



รายงานการวิจัยและพัฒนา

โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์

OPTOELECTRONICS

ผู้กต	อัครเสณ	หัวหน้าโครงการ
มนตรี	สวัสดิ์ศฤงการ	ผู้ร่วมวิจัย
บรรณง	โตประเศวิรุหงส์	ผู้ร่วมวิจัย
เกรียงศักดิ์	เจณิตรีระชูด	ผู้ร่วมวิจัย
ธารา	ชลพรานี	ผู้ร่วมวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทร. 2525001 ต่อ 265

ทศ
วศ 15
007182
ธ. 1

ฉบับสมบูรณ์จาก

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน

รายงานการวิจัยและพัฒนา

โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์



OPTOELECTRONICS

ชุมพล	อินทรเสน	หัวหน้าโครงการ
มนตรี	สวัสดิ์ศฤงฆาร	ผู้ร่วมวิจัย
บรรยง	โตประเสริฐพงศ์	ผู้ร่วมวิจัย
เกรียงศักดิ์	เฉลิมติระกุล	ผู้ร่วมวิจัย
ธารา	ชลปราณี	ผู้ร่วมวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร. 2525001 ต่อ 265

โดยรับทุนสนับสนุนจาก

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน



บทคัดย่อ

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการริเริ่มวิจัยเทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ โดยคิดตั้งใช้งานเตาเอพิแทกซ์สถานะของเหลวแบบแนวนอน ใ้ก่ล่าวถึงข้อเด่นของหัวต่อต่างชนิดกันที่จะทำการทดลองสร้างหัวต่อต่างชนิดของ GaAs/GaAlAs จากนั้นได้ทำการออกแบบและทดลองสร้างผลึกไดโอดเปล่งแสงด้านหน้าและไดโอดเปล่งแสงด้านข้างในช่วงความยาวคลื่น 650-900 nm ได้เป็นผลสำเร็จ และเมื่อทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง เช่น สเปกตรัมแสง ความกว้างของสเปกตรัมแสง กำลังแสง และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน พบว่า แสงที่เปล่งจากไดโอดเปล่งแสงทั้งสองโครงสร้างเกิดจากการรวมตัวของพาหะระหว่างขอบของแถบพลังงานต้องห้ามของชั้นทำงาน แต่ไดโอดเปล่งแสงด้านข้างจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า เนื่องจากมีแสงที่เปล่งเกิดจากการถูกเร้า และมีกระบวนการดูดกลืนแสงภายในโครงสร้างที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน สุดท้ายได้ทำการทดลองสร้างและศึกษาทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ของหัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบสของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p^+)$ ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัว 2 ประการ กล่าวคือ ค่าคงตัวประจําวัสดุ เช่น ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และความเป็นไปได้อในการสร้างอิมิตเตอร์ที่มีแถบพลังงานต้องห้ามกว้างกว่าของเบส ทำให้สมรรถนะของสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้ สูงกว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดเดียวกันที่ทําจากซิลิกอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

Compound semiconductor technology was introduced to the Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Liquid Phase Epitaxy (LPE) furnace were installed and operated. Advances in heterojunctions are reviewed and those of GaAs-GaAlAs were mainly investigated. Surface emitting and edge emitting light emitting diodes in the 650-900 nm wavelength region have been designed and fabricated. After the characterization and investigation of their spectral output, spectral halfwidth (Full Width at Half Maximum, FWHM), optical power output and I-V characteristic, we can conclude that the electroluminescence is mainly originated from band to band recombination of their active regions but the latter ones are superior because of the stimulated emission and the selective absorption mechanisms. Finally, $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}(n)/\text{GaAs}(p^+)$ heterojunction bipolar transistors have been experimentally realized and studied. Superior performance was observed in this device comparing to the one of silicon due to its material parameters such as electron mobility and possibility to design wide gap emitter.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

1. บทนำ.....	1
2. เทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	1
3. ข้อมูลด้านเทคโนโลยีของโครงการ.....	2
3.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไดโอดเปล่งแสง.....	2
3.2 บทบาทของหัวต่อต่างชนิด.....	6
3.3 เทคโนโลยีการผลิต.....	9
4. การพัฒนาเทคโนโลยีของโครงการ.....	10
4.1 กำหนดเงื่อนไขการปลูกผลึก.....	11
4.2 ทดลองปลูกผลึก GaAs, GaAlAs.....	14
4.3 ผลการทดลองปลูกผลึก.....	16
5. ชนิดของไดโอดเปล่งแสง.....	22
6. การออกแบบโครงสร้างไดโอดเปล่งแสง.....	22
6.1 ไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านหน้า.....	22
6.2 ไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านข้าง.....	23
7. ผลการทดลองของไดโอดเปล่งแสง.....	28
8. ลักษณะของสเปกตรัมแสงเมื่อกระแสทำงานมีค่าสูงขึ้น.....	33
9. การเปล่งแสงแบบถูกเร้า.....	33
10. ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์หัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบสของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p^+)$	36
11. ลำดับขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์.....	37
12. ผลการทดลองสร้างทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์.....	41
13. สรุป.....	44
14. ปัญหาอุปสรรคของโครงการระยะที่ 1.....	45
15. เอกสารอ้างอิง.....	46
16. สิ่งตีพิมพ์.....	47
17. กิตติกรรมประกาศ.....	47

เลขหมู่	ดพ
	ดศ 15
เลขทะเบียน	007162
	ก.1
วัน,เดือน,ปี	25 พ.ค. 35

สารบัญตาราง

ตาราง	เรื่อง	หน้า
1	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Si กับ GaAs.....	3
2	ขั้นตอนการวิจัย.....	11
3	ค่า Vapor Pressure และ Distribution Coefficient ของสาร เจือปน.....	13
4	รายละเอียดชิ้นผลึกที่ทดลองปลูก.....	16
5	โครงสร้างไดโอดเปล่งแสง.....	24
6	ขั้นตอนการผลิตไดโอดเปล่งแสง.....	26



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอิเล็กตรอนกับสนามไฟฟ้าพัดพาของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs, InP และสารกึ่งตัวนำ Si.....	3
2 ตารางธาตุ แถวที่ 1 ถึงแถวที่ 5.....	5
3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าคงตัวผลึกของสารประกอบ III-V.....	5
4 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ.....	7
5 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 4 ธาตุ.....	7
6 ลักษณะของหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) GaAs/Ga _{0.6} Al _{0.4} As ที่สมมูลย์ออดทงุมิ.....	8
7 เตาเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy).....	12
8 ระดับความชื้นในเตาเอพิแทกซีตลอดช่วงการทดลอง.....	12
9 เส้นกราฟออดทงุมิของเตาเอพิแทกซี.....	14
10 แสดงรายละเอียดของออดทงุมิ และเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	15
11 เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite Boat).....	16
12 ชั้นผลึกถ่ายจาก Scanning Electron Microscope.....	17
13 ชุดเครื่องมือวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence).....	18
14 ยอดสเปกตรัม p ⁺ -GaAs (Ge-doped).....	18
15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	20
16 ลักษณะสมบัติ (1/C ² , V).....	21
17 ภาพตัดขวางโคโอดเปล่งแสง (ก) โคโอดเปล่งแสงที่ผิวหน้า (ข) โคโอดเปล่งแสงด้านข้าง.....	23
18 ภาพจริงโคโอดเปล่งแสงที่ผิวหน้า (ก) ก่อนเปล่งแสง (ข) ขณะเปล่งแสง.....	29
19 ภาพจริงโคโอดเปล่งแสงด้านข้าง (ก) ก่อนเปล่งแสง (ข) ขณะเปล่งแสง.....	29
20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโคโอดเปล่งแสง.....	30
21 ลักษณะสมบัติกำลังแสง-กระแสของโคโอดเปล่งแสง.....	30
22 สเปกตรัมของโคโอดเปล่งแสงด้านหน้า.....	31
23 สเปกตรัมของโคโอดเปล่งแสงด้านข้าง.....	31
24 สเปกตรัมของโคโอดเปล่งแสงอินฟราเรดเมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้นจาก 40 mA เป็น 60, 100 และ 120 mA ตามลำดับ.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
25	แสดงการแคบลงของช่วงความกว้างสเปกตรัมของแสงเมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น..... 34
26	การเปลี่ยนแปลง λ_p เมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น..... 35
27	สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงด้านข้างบางตัวอย่าง โดยแสดงเปรียบเทียบระหว่างแสงที่เปล่งทางผิวหน้ากับแสงที่เปล่งด้านข้าง จากตัวอย่างเดียวกัน.. 35
28	แสดงการ Coupling แสงจากไดโอดเปล่งแสงด้านข้างเข้าสู่เส้นใยแสง.... 38
29	ระดับสารเจือปนในชั้นต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์..... 38
30	ระดับอุณหภูมิที่ใช้สร้างชั้นผลึกต่าง ๆ 39
31	ขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์..... 40
32	โครงสร้างทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดของอิมิตเตอร์-เบส $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p^+)$ 39
33	ผิวหน้า GaAs Transistor ก่อนติดตั้งบนฐานโลหะ..... 41
34	GaAs Transistor หลังจากติดตั้งบนฐานโลหะ..... 42
35	ลักษณะสมบัติ (I_C, V_{CE}) ของ GaAs Transistors..... 42
36	ลักษณะสมบัติอัตราขยายกระแสกับกระแสคอลเลกเตอร์..... 43
37	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัทออฟกับกระแสคอลเลกเตอร์ของ GaAs-Transistor และ Si-Transistor ที่คำนวณได้จากทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเท่ากัน..... 43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ (List of Abbreviations)

C_{TC}	ทรานซิสชันคาปาซิแตนซ์หัวต่อคอลเลกเตอร์-เบส, pF
C_{TE}	ทรานซิสชันคาปาซิแตนซ์หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส, pF
E_g	แถบพลังงานต้องห้าม, eV
FWHM	ความกว้างสเปกตรัมแสง, nm
f_T	ความถี่กัทออฟ, GHz
G	อัตราขยายกำลัง
k	ค่าคงตัว Boltzmann
N_A	ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนผู้รับ, cm^{-3}
N_D	ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนผู้ให้, cm^{-3}
γ_{BB}	ความต้านทานชั้นเบส,
γ_{CC}	ความต้านทานชั้นคอลเลกเตอร์,
T	อุณหภูมิ °K, °C
U_T	kT/q , เมื่อ q คือค่าประจุไฟฟ้า
λ_p	ความยาวคลื่นที่ความเข้มสูงสุด, nm
μ_n	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน, $cm^2/V.S$
τ_B	เวลาของการเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นเบส, วินาที
τ_C	เวลาของการเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นคอลเลกเตอร์, วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. บทนำ (Introduction)

ถ้าจะตั้งข้อสังเกตสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอาจสามารถแยกแยะออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ กล่าวคือ สิ่งประดิษฐ์แยกย่อย (Discrete Devices) วงจรรวม (Integrated Circuits) และสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronic Devices) แต่ละกลุ่มมีบทบาทและเป็นหัวใจหลักในการทำงานของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน อาจมีความแตกต่างกันอยู่บ้างก็แต่ในเชิงประยุกต์ใช้งานเท่านั้น โดยเฉพาะสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์มักจะมีการประยุกต์ใช้ในวงจรเฉพาะอย่าง ซึ่งไม่สามารถนำสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นมาทดแทนได้ ดังนั้นในเชิงพาณิชย์สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จึงมักจะมีราคาแพง และหาซื้อได้ยากในท้องตลาดทั่ว ๆ ไป ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสิ่งประดิษฐ์กลุ่มนี้มีอยู่มากมาย ยกตัวอย่างเช่น ในการสื่อสารทางแสง (Optical Communication) ในเลเซอร์พริ้นเตอร์ (Laser Printer) ในเครื่องเล่นคอมแพคดิสก์ (Compact Disk Player) ในการแสดงผลเป็นตัวเลข (Digital Display) ในวงจรควบคุมเชิงอุตสาหกรรม (Industrial Optoelectronic Controls) ในเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ ฯลฯ

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เล็งเห็นความสำคัญในประเด็นนี้ จึงได้มีการริเริ่มพัฒนาและวิจัยสิ่งประดิษฐ์ทางแสง โดยใช้สารประกอบกึ่งตัวนำตระกูลแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และแกลเลียมอัลลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (GaAlAs) เป็นวัสดุหลัก เป้าหมายคือ วงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Integrated Circuit, OEIC) [Yariv A.] งานวิจัยขั้นต้นเป็นการเรียนรู้เทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ ทดลองประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแกลเลียมอาร์เซไนด์ และทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ความเร็วสูง

2. เทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ

เทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำ เริ่มมีบทบาทมากขึ้นนับแต่เริ่มมีการประยุกต์ใช้ในการสื่อสารทางแสง (Optical Communication) และวิจัยประดิษฐ์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (Supercomputer) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ใน 2 กรณีนี้มีความต้องการสิ่งประดิษฐ์ที่มีสมรรถนะสูงทางด้านความเร็ว และ/หรือเปล่งแสงได้ สารประกอบกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายประการ ที่เด่นกว่าสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุ เช่น ซิลิกอน และสามารถสนองความต้องการที่กล่าวแล้ว ถ้าใช้ดีโอดแกลเลียมอาร์เซไนด์และซิลิกอนเป็นคู่เปรียบเทียบ จะสามารถเปรียบเทียบลักษณะเด่นของแกลเลียมอาร์เซไนด์เหนือซิลิกอนได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

2.1 GaAs มีความเร็วของอิเล็กตรอนมากกว่าของ Si ถึง 8 เท่าตัว ตามรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเหมือนกันเมื่อผลิตจาก GaAs ย่อมมีผลตอบสนองเชิงความถี่ หรือความเร็วในการทำงานยิ่งยวดกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก Si ด้วยสัดส่วนเดียวกัน

"GaAs จึงเหมาะสมกว่า Si เมื่อใช้ผลิตเป็น High Speed Devices"

2.2 GaAs มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างกว่าของ Si (ดูตารางที่ 1) สิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบกึ่งตัวนำจึงสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า

"GaAs จึงเหมาะสมกว่า Si เมื่อใช้ผลิตเป็น Power Devices"

2.3 สามารถเพิ่มขนาดช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs ได้ โดยการเติมอะตอมของอะลูมิเนียม (Aluminium) ลงไป กลายเป็น $Ga_{1-x}Al_xAs$ ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ (Ternary Compound) ทั้งนี้ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะมากหรือน้อยขึ้นกับสัดส่วนของ Al ที่เติม ข้อเค้นข้อนี้มประโยชน์อย่างไร จะกล่าวละเอียดในหัวข้อการผลิตสิ่งประดิษฐ์ (ไดโอดเปล่งแสง และทรานซิสเตอร์)

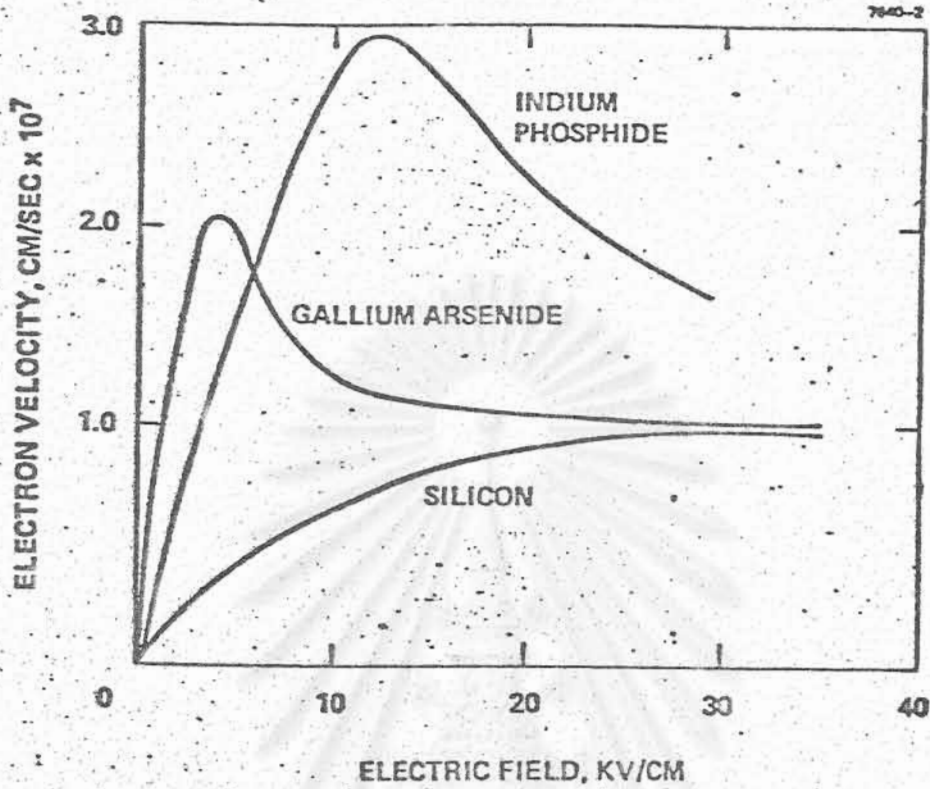
2.4 GaAs มีคุณสมบัติทางด้านแสง ในขณะที่ Si ไม่มีคุณสมบัติข้อนี้ เนื่องจาก GaAs มีแถบพลังงานแบบตรง กระบวนการรวมตัวให้แสงของพาหะบวกและพาหะลบ จึงเกิดขึ้นได้ง่ายและไม่มีการสูญเสีย GaAs จึงสามารถใช้เป็นวัสดุหลักที่ใช้ผลิตสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงได้เช่น เลเซอร์ไดโอด และไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

3. ข้อมูลด้านเทคโนโลยีของโครงการ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไดโอดเปล่งแสง [Gillissen K. และ W. Schairer]

ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปล่งแสงได้ เราพิจารณาจากเหตุผล 2 ประการ

1. ต้องเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (Direct Band Gap) เพื่อให้อิเล็กตรอนกับโฮลรวมตัวกันได้โดยตรง (Direct Band to Band Recombination) ในกรณีที่ไม่ใช่ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง แต่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉ (Indirect Band Gap) จะต้องมีเทคโนโลยีที่สามารถลดบทบาทของการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลระหว่างขอบพลังงานลง และทำให้อิเล็กตรอนกับโฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยวิธีการอื่น ๆ เช่น การเติมสารเจือปนเพื่อให้เกิด Isoelectronic



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอิเล็กตรอนกับสนามไฟฟ้าพัฒนาของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs, InP และสารกึ่งตัวนำ Si

ตารางที่ 1

เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Si กับ GaAs

	Si	GaAs
ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap) (eV)	1.1	1.43
ความคล่องตัว (Mobility) (cm ² /V.S)	1,500	8,500

Centers

2. ขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะต้องสอดคล้องกับช่วงความถี่ของแสงที่เราสนใจ เช่น ในช่วงที่ตามองเห็น (Visible Light) 400-700 nm หรือช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared Light) > 800 nm โดยพิจารณาจาก

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E_g(\text{eV})} \quad (1)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของแสงในหน่วย นาโนเมตร

E_g คือ ความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานในหน่วย อิเล็กตรอน-โวลต์

ด้วยข้อมูล 2 ข้อ ดังกล่าวข้างต้นทราบได้ทันทีว่าธาตุซิลิกอน (Silicon) และธาตุเจอร์มาเนียม (Germanium) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่เรารู้จักกันดี ไม่อยู่ในกฎเกณฑ์ทั้ง 2 ข้อ ซิลิกอน และเจอร์มาเนียม เป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉ และช่องว่างแถบพลังงานแคบเกินไป (1.15 eV และ 0.67 eV ตามลำดับ) ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้

พิจารณตารางธาตุในรูปที่ 2 สังเกตที่ธาตุเจอร์มาเนียม (Ge) ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 4 และมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 32 ตัว มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวที่ใช้ในการยึดกับอะตอมของเจอร์มาเนียมข้างเคียงแบบพันธะโควาเลนต์ สมมติว่าอะตอมเจอร์มาเนียมทุกตำแหน่งสลับตำแหน่ง ถูกแทนที่ด้วยแกเลียม (Gallium, Ga) ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของ Ge และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวในทำนองเดียวกัน Ge ทุกตำแหน่งสลับตำแหน่งที่เหลือถูกแทนที่ด้วยอาร์เซนิก (Arsenic, As) ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว โครงผลึกจะกลายเป็นสารประกอบแกเลียมอาร์เซนิก (GaAs) ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนต่ออะตอมเหมือนเดิม GaAs จึงควรมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุ Ge ซึ่งก็เป็นความจริง GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำ แต่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง และมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่าของ Ge มาก ด้วยวิธีการเดียวกันจะใช้สารประกอบ AIP เมื่อยึดซิลิกอนเป็นหลัก

โดยทั่ว ๆ ไปการรวมตัวระหว่างธาตุในกลุ่ม 3 เช่น Al, Ga, In กับธาตุในกลุ่ม 5 เช่น N, P, As และ Sb จะปรากฏสารประกอบ 12 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนใหญ่เป็นสารกึ่งตัวนำและมีช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง 0.18 eV ถึง 3.4 eV ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 6.89 nm ถึง 365 nm ยกเว้น AlN มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ส่วนสารประกอบที่มีเครื่องหมาย * เป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงนอกนั้น มีช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉ

นอกจากนี้ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ยังสามารถนำมาวมกันเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ (Ternary Compound) และชนิด 4 ธาตุ (Quarternary

Group	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII			
													III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	
													b	b	b	b	b	b	b	b	b
Period 1	H																			He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne			
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar			
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
								Ni													
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe				
								Pd													

รูปที่ 2 ตารางธาตุ แถวที่ 1 ถึงแถวที่ 5

	N	P	As	Sb	
Al	AlN ~6.0? (0.440)	AlP 2.45 0.546	AlAs 2.15 0.566	AlSb 1.65 0.614	eV nm
Ga	GaN 3.4* (0.451)	GaP 2.26 0.545	GaAs 1.42* 0.565	GaSb 0.73* 0.610	eV nm
In	InN 1.95* (0.501)	InP 1.34* 0.587	InAs 0.36* 0.606	InSb 0.18* 0.648	eV nm

รูปที่ 3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าคงตัวผลึกของสารประกอบ III-V

compound) ได้อีกครั้งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 ซึ่งจะทำให้เราสามารถควบคุมหรือกำหนด ช่องว่างแถบพลังงานและความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาได้ โดยกำหนดลักษณะการผสม ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำให้พอเหมาะ ในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบชนิด 3 ธาตุ $GaAs_{1-x}P_x$ และ $Ga_{1-x}Al_xAs$ ซึ่งเกิดจากการผสม ระหว่าง GaAs กับ GaP และ GaAs กับ AlAs ตามลำดับ โดยที่ x เป็นค่าสัดส่วนในการผสมของ GaP และ AlAs ส่วนรูปที่ 5 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ กึ่งตัวนำชนิด 4 ธาตุ $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ ซึ่งเกิดจากการผสมของ InAs, InP, GaAs และ GaP

3.2 บทบาทของหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction)

จากเทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ 3 ธาตุ และ 4 ธาตุ ทำให้สามารถสร้างหัวต่อ (Junctions) ระหว่างวัสดุสองชนิด ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังรูปที่ 6 นอกจากช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันแล้ว ค่าดัชนีหักเหของ สารสองชนิดที่ประกอบเป็นหัวต่อยังแตกต่างกันด้วย คุณสมบัติทั้ง 2 ข้อนี้ทำให้หัวต่อเฮเทอโรมีข้อได้เปรียบที่มีประโยชน์มากในสิ่งประดิษฐ์ทั้งสองที่กำลังวิจัย

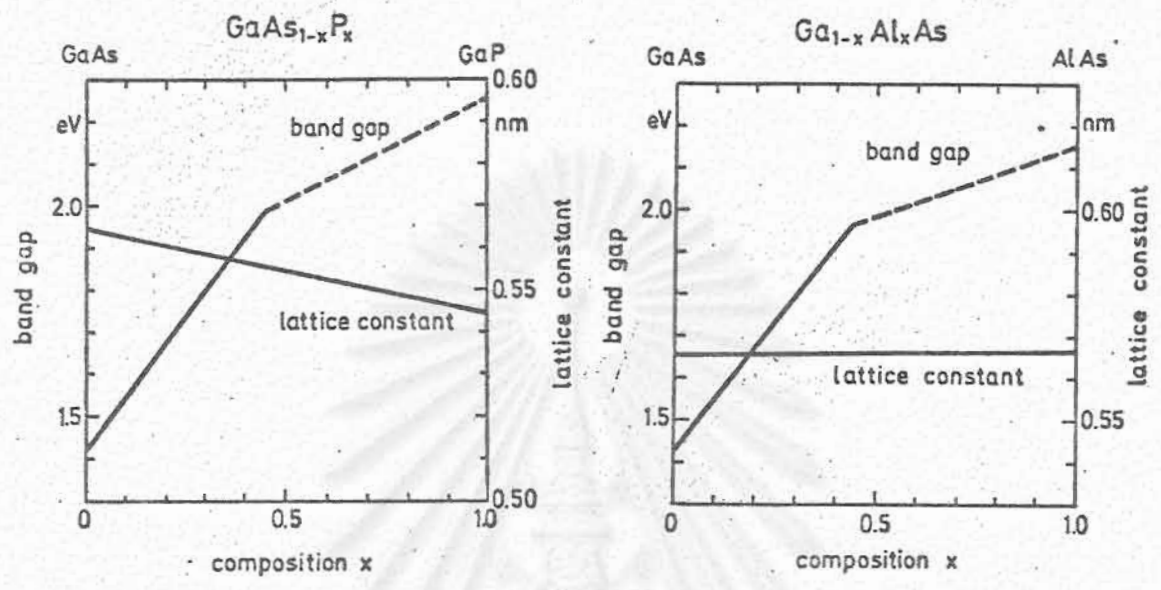
ข้อเด่นของหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) ที่เหนือกว่าหัวต่อธรรมดา (Homojunctions) ได้แก่

3.2.1 ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะ (Injection Efficiency) ของหัวต่อชนิดนี้มีค่าสูงมาก และสูงกว่าหัวต่อธรรมดาถึง $\exp(\Delta E_g/kT)$ เท่า [Kroemer H.] กล่าวคือ

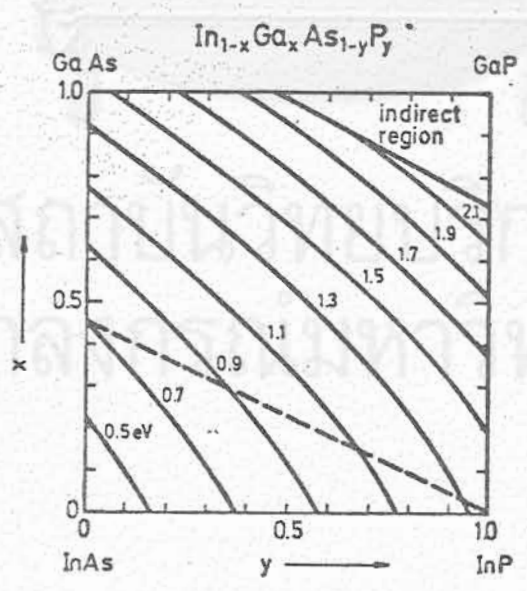
$$\text{Heterojunction Efficiency} = \text{Homojunction Efficiency} * \exp(\Delta E_g/kT)$$

3.2.2 เนื่องจากการขาดตอนของแถบพลังงาน (Band Discontinuities) ที่หัวต่อต่างชนิด ทำให้หัวต่อแบบนี้มีความสามารถในการกักพาหะ (Carrier Confinement) และการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหที่ทันใดที่หัวต่อ (Step Index) เป็นผลให้หัวต่อแบบนี้สามารถกักแสงได้ (Optical Confinement) [Kressel H. และ Butler J.K.]

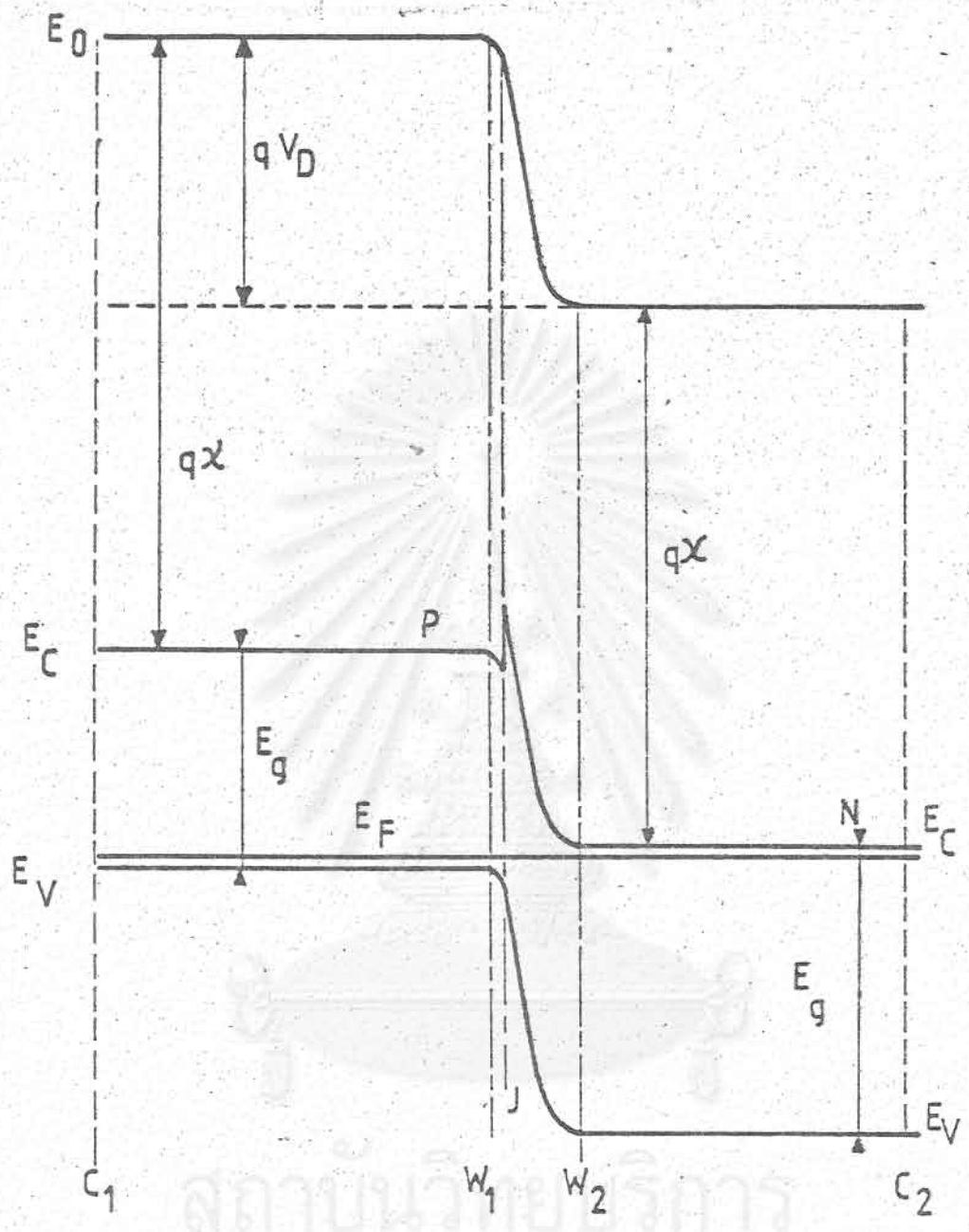
ข้อเด่นข้อแรกถูกประยุกต์ใช้ในทรานซิสเตอร์ความไวสูง ส่วนข้อเด่นข้อหลังถูกประยุกต์ใช้ในไดโอดเปล่งแสงคุณภาพสูงและเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 4 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ



รูปที่ 5 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 4 ธาตุ



รูปที่ 6 ลักษณะของหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction)
GaAs/Ga_{0.6}Al_{0.4}As ที่สมมูลย์อุดมทฤษฎี



3.3 เทคโนโลยีการผลิต

เทคโนโลยีในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารประกอบกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นตอนหลัก กล่าวคือ

- 3.3.1 Crystal Growth
- 3.3.2 Epitaxy
- 3.3.3 Wafer Processing

ชั้นตอนที่ 1 อยู่นอกเหนือความสนใจ ชั้นตอนที่ 2 และ 3 คือ ชั้นตอนที่ต้องพิจารณาในโครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์

Epitaxy

Epitaxy คือเทคโนโลยีปลูกผลึกชั้นบาง ๆ ซึ่งสามารถปลูกซ้อนทับกันหลาย ๆ 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 ในโครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์นี้ เราใช้ LPE เป็นเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างหลาย ๆ ชั้น (Multilayer Structure) ของสิ่งประดิษฐ์ด้วยเหตุผลที่ว่า LPE มีราคาถูกระบบไม่ยุ่งยาก และที่สำคัญคุณภาพของชั้นผลึกที่ปลูกได้ดีกว่าที่ได้จากวิธีการอื่น ๆ เพราะการปลูกชั้นผลึกจาก LPE เป็นการปลูกภายใต้จุดสมดุลอุณหภูมิ (Thermal Equilibrium) ข้อเสียก็คือ ไม่สามารถปลูกชั้นผลึกบางมาก ๆ ได้ (น้อยกว่า 0.1 ไมครอน)

รูปที่ 7 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเตา Horizontal Liquid Phase Epitaxy ซึ่งติดตั้งที่ห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ๆ ดังนี้

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้ (Computerized 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 และหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์กับวัสดุต่าง ๆ ก่อนเริ่มทำงาน
7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
8. เบบ้ารองรับสารละลาย (Graphite Boat) ซึ่งสามารถสร้างชั้นของผลึก 9 ชั้น ในกระบวนการ 1 ครั้ง
9. ก้านแก้ว (Quartz Rod) สำหรับเลื่อน (Slide) แวนผลึกไปใต้หลุมของสารละลาย Ga + Al + As

Wafer Processing

ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐานต่าง ๆ เหมือนกับการผลิตสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนทุกประการ ซึ่งประกอบด้วย

1. Passivation
2. Pattern Definition
3. Metallization
4. Chemical Etching
5. Probing
6. Dicing
7. Encapsulation

ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนจะกล่าวในหัวข้อการผลิตสิ่งประดิษฐ์ชนิดนั้น ๆ

4. การพัฒนาเทคโนโลยีของโครงการ

ตารางที่ 2 แสดงผังลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในช่วง 1 ปีที่ผ่านมา ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 2
ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอน	การวิจัย
1.	พัฒนาการปลูกผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำแบบหลาย ๆ ชั้นซ้อนทับกันในกระบวนการเดียวกันด้วยวิธีการ Liquid Phase Epitaxy
2.	ทดลองสร้างโคโอดเปล่งแสง และวัดลักษณะสมบัติ
3.	ทดลองสร้างทรานซิสเตอร์ความไวสูง และวัดลักษณะสมบัติ

การปลูกผลึกด้วยวิธีการ Liquid Phase Epitaxy

4.1 กำหนดเงื่อนไขการปลูกผลึก

ก. ระดับความเข้มข้นของก๊าซในระบบ ค่าระดับความเข้มข้นซึ่งวัดในหน่วยของ ppm (Part Per Million) ควรมีค่าต่ำกว่า 1 ppm เพื่อให้ได้ชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ดังนั้นระบบจะต้องปิดสนิท มีก๊าซในโตรเจนผ่านสู่ระบบตลอดเวลา และจะต้องเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ตลอดช่วงการปลูกผลึก ดังภาพที่แสดงในรูปที่ 8

ข. ชนิดของสารเจือปน สารเจือปนที่ใช้ในการปลูกผลึกหลาย ๆ ชั้นในกระบวนการเดียวกัน (Multilayer Structures) จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ก. Vapor Pressure ต่ำ

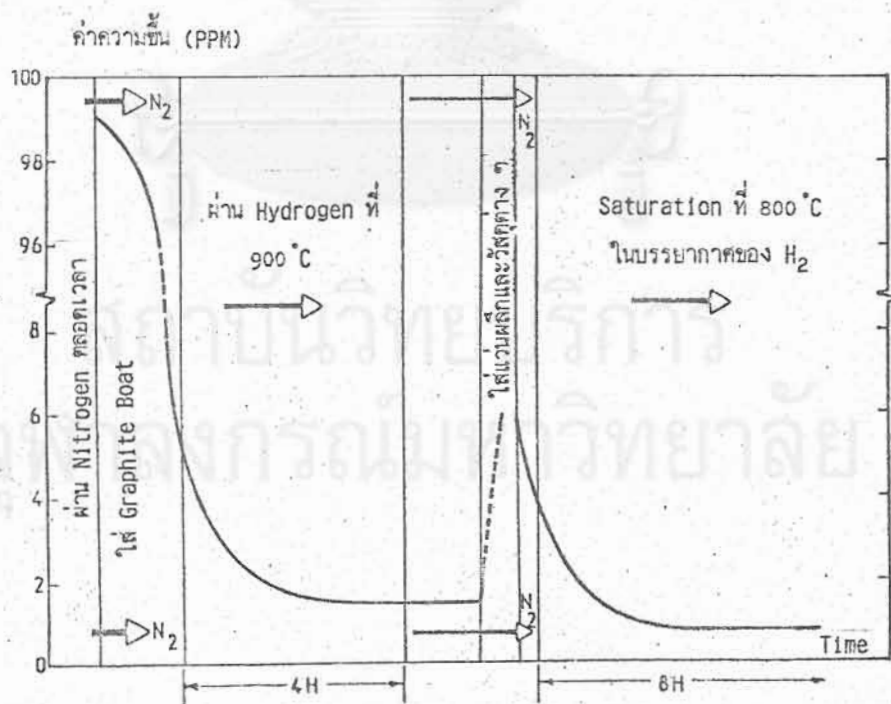
ข. Distribution Coefficient ต่ำ

ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Cross Contamination ระหว่างชั้นผลึก สำหรับค่า Vapor Pressure และ Distribution Coefficient ของสารเจือปนที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ในตารางที่ 3

ค. การเตรียมวัสดุ ต้องเลือกชนิดของแวนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ เริ่มต้นให้มี Critical Orientation ไม่เกิน 0.8° เพื่อให้ผิวของชั้นผลึกที่ปลูกเรียบปราศจากคลื่น (Terrace) [Bauser E. และ Benz K.W.] รวมทั้งส่วนผสมอื่น ๆ ต้องคำนวณน้ำหนัก ซึ่ง และล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายทางเคมี



รูปที่ 7 เตาเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอน
(Horizontal Liquid Phase Epitaxy)



รูปที่ 8 ระดับความชื้นในเตาเอพิแทกซีตลอดช่วงการทดลอง

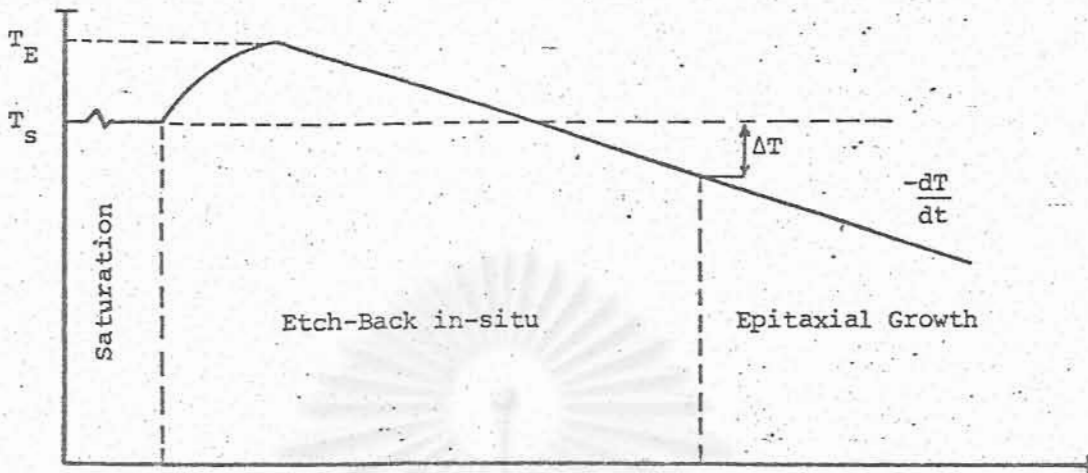
ตารางที่ 3 [Rosztochy F.E. et al]

ค่า Vapor Pressure และ Distribution Coefficient ของสารเจือปน

สารเจือปน	Vapor Pressure ที่ 1000 °K (Torr)	Distribution Coefficient
<u>ผู้ให้</u>		
Si		8.3×10^{-2}
Te	80	3
Se	10^3	10
Sn	5×10^{-8}	8×10^{-5}
<u>ผู้รับ</u>		
Zn	100	10^{-2}
Cd	500	
Ga	6×10^{-10}	8×10^{-3}

ง. อุณหภูมิที่ใช้ปลูกผลึก

Liquid Phase Epitaxy เป็นรูปแบบหนึ่งของการปลูกผลึกด้วยสารละลาย หลักการคือการควบคุมให้เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) ในสารละลายที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ กล่าวคือ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (Solute) ซึ่งในกรณีของ GaAs ได้แก่ As มีค่ามากกว่าความสามารถในการถูกละลาย (Solubility) โดยตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งในที่นี้ก็คือ Ga เมื่อในสารละลายมีผิวหน้าแว่นผลึกเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัส ผิวหน้าแว่นผลึกนั้นจะเป็นแหล่งรองรับตัวถูกละลายส่วนเกิน ซึ่งสารละลายกำลังหาทางกำจัดเพื่อกลับคืนสู่สภาวะอิ่มตัวซึ่งเสถียรกว่า ในทางปฏิบัตินั้นสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดสามารถทำให้เกิดได้ โดยการทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวก่อนที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง (T_S) หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างสม่ำเสมอตามเส้นกราฟในรูปที่ 9 ตลอดช่วงเวลาการปลูกผลึก สำหรับการปลูกผลึกสามารถกระทำได้หลายวิธีการ ขึ้นกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่สารละลายอิ่มตัว (T_S) กับอุณหภูมิที่ผิวหน้าแว่นผลึกเริ่มสัมผัสกับสารละลาย (T) ($\Delta T = T_S - T$) ถ้า $\Delta T \neq 0$ และ $dT/dt < 0$ จะเรียกว่า Super Cooling ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้คุณภาพชั้นผลึกที่ดีที่สุด [Hsieh J.J.]



รูปที่ 9 เส้นกราฟอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซี

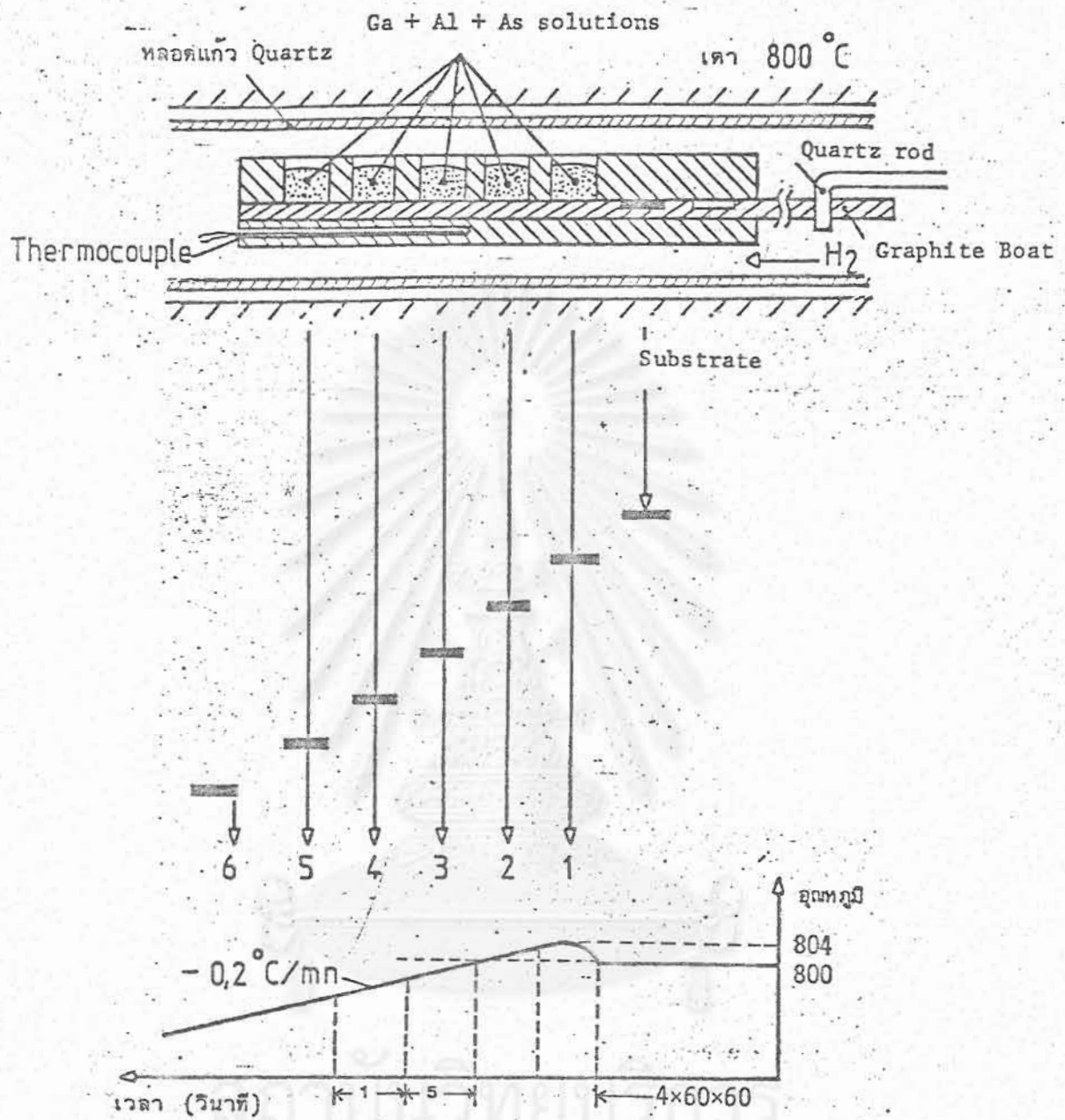
ช่วงอุณหภูมิในรูปที่ 9 จะแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการเตรียมสารละลาย อิมิตัวที่อุณหภูมิ T_S เวลาไม่ควรน้อยกว่า 4 ชม. ช่วงที่ 2 เรียกว่า Etch-Back in-situ $dT/dt > 0$ เพื่อให้เกิดสภาวะ Undersaturation แก่สารละลาย คือตัวถูกละลายจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ณ อุณหภูมินั้น ๆ จุดประสงค์เพื่อใช้กัดแวนผลึกก่อนทำการปลูกผลึกในช่วงที่ 3

รูปที่ 10 แสดงภาพตัดขวางของเตาเอพิแทกซี เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite Boat) ตำแหน่งของแวนผลึกใต้สารละลาย ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยความหนาของชั้นผลึกกำหนดจากอัตราการลดของอุณหภูมิ เวลาที่แวนผลึกอยู่ใต้สารละลายนั้น ๆ ส่วนรูปที่ 11 แสดงรูปจริงของ Graphite Boat

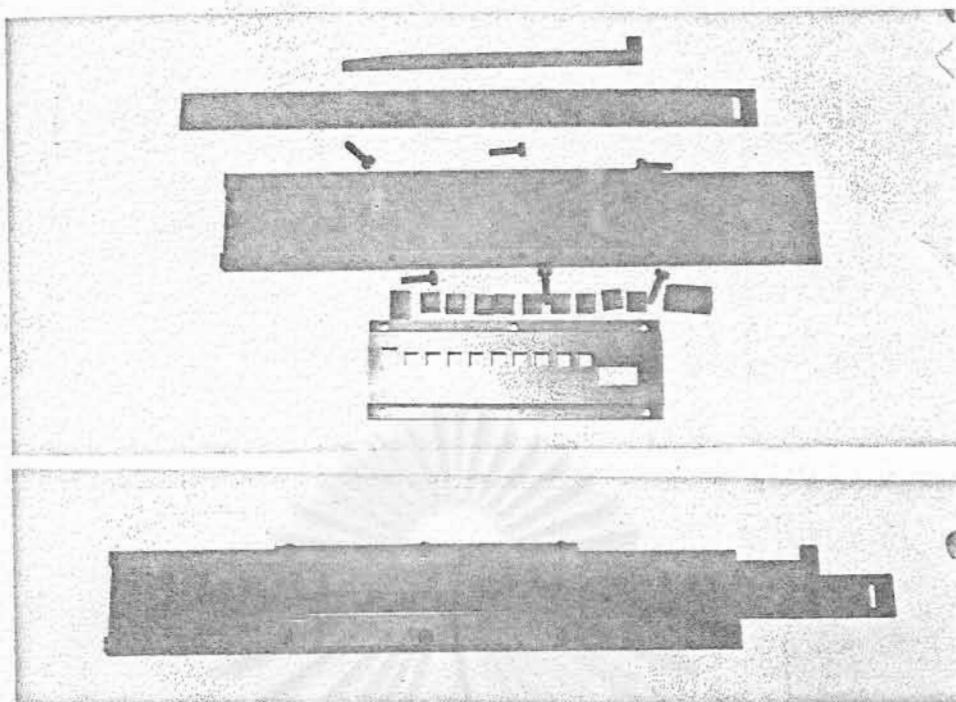
4.2 ทดลองปลูกผลึก GaAs, GaAlAs

ใช้เงื่อนไขในข้อ 4.1 ทดลองสร้างหัวต่อเหมือนที่-เอ็นของแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs p-n Homojunction) และหัวต่อต่างชนิด ที่เอ็นของแกเลียมอาร์เซไนด์-แกเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (GaAs (p)-GaAlAs(n) Heterojunction) โดยรายละเอียดของชั้นผลึกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4

ค่า x ในตารางที่ 4 มีค่า $0 < x < 0.4$ เนื่องจากถ้า $x > 0.4$ $Ga_{1-x}Al_xAs$ จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำแบบเจ และมี Lattice Mismatch สูงมากที่หัวต่อ GaAs/ $Ga_{1-x}Al_xAs$ เป็นผลให้สิ่งประดิษฐ์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10 แสดงรายละเอียดของอุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก



รูปที่ 11 เ้าารองรับสารละลาย (Graphite Boat)

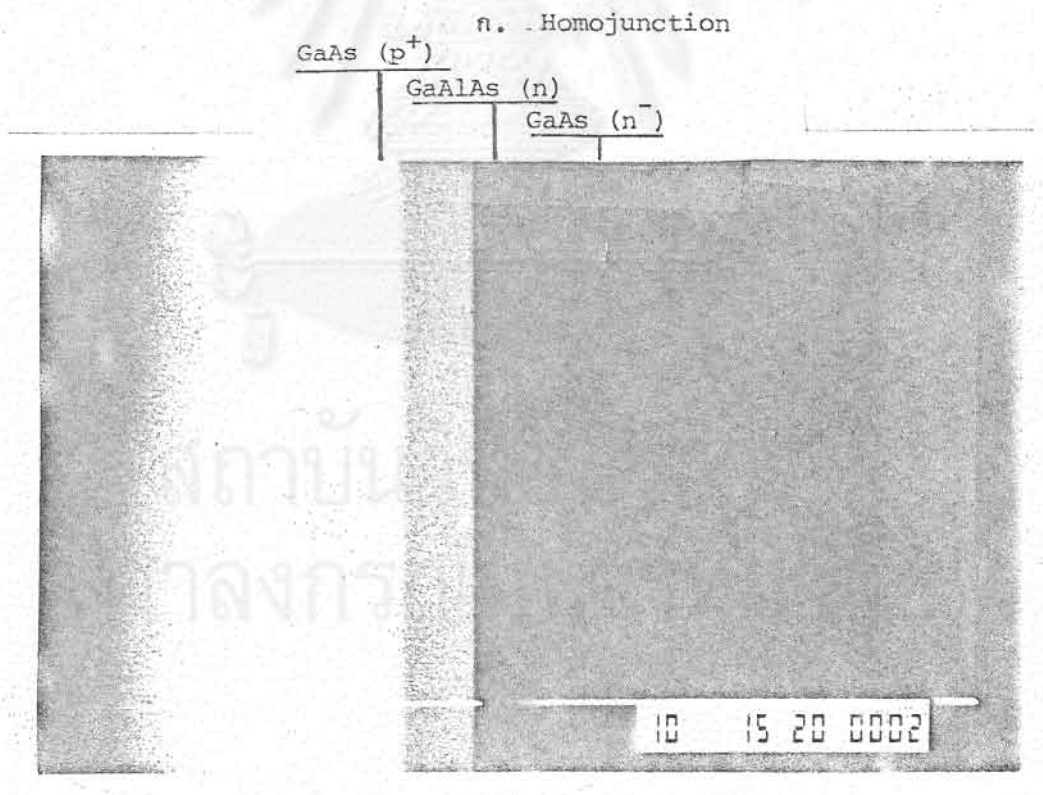
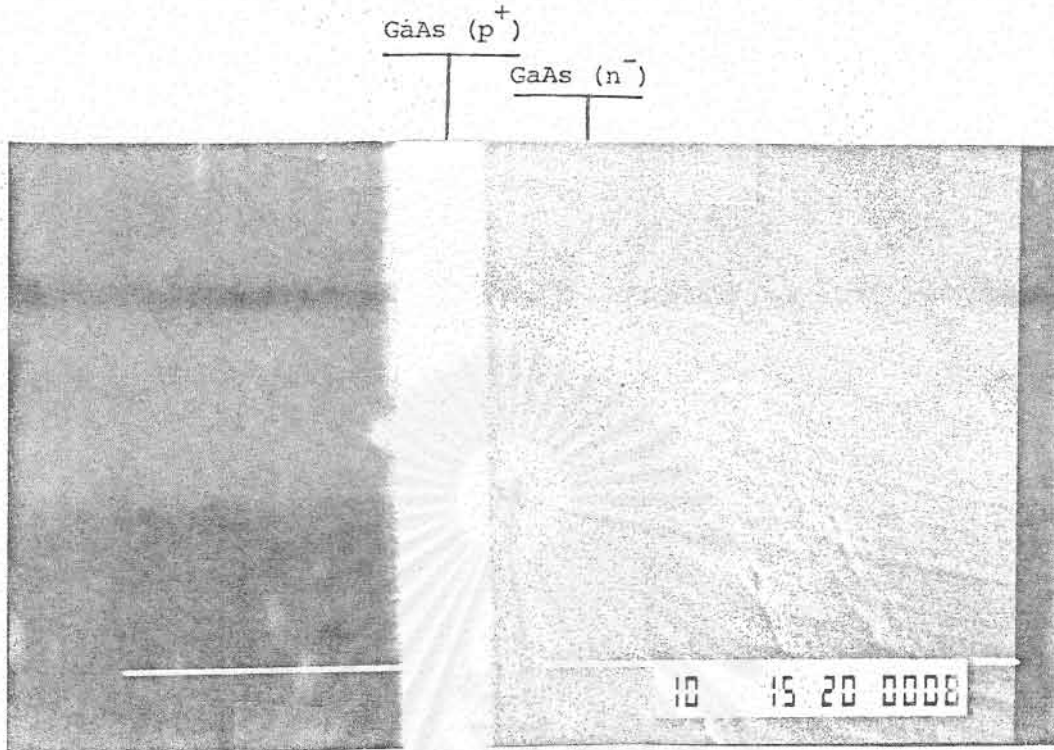
4.3 ผลการทดลองปลูกผลึก

ก) ชั้นผลึก รูปที่ 12 ก. และ ข. แสดงชั้นผลึกที่สามารถสร้างได้ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) สำหรับคุณภาพของชั้นผลึกสามารถตรวจสอบด้วยวิธีการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ตามรูปที่ 13 ซึ่งใช้เลเซอร์อาร์กอนเป็นตัวชักนำ ผลการวัดสามารถวิเคราะห์คุณภาพของผลึกได้ ตัวอย่างการวัดชั้นผลึก p^+ -GaAs แสดงด้วยสเปกตรัมในรูปที่ 14

ตารางที่ 4

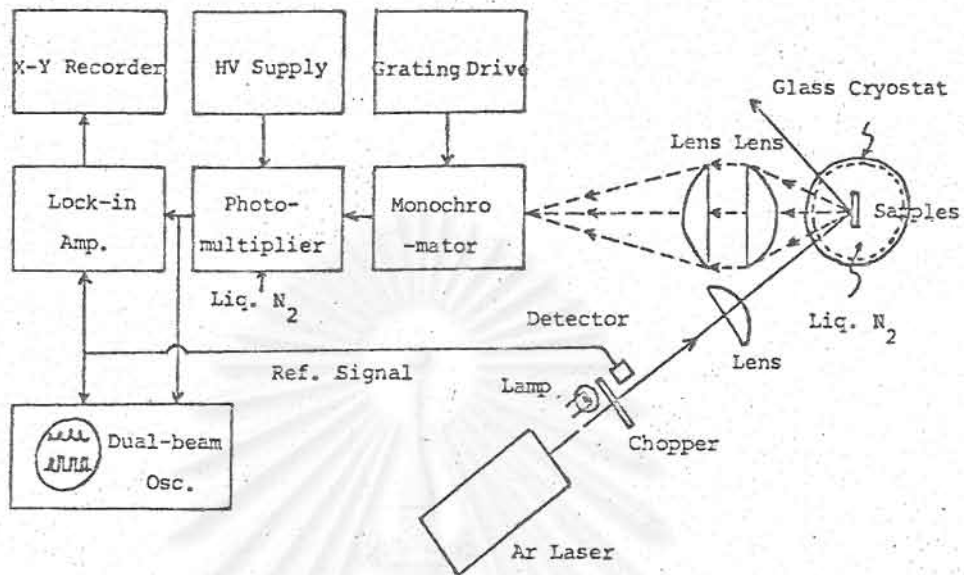
รายละเอียดชั้นผลึกที่ทดลองปลูก

ชนิดของสารประกอบกึ่งตัวนำ	ระดับความเข้มข้น (สารเจือปน) (cm^{-3})
GaAs (p^+)	10^{19} (Ge-Doped)
$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (n)	10^{17} (Sn-Doped)
GaAs (n^-)	10^{14} - 10^{15} (Non-Doped)
GaAs (n^+) Substrate	$5 \cdot 10^8$ (Si-Doped)

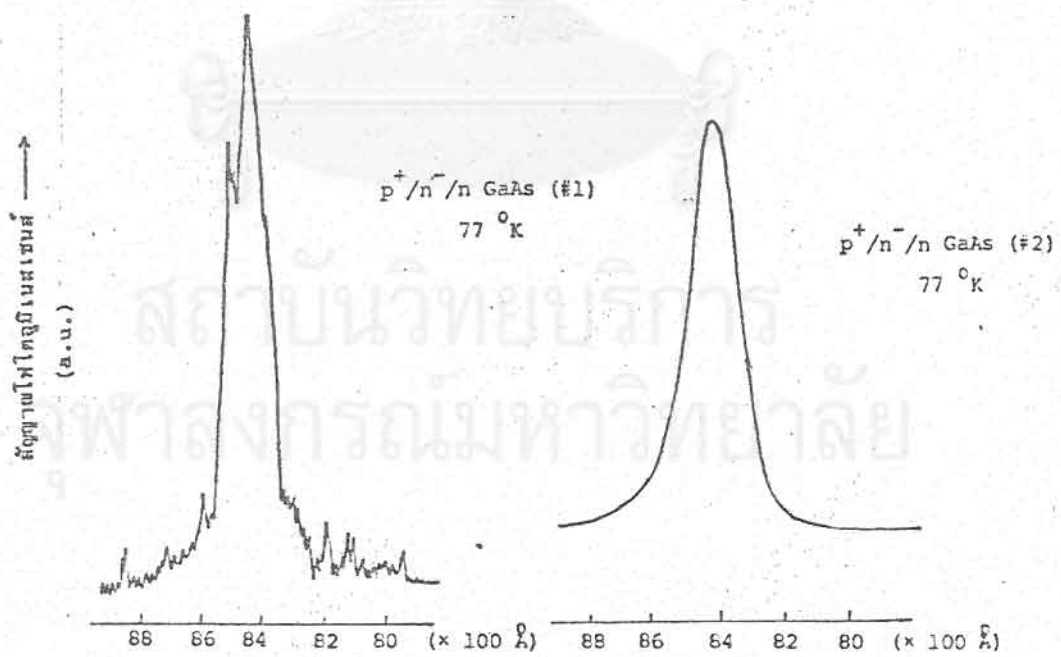


ข. Heterojunction

รูปที่ 12 ชั้นผลึกถ่ายจาก Scanning Electron Microscope



รูปที่ 13 ชุดเครื่องมือวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)



รูปที่ 14 ยอดสเปกตรัม p^+ -GaAs (Ge-doped)

ข) คุณสมบัติทางไฟฟ้า

1. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

รูปที่ 15 ก. แสดงลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของหัวต่อทางด้านไบแอสตาม โดยเปรียบเทียบกับไดโอดซิลิกอนในห้องทดลอง พบว่าค่ากระแสของหัวต่อธรรมดาของ Si มีค่าสูงกว่าหัวต่อตระกูล GaAs ทุกค่าแรงดัน ส่วนความแตกต่างระหว่างหัวต่อธรรมดา GaAs กับหัวต่อต่างชนิด สามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลออกได้เป็น 3 ช่วง

ช่วงที่ 1 ค่ากระแสของหัวต่อต่างชนิดมีค่าสูงกว่าและมี Ideality Factor เท่ากับ 3 ในขณะที่หัวต่อธรรมดา มี Ideality Factor เท่ากับ 2 ตลอดช่วงการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจาก Lattice Mismatch ที่หัวต่อต่างชนิด ก่อให้เกิด Recombination Mechanism ในช่วงปลดพาหะ

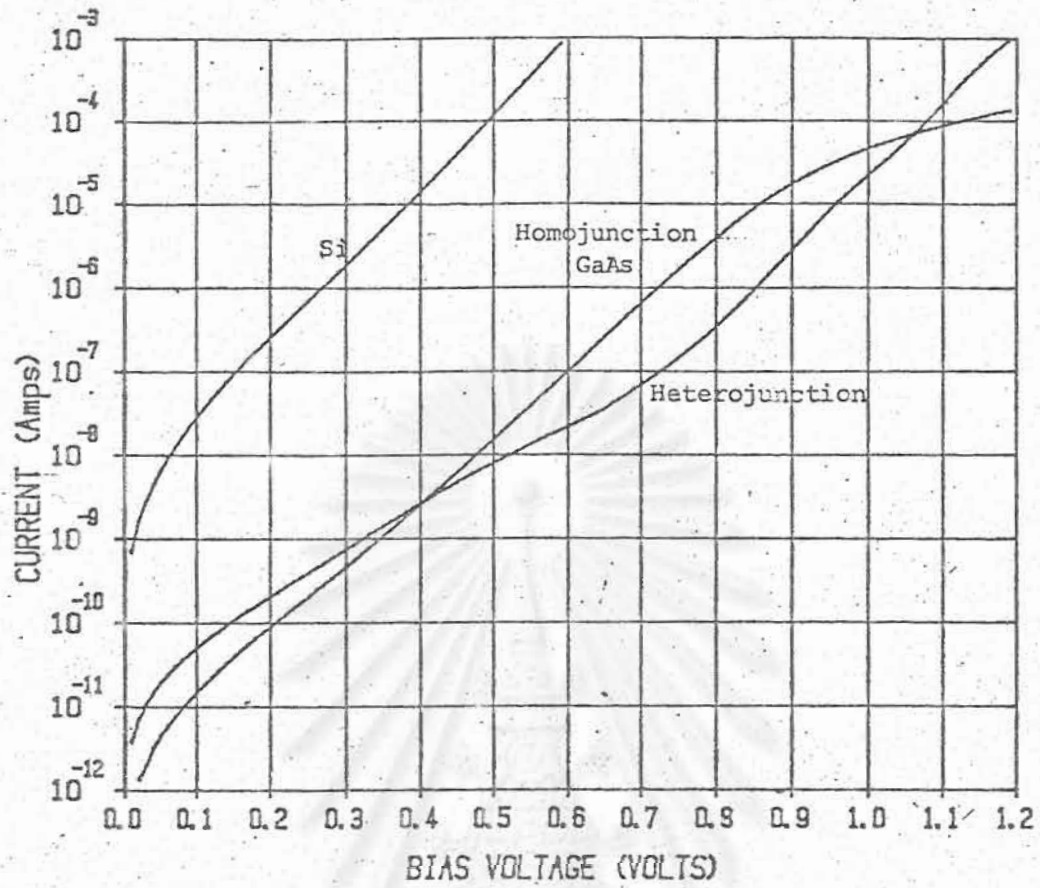
ช่วงที่ 2 ค่ากระแสแพร่ซึม (Diffusion Current) เริ่มมีบทบาทมากขึ้นในหัวต่อต่างชนิด ดังจะเห็นจากค่า Ideality Factor มีค่าลดลงเป็น 2 อย่างไรก็ตาม Recombination Current ในส่วนต่าง ๆ ก็ยังมีบทบาทสำคัญอยู่

ช่วงที่ 3 เนื่องจากแรงดันตกที่ผิวสัมผัสโอห์มมิกของหัวต่อธรรมดา GaAs ก่อนข้างรุนแรงทำให้ค่ากระแสของหัวต่อธรรมดาลดลงเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากัน

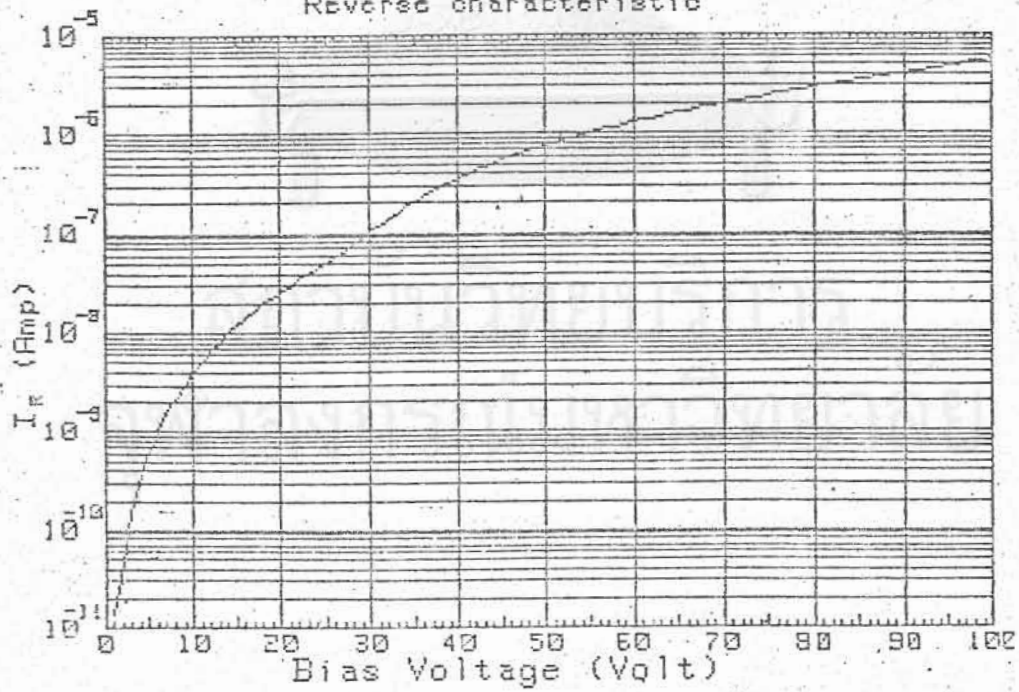
ส่วนทางด้านไบแอสกลับทางพบว่า หัวต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นมีค่า Breakdown Voltage มากกว่า 100 Volts ซึ่งให้เห็นคุณภาพของผลึก และค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 15 ข.

2. ลักษณะสมบัติค่าเก็บประจุไฟฟ้า-แรงดัน

ผลจากกราฟ ($1/C^2$, V) ในรูปที่ 16 ก. และ ข. สามารถหาค่า Diffusion Voltage ได้ 1.2 และ 1.9 Volts ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของสารเจือปนที่คำนวณได้จากการทดลองมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ต้องการในกรณีของ GaAs (n^-) (10^{15} cm^{-3}) และเกิดความผิดพลาด 10 เท่า ($10^{17} \text{ cm}^{-3}/10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ในกรณีของ GaAlAs ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคที่ใช้เป็นสารเจือปนในกรณีของ GaAlAs จะมีค่า Distribution Coefficient ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของ GaAs

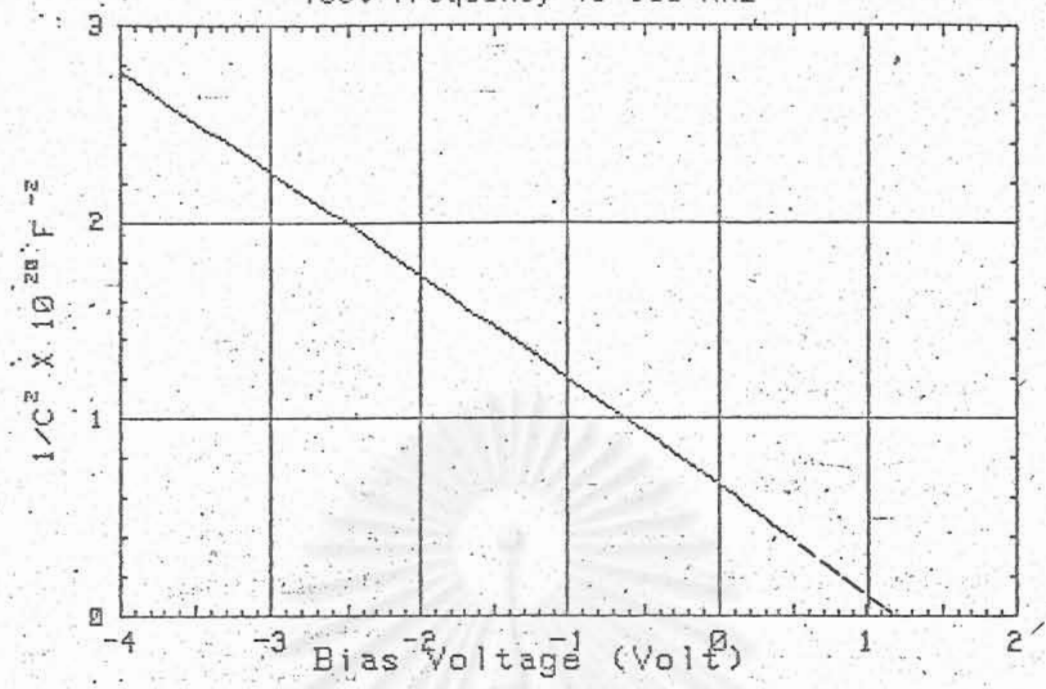


I-V Measurement
Reverse characteristic



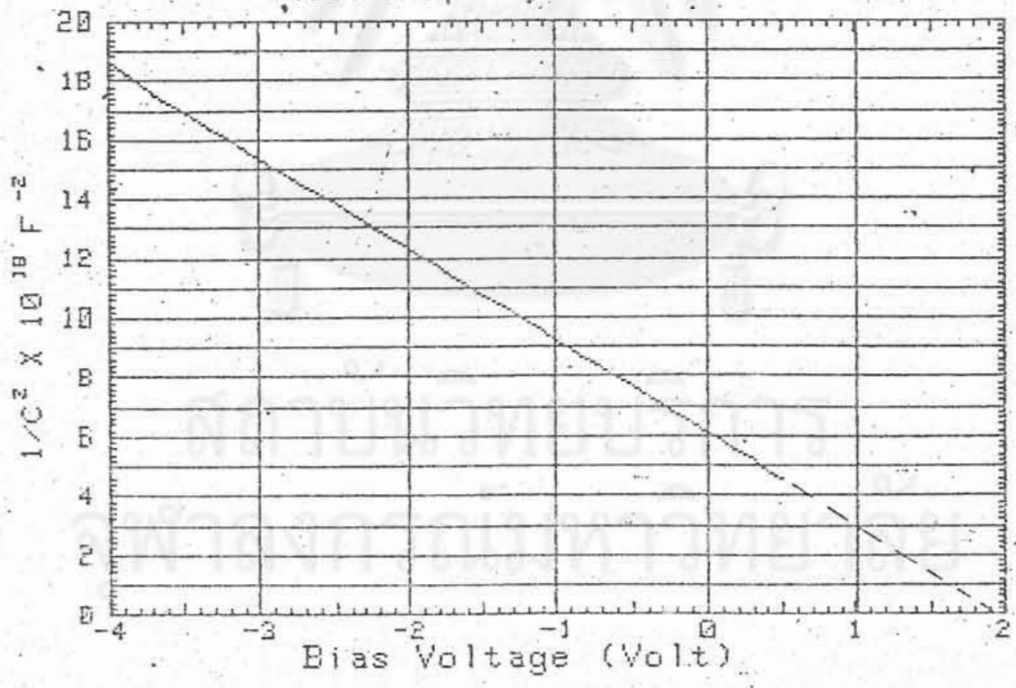
รูปที่ 15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

C-V Measurement
Test frequency is 100 KHz



n. Homojunction

C-V Measurement
Test frequency is 100 KHz



ข. Heterojunction

รูปที่ 16 ลักษณะสมบัติ ($1/C^2$, V)

5. ชนิดของไดโอดเปล่งแสง

แบ่งเป็น 2 กลุ่ม

5.1 ไดโอดเปล่งแสงธรรมดา (General Purpose LEDs)

5.2 ไดโอดเปล่งแสงคุณภาพสูง (High Radiance LEDs)

ไดโอดเปล่งแสงธรรมดา เป็นไดโอดเปล่งแสงที่ประยุกต์ใช้งานทั่ว ๆ ไป มีโครงสร้างแบบหัวต่อพี-เอ็นเหมือน (p-n Homojunction) หรือที่สื่อกจะมีโครงสร้างของหัวต่อต่างชนิด 1 หัวต่อ (Single Heterojunction) ส่วนสื่ิที่เปล่งกำหนดจากชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นชั้นที่เกิดการรวมตัวของพาหะ (Recombination Region) ช่วงกว้างสเปกตรัมของแสงกว้างและมีความเข้มต่ำ

ไดโอดเปล่งแสงคุณภาพสูง ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้ในการสื่อสารทางแสงผ่านเส้นใยแสง จึงต้องการแสงที่มีสเปกตรัมแคบ มีทิศทาง และความเข้มสูง โครงสร้างจึงต้องยุ่งยากขึ้น อาจมีโครงสร้างแบบหัวต่อต่างชนิด 1 หัวต่อ หรือหัวต่อต่างชนิด 2 หัวต่อ (Double Heterojunction) จุดประสงค์ในการใช้หัวต่อต่างชนิดเพื่อให้เกิดการกักกันพาหะ (Carrier Confinement) และการกักกันแสง (Optical Confinement) การรวมตัวของพาหะจะเกิดได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับไดโอดเปล่งแสงธรรมดา ประสิทธิภาพจึงสูงกว่าชนิดแรก

6. การออกแบบโครงสร้างไดโอดเปล่งแสง [Sua! R.H. et al]

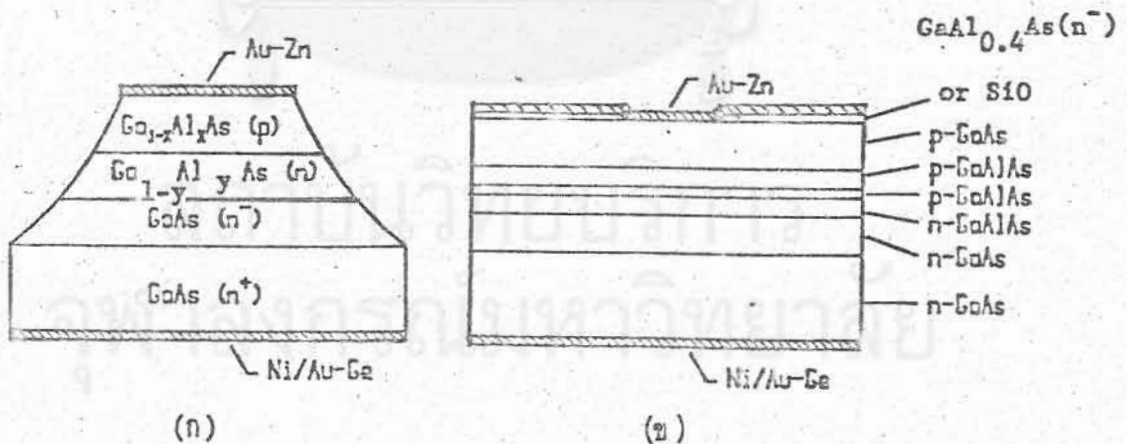
6.1 ไดโอดชนิดเปล่งแสงก้านหน้า (Surface Emitting Types)

ใช้โครงสร้างหัวต่อต่างชนิด 1 หัวต่อ (Single Heterojunction) ของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ $\text{GaAl}_x\text{As}(\text{p})/\text{GaAl}_y\text{As}(\text{n}^+)$ โดยมีวงผลึกของ $\text{GaAs}(\text{n}^+)$ เป็นชั้นวัสดุเริ่มต้น เพื่อให้ประสิทธิภาพในการฉีดอิเล็กตรอนจากชั้น $\text{GaAl}_y\text{As}(\text{n}^+)$ มีค่าสูง ความเข้มข้นของสารเจือปนและสัดส่วนอะลูมิเนียมในชั้นนี้จะต้องมีค่าสูงกว่าชั้นเปล่งแสง ($\text{GaAl}_x\text{As}(\text{p})$) กล่าวคือ $N_D > N_A$ และ $y > x$ เสมอ อย่างไรก็ตาม N_A ของชั้นผิวจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 10^{17} cm^{-3} เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) ที่ชั้นผิว ส่วน y กับ x ก็ไม่ควรแตกต่างกันมากนัก มิฉะนั้น Lattice Mismatch จะมีค่ามากเกินไป ตารางที่ 5 ก. และรูปที่ 17 ก. แสดงโครงสร้างและรายละเอียดของไดโอดเปล่งแสงที่ได้ทดลองสร้างขึ้น

6.2 ไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านข้าง (Side or Edge Emitting type)

ใช้โครงสร้างหัวต่อต่างชนิด 2 หัวต่อ (Double Heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ $GaAl_yAs(p)/GaAl_xAs(p)/GaAl_yAs(n^+)$ ในทำนองเดียวกับกรณีแรก $N_D \gg N_A$ แต่ x ต้องน้อยกว่า y เท่านั้น เงื่อนไขแรกเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะของหัวต่อมีค่าสูงเช่นเดียวกับโครงสร้างแรก ส่วนข้อหลังเพื่อให้มี Closed Confinement ในแนวตั้ง ตารางที่ 5 ข. และรูปที่ 17 ข. แสดงโครงสร้างและรายละเอียดของไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้ นอกจากนี้การกำหนดพื้นที่การทำงานของไดโอดเปล่งแสงยังแบ่งออกเป็นสองลักษณะ วิธีการแรกใช้ฉนวน SiO_2 ปิดกั้นการไหลของกระแส ส่วนวิธีการหลังอาศัยผลของการไบแอสกลับทาง (Reverse Bias) ที่หัวต่อ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n^-)/GaAs(p^+)$ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะเดียวกันกับการไบแอสเดินหน้า (Forward Bias) ไดโอดเปล่งแสง เป็นผลให้มีเพียงแต่กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse Saturation Current) หรือกระแสรั่ว (Leakage Current) เท่านั้นที่ไหลผ่านนอกบริเวณแอคทีฟ (Active Region)

สำหรับขั้นตอนการผลิตอย่างละเอียดของไดโอดเปล่งแสงทั้งสองชนิดนี้ดูได้จากตารางที่ 6



รูปที่ 17 ภาพตัดขวางไดโอดเปล่งแสง
 (ก) ไดโอดเปล่งแสงที่ผิวหน้า
 (ข) ไดโอดเปล่งแสงด้านข้าง

ตารางที่ 5 ก.
โครงสร้างโคโอดเปล่งแสง

โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
n^+ -GaAs:Si (ซึบสเตรต) n -GaAs:undoped n -Ga _{0.72} Al _{0.28} As:Sn (10^{17} cm ⁻³) p -Ga _{0.72} Al _{0.28} As:Si (10^{17} cm ⁻³)	n -GaAs:Si (ซึบสเตรต) n^+ -GaAs:Te ($5 \cdot 10^{18}$ cm ⁻³) n -Ga _{0.5} Al _{0.5} As:Te (10^{18} cm ⁻³) p -Ga _{0.65} Al _{0.35} As:Ge (3×10^{17} cm ⁻³)

ตารางที่ 5 ข.

โครงสร้างที่ 1
n^+ -GaAs:Si (ซึบสเตรต) n -GaAs: (Undoped) n -Ga _{0.3} Al _{0.7} As:Sn (10^{17} cm ⁻³) p -Ga _{0.9} Al _{0.1} As:Si (10^{18} cm ⁻³) p -Ga _{0.3} Al _{0.7} As:Ge (10^{18} cm ⁻³) p^+ -GaAs:Ge (10^{18} cm ⁻³)

โครงสร้างที่ 2
n^+ -GaAs:Si (ซึบสเตรต) n -GaAs: (Undoped) n -Ga _{0.3} Al _{0.7} As:Sn (10^{17} cm ⁻³) p -Ga _{0.6} Al _{0.4} As:Zn (10^{18} cm ⁻³) p -Ga _{0.3} Al _{0.7} As:Zn (10^{18} cm ⁻³) p^+ -GaAs:Ge (10^{18} cm ⁻³)

โครงสร้างที่ 3

n^+ -GaAs:Si (ซึมสเตรต)
 n -GaAs:Te ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
 n -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Te (10^{18} cm^{-3})
 p -Ga_{0.78}Al_{0.22}As:Ge ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)
 p -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Ge (10^{18} cm^{-3})
 p^+ -GaAs:Ge ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

โครงสร้างที่ 4


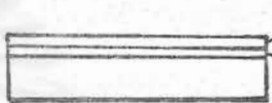

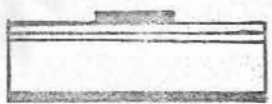
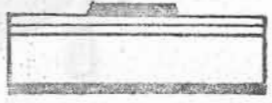

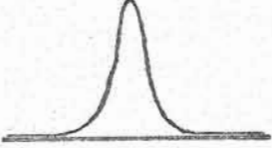
n^+ -GaAs:Si (ซึมสเตรต)
 n -GaAs:Te ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
 n -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Te (10^{18} cm^{-3})
 p -Ga_{0.7}Al_{0.3}As:Ge ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)
 p -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Ge (10^{18} cm^{-3})
 p^+ -GaAs:Ge ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

โครงสร้างที่ 5




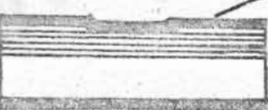
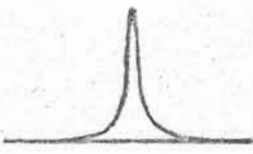
n^+ -GaAs:Si (ซึมสเตรต)
 n -GaAs:Te ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
 n -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Te (10^{18} cm^{-3})
 p -Ga_{0.65}Al_{0.35}As:Ge ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)
 p -Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Ge (10^{18} cm^{-3})
 p^+ -GaAs:Ge ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

ตารางที่ 6 ก.

ขั้นตอนการผลิตไดโอดเปล่งแสงก้ำนหน้า

1. เตรียมแวนผลึก	 <p>GaAs(n^+)</p>
2. สร้างชั้นผลึกแบบบาง ๑ หลาย ๑ ชั้นด้วย LPE	 <p>GaAlAs(p) GaAlAs(n)</p>
3. ฉาบผิวด้วยโลหะ	 <p>AuZn AuGe + Ni</p>
4. กัดชั้นโลหะ AuZn	
5. อบผิวโลหะที่อุณหภูมิ 475 °C 2 นาที	
6. กัด Mesa	
7. ตรวจสอบลักษณะสมบัติ	

ตารางที่ 6 ข.
ขั้นตอนการผลิตไดโอดเปล่งแสงด้านข้าง

1. เตรียมแวนผลึก	<p style="text-align: right;">GaAs(n⁺)</p> 
2. สร้างชั้นผลึกแบบบาง ๆ หลาย ๆ ชั้นด้วย LPE	 <p style="text-align: right;">Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n⁻) GaAs(p⁺) GaAlAs(p) GaAlAs(n)</p>
3. กัดชั้น Ga _{0.6} Al _{0.4} As(n ⁻) [*]	
4. ฉาบผิวด้วยโลหะ	 <p style="text-align: right;">AuZn AuGe + Ni</p>
5. อบผิวโลหะที่อุณหภูมิ 475 °C 2 นาที	
6. Scribing และ Cleaving	
7. ตรวจสอบลักษณะสมบัติ	

* ในกรณีที่ไม่มีชั้นกันกระแส Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n⁻) จะต้องสร้างชั้น SiO ก่อน แล้วกัดชั้น SiO ออกด้วยแบบพิมพ์วงจรถ่ายเดียวกัน

7. ผลการทดลองของไดโอดเปล่งแสง

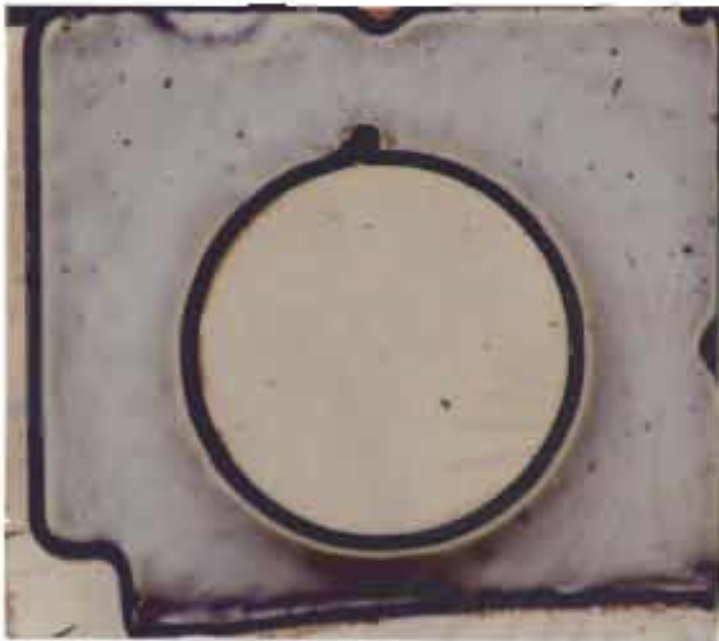
รูปที่ 18 และ 19 แสดงภาพจริงของไดโอดเปล่งแสงทั้งสองชนิดทั้งก่อนเปล่งแสง (รูป ก.) และในขณะที่เปล่งแสงรูป (ข)

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแสดงตามรูปที่ 20 กระแสรวมของไดโอดประกอบด้วยกระแสแพร่ซึม (Diffusion Current) และกระแสรวมตัว (Recombination Current) โดยที่กระแสแพร่ซึมมีผลต่อการเปล่งแสงของไดโอดโดยตรง (Radiative) ส่วนกระแสรวมตัวถือว่าเป็นส่วนที่สูญเสีย (Non-Radiative) ในช่วงกระแสต่ำ ๆ กระแสส่วนใหญ่มาจากกระแสรวมตัว ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของขนาดของโครงสร้างผลึก (Lattice Mismatches) ระหว่าง GaAl_yAs และ GaAl_xAs ดังนั้นในช่วงนี้ไดโอดจะยังไม่เปล่งแสง เมื่อการไบแอสเกินหน้ามีค่าสูงขึ้น กระแสแพร่ซึมมีค่าสูงตาม และจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่เปล่งออกมา อย่างไรก็ตามพฤติกรรมนี้จะมีความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านหน้ากับชนิดเปล่งแสงด้านข้าง ซึ่งจะเห็นจากรูปที่ 21 ไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านหน้า ความเข้มแสงหรือกำลังแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส แต่จะเริ่มอิ่มตัวเมื่อกระแสเกินหน้ามีค่ามากกว่า 20 mA ส่วนไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านข้างนั้นจะแสดงการเปล่งแสงแบบทวีคูณ (Superadiant) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission)

รูปที่ 22 และ 23 แสดงลักษณะสมบัติของความเข้มกับความยาวคลื่น (สเปกตรัมของแสงที่เปล่ง) โดยที่รูปที่ 22 ก. และ ข. เป็นของไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านหน้า โครงสร้าง 1 และที่ 2 ตามตารางที่ 5 ก. ตามลำดับ จะเห็นว่า λ_p สอดคล้องกับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของชั้นเปล่งแสงของแต่ละโครงสร้าง ส่วนรูปที่ 23 ก., ข., ค., ง. และ จ. เป็นของไดโอดชนิดเปล่งแสงด้านข้างของโครงสร้างที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามตารางที่ 5 ข. ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะของแสงที่เปล่งตามลำดับดังนี้

โครงสร้างที่ 1

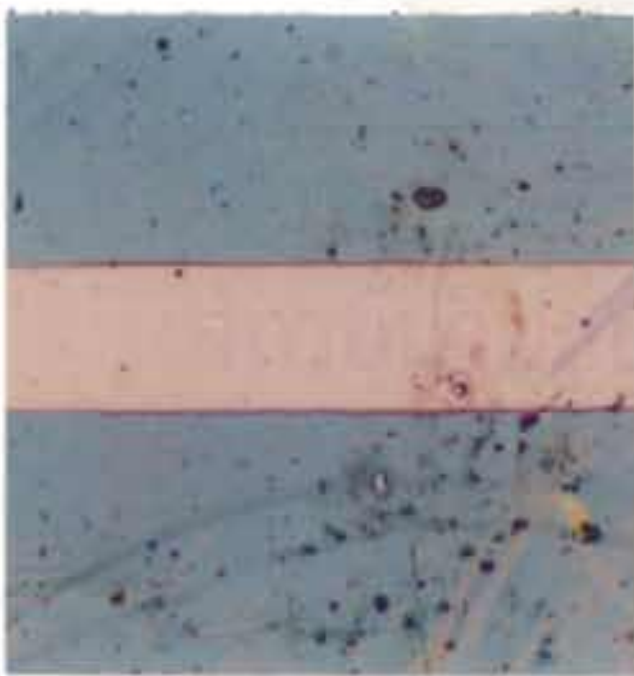
เป็นไดโอดเปล่งแสงที่เปล่งแสงอินฟราเรดโดยมีค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_p) เท่ากับ 880 nm ซึ่งสอดคล้องกับค่าความกว้างแถบพลังงานคั้งห้ามของชั้นแอกทีฟ Ga_{0.9}Al_{0.1}As 1.41 eV สารเจือปนของชั้นแอกทีฟคือซิลิกอน ซึ่งเป็นสารเจือปนที่ให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงสูงสุดในไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด [Gillesen K. และ W. Schairer]



(ก) ก่อนเปลี่ยนแสง

(ข) หลังเปลี่ยนแสง

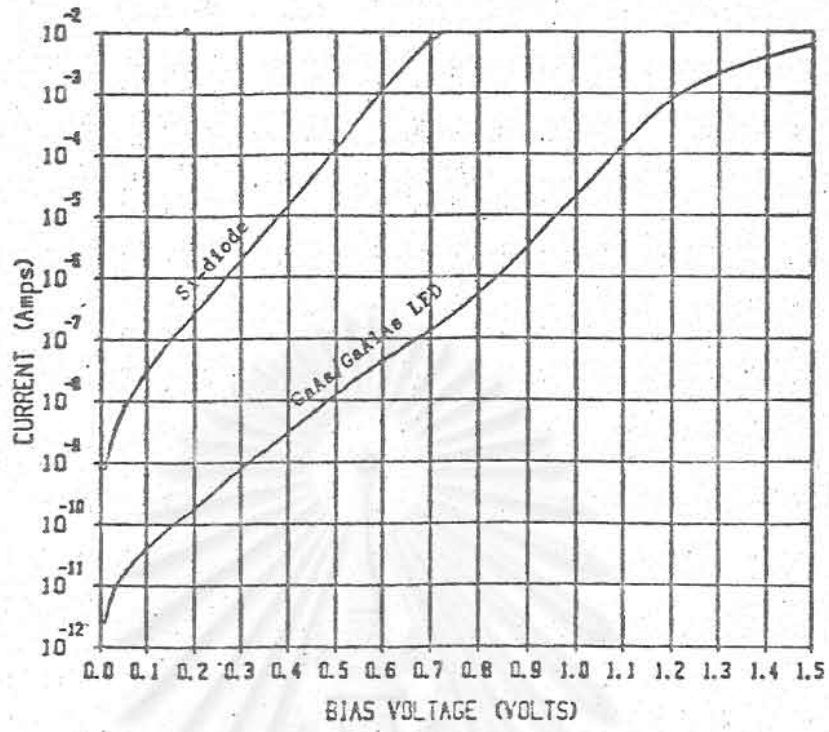
รูปที่ 18 ภาพจริงโคโรนาเปลี่ยนแสงที่ผิวหนัง (ก) ก่อนเปลี่ยนแสง (ข) หลังเปลี่ยนแสง



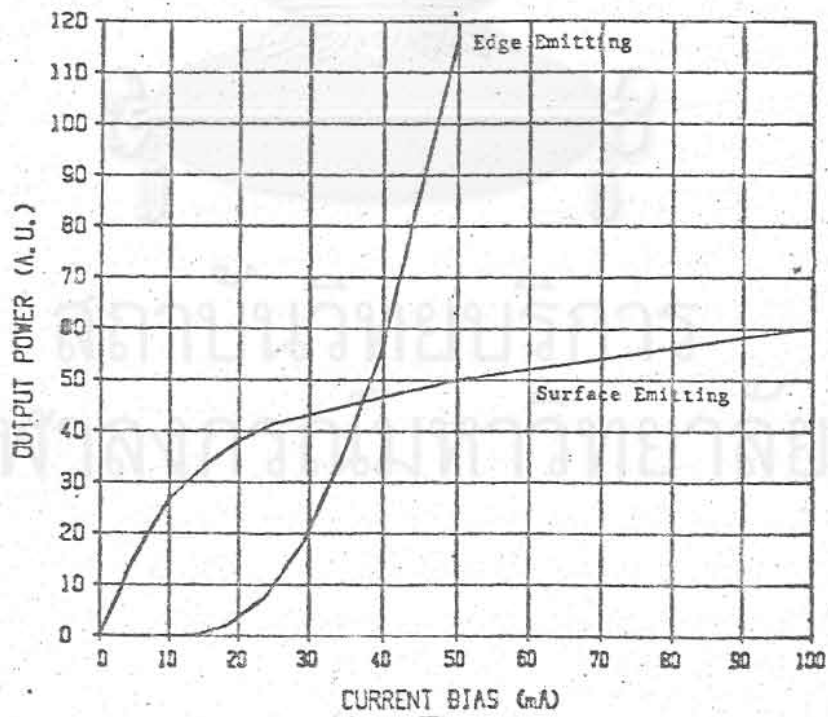
(ก) ก่อนเปลี่ยนแสง

(ข) หลังเปลี่ยนแสง

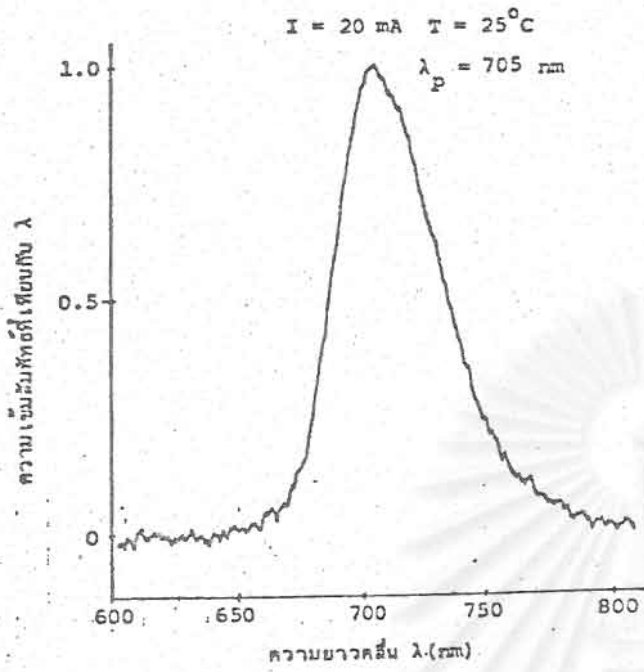
รูปที่ 19 ภาพจริงโคโรนาเปลี่ยนแสงด้านข้าง (ก) ก่อนเปลี่ยนแสง (ข) หลังเปลี่ยนแสง



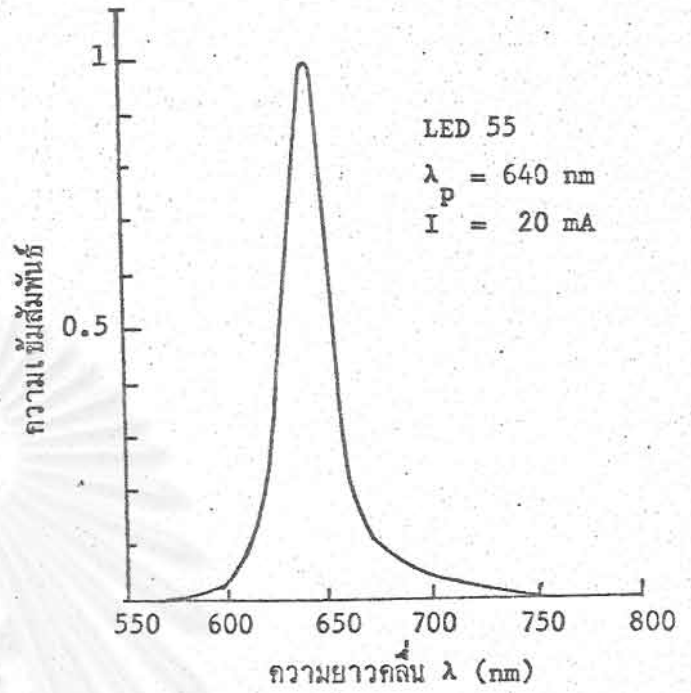
รูปที่ 20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 21 ลักษณะสมบัติกำลังแสง-กระแสของไดโอดเปล่งแสง

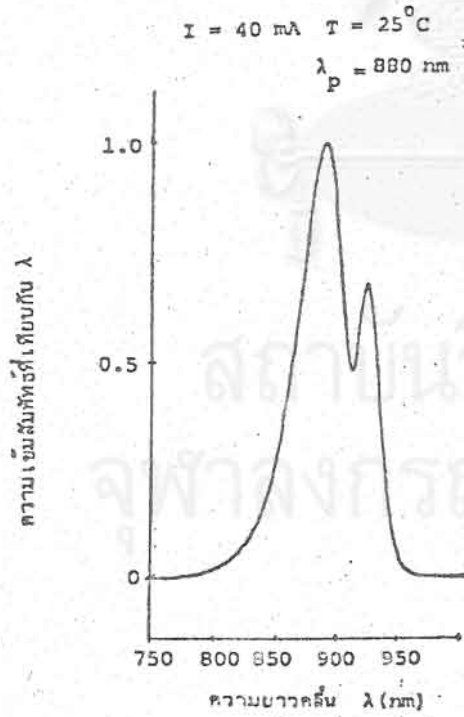


(ก)

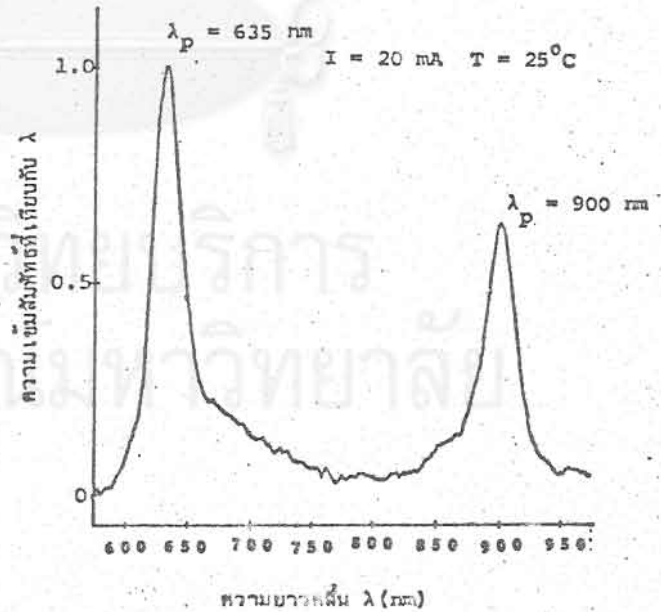


(ข)

รูปที่ 22 ก., ข. สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงค้ำหน้า โครงสร้างที่ 1 และ 2

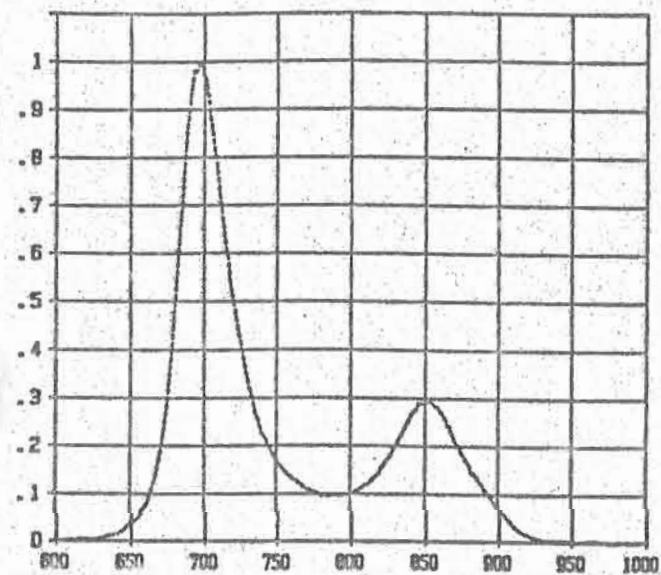
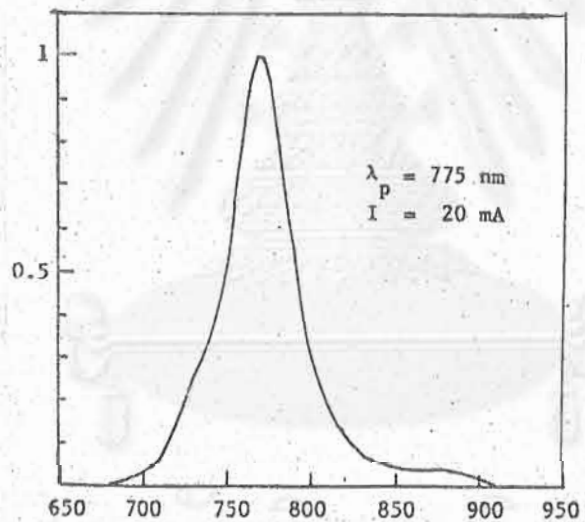
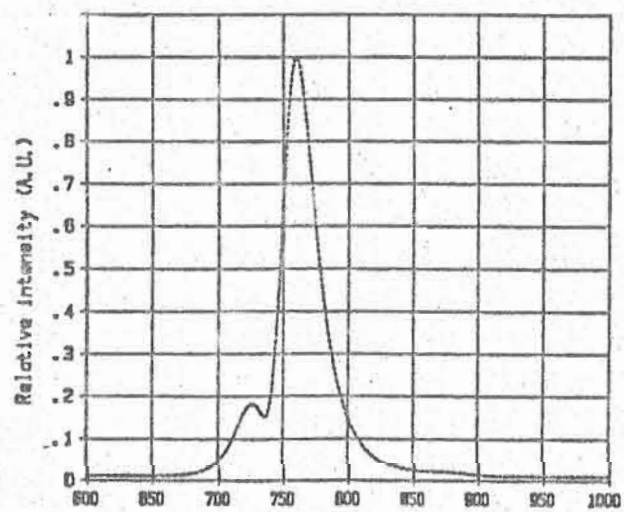


(ก)



(ข)

รูปที่ 23 ก., ข. สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงค้ำข้าง โครงสร้างที่ 1 และ 2



ความยาวคลื่น λ (nm)

รูปที่ 23 ก., ง., จ. สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงค่านข้าง โครงสร้างที่ 3, 4 และ 5

โครงสร้างที่ 2

เป็นไดโอดเปล่งแสงสีแดงที่ใช้สังกะสีเป็นสารเจือปนในชั้นแอกทีฟมีค่าความยาวคลื่นสูงสุด 2 ค่า เท่ากับ 635 nm และ 900 nm λ_p ค่าแรกจะสอดคล้องกับค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามของชั้นแอกทีฟ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ 1.64 eV ส่วน λ_p ค่าหลังเกิดจาก Band to Impurity Level Recombination

โครงสร้างที่ 3, 4 และ 5

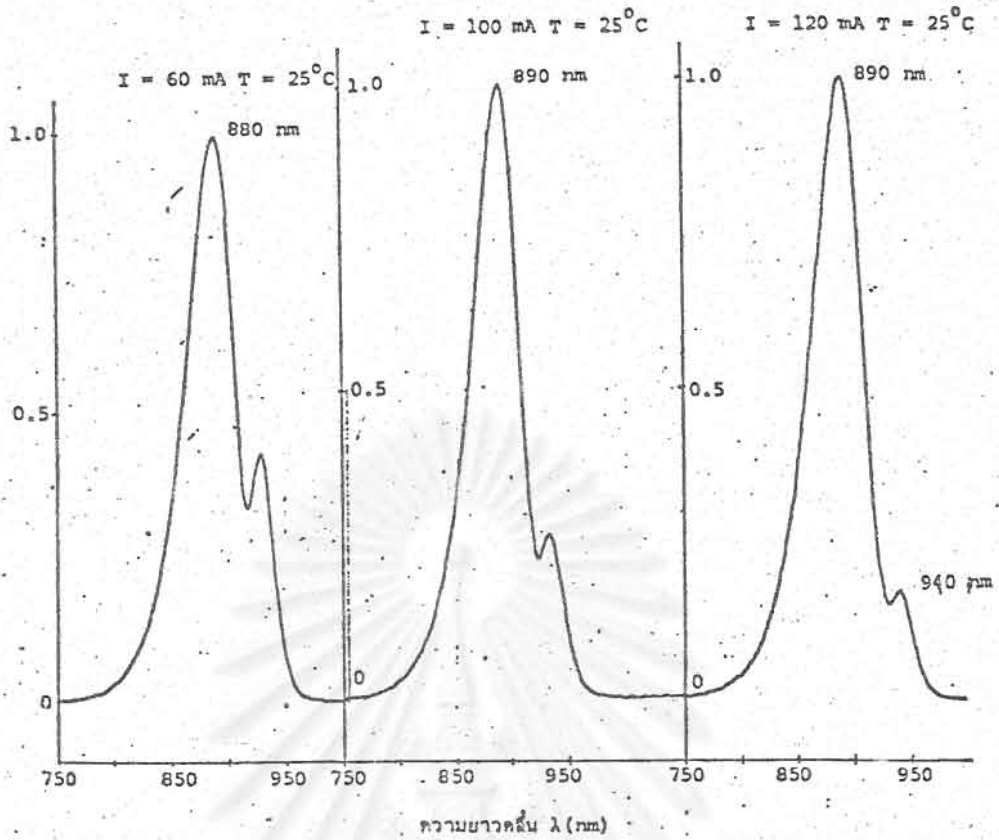
เป็นไดโอดเปล่งแสงสีแดงเช่นกัน แต่ใช้เจอร์มาเนียม (Ge) เป็นสารเจือปนของชั้นแอกทีฟ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ โดย x มีค่า 3 ค่า 0.22, 0.3 และ 0.35 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_p) มีค่า 755, 775 และ 690 nm ตามลำดับ โครงสร้างที่ 5 มี λ_p 2 ค่า เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 2 ด้วยเหตุผลเดียวกัน

8. ลักษณะของสเปกตรัมแสงเมื่อกระแสทำงานมีค่าสูงขึ้น

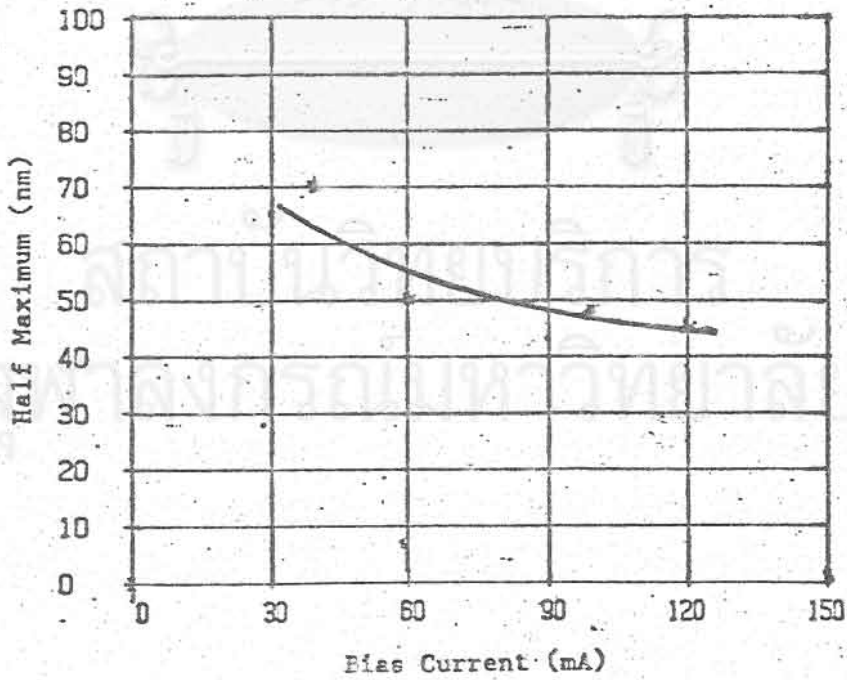
ลักษณะสมบัติทางแสงที่เกี่ยวข้องกับกระแสทำงานนอกจากลักษณะสมบัติกระแสกำลังแสงในรูปที่ 21 แล้ว ยังมีลักษณะสมบัติอีกสองอย่างที่น่าสนใจก็คือ ความกว้างของสเปกตรัม (Full Width at Half Maximum, FWHM) ในไดโอดเปล่งแสงด้านข้างและค่า λ_p เมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น ทว่าค่า FWHM มีแนวโน้มลดลง ดังจะเห็นได้จากสเปกตรัมแสงของโครงสร้างที่ 1 ในรูปที่ 24 เมื่อกระแสมีค่าเพิ่มจาก 40 mA ในรูปที่ 23 ก. เป็น 60, 100 และ 120 mA ซึ่งสามารถแสดงให้อีกรูปแบบดังรูปที่ 25 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปรากฏการณ์แบบถูกเร้ามีแนวโน้มเกิดขึ้น ในขณะที่เกี่ยวกับ λ_p มีค่าสูงขึ้นจาก 880 nm เป็น 890 nm ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 26 จากตัวอย่างไดโอดเปล่งแสงสีแดง λ_p มีค่าสูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของชั้นแอกทีฟมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้น

9. การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission)

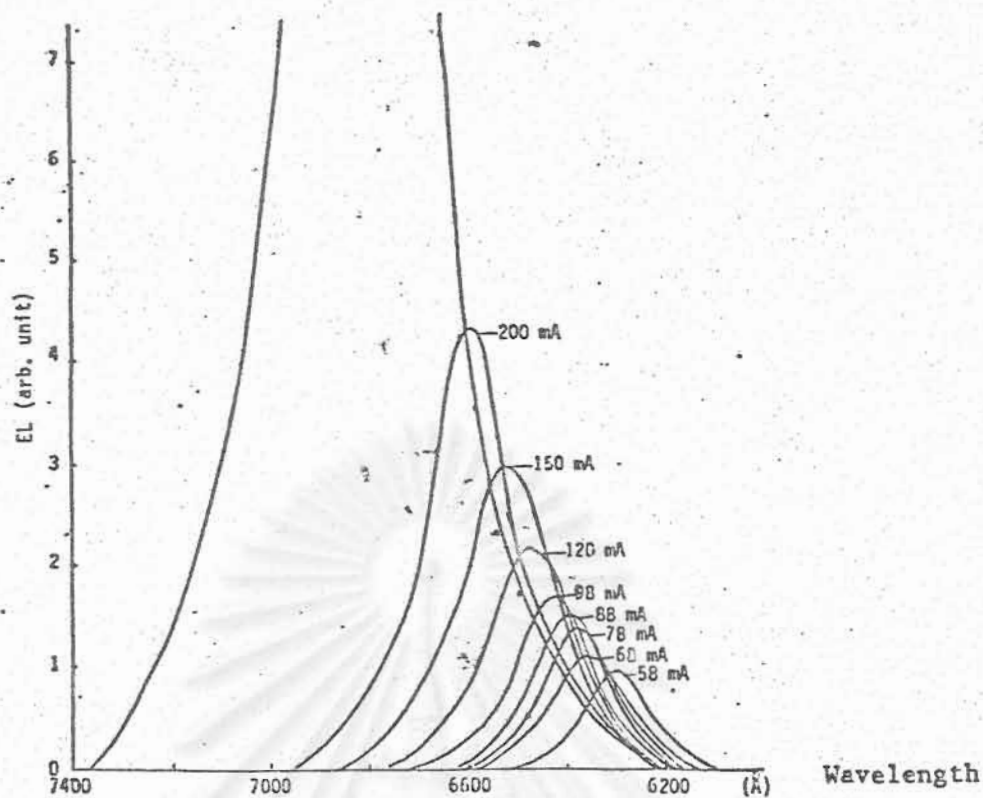
นอกจากการลดลงของค่า FWHM ในไดโอดเปล่งแสงด้านข้างโครงสร้างที่ 1 ที่สามารถใช้เป็นข้อยืนยันว่าเกิดการเปล่งแสงแบบถูกเร้าในไดโอดเปล่งแสงที่สร้างขึ้นแล้ว สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงด้านข้างโครงสร้างที่ 3 ก็สามารถยืนยันในข้อนี้ได้ รูปที่ 27



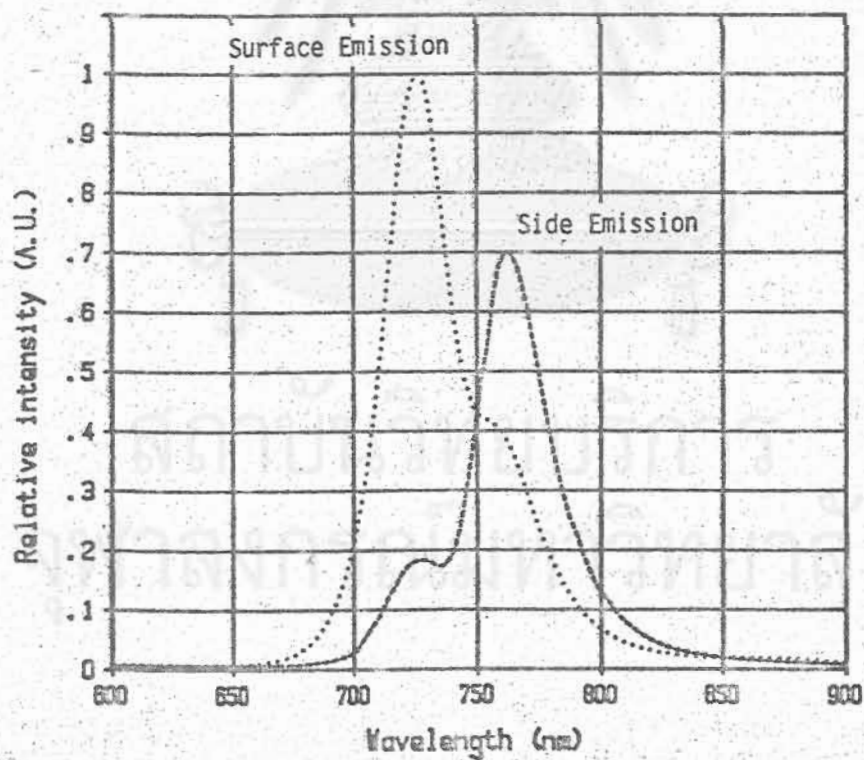
รูปที่ 24 สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดเมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น จาก 40 mA เป็น 60, 100 และ 120 mA ตามลำดับ



รูปที่ 25 แสดงการแคบลงของช่วงความกว้างสเปกตรัมของแสงเมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 26 การเปลี่ยนแปลง λ_p เมื่อกระแสไบแอสมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 27 สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงด้านข้างบางตัวอย่าง โดยแสดงเปรียบเทียบระหว่างแสงที่เปล่งทางผิวหน้ากับแสงที่เปล่งด้านข้าง จากตัวอย่างเดียวกัน

เป็นสเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงโครงสร้างที่ 3 บางตัวอย่างซึ่งมีแสงส่องทะลุผิว สัมผัสโหนดอินทรีขึ้นมาที่ผิว ค่าสูงสุดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากด้านข้างและจากที่ ผิวมีค่า 755 และ 725 nm ตามลำดับ ค่า $\lambda_p = 725$ nm จะเป็นค่าที่สอดคล้องกับ ค่าความกว้างของแถบพลังงานของชั้นแอกทีฟจริงแต่จะมีความเข้มต่ำมากเมื่อดูจากด้านข้าง ดังรูปที่ 23 ค. $\lambda_p = 755$ nm กลับเป็นค่าที่มีความเข้มสูงกว่า และมี FWHM ประมาณ 30 nm เท่านั้น เมื่อใช้กระแสขับ (Driving Current) 50 mA ความไม่สอดคล้อง ของ λ_p ระหว่างแสงที่เปล่งมาจากด้านทั้งสองของไดโอดเป็นผลมาจากการดูดกลืนแสง ภายในโครงสร้างที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน (Selective Absorption) ในที่นี้อัตราขยายแสงที่ $\lambda_p = 755$ nm มีค่าสูงกว่าที่ $\lambda_p = 725$ nm มาก ซึ่งเป็น กระบวนการที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ไดโอดเสมอเมื่อเลเซอร์ไดโอดเริ่มเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission) [Kressel H. และ Butler J.K.] กระบวนการนี้ได้เกิดขึ้นในไดโอดเปล่งแสงด้านข้างโครงสร้างที่ 4 เช่นกัน เพราะค่า λ_p ไม่สอดคล้องกับค่า ความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม (เพียงแต่ไม่มีสเปกตรัมแสงที่เปล่งจากที่ผิวมายืนยัน เพราะไม่มีตัวอย่างที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้) ส่วนไดโอดเปล่งแสงด้านข้างโครงสร้างที่ 2 และ 5 ยังไม่มี Stimulated Emission เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก λ_p จะสอดคล้องกับค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามของชั้นแอกทีฟเช่นเดียวกับไดโอดเปล่งแสง ด้านหน้า ในส่วนของการมีทิศทางที่แน่นอนของแสง (Directional Emission) ได้ ทดลอง Coupling แสงที่เปล่งจากด้านข้างเข้ากับเส้นใยแสง ผลปรากฏว่ามีแสงเพียง 3.3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ที่ส่งถ่ายเข้าไปในเส้นใยแสงได้ ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำอยู่ สำหรับ อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 28

10. ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์หัวต่อต่างชนิดกิมิตเตอร์-เบสของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p^+)$ (Emitter-Base Heterojunction Bipolar Transistor)

แนวความคิดในการสร้างประคิษฐ์ทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดกิมิตเตอร์-เบส ของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p^+)$ เกิดขึ้นจากเหตุผลสำคัญ 2 ประการ [Rey G. et al]

10.1 ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในสาร GaAs มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับของ ซิลิกอน ($\mu_n GaAs \approx 8 \mu_n Si$) ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1

10.2 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของอิมิตเตอร์ ($\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$) ที่โตกว่าของเบส (GaAs) ส่งผลให้อัตราขยายกระแสไม่ขึ้นกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนในอิมิตเตอร์ และในเบสโดยตรง ทำให้สามารถลดความเข้มข้นของสารเจือปนของอิมิตเตอร์ลง เพิ่มความเข้มข้นของสารเจือปนของเบสให้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 29 เป็นผลให้ค่าทรานซิชันคาร์ปาซิแตนซ์ C_{TE} (Transition Capacitance) และความต้านทานของชั้นเบส r_{BB} (Base Resistance) จะมีค่าลดลงตาม ในที่สุดผลตอบสนองเชิงความถี่ (f_T) และอัตราขยายกำลัง (G) จะมีค่าสูงขึ้นด้วยตามสมการ

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \frac{U_T}{I_C} (C_{TE} + C_{TC}) + r_{CC} C_{TC} + \tau_C + \tau_B$$

และ

$$G = \frac{f_T}{8\pi f^2 r_{BB} C_{TC}}$$

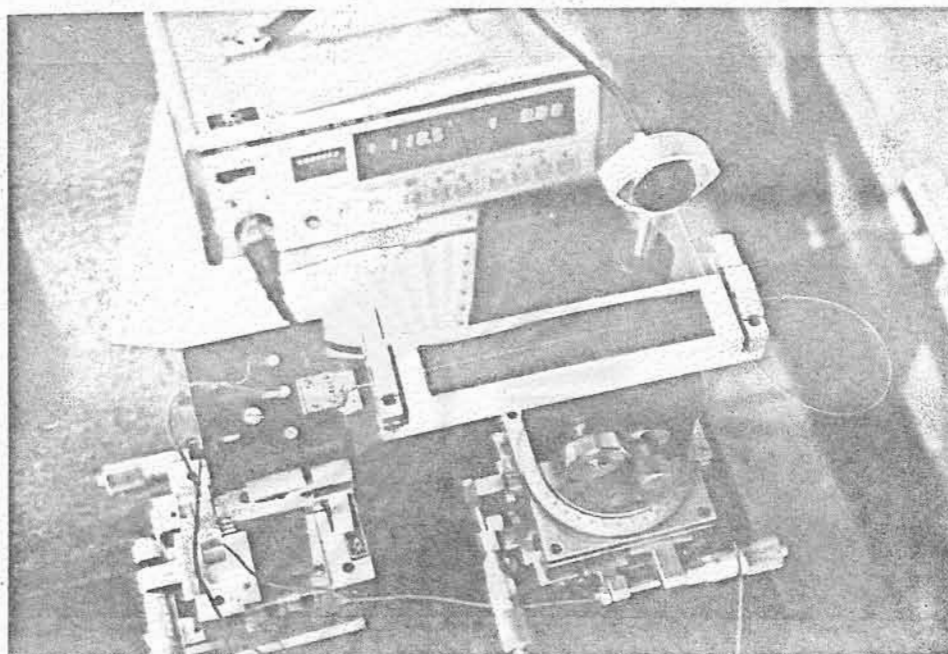
โดยที่ f_T = ความถี่ที่ทำให้อัตราขยายกระแสโคความถี่มีค่าเท่ากับ 1
 f = ความถี่ที่ใช้งานจริง

ในขณะที่เดียวกันช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างกว่าของแกลเลียมอาร์เซไนต์ เมื่อเทียบกับซิลิกอนเป็นผลให้สิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบกึ่งตัวนำสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าและแรงดันพิกัดหลายอันดับสูงกว่า

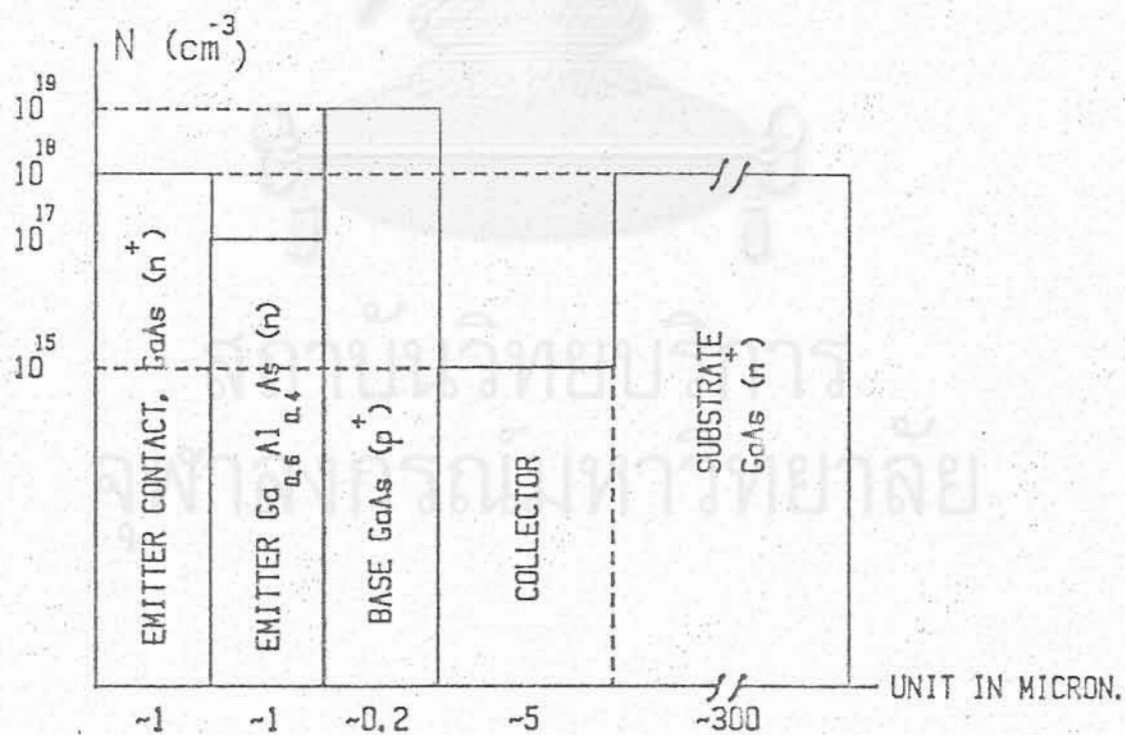
11. ลำดับขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์

ใช้เตาเอพิแทกซีแบบแนวนอน เตรียมสารละลายอิมิตต์วี่อุณหภูมิ 800°C หลังจากกัดผิวแว่นผลึกด้วยสารละลายในหลุมแรกที่อุณหภูมิ 804°C ชั้นแกลเลียมอาร์เซไนต์ชนิดเอ็นของคอลเลคเตอร์ ชั้นแกลเลียมอาร์เซไนต์ชนิดพีของเบส ชั้นแกลเลียมออกไซด์เนี่ยม-อาร์เซไนต์ชนิดเอ็นของอิมิตเตอร์ถูกสร้างขึ้นตามลำดับ ด้วยการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ด้วยอัตรา 0.2°C ต่อนาที ทำให้อุณหภูมิชั้นแกลเลียมอาร์เซไนต์ชนิดเอ็นเข้มข้นถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นชั้นสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก รูปที่ 30 แสดงระดับอุณหภูมิภายในเตาเอพิแทกซีที่ใช้สร้างชั้นผลึกต่าง ๆ

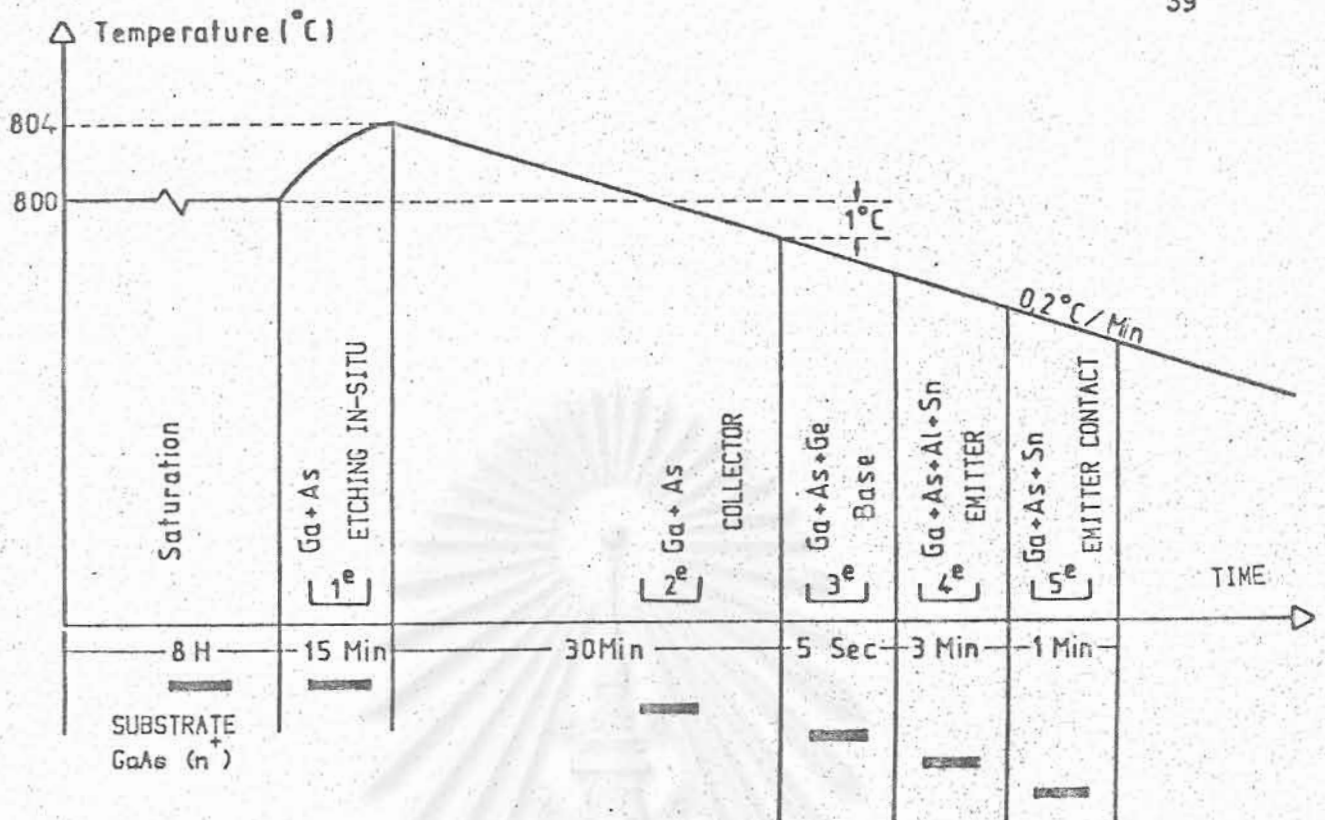
สำหรับรายละเอียดและขั้นตอนการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก และการกัดด้วยสารเคมี เพื่อกำหนดเนื้อที่การทำงานของทรานซิสเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 31 ส่วนรูปที่ 32 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว



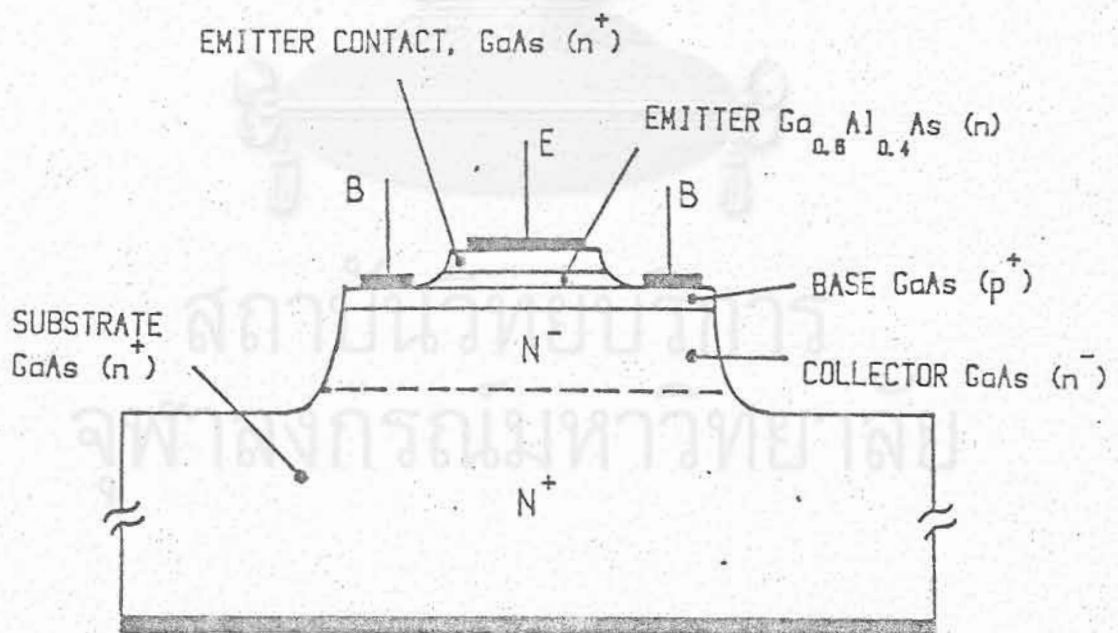
รูปที่ 28 แสดงการ Coupling แสงจากไดโอดเปล่งแสงด้านข้างเข้าสู่เส้นใยแสง



รูปที่ 29 ระดับสารเจือปนในชั้นต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์

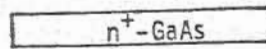


รูปที่ 30 ระบับอุณหภูมิที่ใช้สร้างชั้นผลึกต่าง ๆ

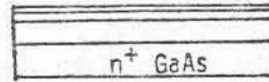


รูปที่ 32 โครงสร้างทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดของอิมิตเตอร์-เบส Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n)/GaAs(p⁺)

1. เตรียมแผ่นผลึก GaAs

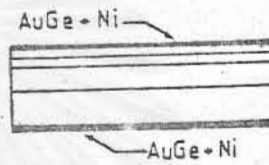


2. สร้างชั้นผลึกแบบบาง ๆ หลาย ๆ ชั้น
ด้วย LPE

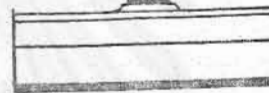


3. แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนย่อย ๆ ดังนี้

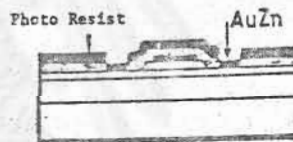
3.1 ฉาบผิวอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์
ด้วย AuGe + Ni



3.2 กัดชั้นโลหะและกัด Mesa อิมิตเตอร์



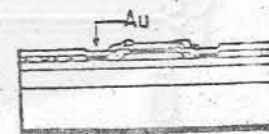
3.3 ฉาบผิวเบสด้วย AuZn



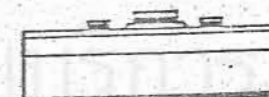
3.4 กัดชั้นโลหะเบส



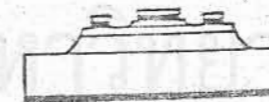
3.5 ฉาบผิวอิมิตเตอร์ เบสด้วย Au บริสุทธิ์



3.6 กัดชั้นโลหะ Au บริสุทธิ์



3.7 กัด Mesa เบส



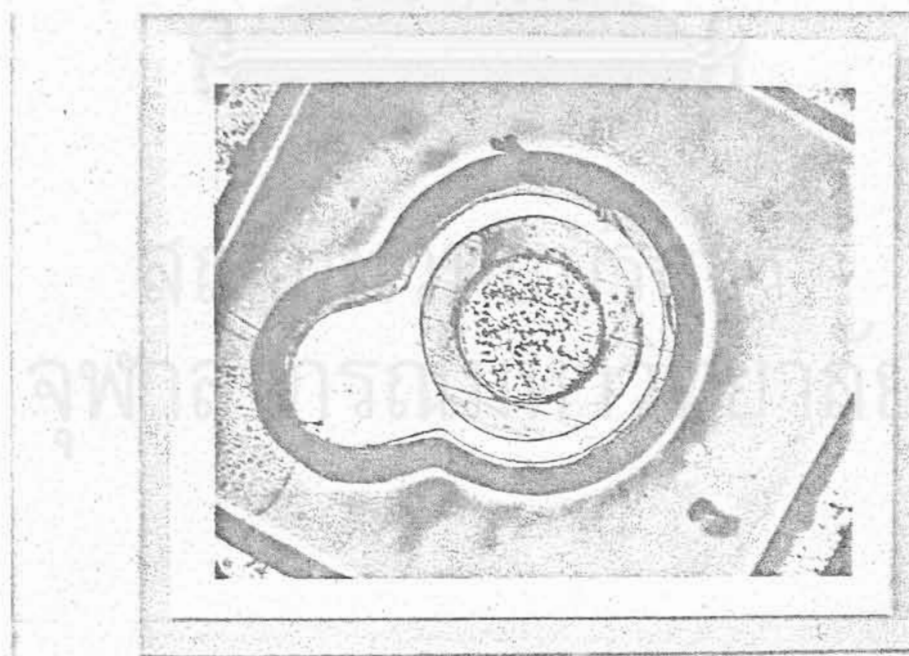
4. ติดตั้งบนฐานโลหะ ต่อขาโลหะแล้วกรอบด้วย
ฝาครอบโลหะ

รูปที่ 31 ขั้นตอนการผลิตทรานซิสเตอร์

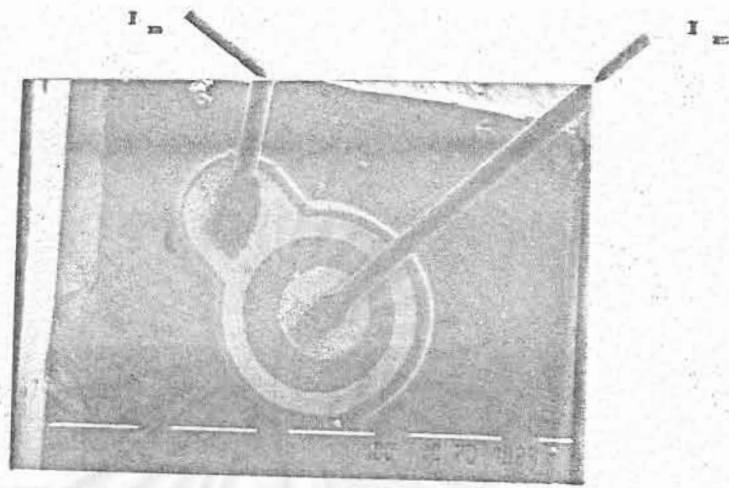
12. ผลการทดลองสร้างทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์

รูปที่ 33 แสดงผิวหน้าของทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่ผลิตได้ ก่อนติดตั้งบนฐานโลหะ ส่วนรูปที่ 34 แสดงผิวหน้าหลังจากต่อเส้นลวดโลหะแล้ว ขนาดของทรานซิสเตอร์ 1 ตัว เท่ากับ $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางอิมิตเตอร์เท่ากับ $100 \mu\text{m}$ ลักษณะสมบัติระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 35 จะเห็นแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์สูงถึง 100 โวลต์ อัตราขยายกระแสมีค่าตั้งแต่ 10 ถึง 300 รูปที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วง 10 ไมโครแอมป์ ถึง 100 มิลลิแอมป์ จากค่ากระแสสูงสุดคอลเลคเตอร์ 100 มิลลิแอมป์ ประกอบกับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ 100 โวลต์ เราสามารถใช้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่กำลังสูงสุด 1 วัตต์

รูปที่ 37 แสดงค่าความถี่คutoff (Cutoff Frequency) ของทรานซิสเตอร์-แกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อค่ากระแสคอลเลคเตอร์เปลี่ยนไป ในรูปเดียวกันเปรียบเทียบให้เห็นว่า ทรานซิสเตอร์ชนิดก่อนที่มีขนาดเท่ากันมีความถี่คutoffต่ำกว่า และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าสูงกว่า 20 มิลลิแอมป์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของกระแสครวคิง (Crowding Effect) ผลการทดลองอีกประการหนึ่งซึ่งชี้ให้เห็นสมรรถนะทางด้านความเร็วของทรานซิสเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ก็คือการมีค่าทรานซิสชันคาร์ปาซิแตนซ์ที่ต่ำ กล่าวคือ $C_{TE} \approx 10 \text{ pF}$ และ $C_{TC} \approx 3 \text{ pF}$

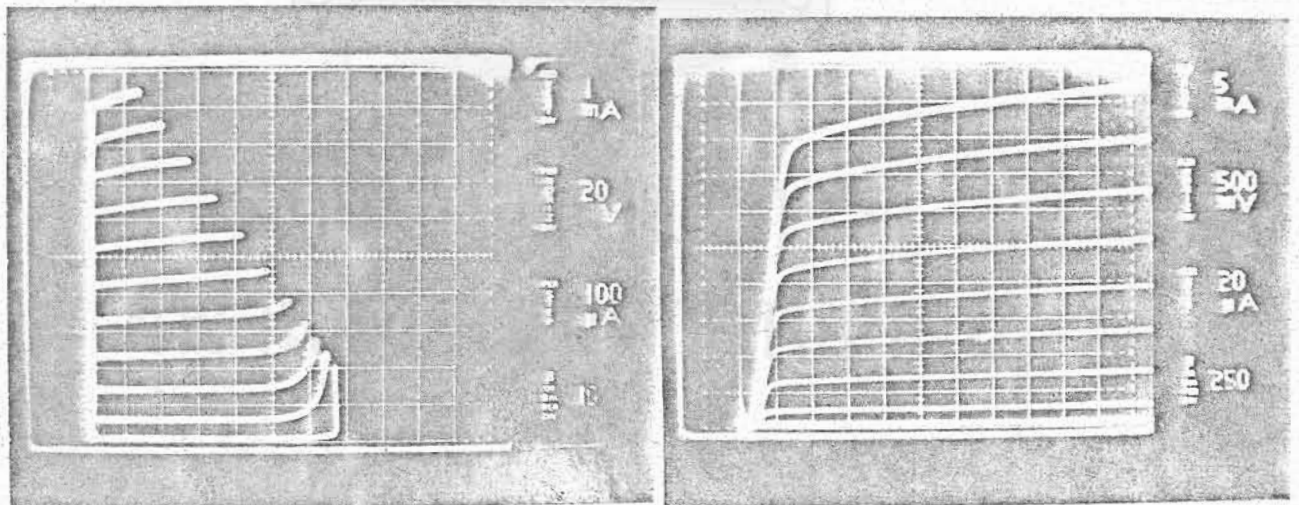


รูปที่ 33 ผิวหน้า GaAs Transistor ก่อนติดตั้งบนฐานโลหะ

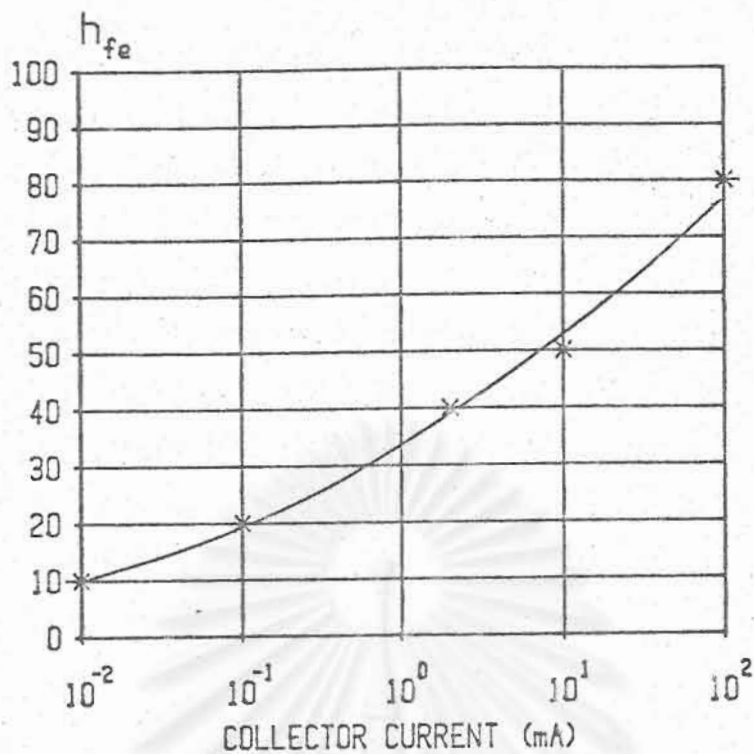


ภาพด้านบนของ GaAs Transistor

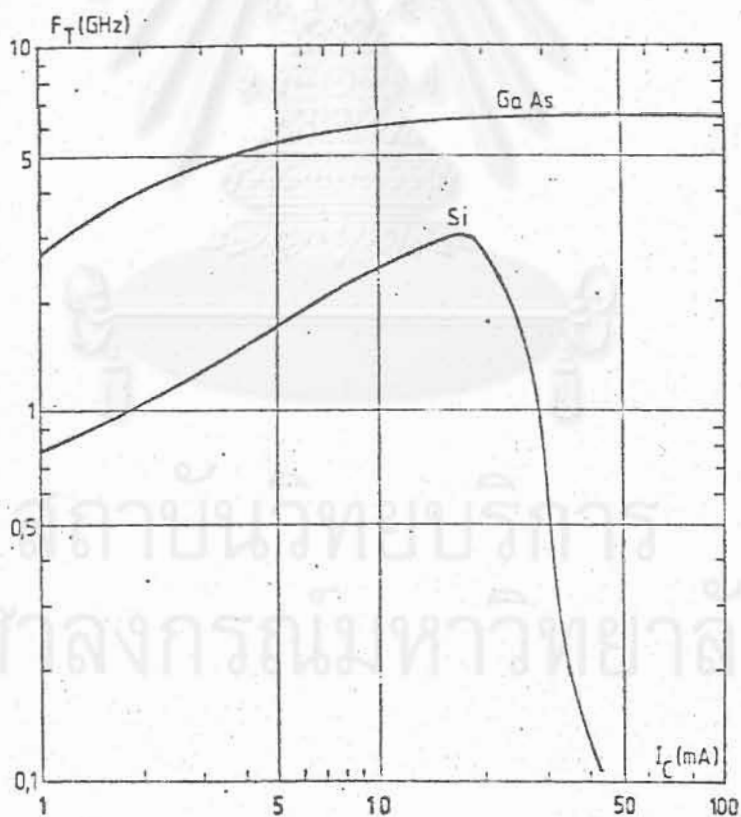
รูปที่ 34 GaAs Transistor หลังจากติดตั้งบนฐานโลหะ



รูปที่ 35 ลักษณะสมบัติ (I_C , V_{CE}) ของ GaAs Transistors



รูปที่ 36 ลักษณะสมบัติที่อัตราขยายกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ห่อพักกับกระแสคอลเลคเตอร์ของ GaAs-Transistor และ Si-Transistor ที่คำนวณได้จากทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเท่ากัน

13. สรุป

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูลแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยใช้เทคโนโลยีเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอนเป็นเทคโนโลยีหลัก เพื่อพัฒนาเทคนิคการสร้างหัวต่อเหมือนและหัวต่อต่างชนิดของ GaAs และ $Ga_{1-x}Al_xAs$ และได้ทำการทดลองสร้างสิ่งประดิษฐ์สารประกอบกึ่งตัวนำชั้น 2 กลุ่ม สิ่งประดิษฐ์ที่เปล่งแสงได้ และสิ่งประดิษฐ์ความไวสูง ซึ่งรายละเอียดสรุปได้ตามชนิดของสิ่งประดิษฐ์ดังนี้

ไดโอดเปล่งแสงด้านหน้า

มีโครงสร้างแบบหัวต่อเหมือน (Homojunction) ของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ $Ga_{0.72}Al_{0.28}As:Si(p)/Ga_{0.72}Al_{0.28}As:Sn(n)$ และหัวต่อต่างชนิด 1 หัวต่อ (Single Heterojunction) ของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 3 ธาตุ $Ga_{0.65}Al_{0.35}As:Ge(p)/Ga_{0.5}Al_{0.5}As:Te(n)$ และสามารถเปล่งแสงที่ $\lambda_p = 705$ และ 640 nm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามของชั้นแอคทีฟของโครงสร้างนั้น ๆ

ไดโอดเปล่งแสงด้านข้าง

ใช้โครงสร้างแบบหัวต่อต่างชนิด 2 หัวต่อ (Double Heterojunction) ของ $GaAl_yAs(p)/GaAl_xAs(p)/GaAl_yAs(n^+)$ ทั้ง 5 โครงสร้าง โดยมีเงื่อนไขหลักว่า รัศมีสารเจือปนในชั้นฉีดกระแส (Injection Layer) $GaAl_yAs(n^+)$ มีค่าสูงกว่าของชั้นแอคทีฟ (Active Layer) $GaAl_xAs(p)$ และ $y > x$ ส่วนการกำหนดพื้นที่การทำงาน (Active Area) ของไดโอดเปล่งแสงมีอยู่ 2 ลักษณะคือใช้ชั้นฉนวน SiO_2 หรืออาศัยผลของการไบแอสกลับทาง (Reverse Bias) ของหัวต่อ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As(n^-)/GaAs(p^+)$ การเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงด้านข้างแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีลักษณะเหมือนไดโอดเปล่งแสงทั่วไป คือ โครงสร้างที่ 2 และ 5 ซึ่งเปล่งแสงด้วยความยาวคลื่น (λ_p) 2 ค่า ที่ $655, 900$ nm และ $690, 850$ nm ตามลำดับ โดย λ_p ค่าแรกจะสอดคล้องตามค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามของชั้นแอคทีฟ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าแสงที่เปล่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างขอบพลังงานแบบ Spontaneous Recombination ส่วน λ_p ค่าหลังเกิดจากการรวมตัวระหว่างขอบพลังงานกับระดับพลังงานของสารเจือปน กลุ่มที่สองเป็นไดโอดเปล่งแสงด้านข้างที่มีลักษณะการเปล่งแสงแบบ

Stimulated Emission เกิดขึ้น โดยโครงสร้างที่ 1 ค่า FWHM มีค่าลดลงตามค่ากระแสทำงานที่สูงขึ้น และมี $\lambda_p \approx 880$ nm สอดคล้องตามความกว้างของแถบพลังงาน ส่วนโครงสร้างที่ 3 และ 4 ซึ่งมี $\text{Ga}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}(p)$ และ $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}(p)$ เป็นชั้นแอกทีฟมีค่า $\lambda_p \approx 755$ และ 775 nm ตามลำดับ แทนที่จะเป็น 725 และ 680 nm ทั้งนี้เนื่องจากเกิดกระบวนการ Selective Absorption ในโครงสร้างทั้งสองซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ไดโอด เมื่อเลเซอร์ไดโอดเริ่มมี Stimulated Emission เกิดขึ้น

ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์หัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบสของ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}(n^-)/\text{GaAs}(p^+)$

เป็นทรานซิสเตอร์โครงสร้างเมสา (Mesa Type) ขนาดขีบ $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ เส้นผ่าศูนย์กลางอิมิตเตอร์ $100 \mu\text{m}$ ด้วยความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามของอิมิตเตอร์ ($\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}(n^-)$) ที่สูงกว่าของเบส, $\text{GaAs}(p^+)$ ทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการฉีดพาหะมีหัวต่ออิมิตเตอร์-เบสสูงมากเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ธรรมดา ส่งผลให้สามารถผลิตทรานซิสเตอร์ที่ให้อัตราขยายกระแสสูงถึง 800 ทั้ง ๆ ที่ระดับสารเจือปนในอิมิตเตอร์ (มีค่าประมาณ 10^{17}) มีค่าต่ำกว่าของเบส (ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{19}) ด้วยระดับสารเจือปนในอิมิตเตอร์ที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ทำให้ค่าทรานซิสชันคาปาซิแตนซ์ของหัวต่ออิมิตเตอร์เบส, C_{TE} มีค่าเพียง 10 pF ลักษณะสมบัติอื่น ๆ ที่วัดได้มี $I_{c_{max}} \approx 100$ mA, $V_{CEO} \approx 100$ โวลต์ $P_{max} \approx 1$ วัตต์ และ $C_{TC} \approx 3$ pF

14. ปัญหาอุปสรรคของโครงการระยะที่ 1

ในระยะที่ 1 ของโครงการมีอุปสรรคสำคัญ 2 ประการ คือ

14.1 ยังขาดเทคโนโลยีในการสร้างชั้นฉนวน ชั้นฉนวน SiO_2 ในไดโอดเปล่งแสงด้านข้างสร้างจาก Electron Beam Evaporator คุณภาพยังไม่ดีพอ จึงต้องเลียงมาใช้ผลของการไบแอสกลับทางระหว่างหัวต่อ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}(n^-)/\text{GaAs}(p^+)$ ซึ่งคงจะหลีกเลี่ยงกระแสรั่วเนื่องจากกระแสมีตัวย้อนกลับไม่ทัน ปัญหานี้จะต้องแก้ไขในโครงการระยะที่ 2 โดยใช้ Plasma Chemical Vapor Deposition สร้างชั้น SiO_2 หรือ Si_3N_4 เป็นชั้นฉนวนแทน

14.2 สิ่งประดิษฐ์ความไวสูงที่ผลิตได้จากการคำนวณด้วยค่าคงที่และพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถทำงานที่ความถี่สูงถึง 10 GHz การทดลองวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ความถี่สูงเช่นนี้ ต้องใช้ S-parameter เป็นวิธีการวัด ปัญหาอุปสรรคที่สำคัญที่สุดก็คืออุปกรณ์ชุดนี้มีราคาแพงมาก และยังมีผู้ใช้ไม่มีใช้ภายในประเทศ

15. เอกสารอ้างอิง (References)

- Bausser E. และ Benz K. W., "LPE of GaAs and Related Compounds: Substrate Orientation and Surface Morphology", *Microelectronics J.*, Vol. 13, No. 1, 1982, pp. 10-14.
- Gillessen K. และ Schairer W., "Light Emitting Diode, An Introduction", Prentice/Hall International, 1987.
- Hsieh J.J., "Thickness and Surface Morphology of GaAs LPE Layers Grown by Supercooling, Step-cooling, Equilibrium-cooling and Two-phase Solution Techniques", *J. Crystal Growth*, Vol. 27, 1974, pp. 49-61.
- Kressel H. และ Butter J.K., "Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs" Academic Press, Newyork, 1977.
- Kroemer H., "Heterostructure Bipolar Transistor: What should we build?" *J. Vac. Sci. Technol. B* 1(2), Apr.-Jun. 1983, pp 126-130.
- Rey G., Baibe J.P., Marty A., Antarasena C., Cazarre A. และ Tasseli J., "Bipolar Structures on GaAs for Integrated Circuits". *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 74: Chapter 8*, Paper presented at Int. Symp. GaAs and Related Compounds, Biarritz, France, 1984, pp 671-676.
- Rosztoczy, Long S.I. และ Kinoshita J., "LPE GaAs for Microwave Applications"., *J. Crystal Growth*, Vol. 27, 1974, pp. 205-214.

Sual R.H., Lee T.P. และ Burrus C.A. "Light Emitting Diode Device Design". Semiconductors and Semimetals, Vol. 22, Part C, 193-237.

Yariv A., "Optical Electronics" Third Edition, Holt, Rinehart and Window, Holt-Saunders, Japan, 1985.

16. สิ่งตีพิมพ์

1. "อิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์ในหัวข้อแบบเซตเตอโรของ GaAlAs/GaAs", ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11, ธันวาคม 2531
2. "ไดโอดเปล่งแสงชนิด $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ ", ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11, ธันวาคม 2531
3. "Development of Optoelectronic Device in Thailand", 2nd ASEAN SCIENCE & TECHNOLOGY WEEK, 30 JAN.-04 FEB. 89, Manila, Philippines.
4. "ทรานซิสเตอร์แกเลียมอาร์เซไนด์" วิศวกรรมสาร, ปีที่ 42, เล่มที่ 1, 2532 pp 77-80.

17. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการ "ออปโตอิเล็กทรอนิกส์" ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจาก ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2531 เป็นเงิน 690,000 บาทถ้วน

