จะถูกกัดออกทั้งหมดด้วยสารละลาย HF ที่อุณหภูมิประมาณ $50^{\circ}C$ สารละลาย HF นี้จะไม่กัดชั้น GaAs โครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่ได้จึงมีลักษณะเป็นโครงสร้างระนาบซึ่งพร้อมจะนำไปทำขั้วโลหะต่อไป รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ที่ได้จากการแพร่ซึมสังกะสีวิธีนี้



รูปที่ 3.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ที่อาศัยวิธีการแพร่ซึมสังกะสีโดยการปลูกชั้นสารด้วยเตา LPE

3.5 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกฐานและวัสดุของสารละลาย [6]

3.5.1 การเตรียมผลึกแผ่นฐาน

ผลึกแผ่นฐานเป็นแผ่นผลึก GaAs ชนิด N^+ มีความเข้มข้นของสารเจือปนประมาณ $3-5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ตัดแผ่นผลึกให้มีขนาด $11 \times 11 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 แผ่นเพื่อใช้เป็นชั้นสเตรต ของสิ่งประดิษฐ์ที่จะผลิต นำแผ่นผลึกทั้งสองมาทำความสะอาดทางเคมีโดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ล้างด้วย Etilene Trichloro แล้วทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้างคราบไขมัน
- 2) ล้างด้วย Acetone แล้วไปทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้าง Etilene Trichloro และคราบไขมันที่เหลือ
- 3) ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง
- 4) กัดออกไซด์ที่ผิวออกและกัดผิวให้มันด้วยสารละลาย $H_2SO_4 + H_2O + H_2O$ (4:1:1 ผสมแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ได้อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส)
- 5) ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง
- 6) ล้างด้วย HCl มากกว่า 5 นาที เพื่อกัดออกไซด์ที่เหลือ
- 7) ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง

ในขั้นตอนนี้ต้องเตรียมแผ่นผลึก GaAs (Non-doped) ขนาด $6 \times 11 \text{ mm}^2$ เพื่อเป็นตัวขดเซย As ให้สารละลายทุกหลุม โดยใช้กระบวนการทำความสะอาดเช่นเดียวกับแผ่นผลึกฐาน

3.5.2 การเตรียมวัสดุของสารละลาย

สารละลายเตรียมอยู่ในรูปของของแข็งซึ่งมีแกเลเลียม (Ga) เป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย มีอาร์เซนิก(As) ,อลูมิเนียม(Al)และสารเจือปนที่ต้องการ โดยสารเจือปนชนิด P จะใช้เจอร์มาเนียม (Ge) สารเจือปนชนิด N ใช้ดีบุก (Sn) และชนิด N^+ ใช้เทลลูเรียม (Te) ในหัวข้อนี้แสดงถึงการคำนวณน้ำหนักของตัวถูกละลายในตัวทำละลายในชั้นต่างของทรานซิสเตอร์

ให้ X เป็นเศษส่วนอะตอมของสารใดๆในสารละลายจะได้

$$X_{Ga} + X_{As} + X_{Al} + X_{im} = 1$$

เมื่อเทียบกับแกเลเลียม จะได้น้ำหนักของอาร์เซนิกเป็น

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

และได้น้ำหนักของอลูมิเนียมเป็น

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

น้ำหนักของสารเจือปนเป็น

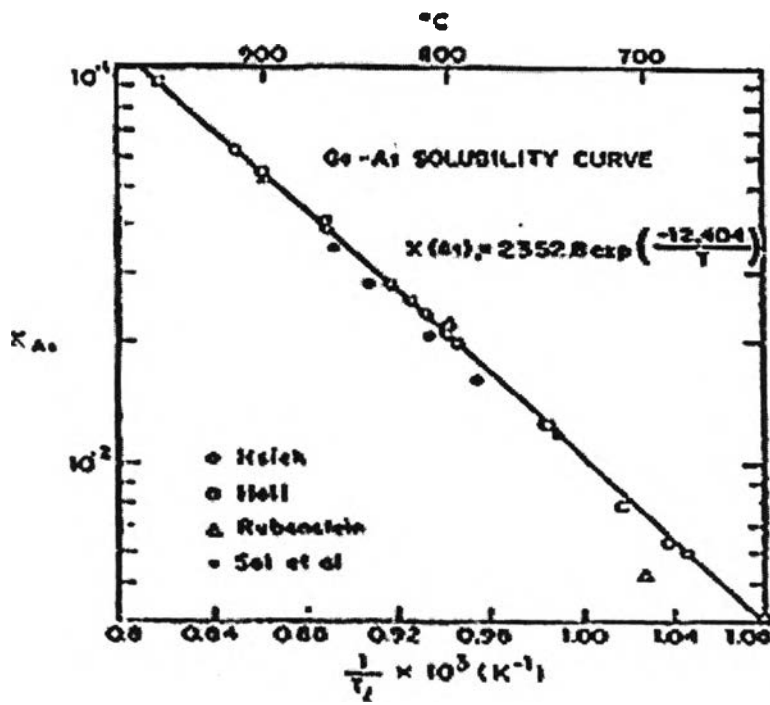
$$W_{im} = (X_{im}/X_{Ga})(M_{im}/M_{Ga}) * W_{Ga}$$

โดยที่อาร์เซนิกจะต้องเตรียมในรูปของแกเลียมอาร์เซไนด์ จะได้น้ำหนักของแกเลียมอาร์เซไนด์เป็น

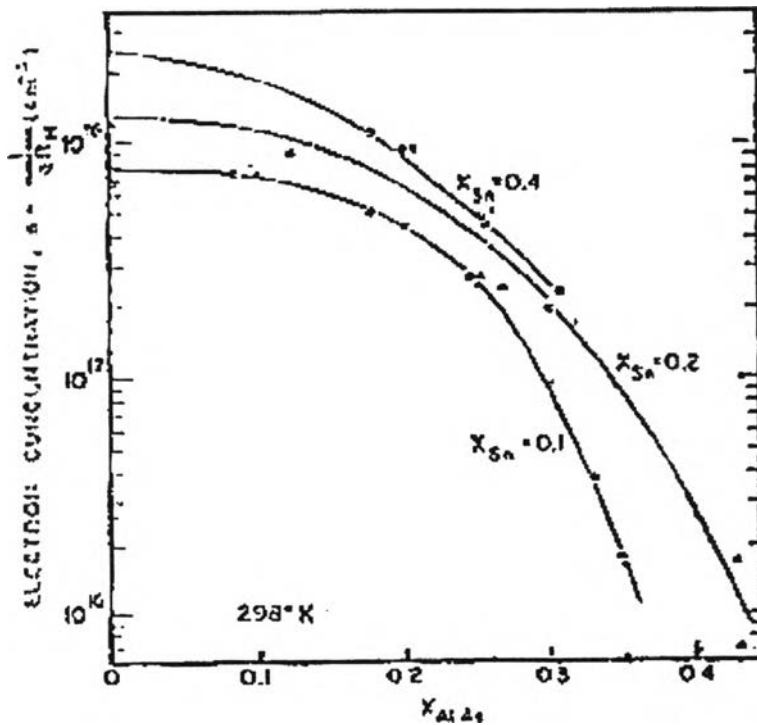
$$W_{GaAs} = (X_{GaAs}/X_{Ga})(M_{GaAs}/M_{Ga}) * W_{Ga}$$

โดยที่	M_{Ga}	=	69.72
	M_{As}	=	74.92
	M_{Al}	=	26.98
	M_{Ge}	=	72.59
	M_{Sn}	=	118.69
	M_{Te}	=	127.60
	M_{GaAs}	=	144.64

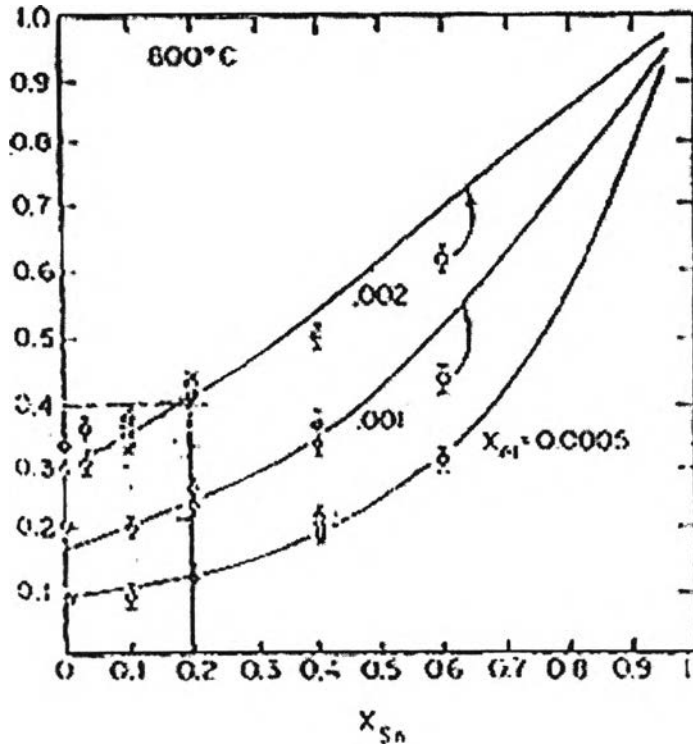
ค่าเศษส่วนอะตอมของตัวถูกละลายพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 3.10 , 3.11 , 3.12 , 3.13, 3.14 และ 3.15



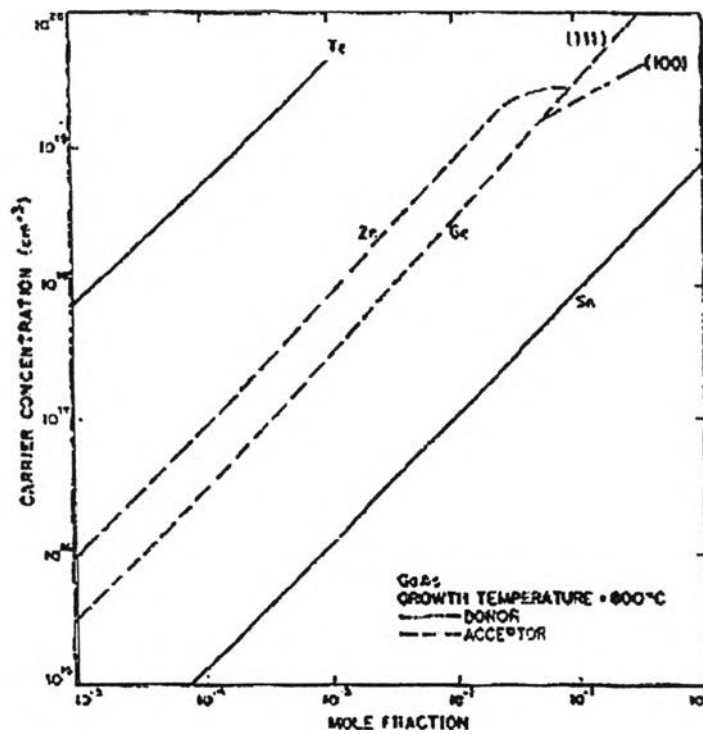
รูปที่ 3.10 กราฟจำนวนเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกในสารละลายอิมตัว GaAs ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ



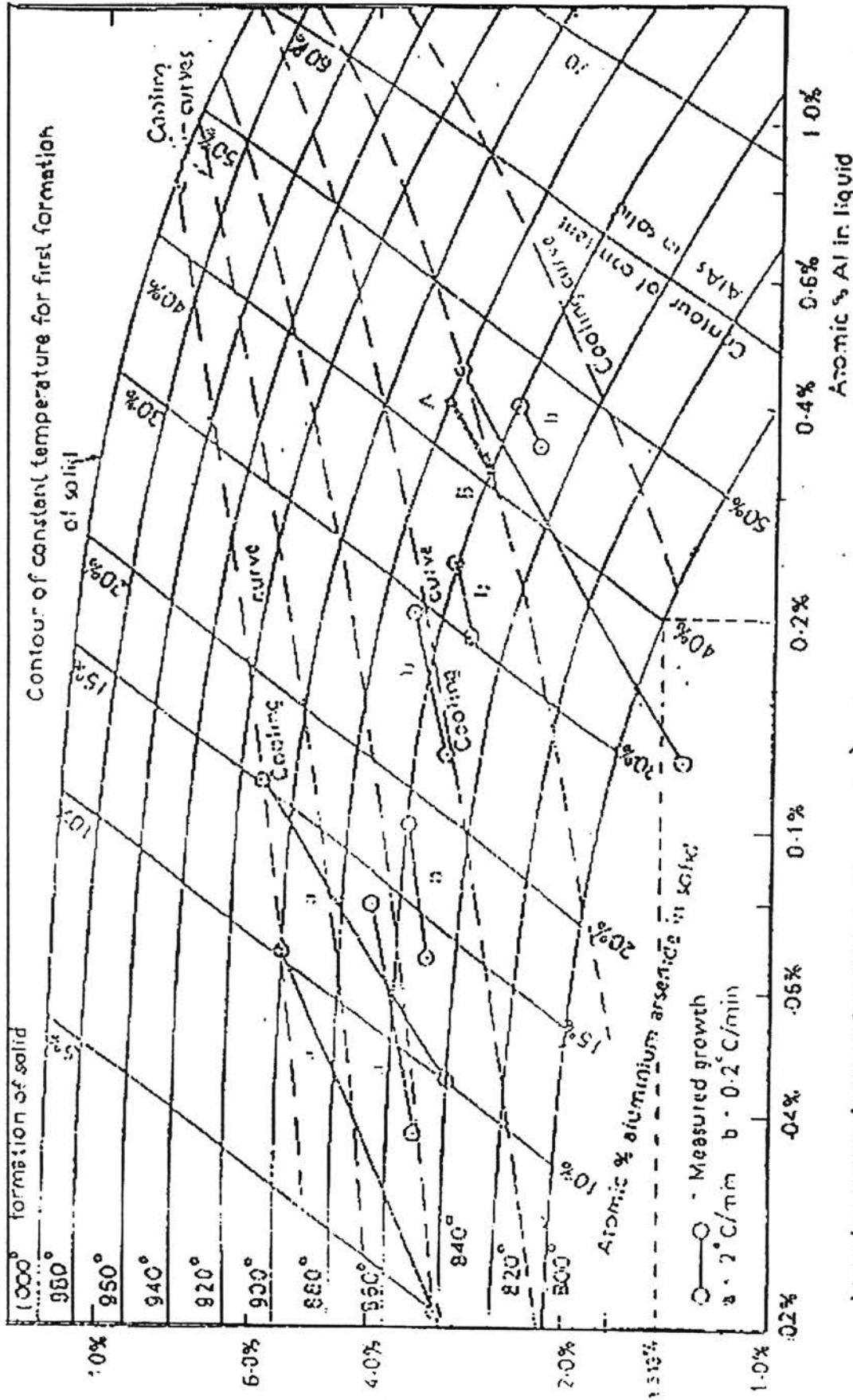
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนโมลของดีบุกที่สัดส่วน
อลูมิเนียมต่างๆที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วนอะตอมดีบุกกับเศษส่วนอะตอมของอลูมิเนียมที่สัดส่วนอลูมิเนียมค่าใดๆใน GaAlAs ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

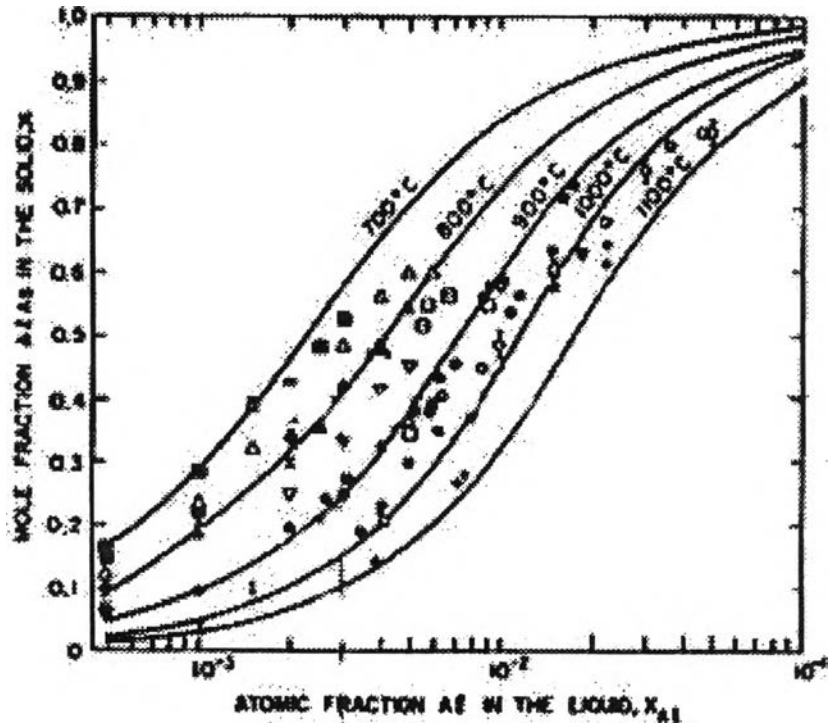


รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนชนิดต่างๆใน GaAs ที่ 800 องศาเซลเซียส



Liquidus curves for the (GaAl)As system, contours of constant AlAs in the solid and equilibrium growth curves.

รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกกับอลูมิเนียม



รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของ AlAs กับเศษส่วนอะตอมของ อลูมิเนียมใน GaAlAs ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่างการคำนวณ จะแสดงการคำนวณการเตรียมสารละลายในหลุมต่างๆของโครงสร้าง แบบที่หนึ่งทีออกแบบไว้

หลุมที่ 1	หลุม Etching ใช้ GaAs	$W_{\text{GaAs}} =$	50-60 mg
หลุมที่ 2	หลุม Buffer ใช้ GaAs	(N^+)	$10^{19} \text{ cm}^{-3} (\text{Te})$
พิจารณากราฟรูปที่ 3.10 จะได้		$X_{\text{As}} =$	0.022
สารเจือปนที่ใช้คือ Te			
พิจารณากราฟรูปที่ 3.13		$X_{\text{Te}} =$	0.0002
จะได้	$X_{\text{Ga}} = 1 - X_{\text{As}} - X_{\text{Te}}$	$=$	0.9778
ใช้แกเลียม 3.0 กรัม จะได้		$W_{\text{GaAs}} =$	140.05 mg
		$W_{\text{Te}} =$	1.123 mg

หลุมที่ 3 ชั้นคอลเล็กเตอร์เป็นชั้น $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ $(N) 10^{17} \text{ cm}^{-3} (\text{Sn})$
 เนื่องจากเป็น GaAlAs เศษส่วนอะตอมของสารเจือปนจะขึ้นกับจำนวนอะตอมใน

GaAlAs

พิจารณากราฟรูปที่ 3.11 จะได้	X_{Sn}	=	0.05
จากกราฟรูปที่ 3.12 จะได้	X_{Al}	=	0.0015
จากกราฟรูปที่ 3.14 จะได้	X_{As}	=	0.016
ดังนั้น	$X_{\text{Ga}} = 1 - X_{\text{As}} - X_{\text{Al}} - X_{\text{Sn}}$	=	0.9325
ใช้แกเลียม 3.0 กรัมจะได้	W_{GaAs}	=	109.113 mg
	W_{Al}	=	1.369 mg
	W_{Sn}	=	273.812 mg

หลุมที่ 4 ชั้นเบสเป็นชั้น GaAs $(P^+) 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} (\text{Ge})$

พิจารณากราฟรูปที่ 3.10 จะได้	X_{As}	=	0.022
สารเจือปนที่ใช้เป็น Ge พิจารณากราฟรูปที่ 3.13 จะได้	X_{Ge}	=	0.04
ดังนั้นได้	$X_{\text{Ga}} = 1 - 0.022 - 0.04$	=	0.9380
ใช้แกเลียม 3.0 กรัม จะได้	W_{GaAs}	=	142.316 mg
	W_{Ge}	=	51.62 mg

หลุมที่ 5 ชั้นอิมิตเตอร์เป็น $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ $(N) 10^{17} \text{ cm}^{-3} (\text{Sn})$

พิจารณาค่าต่างๆจากกราฟเช่นเดียวกับชั้นคอลเล็กเตอร์และใช้แกเลียม 3.0 กรัม
 จะได้

จะได้	X_{Sn}	=	0.05
	X_{Al}	=	0.0015
	X_{As}	=	0.016
ดังนั้นจะได้	$X_{\text{Ga}} = 1 - 0.05 - 0.0015 - 0.016$	=	0.9325
	W_{GaAs}	=	109.113 mg
	W_{Al}	=	1.369 mg
	W_{Sn}	=	273.812 mg

หลุมที่ 6 ชั้นผิวสัมผัสอิมิตเตอร์เป็น GaAs (N^+) 10^{19} cm^{-3} (Te)

พิจารณาค่าจากกราฟเช่นเดียวกับหลุม Buffer และใช้แก๊สเลียม 3.0 กรัม

จะได้	X_{Te}	=	0.022
	X_{As}	=	0.0002
	X_{Ga}	=	1-0.022-0.0002
		=	0.9778
ดังนั้นจะได้	W_{GaAs}	=	140.05 mg
	W_{Te}	=	1.123 mg

หลุมที่ 7 ชั้นหน้ากาก (Mask) เป็น $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (N^-)

เนื่องจากเป็น GaAlAs เศษส่วนอะตอมของสารเจือปนจะขึ้นกับจำนวนอลูมิเนียมใน GaAlAs

พิจารณากราฟรูปที่ 3.10 จะได้	X_{As}	=	0.022
จากกราฟรูปที่ 3.15 จะได้	X_{Al}	=	0.003
ดังนั้นจะได้	X_{Ga}	=	1-0.022-0.003
		=	0.975
	W_{GaAs}	=	193.084 mg
	W_{Al}	=	3.6016 mg

การคำนวณน้ำหนักของสารในหลุมที่ใช้ในการแพร่สังกะสี (Zinc Diffusion) ซึ่งจะทำให้
กระทำในการปลูกผลึกครั้งที่ 2 เป็น $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As P}^+ 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Zn)

พิจารณากราฟรูปที่ 3.10 จะได้	X_{As}	=	0.022
จากกราฟรูปที่ 3.13 จะได้	X_{Zn}	=	0.0378
จากกราฟรูปที่ 3.14 จะได้	X_{Al}	=	0.035
ดังนั้นจะได้	X_{Ga}	=	1-0.022-0.0378-0.035
		=	0.9367
	W_{GaAs}	=	146.176 mg
	W_{Zn}	=	113.527 mg
	W_{Al}	=	4.3378 mg

สรุปสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่1 เป็น ดังนี้

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Etching	***	3	50-60	***	***	***	***	***
Buffer	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Collector	0.2	3	109.113	***	273.812	***	1.369	***
Base	***	3	142.316	***	***	51.62	***	***
Emitter	0.2	3	109.113	***	273.812	***	1.369	***
Contact Emitter	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Mask	0.4	3	193.0843	***	***	***	3.6016	***

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Zn Diffuse	0.4	3	146.1755	***	***	***	4.3378	113.5272

Layer	Doping Concentration (cm^{-3})	Type	Al-content	GaAs/GaAlAs
Etching	***	n-	***	GaAs
Buffer	$1 \cdot 10^{19}$	n+(Te)	***	GaAs
Collector	$1 \cdot 10^{17}$	n(Sn)	0.2	GaAlAs
Base	$5 \cdot 10^{18}$	p+(Ge)	***	GaAs
Emitter	$1 \cdot 10^{17}$	n(Sn)	0.2	GaAlAs
Contact Emitter	$1 \cdot 10^{19}$	n+(Te)	***	GaAs
Mask	***	n-	0.4	GaAlAs
Zn Diffuse	$1 \cdot 10^{19}$	p+(Zn)	0.4	GaAlAs

ตารางที่ 3.2 นำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่1

สรุปสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่2 เป็น ดังนี้

Layer	Al-content	Ga(m)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Etching	***	3	50-60	***	***	***	***	***
Buffer	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Collector	0.3	3	127.9856	***	780.1746	***	2.046	***
Base	***	3	142.316	***	***	51.62	***	***
Emitter	0.3	3	127.9856	***	780.1746	***	2.046	***
Contact Emitter	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Mask	0.4	3	193.0843	***	***	***	3.6016	***

Layer	Al-content	Ga(m)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Zn Diffuse	0.4	3	146.1755	***	***	***	4.3378	113.5272

Layer	Doping Concentration (cm^{-3})	Type	Al-content	GaAs/GaAlAs
Etching	***	n-	***	GaAs
Buffer	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Collector	1×10^{17}	n(Sn)	0.3	GaAlAs
Base	5×10^{18}	p+(Ge)	***	GaAs
Emitter	1×10^{17}	n(Sn)	0.3	GaAlAs
Contact Emitter	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Mask	***	n-	0.4	GaAlAs
Zn Diffuse	1×10^{19}	p+(Zn)	0.4	GaAlAs

ตารางที่ 3.3 นำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่2

สรุปสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่3 เป็น ดังนี้

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Etching	***	3	50-60	***	***	***	***	***
Buffer	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Collector	0.35	3		***		***		***
Base	***	3	142.316	***	***	51.62	***	***
Emitter	0.35	3		***		***		***
Contact Emitter	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Mask	0.4	3	193.0843	***	***	***	3.6016	***

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Zn Diffuse	0.4	3	146.1755	***	***	***	4.3378	113.5272

Layer	Doping Concentration (cm^{-3})	Type	Al-content	GaAs/GaAlAs
Etching	***	n-	***	GaAs
Buffer	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Collector	1×10^{17}	n(Sn)	0.35	GaAlAs
Base	5×10^{18}	p+(Ge)	***	GaAs
Emitter	1×10^{17}	n(Sn)	0.35	GaAlAs
Contact Emitter	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Mask	***	n-	0.4	GaAlAs
Zn Diffuse	1×10^{19}	p+(Zn)	0.4	GaAlAs

ตารางที่ 3.4 นำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่3

สรุปสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่4 เป็น ดังนี้

Layer	Al-content	Ga(m)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Etching	***	3	50-60	***	***	***	***	***
Buffer	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Collector	0.35	3		***		***		***
Base	***	3	142.316	***	***	51.62	***	***
Emitter	0.2	3	109.113	***	273.812	***	1.369	***
Contact Emitter	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Mask	0.4	3	193.0843	***	***	***	3.6016	***

Layer	Al-content	Ga(m)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Zn Diffuse	0.4	3	146.1755	***	***	***	4.3378	113.5272

Layer	Doping Concentration (cm^{-3})	Type	Al-content	GaAs/GaAlAs
Etching	***	n-	***	GaAs
Buffer	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Collector	1×10^{17}	n(Sn)	0.35	GaAlAs
Base	5×10^{18}	p+(Ge)	***	GaAs
Emitter	1×10^{17}	n(Sn)	0.2	GaAlAs
Contact Emitter	1×10^{19}	n+(Te)	***	GaAs
Mask	***	n-	0.4	GaAlAs
Zn Diffuse	1×10^{19}	p+(Zn)	0.4	GaAlAs

ตารางที่ 3.5 นำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่4

สรุปสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่5 เป็น ดังนี้

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Etching	***	3	50-60	***	***	***	***	***
Buffer	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Collector	0.2	3	109.113	***	273.812	***	1.369	***
Base	***	3	142.316	***	***	51.62	***	***
Emitter	0.35	3		***		***		***
Contact Emitter	***	3	140.05	1.123	***	***	***	***
Mask	0.4	3	193.0843	***	***	***	3.6016	***

Layer	Al-content	Ga(g)	GaAs(mg)	Te(mg)	Sn(mg)	Ge(mg)	Al(mg)	Zn(mg)
Zn Diffuse	0.4	3	146.1755	***	***	***	4.3378	113.5272

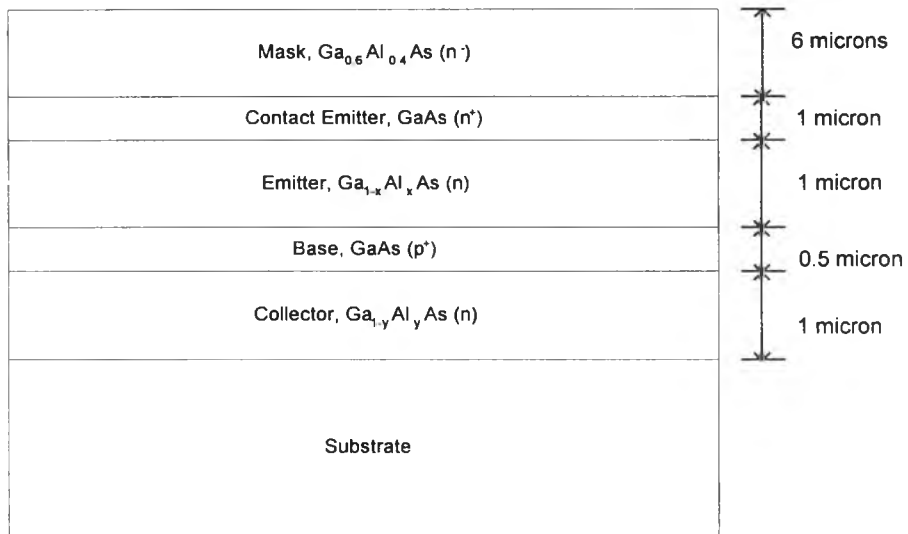
Layer	Doping Concentration (cm^{-3})	Type	Al-content	GaAs/GaAlAs
Etching	***	n-	***	GaAs
Buffer	$1 \cdot 10^{19}$	n+(Te)	***	GaAs
Collector	$1 \cdot 10^{17}$	n(Sn)	0.2	GaAlAs
Base	$5 \cdot 10^{18}$	p+(Ge)	***	GaAs
Emitter	$1 \cdot 10^{17}$	n(Sn)	0.35	GaAlAs
Contact Emitter	$1 \cdot 10^{19}$	n+(Te)	***	GaAs
Mask	***	n-	0.4	GaAlAs
Zn Diffuse	$1 \cdot 10^{19}$	p+(Zn)	0.4	GaAlAs

ตารางที่ 3.6 นำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่5

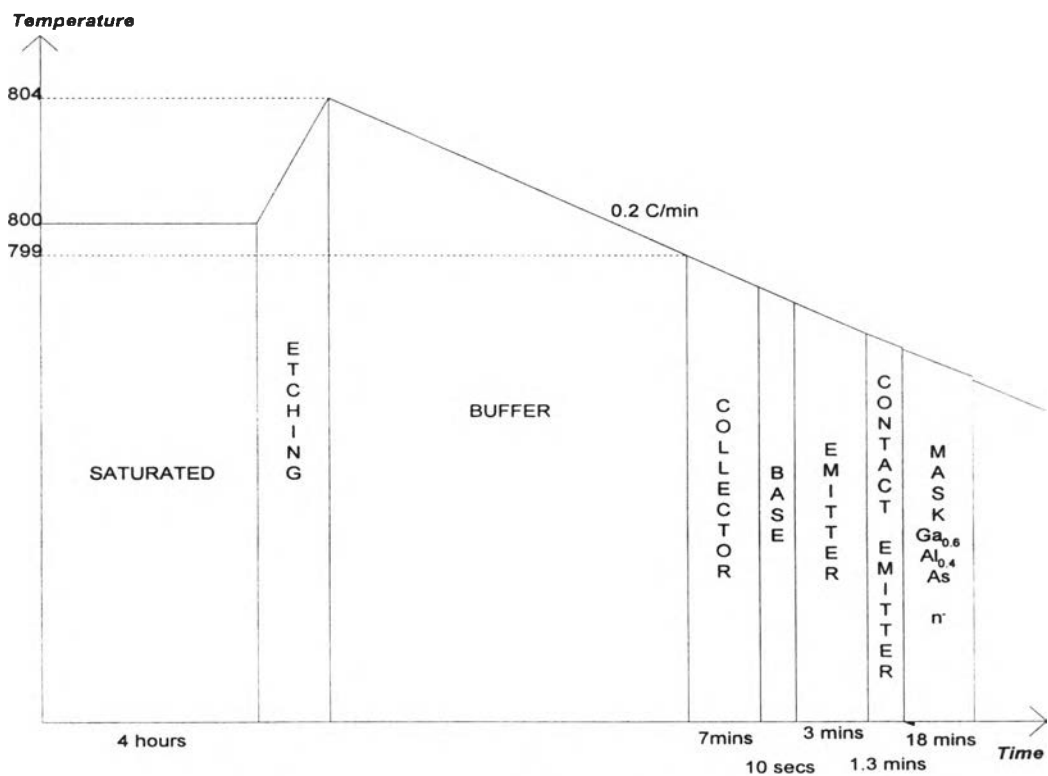
3.5.3 การผลิตสิ่งประดิษฐ์

ขั้นตอนที่ 1 การปลูกผลึกด้วย LPE

ทำการปลูกผลึกตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ โดยกำหนดความหนาของผลึกแต่ละชั้นตามรูปที่ 3.16 ส่วนรูปที่ 3.17 แสดงอุณหภูมิและเวลาในการปลูกผลึกชั้นต่างๆ



รูปที่ 3.16 แสดงความหนาของผลึกในชั้นต่างๆ



รูปที่ 3.17 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่างๆ

สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกแบ่งได้เป็นสามช่วงโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ต่างกันไป ช่วงแรกจะเป็นการเตรียมสารละลายให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_s ซึ่งมีค่าประมาณ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานมากกว่า 4 ชั่วโมงขึ้นไป ช่วงต่อมาจะทำการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายเกิดสภาวะ Undersaturate ช่วงนี้เว่นผลึกจะถูก etching เพื่อทำความสะอาด หลังจากนั้นจะเป็นช่วงการปลูกชั้นผลึก โดยทำการลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 0.2 องศาเซลเซียส/นาทีก่อนจะทำการปลูกชั้น Buffer (ช่วงแรกจะเกิดการกัดสารเจือปนจากเว่นผลึกจะไปเพิ่มสารเจือปนที่คำนวณไว้ในหลุม Buffer ดังนั้นการคำนวณสารเจือปนของชั้น Buffer จะต้องมีการชดเชย) เมื่อลดอุณหภูมิจึงถึง $T_s - \Delta T$ โดย $\Delta T \approx 1$ องศาเซลเซียส จะปลูกผลึกชั้นคอลเล็กเตอร์ เบส อิมิตเตอร์ คอนแทกอิมิตเตอร์ และชั้นกำบัง ตามลำดับโดยวิธี Supercooling ชั้นผลึกที่ปลูกได้จะมีความหนาสัมพันธ์กับเวลาเป็นไป ดังนี้ [6]

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

ซึ่งจากการทดลองใช้ $\Delta T = 1$ องศาเซลเซียส , α คือ อัตราการลดลงของอุณหภูมิมี่ค่าประมาณ 0.167 องศาเซลเซียส/นาทีก่อนจะทำการปลูกชั้นผลึกได้นำไปดูชั้นต่างๆด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากนั้นทำการปรับค่าที่ใช้ปลูกในแต่ละชั้นให้มีความหนาตามที่ได้ออกแบบจะได้เวลาที่ใช้ในการปลูกแต่ละชั้น

ก่อนการปลูกผลึกทุกครั้งจะต้องทำการเผาแกรไฟต์โบตเปล่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศ H_2 เพื่อขจัดความชื้นและสิ่งแปลกปลอมในแกรไฟต์โบต

หลังจากทำการปลูกผลึก นำผลึกที่ได้ไปดูชั้นต่างๆด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่อชั้นต่างๆครบตามต้องการ นำไปกัดออกไซด์และล้างเศษแกดเลียมที่ติดออกมาด้วย $HCl + H_2O$ (1:1) หลังจากนั้นนำไปทำ Ultrasonic จนหมดแล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดพื้นที่เจือสังกะสี

โดยการกัดชั้นหน้าจาก $Ga_{0.6}A_{0.4}As$ ออกในพื้นที่ ส่วนที่ต้องการทำขั้วโลหะเบส ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 2.1 ทำ Photolithography เพื่อกำหนดพื้นที่เจือสังกะสี

2.1.1 อบไล่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที หยอด Positive Photoresist ทำการ spin coat อบที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

2.1.2 ฉายแสง Ultraviolet ผ่าน Mask เปิดหัวโลหะเบส (Mask ที่มีลักษณะกลับกับรูปที่ 3.19(c) ยกเว้นบริเวณหัวโลหะอิมิตเตอร์)

2.1.3 ล้างน้ำยา Positive Developer + DI Water (1:1) ประมาณ 30 วินาที ล้างด้วย DI Water แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2

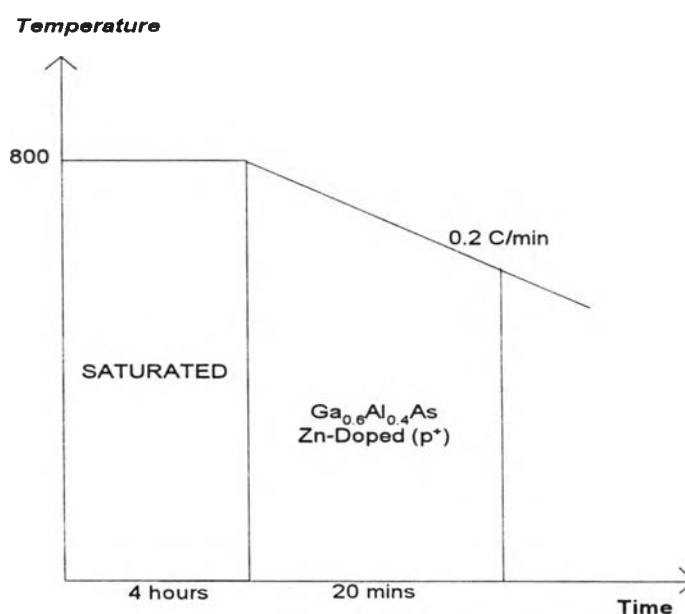
2.1.4 อบให้แห้งที่ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2.2 กัดชั้นหน้ากาก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$

2.2.1 ทา wax ด้านหลังแผ่น ทิ้งให้แห้ง แล้วกัดชั้นหน้ากากด้วย $NH_4OH+H_2O_2+H_2O$ (3:1:15) หลังจากผสมไว้ 3 ชั่วโมง เพื่อลดความรุนแรงของสารเคมี เวลาในการกัดประมาณ 55 วินาที (อัตราการกัดประมาณ $6 \mu m/min$) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(a) อย่างไรก็ตามอาจจะมีชั้นหน้ากากคงเหลืออยู่บ้างแต่ไม่เกิน $0.5 \mu m$

2.2.2 ล้าง wax และ Positive Photoresist ด้วย Etilene Trichloro และ Acetone ตามลำดับ ล้าง DI Water แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(b)

ขั้นตอนที่ 2.3 นำชิ้นงานไปปลูกผลึกอีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยเทคโนโลยี LPE เพื่อแพร่สังกะสี (Zinc Diffusion) โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการปลูกดังรูปที่ 3.18 ผลที่ได้จะได้ชั้น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (p^+) บนโครงสร้าง ในขณะที่เดียวกัน Zn จะแพร่ซึมลงสู่ด้านล่าง ผลที่ได้แสดงตามรูปที่ 3.20(c)



รูปที่ 3.18 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ เพื่อการแพร่สังกะสี

ขั้นตอนที่ 3 ทำขั้วโลหะอิมิตเตอร์และคอลเล็กเตอร์

ก่อนฉาบโลหะกัด $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ทั้ง 2 ชั้นออกด้วย HF ที่อุณหภูมิ 50 °F ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(d)

ขั้นตอนที่ 3.1 ฉาบขั้วโลหะ

3.1.1 ฉาบผิวโลหะด้วย AuGe หนา 2500 อังสตรอม ทั้งสองด้าน

3.1.2 ฉาบผิวด้วย Ni หนา 500 อังสตรอม ทั้งสองด้าน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(e)

ขั้นตอนที่ 3.2 Photolithography

3.2.1 อบไล่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส 5 นาที หยอด Positive Photoresist ทำการ spin coat และอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

3.2.2 ฉายแสงผ่าน Mask contact emitter (รูปที่ 3.19(b)) นาน 40 นาที

3.2.3 ล้างน้ำยา Positive Developer + DI Water (1:1) ประมาณ 30 วินาที แล้วล้างออกด้วย DI Water เป่าด้วย N_2 ให้แห้ง และอบที่ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3.3 กัด Contact emitter

3.3.1 ทำ wax ด้านหลังแผ่น ทั้งให้แห้ง กัดชั้น Ni ด้วย HCl จนกว่าจะหมดฟองอากาศ ล้างด้วย DI Water เป่าให้แห้งด้วย N_2

3.3.2 กัด AuGe ด้วย $KI + I_2$ ล้างด้วย DI Water เป่าให้แห้งด้วย N_2

3.3.3 ล้าง wax และ Positive resist ด้วย Etilene Trichloro และ Acetone ตามลำดับ ล้าง DI Water แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2

3.3.4 Annealing ที่ 450-500 องศาเซลเซียส นาน 2 นาทีภายใต้บรรยากาศของ Forming gas 10% H_2 + 90% N_2 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(f)

ขั้นตอนที่ 4 ทำขั้วโลหะเบส

ขั้นตอนที่ 4.1 ทำ Photolithography เพื่อปิดขั้วโลหะอิมิตเตอร์และเปิดขั้วโลหะเบส

4.1.1 อบไล่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที หยอด Positive Photoresist ทำการ spin coat อบที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

4.1.2 ฉายแสง Ultraviolet ผ่าน Mask emitter (รูปที่ 3.19(a)) 40 วินาที

4.1.3 ล้างน้ำยา Positive Developer + DI Water (1:1) ประมาณ 30 วินาที ล้างด้วย DI Water แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2

ขั้นตอนที่ 4.2 ฉาบผิวหน้าด้วย AuZn หนา 2500 อังสตรอม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(g)

ขั้นตอนที่ 4.3 ทำ Photolithography เพื่อกัดขั้วโลหะเบสโดยวิธีเดียวกับขั้นตอนที่ 4.1 แต่ใช้ Mask Contact Base

ขั้นตอนที่ 4.4 กัด AuZn ด้วย KI + I₂

ขั้นตอนที่ 4.5 ถ้าง Positive resist ด้วย Acetone

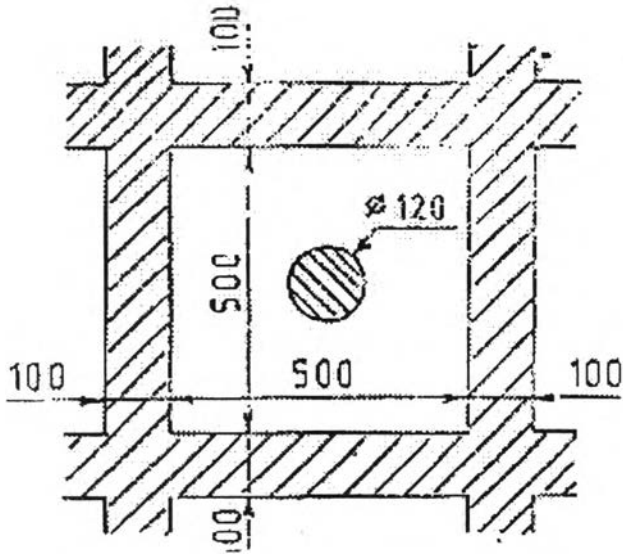
ขั้นตอนที่ 4.6 ทำ Annealing ที่ 450-500 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 นาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(h)

ขั้นตอนที่ 5 ทำ Mesa เบส

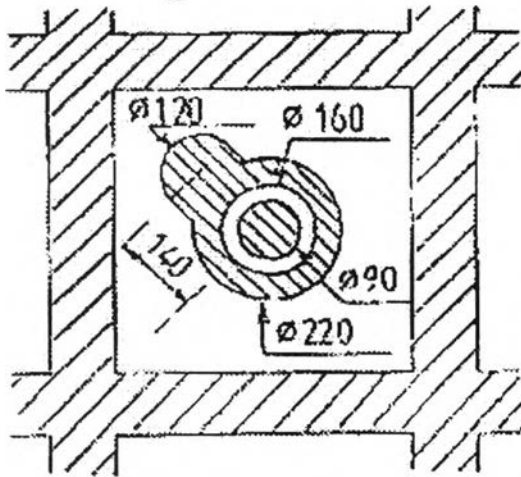
ขั้นตอนที่ 5.1 ทำ Photolithography เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.1 โดยใช้ Mask Mesa Base (รูปที่ 3.19(d))

ขั้นตอนที่ 5.2 กัดชั้นเบสด้วย H₂SO₄ + H₂O₂ + H₂O (4:1:1) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20(i)

จากนั้นนำมาทดสอบลักษณะสมบัติโดยใช้ Curve Tracer ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



(a) Mask Emitter

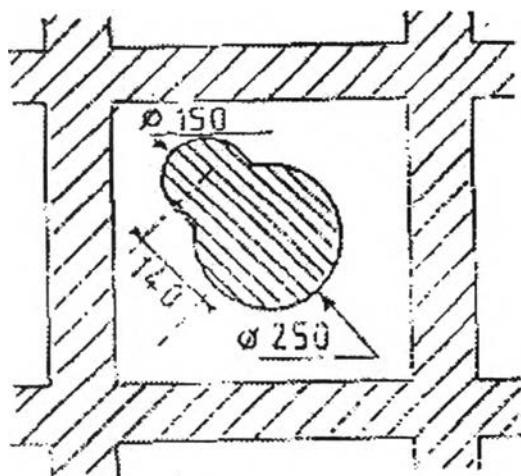


(b) Mask Contact Emitter

(บริเวณเบสจะโปร่งใส)

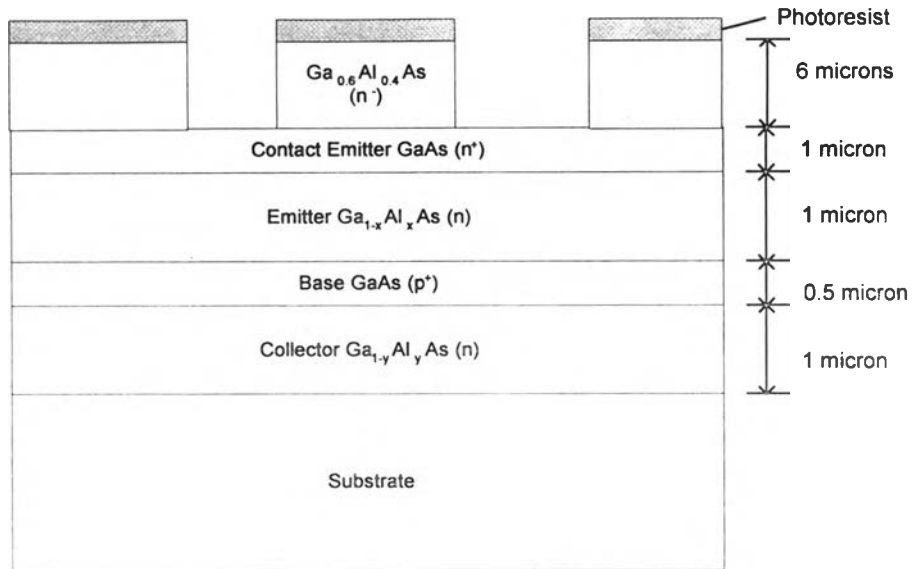
(c) Mask Contact Base

(บริเวณอิมิตเตอร์จะโปร่งใส)

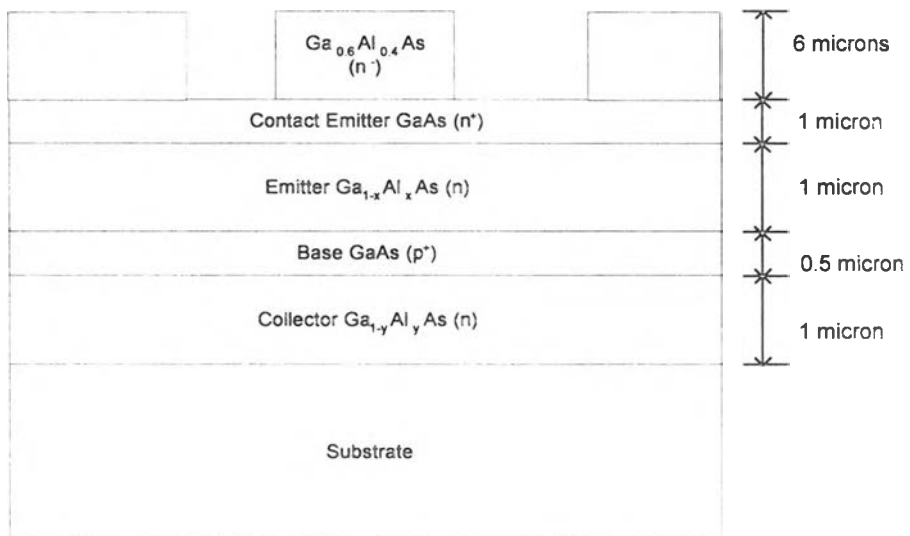


(d) Mask Mesa Base

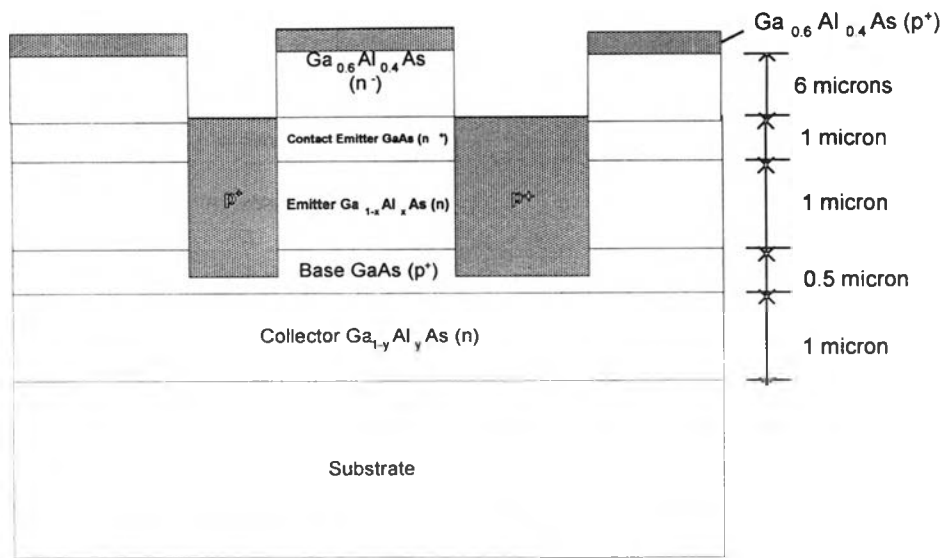
รูปที่ 3.19 Mask ที่ใช้ในกระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.20(a)



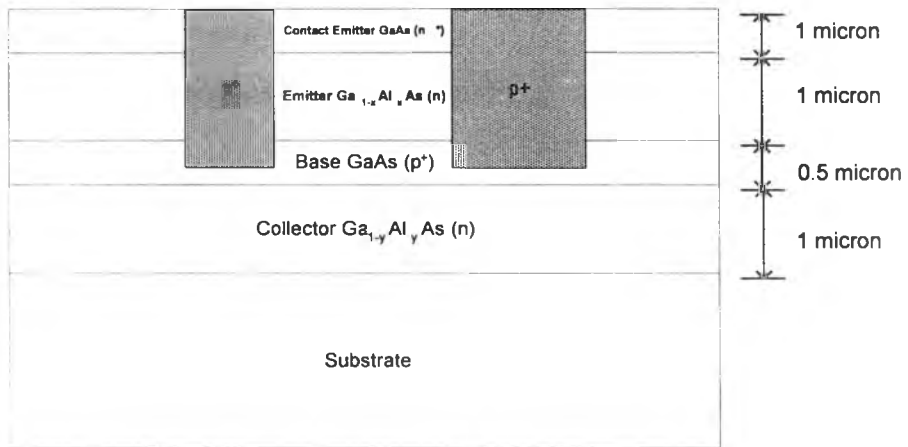
รูปที่ 3.20(b)



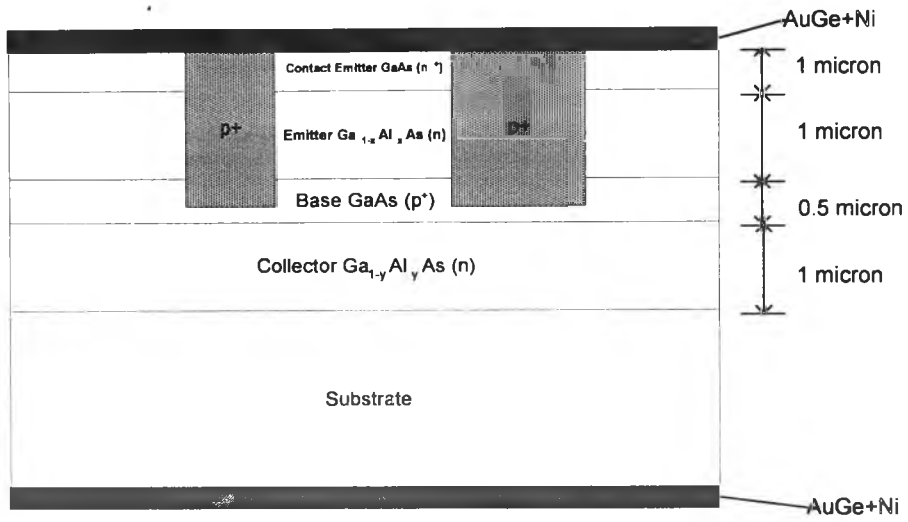
รูปที่ 3.20(c)

หมายเหตุ ความลึกของการแพร่ซึมของสังกะสีอาจจะถึงชั้นคอลเล็กเตอร์ หรืออาจจะถึงชั้น

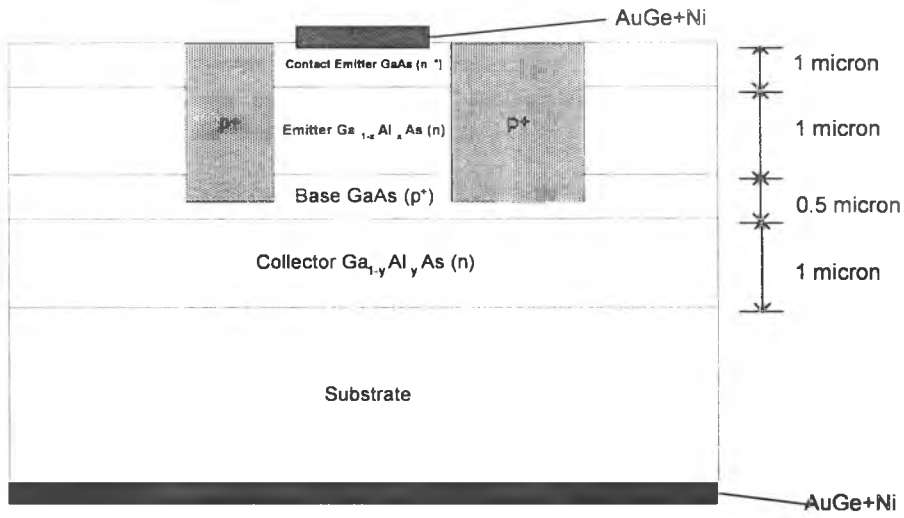
Substrate



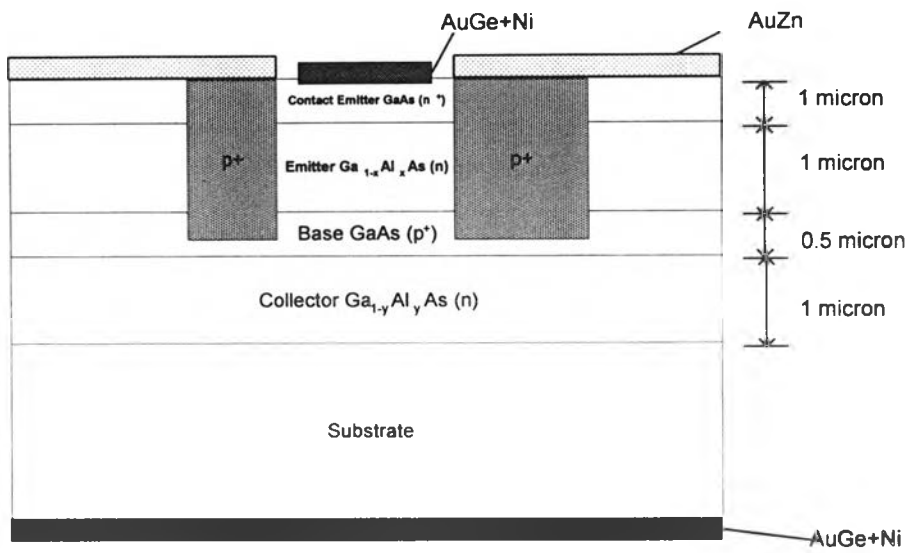
รูปที่ 3.20(d)



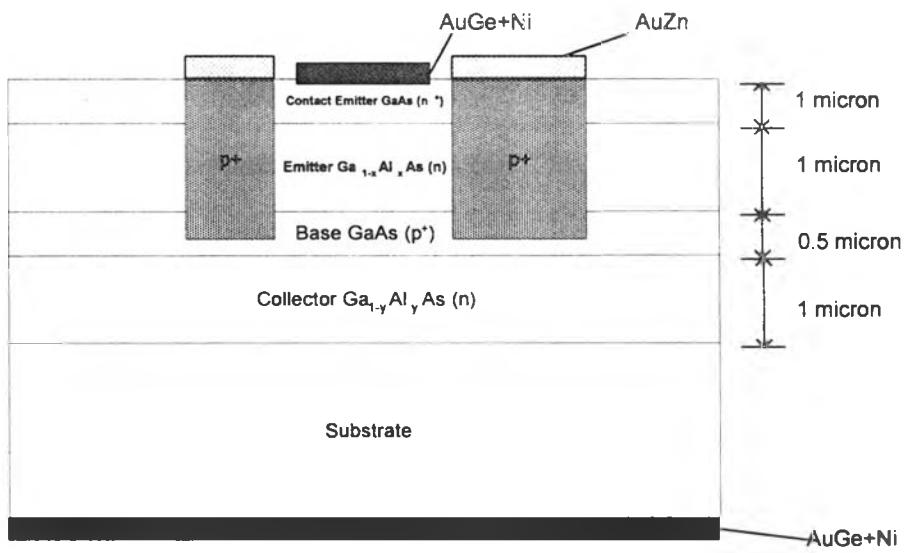
รูปที่ 3.20(e)



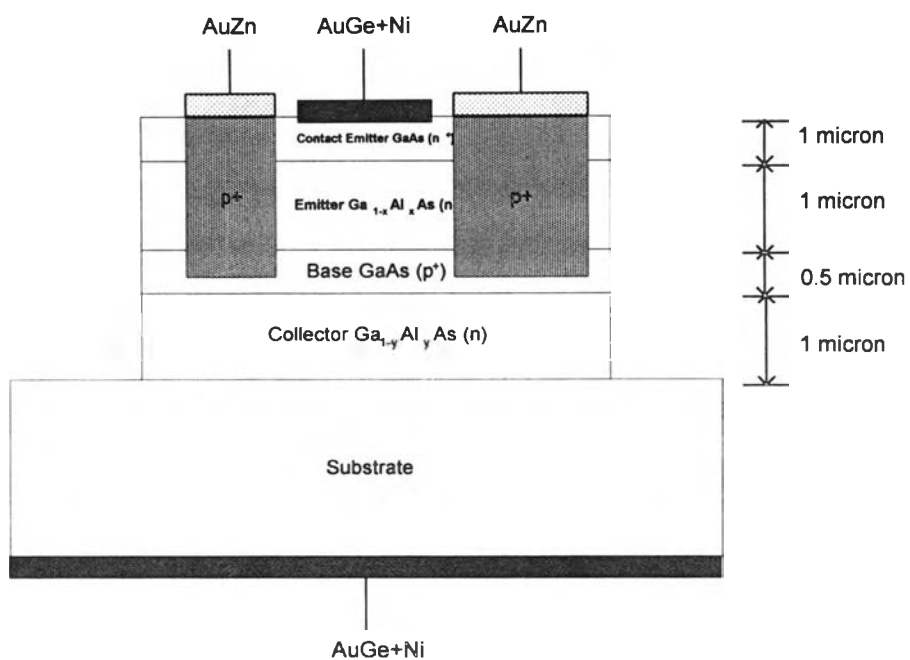
รูปที่ 3.20(ง)



รูปที่ 3.20(g)

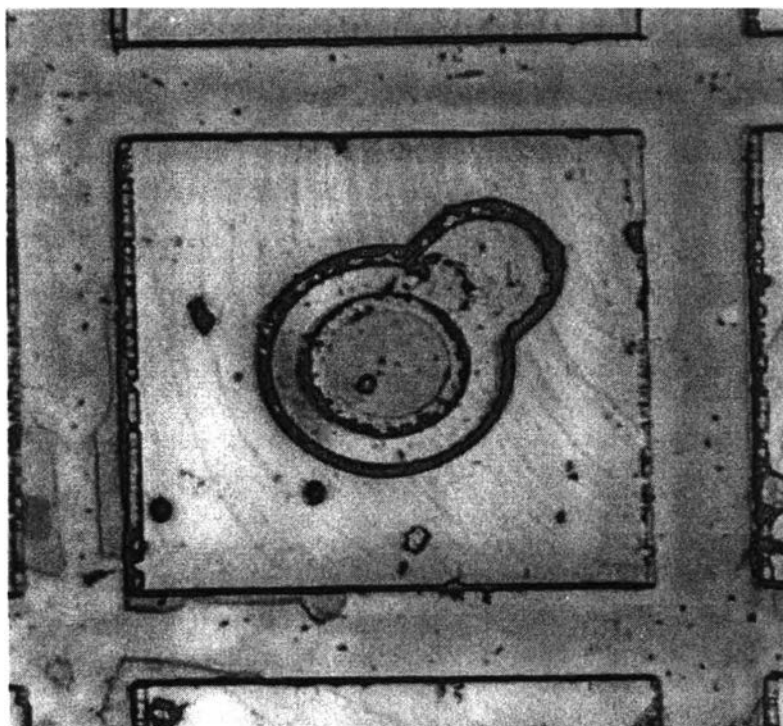


รูปที่ 3.20(h)



รูปที่ 3.20(i)

รูปที่ 3.20(a)-(i) แสดงผลที่ได้หลังจากกระทำตามขั้นตอนต่างๆในการผลิตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.21 ทรานซิสเตอร์ที่ได้ทำการผลิต