

การศึกษาท่อนำคลื่นแสงแบบชั้นเนลซ์สเตรตพลาเนอร์
สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานเลเซอร์ไดโอด

นาย พรพิชญ เหลืองจิรโณทัย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-985-4


ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 14603300

**A STUDY ON CHANNELED SUBSTRATE PLANAR WAVEGUIDE
FOR LASER DIODE APPLICATION**



Mr. Pornpisanu Luangjiranotai



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-985-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาที่นำคลื่นแสงแบบชั้นแนลซ์บัสเตรดพลาแนร์
สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานเลเซอร์ไดโอด
โดย นาย พรพิชญ เหลืองจิรโนทัย
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์

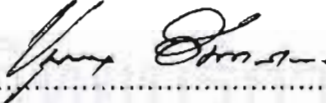
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อินทรเสน)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรจบ โตประเสริฐวงศ์)

พรพินิจ เหลืองจิร โธทัย : การศึกษาต่อนำคลื่นแม่เหล็กแบบชั้นแนวสับสเตรตพลาแนร์
สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานเลเซอร์ไดโอด (A STUDY ON CHANNELED SUBSTRATE
PLANAR WAVEGUIDE FOR LASER DIODE APPLICATION)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ , 61 หน้า. ISBN 974-332-985-4.

วิทยานิพนธ์ได้มีการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด โครงสร้าง Channel Substrate Planar (CSP) จากวัสดุ AlGaAs ที่มีเปล่งแสงในย่าน 0.78 ไมครอน โดยคุณสมบัติทางแสงถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมาณค่าดัชนีหักเห (Effective Index Approximation) ซึ่งตัวแปรเหล่านั้น ได้แก่ ค่าความกว้างและความลึกของร่องส่วนกลางในโครงสร้าง ค่าความหนาของชั้นเปลือกด้านล่าง (Lower Cladding Layer) ในส่วนปีกของโครงสร้าง จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความกว้างของส่วนร่องนั้นมีค่าสูงสุด 5 ไมครอน ค่าความลึกของร่องน้อยที่สุด 0.4 ไมครอน และค่าความหนาของชั้นเปลือกด้านล่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.3 ไมครอนซึ่งจะให้คุณสมบัติทางแสงเป็นโหมดเดี่ยว (TE_{00}) นอกจากนี้ยังศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากสถานะของเหลว (LPE) บนผลึกฐาน โดยชั้นเปลือกส่วนล่างนี้เป็นชั้นผลึกของ $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกจากสารละลายอิมตัวที่อุณหภูมิ 800 °C ซึ่งการปลูกผลึกเริ่มต้นที่อุณหภูมิที่ 798 °C และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ 0.2 °C/นาทีก และเวลาที่ใช้ในการปลูกในช่วง 50-60 วินาทีเพื่อให้ได้ผลึกของชั้นเปลือกด้านล่างที่มีความเรียบสม่ำเสมอทั้งส่วนร่องและส่วนปีก โดยที่ค่าความหนาของชั้นปีกและส่วนร่องอยู่ในขอบเขตที่ได้วิเคราะห์ไว้ สุดท้ายของการทดลองนี้ได้นำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเลเซอร์ไดโอด โครงสร้าง Channel Substrate Planar (CSP) จากวัสดุ AlGaAs ที่มีเปล่งแสงในย่าน 0.78 ไมครอน โดยมีโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอดเป็นแบบหัวต่อเฮเทอโรสตรักเจอร์ (Double Heterostructure) ในส่วนกลางหรือร่อง โดยตัวอย่างของไดโอดเลเซอร์แบ่งเป็น 2 แบบคือแบบพื้นที่ขั้วนำกระแสกว้าง (Broad Area Contact) และแบบช่องเปิดของชั้น SiO_2 ขนาด 10 ไมครอนในด้านพี ตัวอย่างที่ได้นี้มีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์อยู่ในช่วง 125-160 mA สำหรับไดโอดเลเซอร์ที่มีค่าความยาวในช่วง 500-700 ไมครอน สำหรับแบบช่องเปิดของชั้น SiO_2 ขนาด 8 ไมครอนในด้านพี ส่วนแบบพื้นที่ขั้วนำกระแสกว้างนั้นมีค่ากระแสขีดเริ่มต้นสูงกว่า เนื่องจากพื้นฐานของขั้วนำกระแสที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตามทั้งสองโครงสร้างนี้มีคุณสมบัติทางแสงระยะสนามใกล้ (Near Field Pattern) เป็นแบบโหมดเดี่ยว

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษารวม

3971143421: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD:

CHANNELED SUBSTRATE PLANAR (CSP) WAVEGUIDE / LATERAL
CONFINEMENT / HETEROSTRUCTURE / EFFECTIVE REFRACTIVE INDEX /
WET ETCHING

PORNPISANU LUANGJIRANOTAI :A STUDY ON CHANNELED SUBSTRATE
PLANAR WAVEGUIDE FOR LASER DIODE APPLICATION.

THESIS ADVISOR : Assoc. Prof. SOMCHAI RATTANATAMPAN, 61 pp.

ISBN 974-332-985-4.

The 0.78 μm range AlGaAs Channel Substrate Planar laser diodes is theoretically analyzed to investigate the effect of structure parameters. The waveguide properties are investigated using an effective index approximation. The parameters are the channel width and depth of the center part, the lower cladding thickness of the wing part. The analyzed results are for the maximum channeled width of 5 μm , the minimum channel depth of 0.4 μm and the lower cladding thickness in the range of 0.1-0.3 μm for TE_{∞} mode condition. In addition, the optimum condition for LPE growth of the lower cladding on the substrate. The lower cladding layer is $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$. The growth is done at 800 $^{\circ}\text{C}$. The starting from 798 $^{\circ}\text{C}$ with a cooling rate of 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ and the growth time interval in the range of 50-60 second to obtain the flat surface of epi-layer on the center and wing regions. Finally, the optimum growth condition is applied in the fabrication of 0.78 μm AlGaAs CSP laser diodes. The two groups of samples are separated by a top contact structure. One is a broad area contact, the other has an 8 μm wide stripes of SiO_2 windows. Laser fabricated from such structures have threshold current in the range of 120-160 mA with a cavity length in the range of 500-700 μm . The broad area contact lasers have higher threshold current. However, both samples show a near field pattern in the TE_{∞} mode.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับคำแนะนำที่มีคุณค่าเป็นอย่างมาจาก ผศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ในที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้แก่ ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน รศ. ดร. บรรยง โตประเสริฐ และ ผศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ อ.ดร. อารมณ์ ชีรมงคลรัมย์ ดร. สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ คุณ กฤษณา พรพิทักษ์พงศ์ คุณ ศุภโชค ไทยน้อย และ คุณ ขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย SDRL ที่ให้การศึกษาปริญญาโทแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนบางส่วนในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจในการศึกษาและทำวิจัยมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	2
2. ความรู้พื้นฐาน	5
2.1 คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด	5
2.1.1 สารประกอบที่นำมาใช้ในการสร้างเลเซอร์ไดโอด	7
2.1.2 การเปล่งแสงแบบถูกเร่ง	8
2.1.3 เลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโร (DH)	9
2.2 การกักแสง (Optical Confinement)	13
2.3 การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี Liquid Phase Epitaxy(LPE)	18
2.3.1 เทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี LPE	20
2.3.1.1 เทคนิค Equilibrium-Cooling	20
2.3.1.2 เทคนิค Step-Cooling	21
2.3.1.3 เทคนิค Supercooling	21
2.3.1.4 เทคนิค Two-phase- Solution	22
2.3.2 ชุดระบบอุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี LPE	22
3. การวิเคราะห์โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด	26
3.1 ความรู้พื้นฐานของสมการ Maxwell's Equation	27
3.2 การวิเคราะห์ในโหมดของ Transverse	29
3.3 การวิเคราะห์ในโหมดของ Lateral	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4.	กระบวนการสร้างเลเซอร์ไดโอด	38
4.1	การเตรียมผลึกแผ่นฐาน	38
4.2	การปลูกผลึกบนผลึกแผ่นฐานที่ไม่เป็นแนวระนาบ	39
4.3	การเตรียมสารประกอบ	39
5.	ผลการทดลองและการวิเคราะห์	43
5.1	การเตรียมสารประกอบ	43
5.2	ขั้นตอนในการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด	44
5.3	การทดลอง	46
5.4	I-V Curve Characteristics	47
5.5	การเก็บกักแสง(Optical Confinement)	48
5.6	I-L Curve Characteristics	52
5.7	ลักษณะสเปกตรัมของ CSP เลเซอร์ไดโอด	53
6.	สรุป	55
	รายการอ้างอิง	56
	ภาคผนวก	57
	ประวัติผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	ข้อมูลของสารประกอบที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยวิธี LPE	44
5.2	ข้อมูลของชิพ CSP เลเซอร์ไดโอดแต่ละตัวที่มีค่า Threshold Current และค่าความยาวของ Cavity แตกต่างกัน	53



สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิด	1
1.2 แผนภาพโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีการเก็บกักแสง	2
2.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความยาวคลื่นแสงกับ การสูญเสียพลังงานของเส้นใยนำแสงที่ทำด้วย ซิลิกา	6
2.2 แผนภาพความสัมพันธ์ของสารประกอบแต่ละชนิด กับค่าความยาวคลื่นแสง	7
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานและ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบต่างๆ	7
2.4 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ระหว่างชั้นพลังงาน E_1 และ E_2	9
2.5 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission)	9
2.6 แผนภูมิแถบพลังงานของ Double Heterojunction Lasers เมื่อเปรียบเทียบกับ Homojunction Lasers	11
2.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของรอยต่อพีเอ็นใน DH Laser Diode	11
2.8 แผนภูมิแสดงสถานะแถบพลังงาน ขณะถูกป้อนกระแสไฟฟ้าของโครงสร้างต่างๆ	12
2.9 กราฟความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสขีดเริ่มต้น ของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current density) และอุณหภูมิของโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบต่างๆ	12
2.10 กลไกการเก็บกักแสงที่เกิดจากตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ตามกฎของ Snell	13
2.11 (ก) รูปแบบโครงสร้างเลเซอร์ไดโอด 3 ชั้นของสาร GaAs/GaAlAs ซึ่งสามารถเก็บกักแสงในระนาบ YZ ได้	14
2.11 (ข) กลไกการเก็บกักแสงโดยอาศัยกฎการหักเหของแสง	14
2.11 (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสง กับปริมาณของอลูมิเนียม(Al)	15
2.12 ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian) ซึ่งแสดงถึงการกำหนดทิศทาง ของแสงตามแนวแกน Z ของแสงเลเซอร์ไดโอด	15
2.13 โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดทั่วไปที่สามารถบังคับทิศทางของแสง ในแนวขนานกับ Cavity ได้โดยการจำกัดพื้นที่การฉีดของกระแสไฟฟ้า	16

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14	รูปแบบโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่สามารถบังคับทิศทางของแสงไปตามแนวแกน Z ได้ 17
(ก)	Gain-induced guide
(ข)	Positive-index guide
(ค)	Negative-index guide
2.15	โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบต่างๆที่สามารถเก็บกักแสงในแนว Lateral ได้..... 17
(ก)	Buried heterostructure
(ข)	Selective diffused
(ค)	Varying-thickness structure
(ง)	Bent-layer structure
2.16	รูปเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ Channel Substrate Planar 18
2.17	แบบจำลองอัตราการเกิดผลึกที่ไม่เท่ากันของวิธีการปลูกผลึกแบบ LPE ในผลึกแผ่นฐานที่ไม่เป็นระนาบ (Non-Planar) 19
2.18	กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ As ที่ละลายในของเหลว Ga และ อุณหภูมิ 20
2.19	แผนภูมิของอุณหภูมิและเวลาในกลไกการปลูกผลึกอพิแทกซีของเทคนิคต่างๆ 22
2.20	แผนภาพของชุดระบบอุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกวิธี LPE 23
2.21	ชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของชุดเข้าหลอม 25
2.22	ชุดเข้าหลอมที่ประกอบอย่างสมบูรณ์ 25
3.1 (ก)	แผนภาพโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP แบบ 3 มิติ 26
3.1 (ข)	ภาพจำลองโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ... 27
3.2	แผนภาพค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลที่ WING และที่ CSP ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน 31
3.3 (ก)	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (n_{xx}) กับค่าความหนาของชั้น Cladding (T) ของโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด (D = 0.1 ไมครอน และ 0.5 ไมครอน) 32
3.3 (ข)	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (n_{xx}) กับค่าความหนาของชั้น Cladding (T) ของโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด (D = 0.1 ไมครอน) 33

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของร่อง CSP(W) กับ ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลในแนว Lateral ($RE[n_x]$) ที่มีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.01	36
3.4 (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของร่อง CSP(W) กับ ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลในแนว Lateral ($RE[n_x]$) ที่มีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.02	36
3.5 ภาพตัดขวางของโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะทำการสร้าง	37
4.1 แผนภาพของกระบวนการเตรียมผลึกฐาน	38
4.2 แผนภาพอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองปลูกผลึกที่ไม่เรียบ	39
4.3 (ก) อัตราการเกิดผลึกของสารประกอบ GaAlAs บนผลึกแผ่นฐาน GaAs บริเวณร่อง CSP	40
4.3 (ข) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกบนร่อง CSP ที่เวลา 10 วินาที	40
4.3 (ค) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกบนร่อง CSP ที่เวลา 1 นาที	40
4.3 (ง) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกบนร่อง CSP ที่เวลา 2 นาที	41
4.4 (ก) ความเข้มข้นของสาร As ที่บริเวณต่างของร่อง CSP	41
4.4 (ข) ภาพแสดงปรากฏการณ์ 2 ชนิดที่เกิดขึ้นบริเวณร่อง CSP	41
4.5 (ก) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ยังไม่มีมีการปลูกผลึก	42
4.5 (ข) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกบนร่อง CSP ที่เวลา 1 นาที	42
4.5 (ค) รูปร่างของผลึก $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ที่ปลูกบนร่อง CSP ที่เวลา 5 นาที	42
5.1 โครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะสร้าง	43
5.2 แผนภาพขั้นตอนการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด	45
5.3 (ก) ภาพถ่ายตัดขวาง CSP เลเซอร์ไดโอดที่ทำขั้วโลหะเต็มหน้า	46
5.3 (ข) แผนภาพขนาดชั้นอพิแทกซ์ของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่ปลูกได้	46
5.4 I-V Curve Characteristics ของ CSP เลเซอร์ไดโอด	47
5.5 (ก) สเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่น 0.75 ไมครอน	48
5.5 (ข) ภาพถ่ายด้านบนของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นแสง เท่ากับ 0.75 ไมครอน	48
5.5 (ค) ภาพถ่ายด้านข้างบริเวณร่อง CSP ที่มีความยาวคลื่นแสง 0.75 ไมครอน	49
5.6 (ก) สเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่น 0.78 ไมครอน	50
5.6 (ข),(ค),(ง) และ (จ) การเก็บกักแสงบริเวณร่อง CSP (ทำขั้วโลหะเต็มหน้า)	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

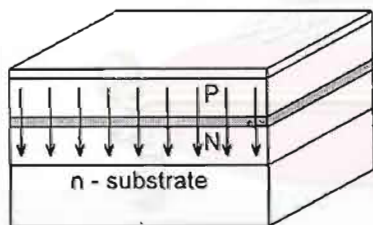
รูปที่		หน้า
5.7 (ก)	ภาพถ่ายตัดขวาง CSP เลเซอร์ไดโอดที่ทำขั้วโลหะบริเวณร่อง CSP	51
5.7 (ข)	แผนภาพตำแหน่งชั้นอีพิแทกซีต่างๆของ CSP เลเซอร์ไดโอด	51
5.8 (ก),(ข),(ค),(ง),(จ)และ(ฉ)	ภาพถ่ายด้านข้างบริเวณร่องของ CSP เลเซอร์ไดโอด ที่มีความยาวคลื่นแสง 0.78 ไมครอน	51
5.9	I-L Curve characteristics ของ CSP เลเซอร์ไดโอด	52
5.10 (ก)	สเปกตรัมของแสงก่อนที่จะเปล่งแสงเลเซอร์	54
5.10 (ข)	สเปกตรัมของแสงขณะเปล่งแสงเลเซอร์	54



1.1 ที่มาของปัญหา

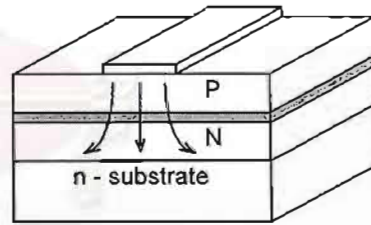
ปัจจุบันเลเซอร์ไดโอด เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของอุปกรณ์เครื่องใช้หลายๆ ประเภทที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องเล่น Compact Disc อุปกรณ์สื่อสารทางแสง เครื่องมือวัดที่ต้องการความแม่นยำในการวัดสูง เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของเลเซอร์ไดโอดได้แก่ ขนาดที่เล็ก ใช้งานได้ง่าย กินกำลังไฟฟ้าต่ำ และความสามารถในการมอดูเลตสัญญาณได้ความถี่ที่สูงมาก จึงทำให้เลเซอร์ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องการในอุปกรณ์เหล่านั้น

แต่เลเซอร์ไดโอดที่เราใช้กันโดยทั่วไปนั้น มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมในการใช้งาน(ควบคุมทิศทางของแสงได้ไม่ดีพอ และมี Threshold Current สูง ดังรูปที่ 1.1(ก) และ 1.1(ข)) ที่จะนำไปต่อกับอุปกรณ์ทางแสงชนิดอื่นๆ เช่น ต่อกับเส้นใยนำแสง หรือนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิต โครงสร้างวงจรรวมทางแสงที่ซับซ้อนมากขึ้นได้



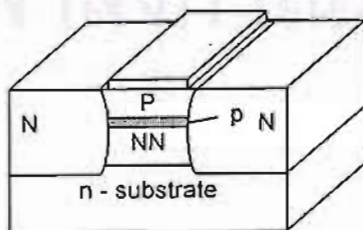
BROAD-AREA CONTACT

(ก)



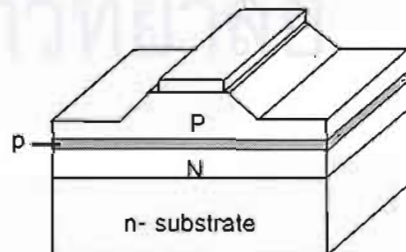
STRIPE CONTACT

(ข)



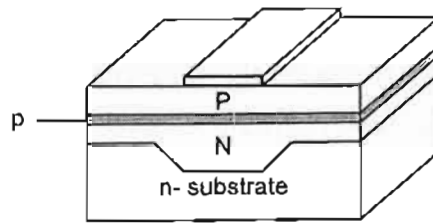
BH
Buried Heterostructure

(ค)



RW
Ridge Waveguide

(ง)



CSP
Channel Substrate Planar

(จ)

รูปที่ 1.1 โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิด (ก) Broad-Area Contact (ข) Stripe Contact
(ค) Buried Heterostructure(BH) (ง) Ridge Waveguide (RW) (จ) Channel Substrate Planar (CSP)

โดยโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ Broad-Area Contact และ Stripe Contact นั้นมีการเก็บกักแสงในทิศทางเดียวดังรูปที่ 1.2 (ก) ซึ่งเราไม่สนใจ ส่วนโครงสร้าง 1.1(ค),(ง) และ (จ) นั้นเป็นโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่สามารถเก็บกักแสงได้ 2 ทิศทางตามรูปที่ 1.2(ข) ซึ่งโครงสร้างในรูปที่ 1.1(ค) นั้นเป็นโครงสร้างที่มีขั้นตอนในการสร้างที่ซับซ้อน และโครงสร้างในรูปที่ 1.1 (ง)นั้นได้มีการสร้างเป็นผลสำเร็จแล้ว[2] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงนำเสนอแนวทางในวิธีการสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ Channel Substrate Planar (CSP) ดังรูปที่ 1.1(จ) ซึ่งสามารถทำให้คุณสมบัติทางแสงของเลเซอร์ไดโอดนั้นดียิ่งขึ้น

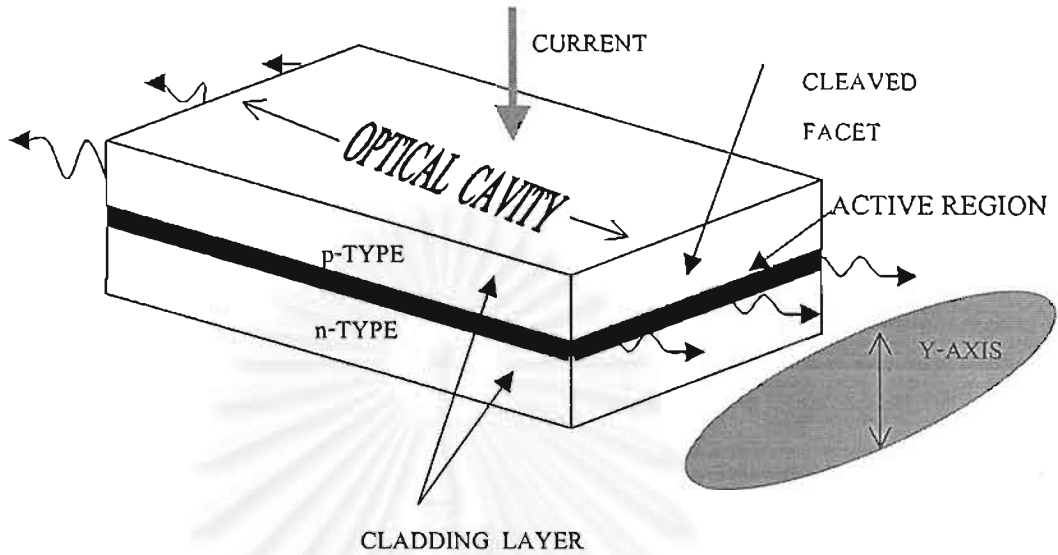
1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทั้งการศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ในโครงสร้าง Channel Substrate Planar (CSP) จากสารประกอบ GaAlAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากสถานะของเหลว(LPE) ที่ให้ค่าความยาวคลื่นแสง 0.78 ไมครอน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเลเซอร์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพของแสงสูงขึ้น หรือนำไปใช้กับการสร้างวงจรรวมทางแสงแบบอื่นๆ อีกด้วย

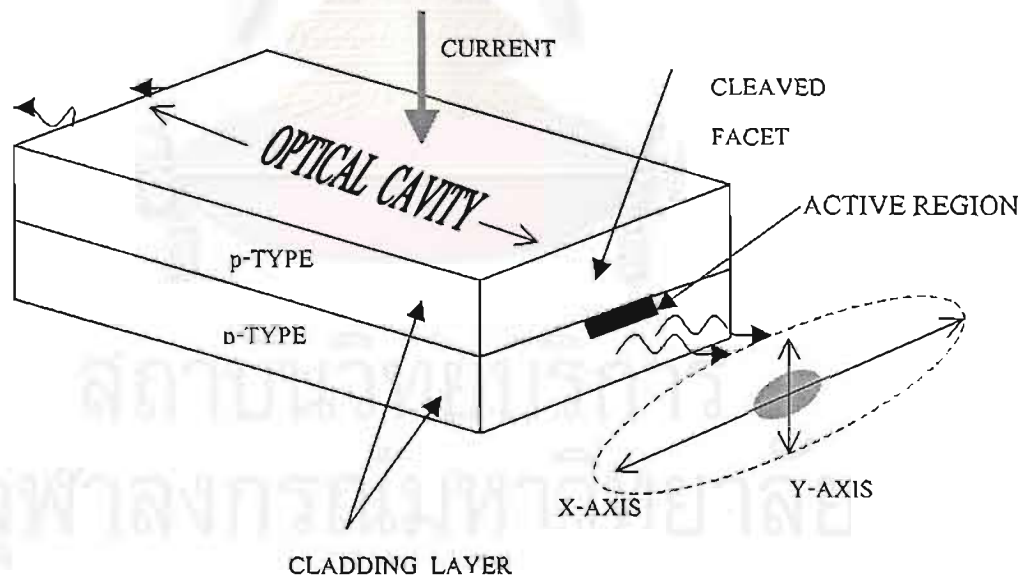
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างในการผลิตเลเซอร์ไดโอดโดยทั่วไป จะออกแบบมาเพื่อใช้เก็บกักพลังงานแสง (Optical Confinement) ให้อยู่ภายในบริเวณที่กำเนิดแสง (Action Region) ได้ในแนวแกนเพียงแกนเดียวเท่านั้น (ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อพีเอ็นหรือทิศทางเดียวกันกับแกน Y ดังในรูปที่ 1.2(ก)) แต่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอวิธีการสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ Channel Substrate

Planar ซึ่งโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดชนิดนี้จะมีคุณภาพของแสงดีกว่าเลเซอร์ไดโอดโดยทั่วไปคือสามารถเก็บกักพลังงานแสงได้ทั้งสองทิศทาง (ในแนวกับขนานรอยต่อพีเอ็นและในแนวตั้งฉากกับรอยต่อพีเอ็นหรือทิศทางตามแนวแกน X และ Y ดังในรูปที่ 1.2 (ข))



รูปที่ 1.2(ก) แผนภาพโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีการเก็บกักแสงได้เพียงแกนเดียว



รูปที่ 1.2(ข) แผนภาพโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่สามารถเก็บกักแสงได้ทั้งสองแกน

โดยในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์จะเริ่มตั้งแต่การออกแบบหาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมในการสร้างเลเซอร์ไดโอด กระบวนการสร้างเลเซอร์ไดโอดด้วยวิธีการปลูกอิมแพกซ์จากสถานะของเหลว จนกระทั่งถึงขั้นตอนการทดสอบเลเซอร์ไดโอดที่สร้างได้และสรุปผลการทดลอง



บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

เนื่องจากเลเซอร์ไอโอดมีโครงสร้างหลายแบบ และมีความแตกต่างจากเลเซอร์แบบอื่น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทราบข้อดีข้อเสียของโครงสร้างเลเซอร์ไอโอดแต่ละแบบ เพื่อเป็นประโยชน์ในการสร้างเลเซอร์ไอโอดให้ตรงตามจุดประสงค์ของการทำงานที่ต้องการ โดยในหัวข้อ 2.1 เป็นการจะเปรียบเทียบคุณสมบัติของเลเซอร์ไอโอดกับเลเซอร์แบบอื่นๆ

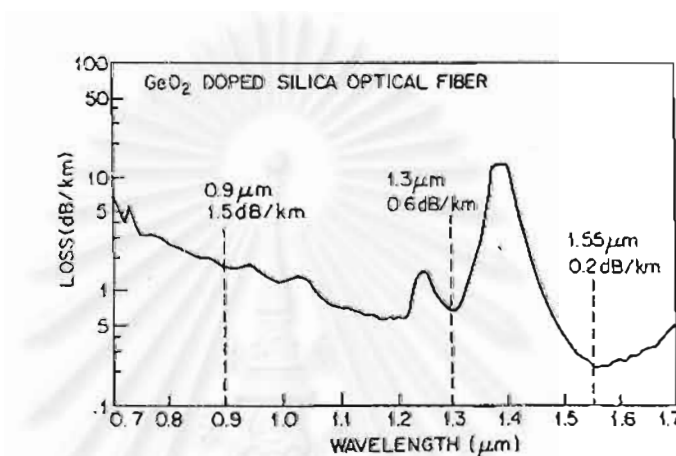
2.1 คุณสมบัติของเลเซอร์ไอโอด

เลเซอร์ไอโอดก็จะมีคุณสมบัติเหมือนกับเลเซอร์ไอโอดชนิดอื่นๆ (เช่น Solid-State Ruby Laser หรือ He-Ne gas Laser) ตรงที่สามารถให้กำเนิดคลื่นแสงที่เป็นระเบียบ (คลื่นแสงที่มีเฟสเดียวกัน และทำให้เกิดหน้าคลื่นเดียวกันหรือที่เรียกว่า Coherent Light) และแสงที่ได้มีสีเดียวทำให้มี Band width แคบซึ่งทำให้เกิดแสงที่มีทิศทางแน่นอน

อย่างไรก็ตามเลเซอร์ไอโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งซึ่งมีข้อแตกต่างจากเลเซอร์ไอโอดที่ทำจากของแข็ง ก๊าซ หรือของเหลวดังต่อไปนี้

1. ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไอโอดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้ในการสร้างเลเซอร์ไอโอด
2. ขนาดของเลเซอร์ไอโอดมีขนาดเล็ก (อยู่ในย่านความกว้างประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นเหตุผลมาจากชั้นแอคทีฟ ของเลเซอร์ไอโอดที่ปลูกได้จะมีขนาดเล็กมาก (อยู่ในย่านความกว้างประมาณ 1 ไมโครเมตร) และจากเหตุผลข้างต้นนี้เองทำให้เกิดข้อเสียคือ ขนาดการบานออกของลำแสง (Beam Divergence) จะมีค่ามากกว่าเลเซอร์ไอโอดแบบอื่นๆ
3. คุณสมบัติ และ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ได้จะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของรอยต่อและชนิดวัสดุของสารที่จะนำมาใช้สร้าง
4. การกระตุ้นให้เลเซอร์ไอโอดทำงาน เราเพียงไปแอสตาม คร่อมรอยต่อพีเอ็นเท่านั้น ซึ่งเป็นเหตุผลให้เลเซอร์ไอโอดเป็นที่นิยม เพราะใช้งานได้ง่าย และเลเซอร์ไอโอดยังมีคุณสมบัติในการมอดูเลตสัญญาณที่ความถี่สูงได้ด้วย

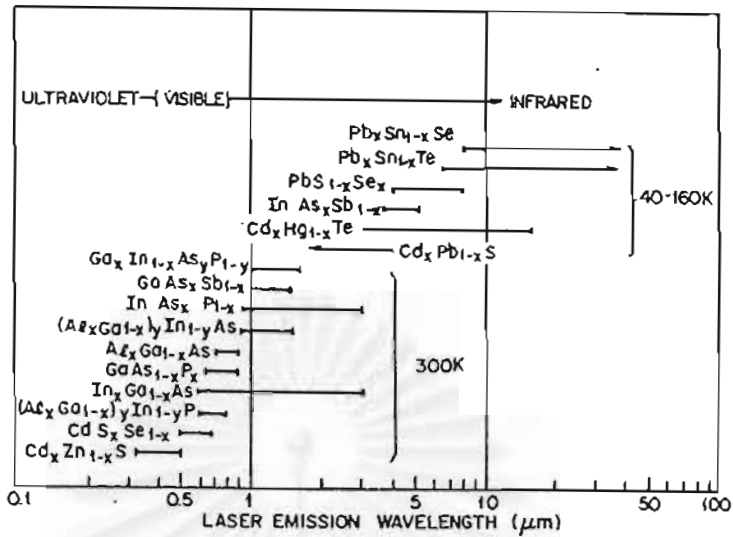
จากเหตุผลที่ว่า เลเซอร์ไดโอดมีขนาดเล็ก สะดวกในการติดตั้งกับอุปกรณ์อื่นๆ และมีความสามารถในการมอดูเลตสัญญาณได้ความถี่สูงๆ จึงเป็นเหตุผลให้เลเซอร์ไดโอดถูกนำไปใช้ในการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงมาก แต่เนื่องจากแสงเมื่อถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสง จะมีการลดทอนกำลังของแสง เราจึงสนใจว่าแสงที่มีค่าความยาวคลื่นเท่าใด จะมีการลดทอนกำลังของแสงน้อย เมื่อถูกส่งผ่านไปเส้นใยนำแสง เพื่อให้การส่งสัญญาณมีระยะเวลาทำการที่ไกลขึ้น โดยกราฟรูปที่ 2.1 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวคลื่นของเลเซอร์กับอัตราการสูญเสียกำลังของแสง[1]



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความยาวคลื่นแสงกับการสูญเสียพลังงานแสงของเส้นใยนำแสงที่ทำด้วย ซิลิกา

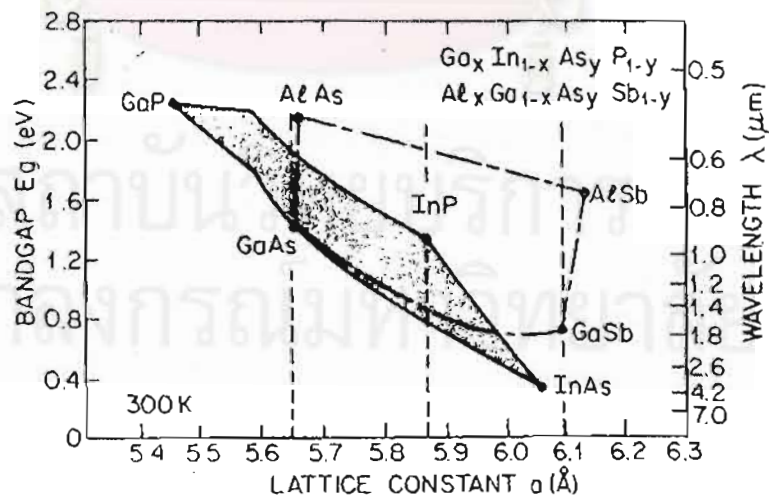
จากกราฟในรูปที่ 2.1 ค่าการลดทอนในแต่ละความยาวคลื่นที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ามีความยาวคลื่น 3 จุดที่น่าสนใจ จุดแรกคือที่ความยาวคลื่นย่าน 0.9 ไมโครเมตรซึ่งได้จากสารประกอบของ GaAs/GaAlAs ส่วนจุดที่สองคือที่ความยาวคลื่นย่าน 1.3 ไมโครเมตร ซึ่งมีอัตราการสูญเสียกำลังของแสงต่ำ (0.6 dB/km) และมีอัตราการกระเจิงของแสงน้อย (Low Dispersion) และจุดที่สามคือที่ความยาวคลื่นย่าน 1.55 ไมโครเมตร ซึ่งมีอัตราการสูญเสียกำลังของแสงต่ำที่สุด (0.2 dB/km) ซึ่งที่ความยาวคลื่น 1.3 และ 1.55 ไมโครเมตรนั้นเลเซอร์ได้ทำจากสารประกอบ 4 ธาตุที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำของธาตุในหมู่ที่ 3 และธาตุในหมู่ที่ 5 (III-V Quaternary Compound) ซึ่งจะเป็นสารประกอบของ $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$

2.1.1 สารประกอบที่นำมาใช้สร้างเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 2.2 แผนภาพความสัมพันธ์ของสารประกอบแต่ละชนิดกับค่าความยาวคลื่นแสง

สารประกอบที่นำมาใช้ในการสร้างเลเซอร์ไดโอดนั้นมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะกำหนดคุณสมบัติและความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกเปล่งออกมาจากตัวเลเซอร์ไดโอดมาก ดังในรูปที่ 2.2 [1] โดยจากรูปที่ 2.1 ค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่เราสนใจคือช่วงความยาวคลื่นแสง 0.9 ไมครอน เนื่องจากมีการลดทอนกำลังของแสงไม่มากสำหรับสารประกอบ GaAlAs/GaAs และที่สำคัญสามารถทำการสร้างได้ง่ายด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบ LPE



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานและค่าคงที่ของโครงผลึกของสารประกอบต่างๆ *(อ้างอิงจาก Casey และ Panish)

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดก็คือ ค่าคงตัวของโครงผลึก (Lattice Constant) ซึ่งถ้าค่าคงที่ของโครงผลึกของสารประกอบที่จะนำมาใช้สร้างเลเซอร์ไดโอดมีค่าแตกต่างกันมาก ก็จะทำให้ผลึกที่ปลูกได้มีการจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณรอยต่อของสารประกอบทั้งสองไม่สมบูรณ์หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงส่งผลให้เลเซอร์ไดโอดที่สร้างได้ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีตามไปด้วย โดยค่าคงที่ของโครงผลึกของสารประกอบต่างๆ นั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3

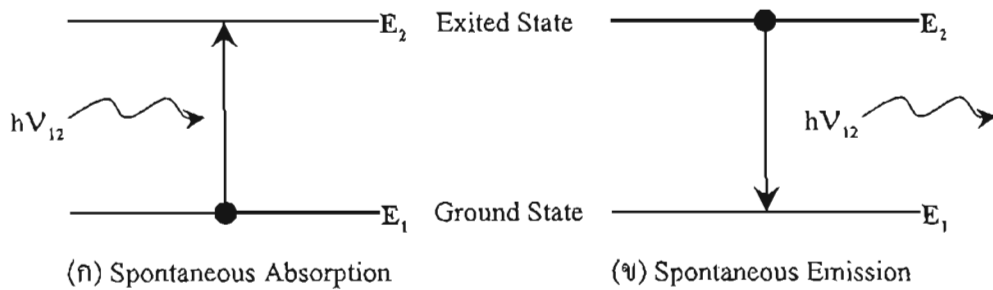
ซึ่งจากรูปที่ 2.1 เราสนใจค่าความยาวคลื่นในย่าน 0.9 ไมครอนเพราะมีอัตราการสูญเสียกำลังของแสงในเส้นใยนำแสงไม่มากนัก โดยถ้าเราต้องการวัดคุณสมบัติการเก็บกักแสงได้ง่าย เราต้องเลือกสารประกอบที่สามารถให้แสงเลเซอร์ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible) และจากรูปที่ 2.2 และ 2.3 นั้นเราจึงเลือกสารประกอบ GaAs/GaAlAs ที่ให้ค่าความยาวคลื่นแสงประมาณ 0.78 ไมครอน ซึ่งเราสามารถมองเห็นแสงได้ด้วยตาเปล่า และมีความแตกต่างของค่าคงตัวของโครงผลึกน้อยโดยจะส่งผลให้ผลึกที่ปลูกได้มีคุณภาพดี

2.1.2 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission)

โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงพื้นฐานในการทำงานของเลเซอร์ ซึ่งในทางคว้นตัมแมคคานิกส์ ระดับพลังงานของโมเลกุลหรืออะตอมจะประกอบไปด้วยชั้นพลังงานต่างๆ ตามโครงสร้างของโมเลกุลและอะตอมนั้นๆ เช่น ระดับพลังงานของอะตอม E_1 (Ground State) และ E_2 (Excited State) ในรูปที่ 2.4 อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงสถานะจาก E_1 ขึ้นไปสู่ E_2 ได้ต้องมีการดูดกลืนพลังงาน และถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงสถานะจาก E_2 ลงไปสู่ E_1 ได้ด้วยมีการคายพลังงาน พลังงานที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกนี้ต้องมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง E_1 และ E_2 หากพลังงานที่ต้องดูดกลืนหรือคายออกนี้เป็นพลังงานแสง ด้วยการดูดกลืนแสง (Light Absorption) หรือการเปล่งแสง (Light Emission) ขึ้นตามรูปที่ 2.4 (ก) และ รูปที่ 2.4 (ข) ตามลำดับ ซึ่งนั่นก็หมายถึงค่าพลังงานแสงหรือโฟตอนจะมีค่าเท่ากัน

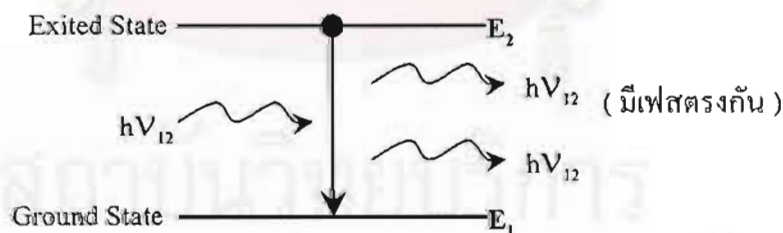
$$h\nu_{12} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

การเปล่งแสงในลักษณะของรูปที่ 2.4 (ข) นี้มีชื่อเรียกว่า การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากมีการดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงสถานะขึ้นไปอยู่ที่ E_2 ซึ่งเป็น Excited State แต่อิเล็กตรอนจะอยู่ในชั้นพลังงานนี้ได้ชั่วระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เมื่อหมดเวลาชีวิต (life time) ของมัน อิเล็กตรอนก็จะตกกลับมายังชั้นพลังงาน E_1 ตามเดิม จึงเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ระหว่างชั้นพลังงาน E_1 และ E_2

ในระหว่างที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่สถานะ E_2 ยังไม่หมดเวลาชีวิตของมัน เนื่องจากระบบของอะตอมนี้มีชั้นพลังงาน E_2 ที่ให้เวลาชีวิตของอิเล็กตรอนนานกว่าปกติ แต่ถ้ามีโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ เข้ามาเร่งเร้า อิเล็กตรอนที่ E_2 นี้ไม่จำเป็นต้องรอให้หมดเวลาชีวิตเสียก่อนก็สามารถตกลงมาที่ E_1 ได้และเกิดการเปล่งแสงหรือคายโฟตอนออกมาได้ พลังงานของโฟตอนที่คายออกมานี้จะต้องมีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ เช่นเดียวกับกับโฟตอนที่มาเร้า โฟตอนทั้งสองตัวนี้จะต้องเหมือนกันทั้งในทิศทางเคลื่อนที่ ค่าความยาวคลื่น จึงมีเฟสเหมือนกัน หน้าคลื่นเดียวกัน การเปล่งแสงในลักษณะเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า “การเปล่งแสงแบบถูกเร้า” (Stimulated Emission) ดังรูปที่ 2.5 ลักษณะการเปล่งแสงเช่นนี้เป็นที่หลักการของเลเซอร์ เพราะโฟตอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติของ Coherency อยู่ เราจึงต้องสร้างกลไกดังกล่าวในเลเซอร์ซึ่งก็คือ การเกิด Population Inversion ด้วยการฉีดพาหะ และ Optical Cavity เพื่อการป้อนกลับให้เกิด การเปล่งแสงแบบถูกเร้า ด้วย Facet Mirror



รูปที่ 2.5 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission)

2.1.3 เลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโร (DH)

โดยในยุคแรกของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างเป็นแบบหัวต่อโฮโม (Homojunction) ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ทำจากสารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียว โดยเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบหัวต่อโฮโมนั้นมีข้อเสียหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบหัวต่อเฮเทอโร

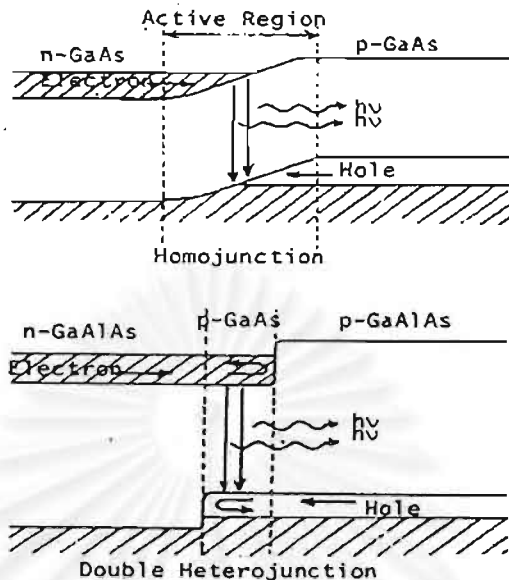
(Heterojunction) ซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป ในการที่จะให้เลเซอร์ทั้งสองแบบทำงานนั้นเงื่อนไขที่จำเป็นก็คืออิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปและแสงที่เปล่งออกมานั้นจะต้องถูก Confined ให้อยู่ในย่านหัวต่อเพื่อให้เกิดกระบวนการ Stimulated Emission ที่มีประสิทธิภาพ แต่ในเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เป็น Homojunction นี้ต้องใช้ ค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold Current) สูงมากเพื่อให้เกิดกลไกเลเซอร์ขึ้น เพราะการ Confinement ของอิเล็กตรอนและแสงไม่ดีพอ อิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในหัวต่อ มีระยะทางต่างๆ ก่อนรวมตัวกับโฮล และแสงบางส่วนก็กระจายจากหัวต่อทำให้ปริมาณการเกิด Stimulate Emission ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีประสิทธิผลต่ำ เนื่องจากต้องใช้ ค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์สูงนั่นเอง จึงทำให้เลเซอร์ไดโอดมีอุณหภูมิสูงต้องมีการหล่อเย็น (Cooling) ซึ่งเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ เมื่อนำเอาเลเซอร์ไดโอดไปใช้งาน

การทำให้เลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ต่ำลงได้ ถ้าเราใช้โครงสร้างเป็นแบบ Heterojunction ซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด เช่น หัวต่อพีเอ็นที่ทำด้วยแกลเลียมอาเซนายด์ (GaAs) และแกลเลียมอลูมิเนียมอาเซนายด์ (GaAlAs) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้มีค่าดัชนีหักเหของแสง และ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap) ไม่เท่ากัน โดยหัวต่อที่ประกอบจากวัสดุต่างชนิดกันนี้จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องทั้งในเชิงค่าดัชนีหักเห และค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งทำให้แสงที่เปล่งออกมาและอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในบริเวณหัวต่อถูกกัก (Confined) ภายในย่านแคบๆ อย่างมีประสิทธิภาพ และส่งผลทำให้มีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ต่ำลงด้วย Heterojunction Laser จึงเป็น โครงสร้างที่ใช้งาน ได้ที่อุณหภูมิห้องปกติ

Heterojunction Laser (DH) อาจมีโครงสร้างทั้งแบบ Single Heterostructure (SH) และ Double Hetero Structure (DH) ตัวอย่างของ โครงสร้างแบบแรกได้แก่การใช้ชั้นผลึก p^+ -GaAlAs ทับบนผลึกฐาน n -GaAs ส่วน โครงสร้างแบบหลังได้แก่การใช้ p^+ -GaAlAs และ n -GaAlAs ประกอบทั้งสองด้านของ p -GaAs ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน

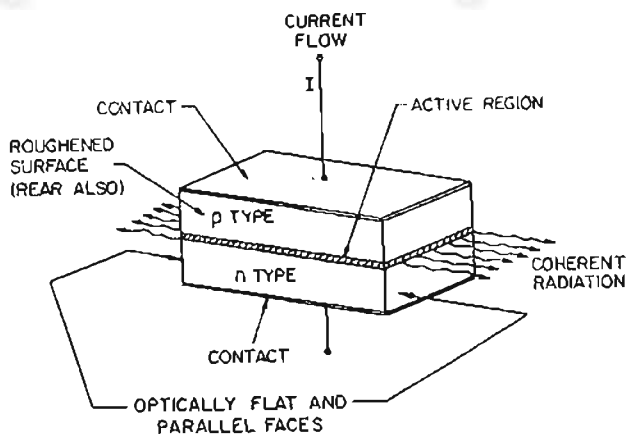
Double Heterojunction Lasers มีแผนภูมิแถบพลังงานดังรูปที่ 2.6 เมื่อเปรียบเทียบกับ Homojunction การที่ GaAlAs มีค่าช่องว่างแถบพลังงานโตกว่า GaAs นี้เอง บริเวณรอยต่อระหว่าง GaAlAs และ GaAs จึงเกิดกำแพงศักย์ขึ้น ทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนและโฮลให้อยู่ในย่านเปล่งแสง (Active Region) ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันง่ายขึ้น อันเป็นผลให้ค่าค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ ของเลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้มีค่าต่ำเพียง 2000 A/cm^2 แทนที่จะมีค่า 8000 A/cm^2 และ 4000 A/cm^2 เมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างแบบ Single Heterostructure และ

Homostructure ตามลำดับ เลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Double Heterostructure นี้จึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องได้



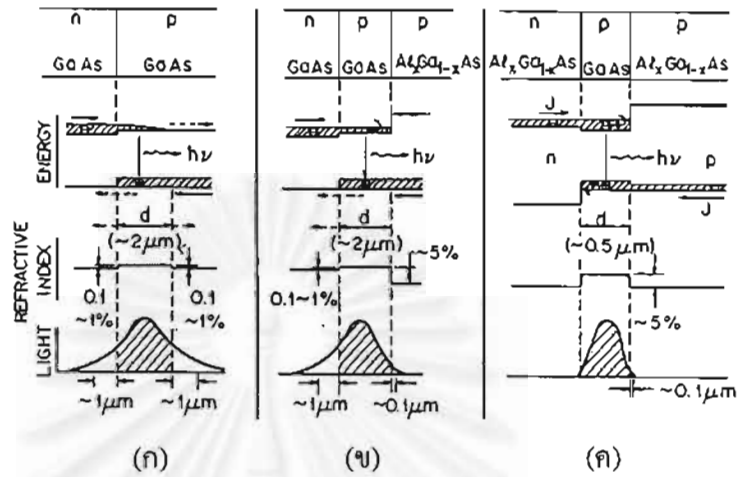
รูปที่ 2.6 แผนภูมิแถบพลังงานของ Double Heterojunction Lasers เมื่อเปรียบเทียบกับ Homojunction Lasers

จากโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นแบบ DH Lasers ในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นกับชั้นเปล่งแสงซึ่งเป็นสารต่างชนิดกัน ระบายด้านข้างที่ขนานกับรอยต่อที่ใช้ในการสะท้อนซึ่งจะเป็นทิศทางในการเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด และขั้วโลหะ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของรอยต่อพีเอ็นใน DH Laser Diode

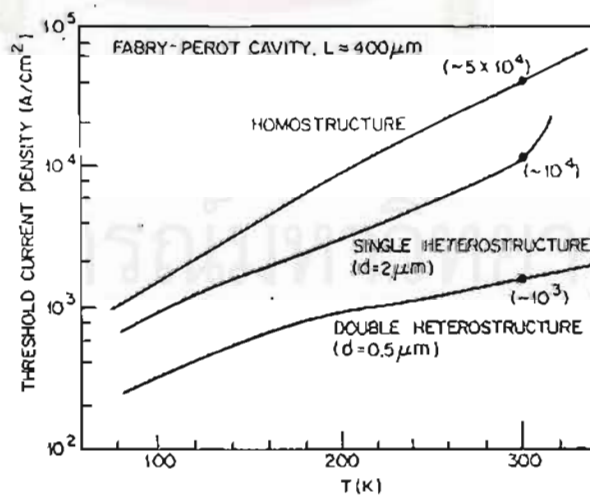
โดยโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแบบต่างๆ ในรูปที่ 2.7 นั้นได้มีการทดลอง [1] นำเอาวัสดุ GaAs , GaAlAs มาทดสอบหาประสิทธิภาพของการเก็บกักแสงและ Threshold Current Density ปรากฏผลการทดลองดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 แผนภูมิแสดงสถานะแถบพลังงานขณะถูกป้อนกระแสไฟฟ้าของ โครงสร้างต่างๆ

- (ก) โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบหัวต่อโฮโม (Homojunction)
- (ข) โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบหัวต่อเฮเทโรเดียว (Single Heterojunction) และ
- (ค) โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบหัวต่อเฮเทโรคู่ (Double Heterojunction)

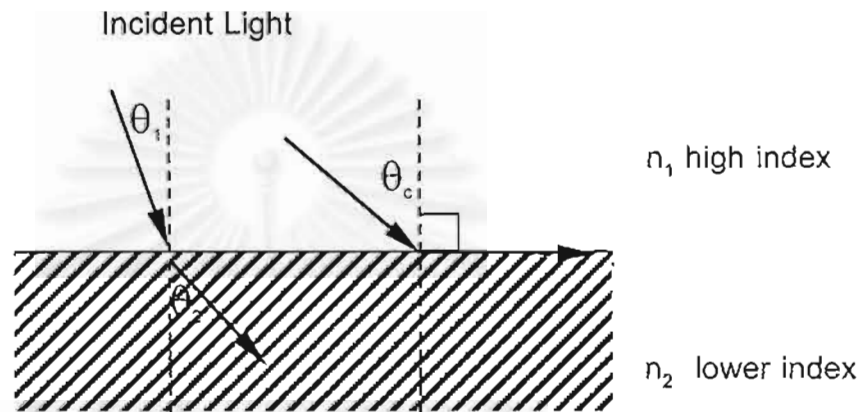
โดยจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ที่เงื่อนไขเดียวกันแต่เปลี่ยนโครงสร้างจาก Homostructure, Single Heterostructure และ Double Heterostructure การเก็บกักแสงอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของ โครงสร้าง DH Laser จะมีการเก็บกักแสงได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current density) และอุณหภูมิของ โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบต่างๆ[1]

จากกราฟรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของ DH Laser มีค่าความหนาแน่นของกระแส จิตเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ น้อยที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 300 K ซึ่งยืนยันได้ว่า โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ DH เป็น โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่ดีที่สุดในขณะนี้ที่เหมาะสม กับการสร้างและพัฒนาเลเซอร์ไดโอดโครงสร้างใหม่ๆ ต่อไป

2.2 การเก็บกักแสง (Optical Confinement)



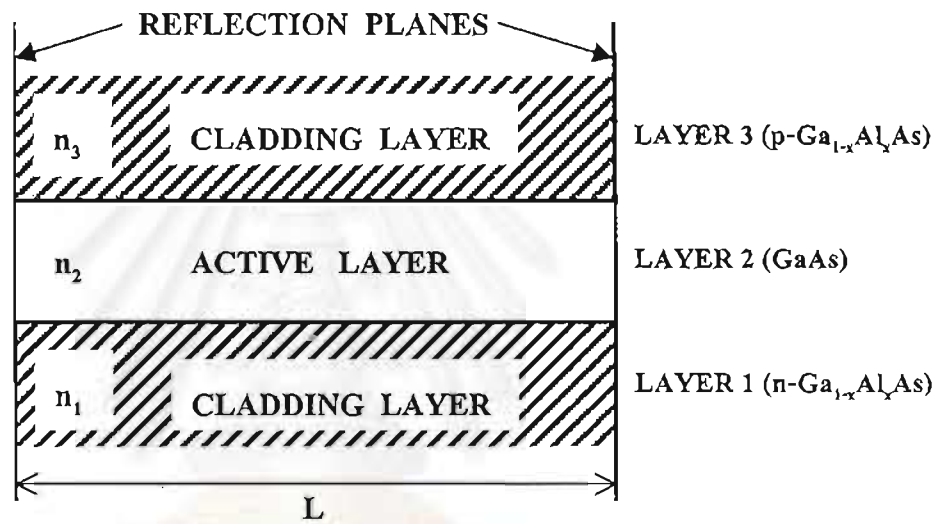
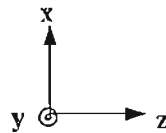
รูปที่ 2.10 กลไกการเก็บกักแสงที่เกิดจากตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ตามกฎการหักเหของคลื่นแสงของ Snell ($n_2 > n_1$, $\sin \theta > n_2 / n_1$)

ในการสร้างเลเซอร์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ กลไกการเก็บกักแสงของเลเซอร์ไดโอดที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจากกฎการหักเหของคลื่นแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของคลื่นไม่เท่ากันของ “สเนลล์” (Snell) เราจะนำมาใช้เป็นกลไกการเก็บกักแสงของเลเซอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.10

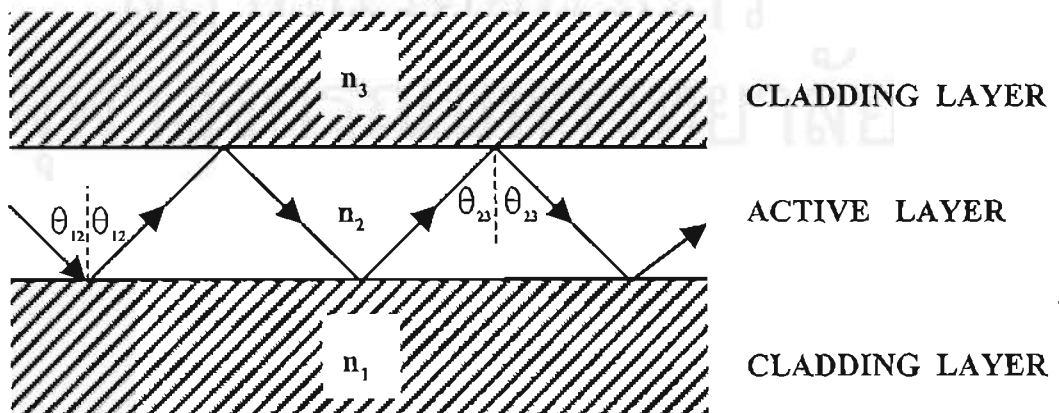
โดยในหัวข้อที่ 2.1.3 นั้นเราทราบแล้วว่า โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแบบ DH ซึ่งมีคุณสมบัติการเก็บกักแสงได้ดีที่สุด อันเนื่องมาจากทำจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน เราจึงนำเอาโครงสร้างแบบ DH มาใช้ในการเลเซอร์ไดโอด เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยหลักการเก็บกักแสงตามกฎของสเนลล์ และใช้สาร GaAs/GI_xAl_xAs มาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในการสร้างเลเซอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.11 (ก) และ 2.11 (ข)

ซึ่งจากรูปที่ 2.11 (ก) สาร GaAs จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงค่าๆ หนึ่งดังกราฟรูปที่ 2.11 (ค) และเมื่อเราเติมสาร Al เข้าไปก็จะกลายเป็นสาร GaAlAs ซึ่งก็จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงอีกค่าหนึ่งเมื่อนำเอาสารทั้งสองชนิดมาปลูกทับกันเป็นโครงสร้างเลเซอร์ไดโอด ก็จะสามารถเก็บกักแสง

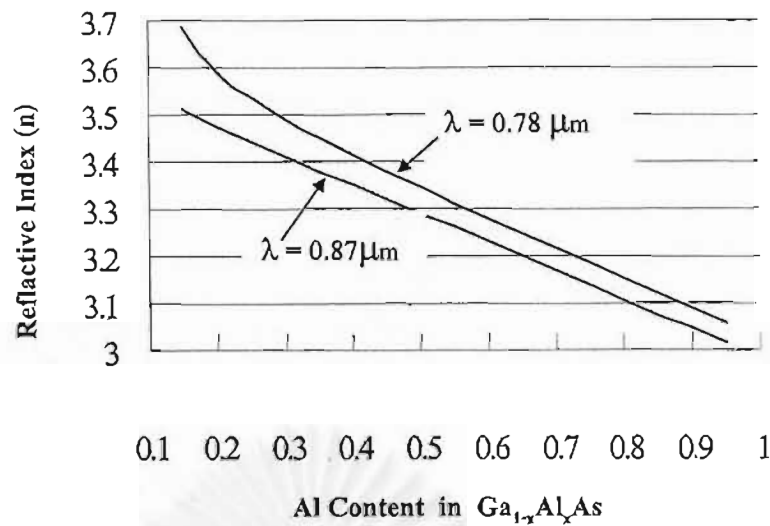
ได้ ดังรูปที่ 2.11(ข) โดยการหักเหของแสงจนสะท้อนกลับหมดจากรูปที่ 2.11 (ข) จากกฎของ Snell คือแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงไม่เท่ากันจะเกิดการหักเหออกไปจากแนวเดิม และถ้าแสงเดินทางเข้าหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหที่สูงกว่า และถ้ามุมตกกระทบของแสงมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต (θ_c) (θ_c ในรูปที่ 2.11 (ข) คือ θ_{12} และ θ_{23}) จะส่งผลให้แสงสะท้อนกลับเข้ามา



2.11 (ก)



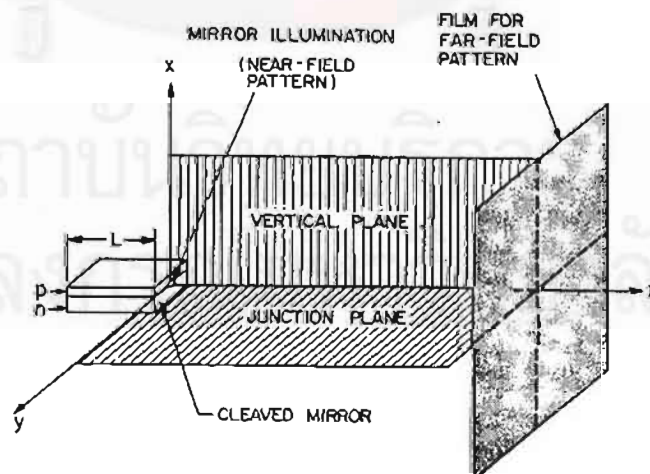
2.11 (ข)



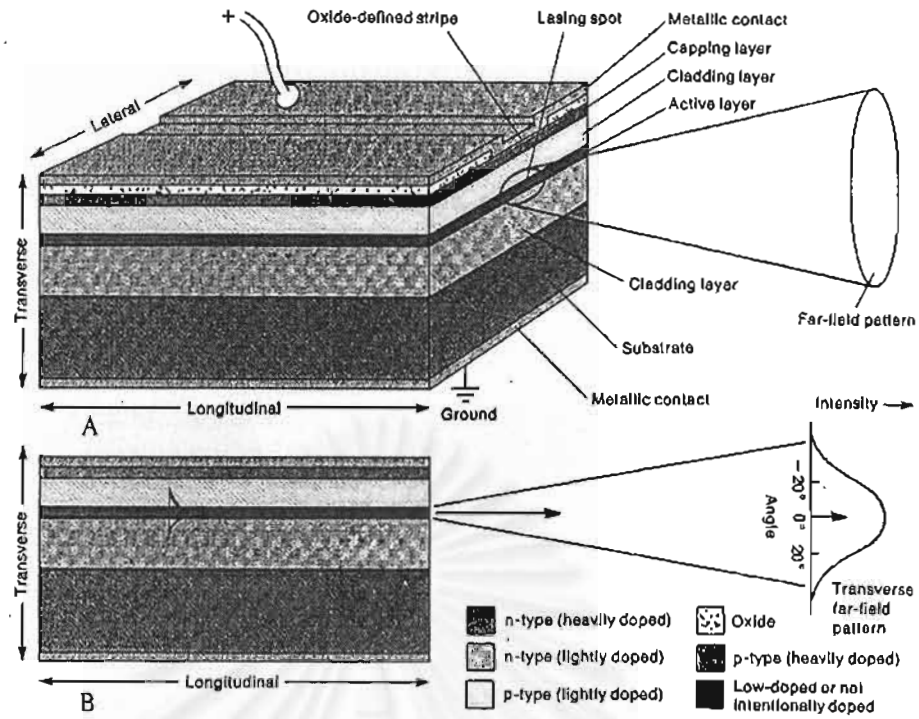
2.11 (ค)

รูปที่ 2.11 (ค) รูปแบบโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มี 3 ชั้นของสารชนิด GaAs/GaAlAs ซึ่งสามารถเก็บกักแสงในระนาบ YZ ได้ (ข) กลไกการเก็บกักแสงของรูปที่ 2.11(ก)โดยอาศัยกฎการหักเหของแสงจนสะท้อนกลับหมดตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงกับปริมาณของอลูมิเนียม (Al) ในสารประกอบ $Ga_{1-x}Al_xAs$ ในย่านความยาวคลื่นแสง 0.78 ไมครอนและ 0.87 ไมครอน

ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า ทำให้โครงสร้างในรูปที่ 2.11 (ก) สามารถเก็บกักแสงในระนาบ yz ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) แต่ในวิธานิพนธ์เล่มนี้ต้องการให้โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดสามารถกำหนดทิศทางของแสงในแนวนานกับ Cavity (ดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 (ก) ,(ข) คือในแนวแกน z (Lateral)



รูปที่ 2.12 ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian) ซึ่งแสดงถึงการกำหนดทิศทางของแสงตามแนวแกน Z ของแสงเลเซอร์ไดโอด

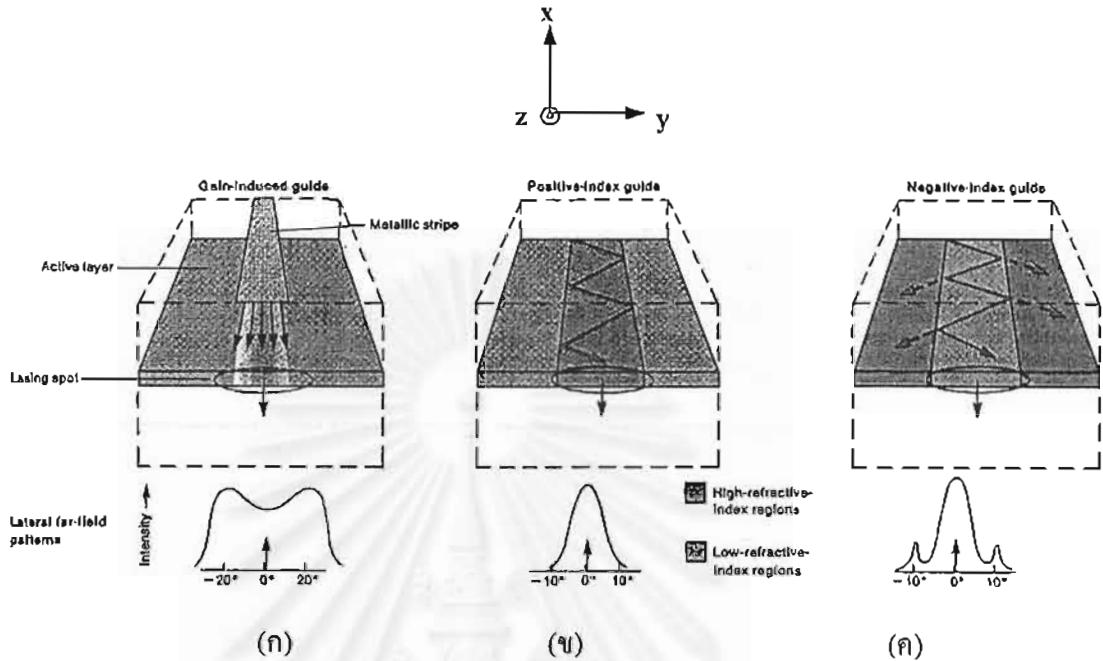


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดโดยทั่วไปที่สามารถบังคับทิศทางของแสงในแนวขนานกับ Cavity (Lateral) ได้โดยการจำกัดพื้นที่การฉีดของกระแสไฟฟ้า

และจากรูปที่ 2.13 นั้นเป็นโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่สามารถบังคับทิศทางของแสงที่เปล่งออกมาได้ โดยอาศัยการกำหนดพื้นที่การฉีดของกระแสไฟฟ้า (Current Injection) และโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่จะเก็บกักแสงได้ตามทิศทางแนวแกน Z จะต้องเป็นโครงสร้างที่มีความแตกต่างจากโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดโดยทั่วไป กล่าวคือถ้าต้องการให้แสงของเลเซอร์ไดโอดเปล่งแสงออกมาเฉพาะตามแนวแกน Z เท่านั้น โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดจะต้องสามารถเก็บกักแสงได้ทั้งตามแนวแกน X และ Y ซึ่งโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดชนิดนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.14

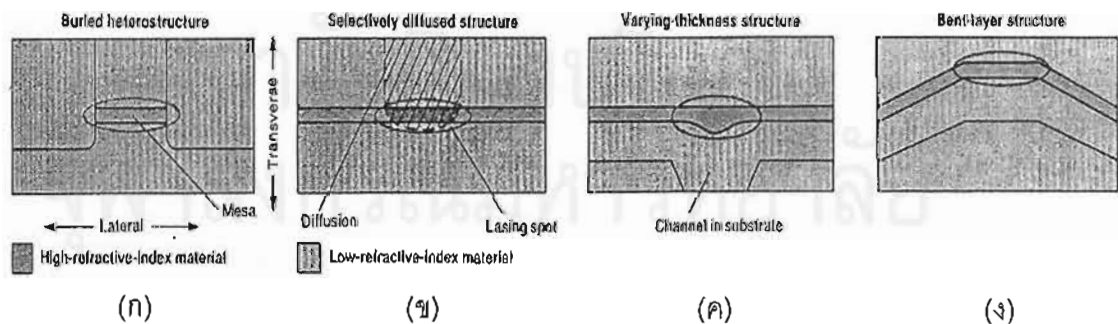
จากรูปที่ 2.14 (ก) นั้นเป็นการบังคับทิศทางของแสงโดยใช้วิธีการกำหนดพื้นที่ของขั้วโลหะที่จะป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเลเซอร์ไดโอด ซึ่งลำแสงเลเซอร์ (Beam divergent) ที่ได้จะมีคุณภาพไม่ดี แต่ถ้าเป็นโครงสร้างในรูปที่ 2.14 (ข) และ (ค) นั้นคุณภาพของแสงจะดีกว่า โดยโครงสร้างในรูปที่ 2.14 (ข) (Positive-index guide) นั้นจะมีคุณภาพของแสงดีที่สุด เนื่องจากเป็นไปตามกฎการหักเหของคลื่นแสงของสเนลล์ (คลื่นแสงจะสะท้อนกลับเข้ามาหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงสูงกว่า จึงทำให้สามารถเก็บกักแสงได้) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน (ในแนวแกน Y หรือ แนว Lateral) ได้ ทั้งๆที่เป็นชั้นของสารประกอบชนิดเดียวกันนั้น เกิดจากผลรวมของค่า

ดัชนีหักเหของแสงของสารประกอบที่มีความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกนั้นไม่เท่ากัน ซึ่งเราจะเรียกค่าดัชนีหักเหชนิดนี้ว่า ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (Effective Index) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป



รูปที่ 2.14 รูปแบบโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่สามารถบังคับทิศทางของแสงไปตามแนวแกน Z (Lateral) ได้ (ก) Gain-induced guide (ข) Positive-index guide (ค) Negative-index guide

และรูปแบบโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่จะมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเก็บกักแสงได้ทั้งสองทิศทางได้ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 (ก),(ข),(ค) และ (ง)

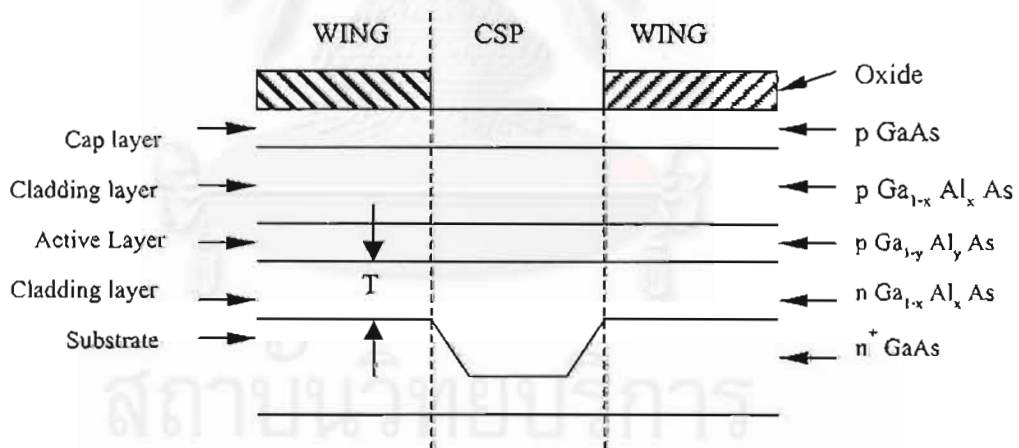


รูปที่ 2.15 โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบต่างๆที่สามารถเก็บกักแสงในแนว Lateral ได้

(ก) Buried heterostructure (ข) Selectively diffused

(ค) Varying-thickness structure (ง) Bent-layer structure

โดยหลักการในการเก็บกักแสงในโครงของเลเซอร์ไดโอดในรูปที่ 2.15 (ก) ก็คือ Buried heterostructure นั้นมีหลักการในการเก็บกักแสงให้ได้ 2 ทิศทาง (Lateral , Transverse) คือทำการปลูกผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงน้อยกว่าล้อมรอบผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงมากกว่า และวิธีที่ 2.15 (ข) (Selectively diffused) คือการแพร่ซึมสารประกอบลงไปชั้นแอคทีฟเมื่อทำการปลูกผลึกที่ชั้นหนึ่งแล้ว ซึ่งทั้งสองวิธีการ (2.15 (ก) และ 2.15 (ข)) ข้างต้นนั้นมีการบวนการปลูกผลึกที่ยุ่งยากและซับซ้อน จึงไม่เป็นที่นิยมทำกัน ส่วนอีก 2 วิธีหลัง (2.15 (ค) คือวิธี Varying-thickness structure และ 2.15 (ง) คือวิธี Bent-layer structure) เป็นวิธีการปลูกผลึกที่ง่าย คือทำการปลูกผลึกเพียงครั้งเดียวก็ได้เลเซอร์ไดโอดที่สามารถเก็บกักแสงได้ทั้งสองทิศทางแล้ว ซึ่งวิธีการที่ 2.15 (ง) นั้นจะมีโครงสร้างคล้ายกับวิธีการที่ 2.15 (ค) แต่ต่างกันที่รูปร่างของผลึกแผ่นฐานที่กัดได้ จะกลับหัวกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงสนใจศึกษาโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดโครงสร้างแบบที่ 3 คือ Varying thickness structure หรือเรียกว่าโครงสร้าง Channeled Substrate Planar หรือเรียกย่อๆว่า CSP Laser Diode ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้น Cladding layer (T) ชั้นล่างนั้นจะมีค่าน้อยในส่วนที่เป็นปีก (WING) และจะมีความหนาน้อยกว่าในส่วนที่เป็น CSP ซึ่งจากค่าแตกต่างระหว่างค่า T นี้เองจะส่งผลให้ค่า Effective Index ในส่วนที่เป็น CSP จะมีค่ามากกว่าในส่วนที่เป็น WING และจะทำให้โครงสร้างสามารถเก็บกักแสงได้อีกแนวหนึ่ง(Lateral)

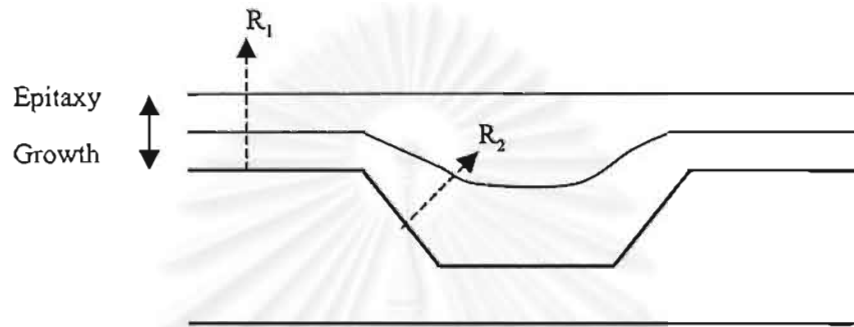


รูปที่ 2.16 โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ Channel Substrate Planar

2.3 การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี Liquid-Phase Epitaxy (LPE)

วิธีการปลูกผลึกมีหลายวิธีเช่น MBE (Molecular Beam Epitaxy) ,CVD (Chemical Vapor Deposition) , LPE (Liquid Phase Epitaxy) ฯลฯ แต่ในการปลูกผลึกในโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP นั้นจะต้องปลูกผลึกให้มีความหนาของชั้น Epitaxy ได้ไม่เท่ากันในเวลาเดียวกัน ดังรูปที่

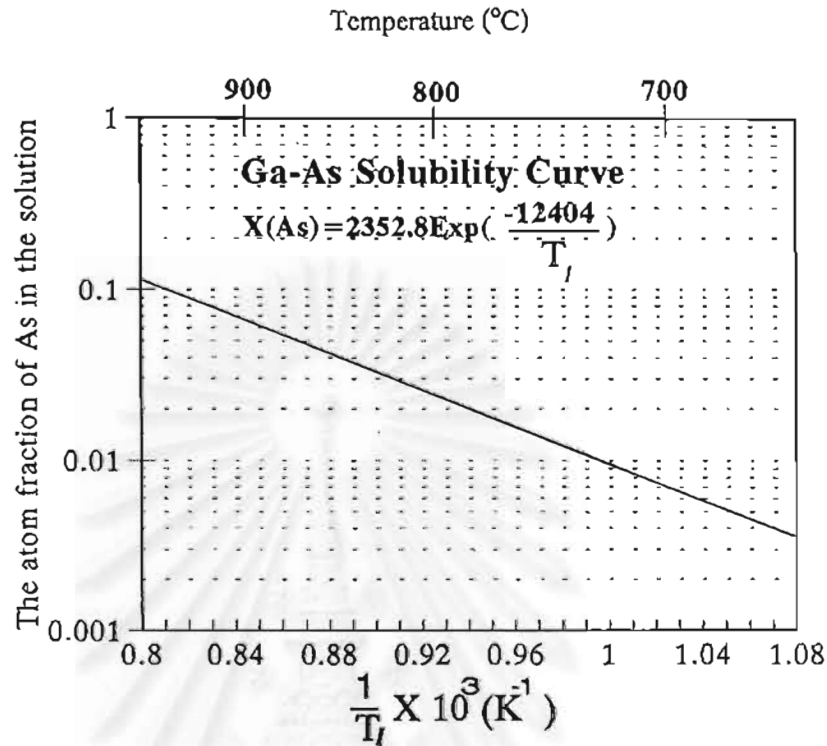
2.17 ทั้งนี้เพื่อให้เกิดค่าดัชนีหักเหประสิทธิภาพ (Effective Index) ในโครงสร้าง CSP มีค่ามากกว่าในส่วนที่เป็น WING อันจะนำไปสู่เงื่อนไขการเก็บกักแสงในแนว Lateral ได้ ซึ่งวิธีที่จะปลูกผลึกแบบ LPE จะสามารถปลูกผลึกแบบนี้ได้ เพราะสารประกอบขณะทำการปลูกในวิธี LPE จะมีสภาพเป็นของเหลว ซึ่งจะสามารถกำหนดอัตราการเกิดผลึกในหลุมของโครงสร้าง CSP ได้ แต่วิธีการอื่นเช่น MBE หรือ CVD นั้นสารประกอบขณะทำการปลูกจะมีสภาพเป็นไอ ซึ่งจะมีอัตราการเกิดผลึกเท่ากันทุกทิศทาง หรือแม้จะต่างกันก็ต่างกันไม่มาก ดังนั้นเราจึงเลือกวิธีการปลูกผลึกแบบ LPE



รูปที่ 2.17 แบบจำลองอัตราการเกิดผลึกที่ไม่เท่ากันของวิธีการปลูกผลึกแบบ LPE ในผลึกแผ่นฐานที่ไม่เป็นระนาบ (Non - Planar)

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าอัตราการปลูกผลึกแบบ LPE จะมีอัตราการเกิดผลึกที่ไม่เท่ากันระหว่างในส่วนที่เป็นหลุม CSP กับส่วนที่เป็น WING โดยอัตราการเกิดผลึกที่หลุม CSP (R_2)จะมีค่ามากกว่าอัตราการเกิดผลึกที่ WING (R_1) ซึ่งเราจะสามารถกำหนดความหนาของผลึกในแต่ละจุดที่เราต้องการได้ และเทคนิคการสร้าง GaAs/GaAlAs Laser Diode โดยวิธี LPE นั้นเป็นวิธีการปลูกชั้นผลึกอพิแทกซ์จากสารละลายบนผลึกฐานที่เป็นผลึกเดี่ยว โดยอาศัยกลไกการปรับตัวเองให้อยู่ในสถานะสมดุลของสารละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation Solution) ซึ่งทำให้เราสามารถปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นๆ ด้วยการละลายสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งด้วยสารอีกชนิดหนึ่ง เป็นผลทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นสามารถละลายได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น ดังตัวอย่างเช่น GaAs มีจุดหลอมเหลว 1238 °C ในขณะที่สารละลายของ GaAs+Ga มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่ามาก (เมื่อปริมาณของ Ga มีมากขึ้น จุดหลอมเหลวสารละลายยิ่งมีค่าต่ำ) ซึ่งกลไกนี้สามารถใช้ในการกำหนดและควบคุมปริมาณของ As ในของเหลว Ga ตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 โดยที่ค่าอุณหภูมิต่ำนั้น ปริมาณสูงสุดของ As ที่ละลายในของเหลว Ga มีค่าเฉพาะเท่านั้น ซึ่งสารละลายของ Ga ที่มีปริมาณของ As ละลายได้มากที่สุดที่อุณหภูมิต่ำๆ เราเรียกสารละลายชนิดนี้ว่า "สารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด" เมื่อสารละลายอิ่มตัวนี้ถูกลดอุณหภูมิลง สารละลายนี้จะปรับตัวให้เข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ ด้วยการ

คาย As จากสารละลายในปริมาณหนึ่ง เพื่อให้สารละลายเข้าสู่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจนในสภาวะใหม่ โดยปริมาณของ As ที่คายออกมานั้นจะทำปฏิกิริยากับ Ga เป็นสารประกอบของ GaAs ขึ้น



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณของ As ที่ละลายในของเหลว Ga และอุณหภูมิ

ซึ่งสารประกอบ GaAs ที่เกิดขึ้นจากกลไกนี้จะอยู่ในรูปของของแข็งและสามารถเรียงตัวกันเป็นผลึกใหม่เกาะบนผิวผลึกเดี่ยวของ GaAs ได้ ในทางปฏิบัติเราจะทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ใช้มีค่าในช่วง 0.1-2.0 °C/นาที ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมอัตราการเกิดผลึกสำหรับ LPE นี้ได้แก่ ทิศทางผลึกของผลึกเริ่มต้น (Orientation) อุณหภูมิอิมตัวของสารละลาย อัตราการลดอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก

2.3.1 เทคนิคการปลูกผลึกอีพิแทกซ์วิธี Liquid-phase Epitaxy (LPE)

2.3.1.1 เทคนิค Equilibrium-Cooling

วิธีนี้เป็นการปลูกผลึกอีพิแทกซ์ด้วยการนำผลึกฐานเริ่มต้นไปสัมผัสกับสารละลายอิมตัว โดยสารละลายมีอุณหภูมิอิมตัวคงที่จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของสารละลายลงด้วย อัตราคงที่ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกของวิธีนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} R t^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

โดยที่ d คือความหนาของผลึกที่ได้จากการปลูก C_s คือความหนาแน่นของอะตอมของสารละลายอิมิตัวซึ่ง C_s มีค่าตามสมการ $\frac{4}{a^3}$ และ a ในที่นี้คือค่าคงตัวของผลึก m คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมของสารละลาย D_{As} คือค่า Diffusivity ของ As ในสารละลาย Ga และ R คือ อัตราการลดลงของอุณหภูมิ และ t คือเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก

2.3.1.2 เทคนิค Step-Cooling

วิธีนี้เป็นการปลูกผลึกอพิแทกซ์ด้วยการนำผลึกฐานเริ่มต้นไปสัมผัสกับสารละลายอิมิตัวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิมิตัว ซึ่งเตรียมได้ด้วยการลดอุณหภูมิของสารละลายอิมิตัวลงจากอุณหภูมิอิมิตัวโดยมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิกงที่จนถึงค่าอุณหภูมิที่ทำการปลูกผลึก จึงนำแผ่นผลึกฐานสัมผัสกับสารละลายนี้ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกของวิธีสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta T t^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

โดย $\Delta T = T_s - T_0$ ซึ่ง T_s คืออุณหภูมิอิมิตัวของสารละลาย T_0 คืออุณหภูมิที่ปลูกผลึก

2.3.1.3 เทคนิค Supercooling

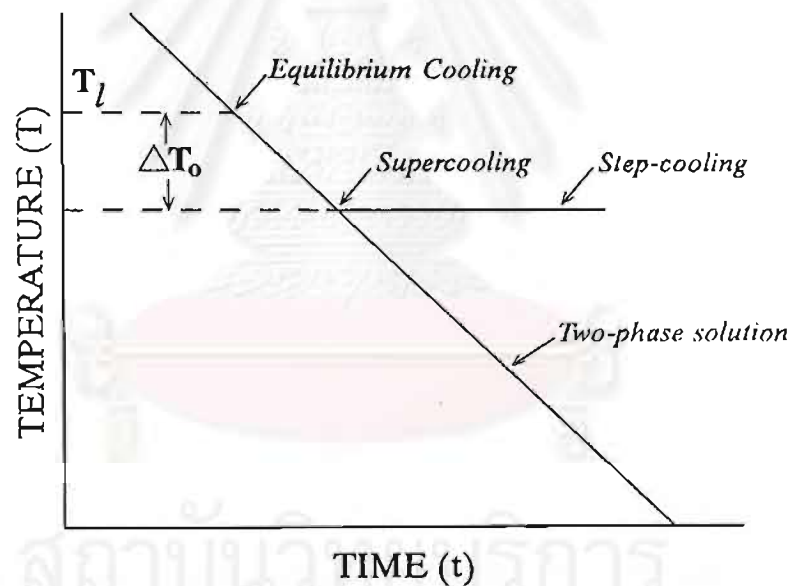
วิธีนี้เป็นการปลูกผลึกอพิแทกซ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเทคนิคของ Step cooling คือสารละลายจะถูกลดอุณหภูมิลงจากอุณหภูมิอิมิตัวด้วยอัตราคงที่จนถึงอุณหภูมิที่ปลูกผลึก จึงนำผลึกฐานมาสัมผัสกับสารละลาย แต่ในการปลูกวิธีนี้อุณหภูมิลดลงยังคงดำเนินต่อไปเช่นเดียวกับเทคนิค Equilibrium Cooling ซึ่งจุดนี้เป็นข้อแตกต่างจากวิธี Step Cooling สำหรับอัตราการเกิดผลึกของวิธีสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\Delta T t^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} R t^{\frac{3}{2}} \right) \quad (2.4)$$

จากสมการอัตราการเกิดผลึกของวิธี Supercooling นี้ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดผลึกของวิธี Supercooling เป็นผลรวมของอัตราการเกิดผลึกของวิธี Equilibrium Cooling และ Step Cooling ตามสมการข้างต้น ซึ่งเทคนิค Supercooling นี้จะมีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆ คือคุณภาพของผลึกที่ปลูกนั้นมีคุณภาพดี เหมาะสำหรับการใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง รวมถึงสิ่งประดิษฐ์ทางแสงของออปโตอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

2.3.1.4 เทคนิค Two-phase-Solution

ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์ของ LPE ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมักมีปัญหาของการตกตะกอนผลึก (Precipitates) ในเทคนิค Step Cooling และ Supercooling ในกรณีที่อุณหภูมิที่ปลูกผลึกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวมาก เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการใส่ผลึก GaAs ที่มีปริมาณมากเกินพอในสารละลาย โดยปริมาณของ GaAs ที่เหลืออยู่นี้จะเป็นตัวควบคุมมิให้เกิดการตกตะกอน และอัตราการเกิดผลึกของเทคนิคจะมีค่าต่ำที่สุด แต่ไม่สามารถที่คำนวณได้ทางทฤษฎี



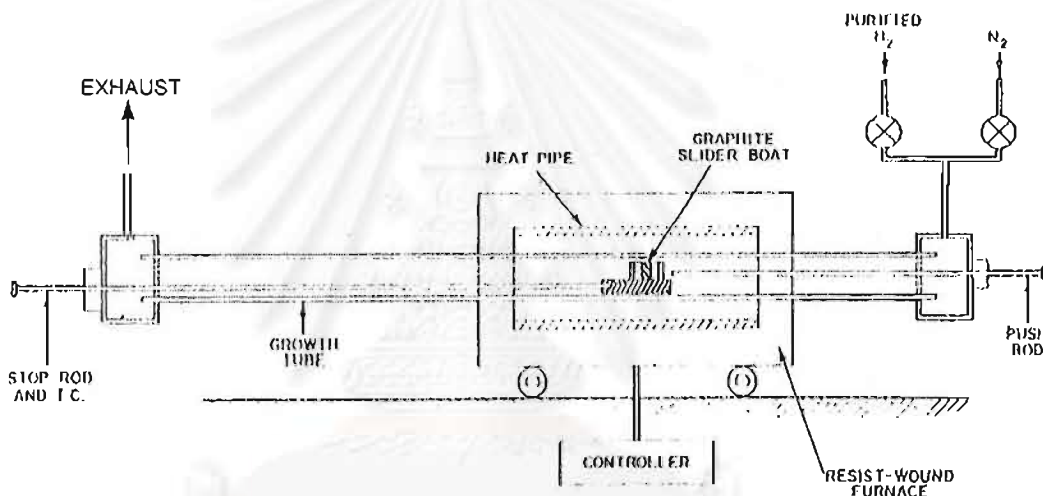
รูปที่ 2.19 แผนภูมิของอุณหภูมิและเวลาในกลไกการปลูกผลึกอพิแทกซ์ของเทคนิคต่างๆ โดยตำแหน่งที่ลูกศรชี้เป็นจุดเริ่มต้นของการปลูกผลึกของแต่ละเทคนิค

2.3.2 ชุดระบบอุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี LPE

ในการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี LPE เราสามารถกำหนดชนิดคุณสมบัติของชั้นผลึกสารกึ่งตัวนำได้จากส่วนผสมของสารละลาย สำหรับความหนาของชั้นผลึกสามารถกำหนดจากช่วงค่าเวลา

ที่ใช้ในการปลูก ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอิมตัวของสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้การปลูกผลึก และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ ดังนั้นกลไกที่สำคัญของการปลูกวิธีนี้คือการควบคุมอุณหภูมิที่สามารถทำได้ได้อย่างได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพและความหนาของชั้นผลึกได้อย่างแน่นอน

ระบบอุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกวิธี LPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ใช้กับวิธีการเลื่อนผลึกฐาน (Substrate) ผ่านได้สารละลายอิมตัว ซึ่งมีแผนภูมิตามรูปที่ 2.20 โดยระบบนี้ประกอบด้วยเบ้าหลอม (Boat) แบบหลายเบ้า (Multitbin) ที่ทำจากกราไฟต์ (Graphite) ท่อแก้วระบบควบคุมอุณหภูมิ ชุดขดลวดความร้อนที่เคลื่อนที่ได้สำหรับการเพิ่มหรือลดอย่างรวดเร็ว ระบบเครื่องกรองก๊าซเพื่อให้ก๊าซมีความบริสุทธิ์สูง (99.999 %) ระบบตรวจความชื้น (Hygrometer)



รูปที่ 2.20 แผนภาพของชุดระบบอุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกวิธี LPE

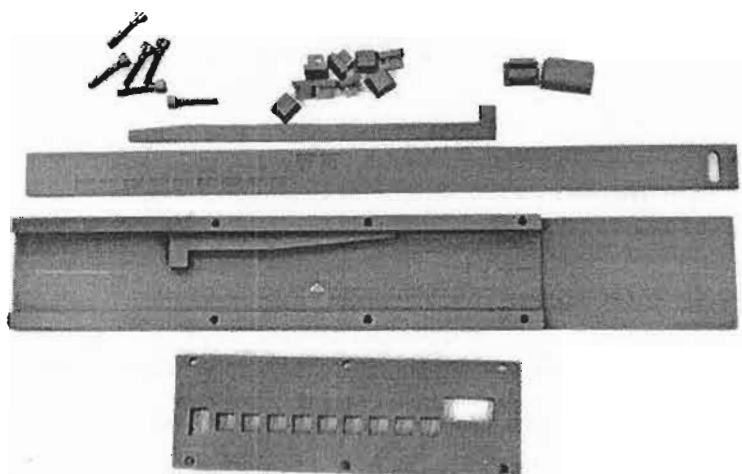
ในการปลูกผลึกนั้นสารละลายจะถูกเตรียมและผสมลงในเบ้าภายในเบ้าหลอม ซึ่งส่วนผสมของสารละลายในเบ้าหนึ่งจะถูกกำหนดโดยชนิดของชั้นผลึกที่ต้องการ และจำนวนของสารละลายจะถูกกำหนดจากโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ในแต่ละโครงสร้างนั้นสารละลายที่ใช้การปลูกผลึกจะถูกเตรียมและผสมลงในเบ้าหลอมโดยมีปริมาณที่เหมาะสมที่จะได้สารละลายอิมตัวที่อุณหภูมิได้กำหนดไว้ จากนั้นสารละลายจะถูกเผาที่อุณหภูมิที่ได้กำหนดจนอิมตัวโดยมีเบ้าหลอมกราไฟต์เป็นภาชนะรองรับ ซึ่งการเผานี้กระทำภายใต้บรรยากาศก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ภายในท่อแก้ว ในระบบนี้จะต้องมีการตรวจสอบป้องกันไม่ให้น้ำรอยรั่วโดยเด็ดขาด เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซติดไฟได้เมื่อถูกความร้อนและมีก๊าซออกซิเจนอยู่ด้วย ดังนั้นในระบบนี้เราสามารถสังเกตได้จากค่าความชื้นในระบบภายในท่อแก้วที่ลดลงภายหลังการไล่ด้วยก๊าซ

ไนโตรเจนและไฮโดรเจนตามลำดับ สำหรับการเผาสารละลายให้เป็นสารละลายอิมิตัวจะใช้เวลา 3-4 ชั่วโมงสำหรับสารละลาย GaAs+Ga และ GaAs+Ga+Al จากนั้นเป็นขั้นตอนการปลูกผลึกโดยลดอุณหภูมิของสารละลายลง และทำการปลูกผลึกโดยการเลื่อนผลึกฐานสัมผัสกับสารละลาย หลังการสร้างชั้นผลึกโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สิ้นสุดลง จุดขดลวดความร้อนจะถูกเลื่อนออกจากตำแหน่งที่เข้าหลอมวางอยู่ จนกระทั่งเข้าหลอมเย็นลงก็จะทำการไล่ก๊าซไฮโดรเจนในท่อแก้วออกด้วยก๊าซไนโตรเจน และทำการนำผลึกฐานที่ผ่านการปลูกผลึกแล้วไปผ่านกระบวนการต่อไป

จุดสำคัญของการปลูกวิธี LPE คือความสม่ำเสมอของอุณหภูมิของเข้าหลอม ซึ่งตัวกำหนดหรือควบคุมคือจุดขดลวดความร้อนที่มีขดลวด 3 ชุดที่มีความยาวเหมาะสมกับขนาดของเข้าหลอม และชุดระบบควบคุมอุณหภูมิ 3 ชุดเช่นกัน

สำหรับเข้าหลอมนั้นสำหรับงานวิจัยมีลักษณะตามที่แสดงในรูปที่ 2.21 โดยส่วนประกอบของเข้าหลอมกราฟไฟต์ประกอบด้วยส่วน Substrate Holder ที่จะเป็นตัวรองรับแผ่น GaAs Source ที่วางใต้สารละลายขณะเผาเพื่อให้สารละลายอิมิตัวแล้วและแผ่น GaAs ผลึกฐานเริ่มต้น (Substrate) ทั้งเป็นตัวการช่วยในการเคลื่อนที่ของผลึกฐานไปสัมผัสสารละลายในกระบวนการปลูกผลึก ส่วน Tapper Slider เป็นส่วนที่ช่วยทำให้การเกิดการเคลื่อนที่ของ Substrate Holder ในแนวตามขวางเพื่อเลื่อนให้ GaAs Source หลุดออกจากสารละลายและทำให้ Substrate อยู่ในแนวที่สามารถเคลื่อนผ่านตามแนวการเรียงของเข้าได้ ส่วนช่องเข้าหลอมสำหรับสารละลายเป็นส่วนที่รองรับสารละลายและมีช่องสำหรับรองรับ Cover ที่ใช้ปิดป้องกันการเสียหายของผิวผลึกฐานในขณะที่ชุดเข้าหลอมถูกเผาเพื่อให้สารละลายอิมิตัว ส่วนฐานเป็นส่วนรองรับชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ Substrate Holder Tapper และส่วนเข้าหลอม โดยมี Screw เป็นยึดส่วนฐานและส่วนช่องเข้าหลอม และมีหน้าที่เป็นตัวกำหนดแนวการเคลื่อนที่ของส่วนทั้งส่วน Substrate Holder และ Tapper สำหรับส่วนฝาปิดเป็นส่วนที่ใช้ปิดเข้าหลอมของสารละลายแต่ละเข้า เพื่อป้องกันการระเหยของสารบางตัว ได้แก่ Te และ Zn อันเป็นสารเจือปน (Dopant) ที่สามารถระเหยได้ง่าย ซึ่งผลของการระเหยนี้ทำให้ระบบสกปรก และมีผลต่อสารละลายอื่นๆ ในขณะที่เข้าหลอมร้อนอยู่ หน้าที่ที่สำคัญของฝาปิดอีกประการคือ กดทับสารละลายเพื่อป้องกันการเคลื่อนไหวของสารละลายในขณะที่ทำการปลูกผลึก เป็นผลให้ชั้นผลึกที่ได้มีความเรียบสม่ำเสมอ โดยชุดเข้าหลอมที่ประกอบกันอย่างสมบูรณ์ได้แสดงในรูปที่

2.22



รูปที่ 2.21 ชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของชุดเบ้าหลอม



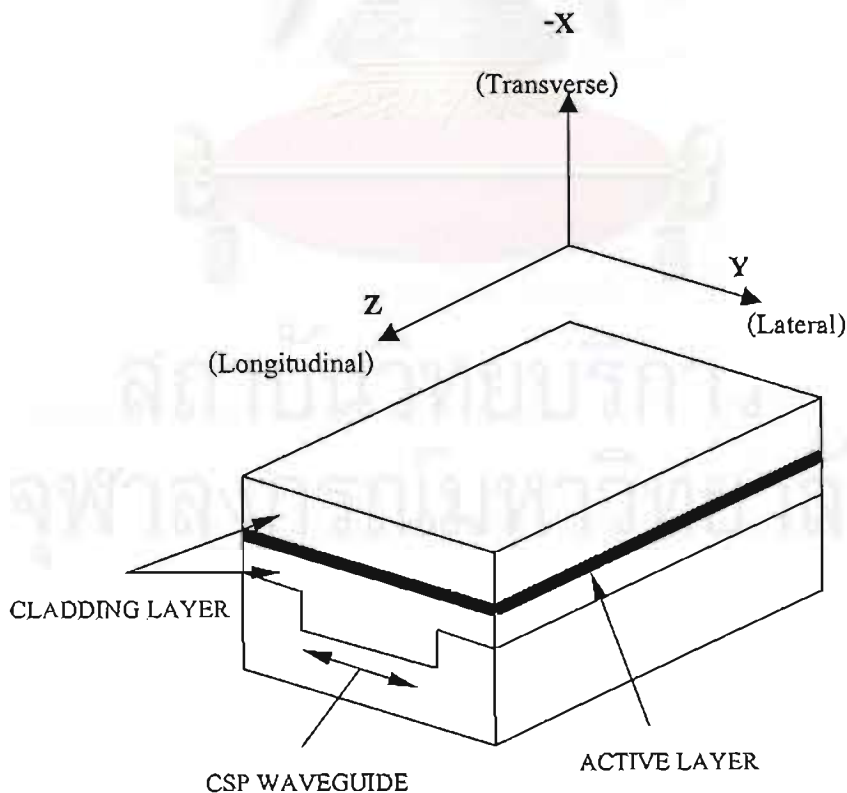
รูปที่ 2.22 ชุดเบ้าหลอมที่ประกอบอย่างสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

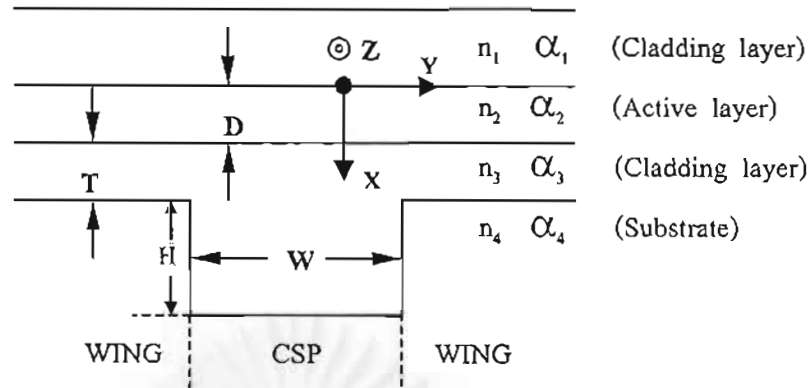
บทที่ 3

การวิเคราะห์โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด

ในบทที่ 2 นั้นเราได้ทราบถึงกลไกการเก็บกักแสงของเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ CSP แล้ว ต่อไปในที่นี้เราจะทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมในการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด เช่น ค่าความหนาของชั้นแอกทีฟ , ค่าความหนาของชั้น Cladding เป็นต้น โดยถ้าเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ Heterostructure นั้นเราจะสนใจคลื่นแสงในโหมดของสนามไฟฟ้า (TE mode) มากกว่าคลื่นแสงในโหมดของสนามแม่เหล็ก(TM mode) เพราะในโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ Heterostructure นั้นจะมีค่าการสะท้อนกลับที่ผิวสะท้อน (facet reflectivity) สูง จึงเหมาะสมที่จะใช้ TE mode ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด [2] ซึ่งเราจำเป็นต้องรู้จักโครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดก่อน เพื่อกำหนดส่วนประกอบต่างๆ ในการสร้าง โดยโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างนั้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข)



รูปที่ 3.1(ก) แผนภาพ โครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP แบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.1(ข) ภาพจำลอง โครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะใช้ในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ

โดยเรามีค่าตัวแปรที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมคือค่า ความหนาของชั้น Active (D), ความหนาของชั้น Cladding (T) และความกว้างของร่องนำคลื่นแสงแบบ CSP (W) และเรามีตัวแปรที่กำหนดค่าไว้แล้ว ดังนี้คือ

$n_1 = n_3$ คือ ค่าดัชนีหักเหของชั้น Cladding

n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหของชั้น Active

n_4 คือ ค่าดัชนีหักเหของวัสดุแผ่นฐาน(Substrate)

α_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorbtion Coefficient) ของชั้น Cladding ชั้นที่ 1

α_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น Cladding ชั้นที่ 2

α_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น Cladding ชั้นที่ 3

α_4 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น Cladding ชั้นที่ 4

3.1 ความรู้พื้นฐานของสมการ Maxwell's Equation

สมการ Maxwell' s Equation [10],[11] เป็นทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสำคัญที่ช่วยอธิบายปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทฤษฎีกล่าวถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ρ (Electric Charge Density) สนามไฟฟ้า E (Electric Field) ค่าขจัดทางไฟฟ้า D (Electric Displacment) สนามแม่เหล็ก H (Magnetic Field) และค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็ก B (Magnetic Induction) และ สมการของความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่รู้จักกันในชื่อของ Boundary Condition ซึ่งสมการ Maxwell's Equation และ

Boundary Condition มีความสำคัญอย่างมากสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากการวิเคราะห์ลักษณะการ Propagation ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการ Maxwell's Equation สำหรับสนามไฟฟ้าคือ

$$\frac{\partial E^2}{\partial x^2} + [K^2 n^2 - \beta^2]E = 0 \quad (3.1)$$

สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\frac{\partial H^2}{\partial x^2} + [K^2 n^2 - \beta^2]H = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่ K คือค่า Wave Propagation Constant ของแสงในสูญญากาศ

n คือค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

β คือค่า Group Velocity ของตัวกลาง

Boundary Condition

ที่ผิวรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่ไม่มีประจุอิสระ ซึ่งมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในวัสดุทั้งสอง ความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในเนื้อวัสดุทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

ค่าขจัดไฟฟ้าในแนวตั้งฉากของผิวต่อมีค่าตามสมการ

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (3.3)$$

ค่าสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผิวต่อมีค่าตามสมการ

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (3.4)$$

ค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็กในแนวตั้งฉากของผิวต่อมีค่าตามสมการ

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (3.5)$$

ค่าสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวต่อมีค่าตามสมการ

$$H_{11} = H_{12} \quad (3.6)$$

3.2 การวิเคราะห์ในโหมดของ Transverse

ในโครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่แสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข) นั้นเราจะกำหนดให้สนามไฟฟ้ามีค่าตามแนวแกน Z ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพจน์ในสมการที่ (3.7)

$$E_z = e^{j(\beta_{xz} \cdot \omega t)} \quad (3.7)$$

โดย ω คือค่าความถี่เชิงมุม (angular frequency) และ β_x คือ ค่าคงที่ของการแผ่กระจายคลื่น (propagation constant) ในแนว longitudinal โดยเมื่อเราคิดการแผ่กระจายคลื่นเฉพาะใน TE mode โดยตั้งต้นจากสมการ Maxwell's wave equation ดังในสมการที่ (3.8) เราก็จะได้สมการของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นของโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดดังแสดงในสมการที่ (3.9)

$$\nabla^2 E + \epsilon(x,y) k_0^2 E = 0 \quad (3.8)$$

$$E(x) = \begin{cases} A_1 e^{jK_1 x} & ;(X < 0) \\ B_1 e^{jK_2 x} + B_2 e^{-jK_2 x} & ;(0 < X < D) \\ C_1 e^{jK_3 (x-D)} + C_2 e^{-jK_3 (x-D)} & ;(D < X < D+T) \\ D_1 e^{jK_4 (x-D-T)} & ;(X > D+T) \end{cases} \quad (3.9)$$

โดย D และ T คือค่าความหนาของชั้น Active และชั้น Cladding ตามลำดับของรูปที่ 3.1 (ข) และค่าการแผ่กระจายคลื่น K_m จะนิยามให้มีค่าเท่ากับสมการที่ (3.10)

$$K_m = ((k n_m^*)^2 - \beta_x^2)^{1/2} \quad m = (1, 2, 3, 4) \quad (3.10)$$

ซึ่งในสมการที่ (3.10) ให้ $k = 2\pi / \lambda$ (free space propagation constant), λ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่เปล่งออกมา และ n_m^* คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแต่ละชั้น

$$n'_m = n_m + j(\alpha_m - g_m) / (2k) \quad (3.11)$$

โดยเรากำหนดให้ n_m , α_m และ g_m คือค่าดัชนีหักเหจริง (real refractive index), ค่าการสูญเสียในสารกึ่งตัวนำ (material loss) และ ค่าอัตราการขยายในชั้นสารกึ่งตัวนำ (gain in the mth layer) ตามลำดับ และเราได้นิยามค่า g_m ไว้ในสมการที่ 3.12

$$g_m(y) = 45 (J(y) / D) - \alpha_0 \quad (3.12)$$

โดย $J(y)$ คือค่า inject current density ซึ่งมีหน่วยเป็น (kA/cm²) และเราได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ในแต่ละชั้นดังนี้ $\alpha_0 = 190 \text{ cm}^{-1}$ (α_0 คือ background absorption coefficient at lasing wavelength), $\alpha_1 = \alpha_3 = 7 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha_2 = 20 \text{ cm}^{-1}$ ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ คือ free carrier absorption loss, และ $\alpha_4 = 8000 \text{ cm}^{-1}$ (α_4 คือ band-to-band absorption losses in substrate)

และเราได้กำหนดค่าดัชนีหักเหของแสงในแต่ละชั้นอพิแทกซ์ดังนี้ ที่ความยาวคลื่น 0.78 ไมโครเมตร (สีแดง) เรากำหนดให้ [3] $n_1 = n_3 = 3.380$, $n_2 = 3.685$, $n_4 = 3.80$ และเมื่อนำเอาสมการที่ 3.9 มาหาค่าสมการความต่อเนื่องของคลื่นใน Boundary condition เราก็จะได้สมการที่ 3.13 ถึงสมการที่ 3.17

$$K_2 D = [-(j/4) \ln(u^2 + v^2)] + [(1/2)(\text{Arg}(u + jv))] \quad (3.13)$$

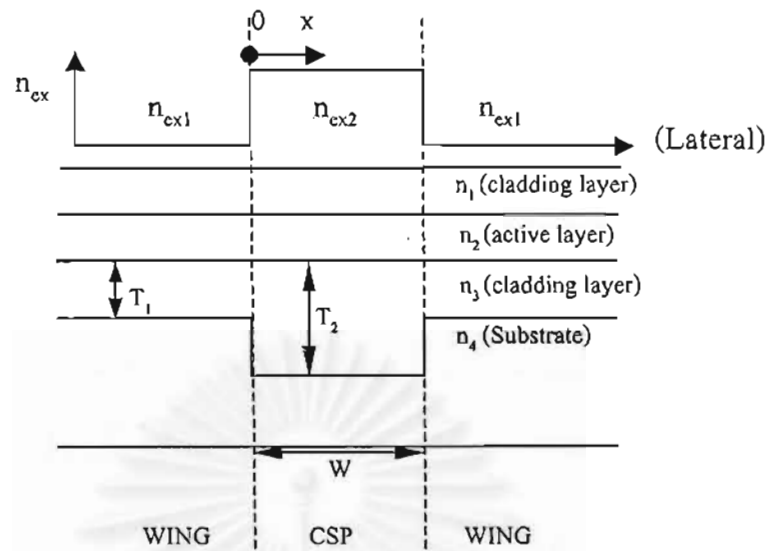
โดยให้;

$$u = \text{Re} \left\{ \frac{(K_2 + K_1) [(K_2 + K_3) + (K_2 - K_3) S_4]}{(K_2 - K_1) [(K_2 - K_3) + (K_2 + K_3) S_4]} \right\} \quad (3.14)$$

$$v = \text{Im} \left\{ \frac{(K_2 + K_1) [(K_2 + K_3) + (K_2 - K_3) S_4]}{(K_2 - K_1) [(K_2 - K_3) + (K_2 + K_3) S_4]} \right\} \quad (3.15)$$

$$S_4 = \frac{(K_3 - K_4) + (K_3 + K_4)}{(K_3 + K_4) + (K_3 - K_4)} \exp(2j K_3 T) \quad (3.16)$$

$$\text{Arg}(u + jv) = \begin{cases} \tan^{-1}(v/u) & ;(u > 0, v > 0) \\ \tan^{-1}(v/u) + \pi & ;(u < 0) \\ \tan^{-1}(v/u) + 2\pi & ;(u > 0, v < 0) \end{cases} \quad (3.17)$$



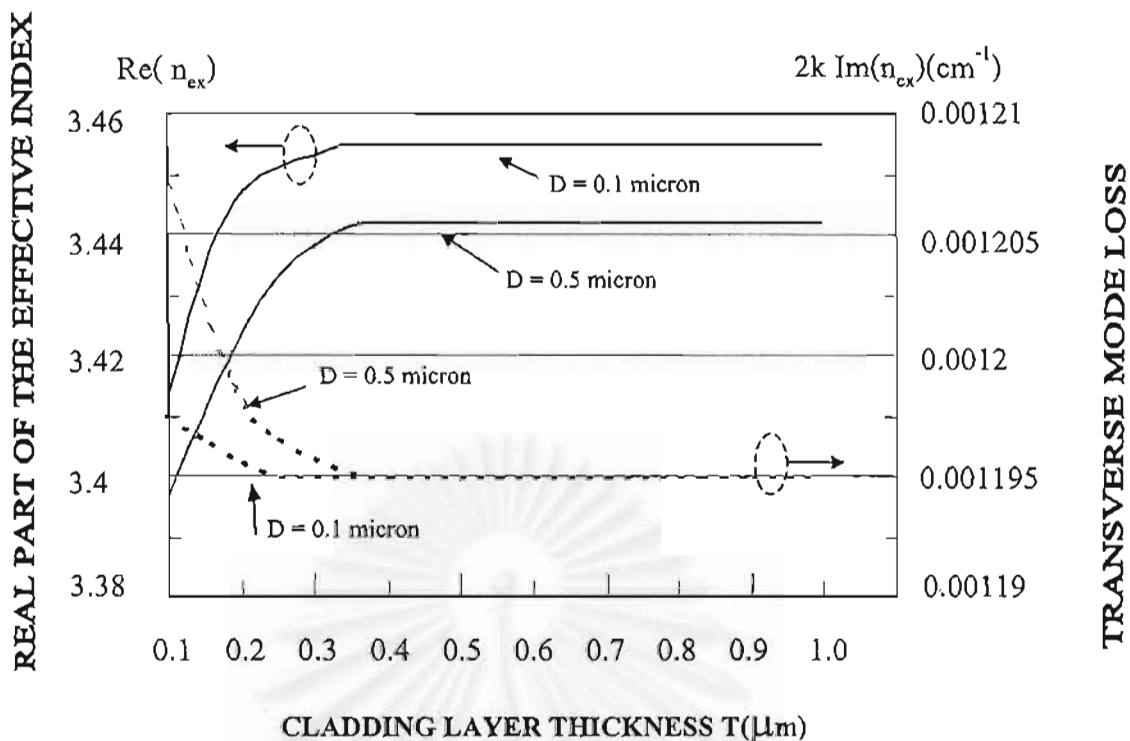
รูปที่ 3.2 แผนภาพค่าดัชนีหักเหประสิทธิภาพที่ WING และที่ CSP ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน

โดยจากรูปที่ 3.2 กลไกการเก็บกักแสงในแนว Lateral เกิดขึ้นจากความหนาของชั้น cladding ที่บริเวณ CSP (T_2) มีค่ามากกว่าความหนาของชั้น cladding ที่ WING (T_1) จึงส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหประสิทธิภาพที่ CSP มีค่ามากกว่าที่ WING จึงเกิดการเก็บกักแสงได้

และเรานิยามให้ n_{ex} คือค่าของดัชนีหักเหประสิทธิภาพ (effective index) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการหา โดยให้มีค่าดังสมการที่ 3.18

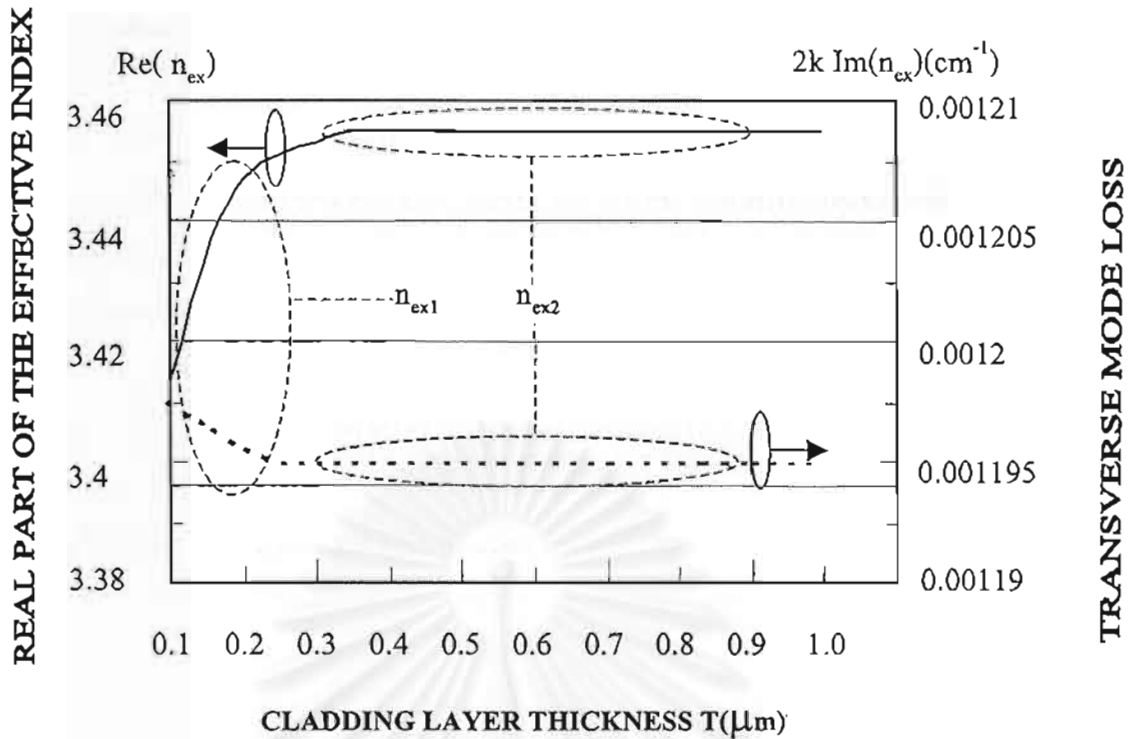
$$n_{ex} = \beta_x / k \quad (3.18)$$

และเมื่อเรานำเอาสมการที่ 3.10 ถึงสมการที่ 3.18 มาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นแอกทีฟ (D) และค่าความหนาของชั้น cladding (T) เราจะได้กราฟในรูปที่ 3.3(ก)



รูปที่ 3.3 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (n_{ex}) กับค่าความหนาของชั้น cladding (T) ของโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP ใน TE_0 mode (ที่ $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$, $n_1 = n_3 = 3.380$, $n_2 = 3.685$, $n_4 = 3.80$ และ D มีค่าเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ และ $0.5 \mu\text{m}$)

โดยกราฟที่ 3.3(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นเปลือก (cladding layer) และค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีสองค่า คือค่าจริงของดัชนีหักเหประสิทธิผล (real part of effective index [n_{ex}]) ซึ่งแสดงเป็นกราฟเส้นทึบ และ ค่าจินตภาพของดัชนีหักเหประสิทธิผล หรือ ค่าการสูญเสียในแนว Transverse (transverse mode loss [$\text{Im}(n_{\text{ex}})$]) ซึ่งแสดงเป็นกราฟเส้นประ โดยจากกราฟที่ 3.3(ก) นี้เราจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ Cladding Layer เท่าๆกัน การสูญเสียประสิทธิภาพของแสง (transverse mode loss) จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาของชั้น Active เพิ่มมากขึ้น แสดงว่าเงื่อนไขในการกำหนดความหนาของชั้น Active คือ ยิ่งบางยิ่งดี แต่เราต้องทำการปลูกชั้นอพิแทกซีในวิธี LPE (จากเหตุผลในหัวข้อที่ 2.3 ของบทที่ 2) ซึ่งวิธีการปลูกผลึกแบบนี้จะสามารถทำการปลูกชั้นของอพิแทกซีได้บางที่สุดประมาณ 0.1 ไมครอน ดังนั้นเราจึงเลือกความหนาของชั้น Active ให้เท่ากับ 0.1 ไมครอน ($D = 0.1 \mu\text{m}$) ดังแสดงในกราฟที่ 3.3(ข) โดยในกราฟรูปนี้เราจะเลือกค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลให้กับบริเวณส่วนที่เป็น CSP (ส่วนที่เป็นร่องกว้าง W) และกับส่วนที่เป็นปีก (WING) โดยเราจะเลือกค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลในส่วนที่เป็น CSP ให้มีค่ามากกว่าในส่วนที่เป็น WING เพื่อให้เกิดการเก็บกักแสงในแนว Lateral ได้ (จากกฎการหักเหของแสงใน



รูปที่ 3.3 (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (n_{ex}) กับค่าความหนาของชั้น cladding (T) ของโครงสร้างเลเซอร์ไดโอดแบบ CSP สำหรับ TE_0 mode (ที่ $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$, $n_1 = n_3 = 3.380$, $n_2 = 3.685$, $n_4 = 3.80$ และ D มีค่าเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$)

บทที่ 2) ซึ่งเมื่อเราเลือกค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล เราก็จะได้ความหนาของชั้นเปลือกที่เราต้องการปลูก ซึ่งก็คือการกำหนดความหนาของชั้น Cladding (T) และความลึกของร่อง CSP (H)

จากรูปที่ 3.1(ข)

สรุปสำหรับกรณี TE_0 เราได้ค่าความหนาของชั้นแอกทีฟ $D = 0.1 \mu\text{m}$

เราได้ค่าความหนาของชั้นเปลือก $T = 0.1$ ถึง $0.3 \mu\text{m}$

(n_{ex} มีค่าประมาณ 3.430 ถึง 3.453)

และ เราได้ค่าความลึกของร่อง CSP , H มีค่าตั้งแต่ $0.4 \mu\text{m}$ ขึ้นไป

(n_{ex} มีค่าประมาณ 3.455)

ซึ่งการที่เราใช้ค่าประมาณนั้น เพราะว่ายังเหลือค่าความกว้างของร่อง CSP (W) อีกตัวแปรหนึ่งที่ยังไม่ได้หาค่า โดยค่า W นี้มีความสัมพันธ์กับค่าของ T และ H ด้วย

3.3 การวิเคราะห์ในโหมดของ Lateral

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาในแนว Lateral ซึ่งเราจะหาค่าของ W โดยการกำหนดค่าของที่เหมาะสมของ ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลของ WING (n_{cx1}) และ ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลของร่อง CSP (n_{cx2}) โดยค่าของ n_{cx1} และ n_{cx2} ที่เหมาะสมก็คือ สามารถกำหนดค่าความกว้างของร่อง CSP แล้วทำให้แสงเลเซอร์ที่เปล่งออกมาเป็น โหมดเดี่ยว (Single Mode)

โดยเราทำการเอาค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลที่เลือกได้ (n_{cx1} จากบริเวณ WING และ n_{cx2} จากบริเวณ CSP ในรูปที่ 3.2) มาใช้หาค่าคำตอบของสมการ โดยในสมการที่ 3.13 นั้นได้ค่าของสนามไฟฟ้าแต่ละชั้น (พิจารณา 3 ชั้นอทิแพกซี)

$$E(x) = \begin{cases} A_1 e^{jk_1 x} & ;(X < 0) \\ B_1 e^{jk_2 x} + B_2 e^{-jk_2 x} & ;(0 < X < W) \\ C_1 e^{jk_3 x} & ;(X > W) \end{cases} \quad (3.19)$$

โดย W คือค่าความกว้างของร่อง CSP และค่าการแผ่กระจายคลื่น K_m จะนิยามให้มีค่าเท่ากับสมการที่ (3.20)

$$K_m = ((k n_m^*)^2 - \beta_x^2)^{1/2} \quad m = (1, 2, 3) \quad (3.20)$$

และ n_m^* คือค่าดัชนีหักเหของแสงแต่ละชั้น โดย n_{cxm} ก็คือค่าดัชนีหักเหของแสงที่เกิดขึ้นในแนว Lateral ดังแสดงในสมการที่ 3.21

$$n_m^* = n_{cxm} \quad ;(m = 1,2) \quad (3.21)$$

เมื่อนำเอาสมการที่ 3.19 มาหาค่าสมการความต่อเนื่องของคลื่นใน Boundary condition 151 ก็จะได้สมการที่ 3.22 ถึงสมการที่ 3.26

$$K_2 W = [-(j/4) \ln(u^2 + v^2)] + [(1/2)(\text{Arg}(u + jv))] \quad (3.22)$$

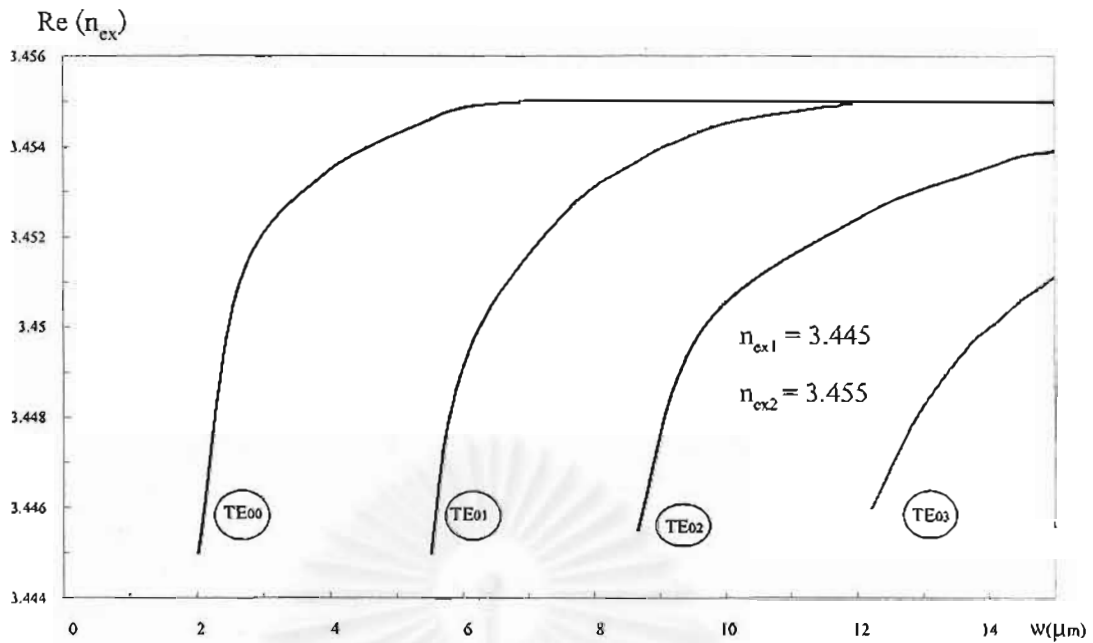
$$\text{โดยให้}; \quad u = \text{Re} \left\{ \frac{(K_2 + K_1) [(K_2 + K_3) + (K_2 - K_3)]}{(K_2 - K_1) [(K_2 - K_3) + (K_2 + K_3)]} \right\} \quad (3.23)$$

$$v = \text{Im} \left\{ \frac{(K_2 + K_1) [(K_2 + K_3) + (K_2 - K_3)]}{(K_2 - K_1) [(K_2 - K_3) + (K_2 + K_3)]} \right\} \quad (3.24)$$

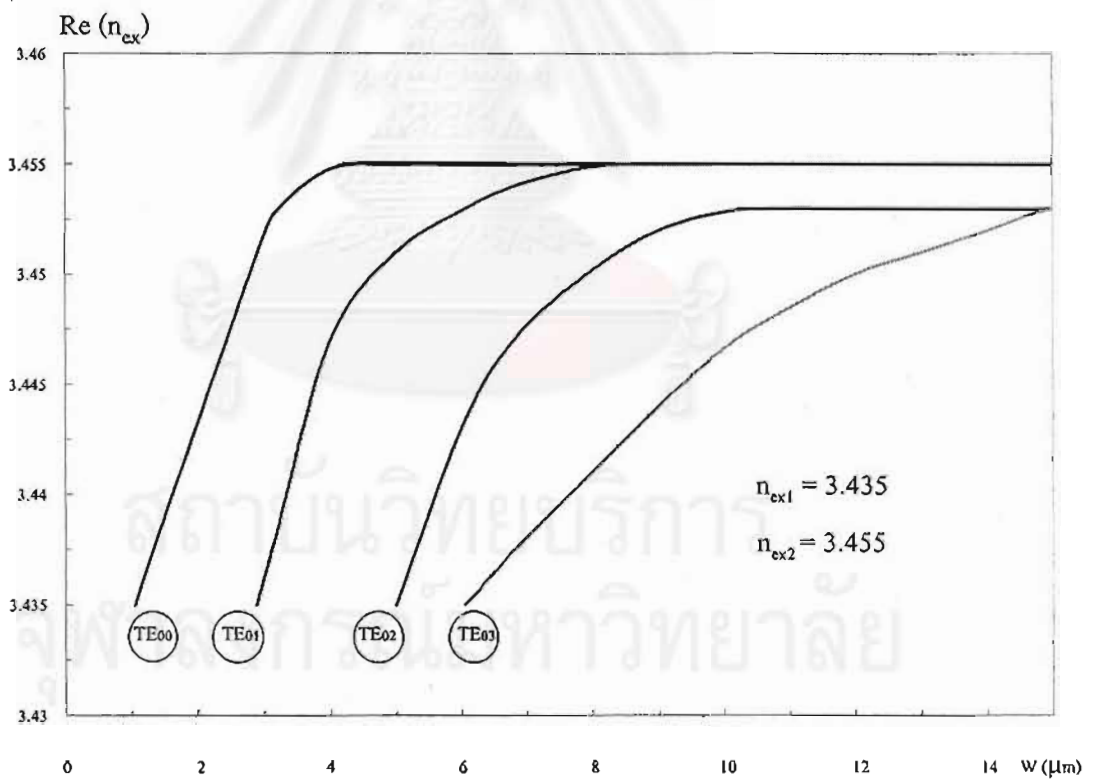
$$\text{Arg}(u + jv) = \begin{cases} \tan^{-1}(v/u) & ;(u > 0, v > 0) \\ \tan^{-1}(v/u) + \pi & ;(u < 0) \\ \tan^{-1}(v/u) + 2\pi & ;(u > 0, v < 0) \end{cases} \quad (3.25)$$

$$n_{\text{cxn}} = \beta_x / k \quad (3.26)$$

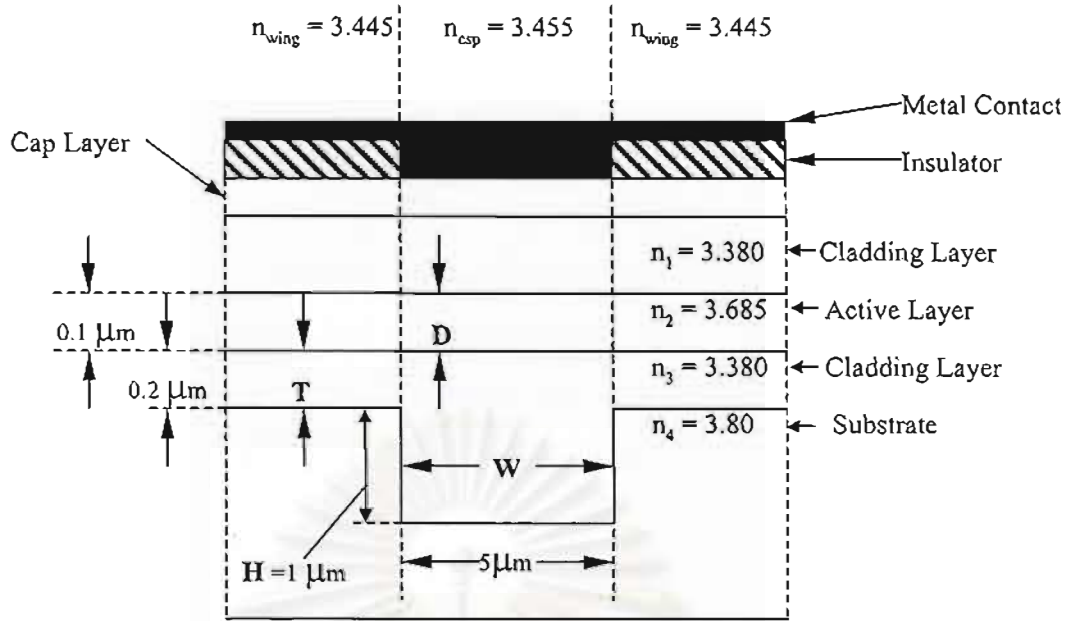
โดยเมื่อเรานำเอาสมการที่ 3.20 ถึงสมการที่ 3.26 มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความกว้างของร่อง CSP (ค่า W ในรูปที่ 3.2) และ ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในแนว Lateral (n_{cxn}) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.4(ก) และ 3.4(ข) โดยในกราฟรูปที่ 3.4(ก) นั้นเราเลือกค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล ($n_{\text{cx2}} - n_{\text{cx1}}$) เท่ากับ 0.01 ส่วนในกราฟรูปที่ 3.4(ข) เราเลือกค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลเท่ากับ 0.02 ซึ่งถ้าเราต้องการให้แสงเลเซอร์ที่ได้เป็นโหมดเดียว จะเห็นได้ว่ากราฟในรูปที่ 3.4(ก) นั้นสามารถให้ค่า W (ความกว้างของร่อง CSP) มากกว่ากราฟในรูปที่ 3.4(ข) ซึ่งก็หมายความว่า ถ้าค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหประสิทธิผลน้อย จะทำให้ค่า W ที่ทำให้เกิดโหมดเดียวของแสงมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าเรากำหนดค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหประสิทธิผลให้มีค่าน้อยๆ ก็จะทำให้ในแนว Lateral มีการเก็บกักแสงได้ไม่ดีตามไปด้วย [2] ดังนั้นเราจึงเลือกค่าความกว้างของร่อง CSP ที่เหมาะสม คือมีค่าเท่ากับ 5 ไมครอน (โดยที่เลือก $n_{\text{cx1}} = 3.445$ และเลือก $n_{\text{cx2}} = 3.455$) และจะทำได้ความหนาของชั้น Cladding (T) เท่ากับ 0.2 ไมครอน (จากกราฟในรูปที่ 3.3(ข)) เพราะฉะนั้นเราก็จะได้โครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะนำไปสร้างดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของร่อง CSP (W) กับ
ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล ในแนว Lateral ($\text{Re}[n_{ex}]$)
ที่มีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.01 (3.455 – 3.445)



รูปที่ 3.4(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของร่อง CSP (W)
กับค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล ในแนว Lateral ($\text{Re}[n_{ex}]$)
ที่มีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.02 (3.455 – 3.435)



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางของโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะทำการสร้าง

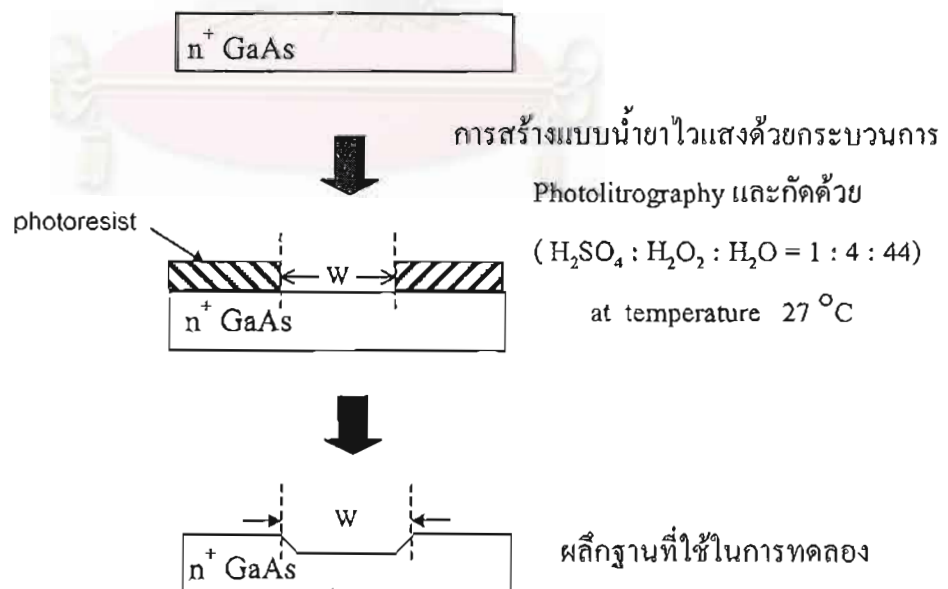
บทที่ 4.

การปลูกผลึกบนผลึกฐานที่ไม่เรียบ

จากบทที่ 3 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง CSP จาก GaAlAs ในย่านความยาวคลื่น 0.78 ไมครอน สำหรับในบทนี้เป็นการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับสร้างปลูกด้วยเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากสถานะของเหลว (LPE) สำหรับการปลูกผลึกส่วนเปลือกด้านล่างที่ได้เงื่อนไขตามที่ได้ผลการคำนวณที่ได้และผลที่ได้จากการทดลองนี้

4.1 การเตรียมผลึกฐาน

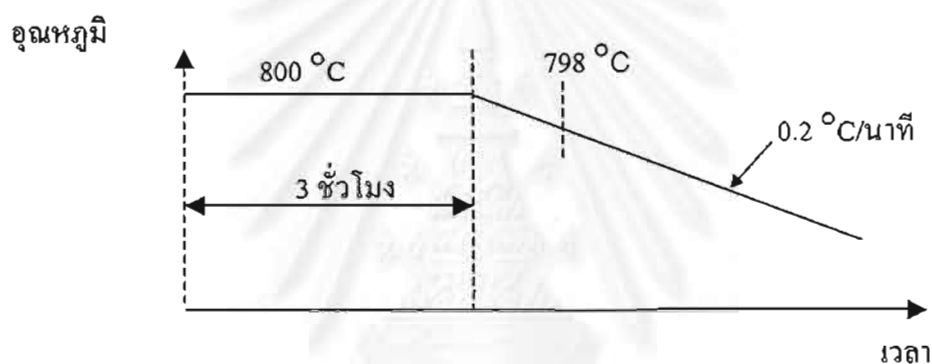
สำหรับการเตรียมผลึกฐานในการทดลองเริ่มต้นจากผลึกฐาน (100) GaAs ชนิดเอ็น ซึ่งรายละเอียดของผลึกฐานนี้ดูได้จากภาคผนวก โดยขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีขนาด $11 \times 11 \text{ mm}^2$ จากนั้นทำความสะอาด จากนั้นทำการกัดขึ้นรูปของร่อง (Channel) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและกระบวนการกัดด้วยสารเคมี (Chemical Etching) ซึ่งกระบวนการเตรียมผลึกสำหรับการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 (รายละเอียดของกระบวนการต่างๆได้จากภาคผนวก)



รูปที่ 4.1 แผนภาพของกระบวนการเตรียมผลึกฐาน

4.2 การทดลอง

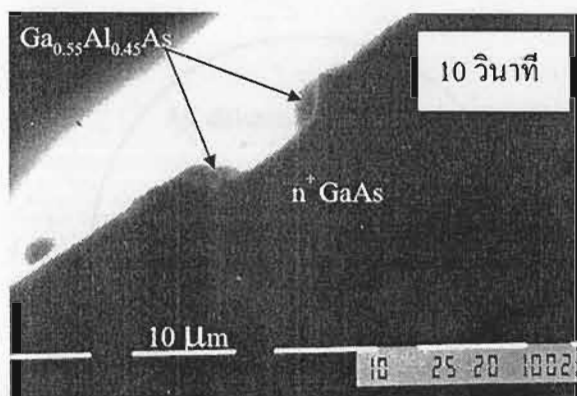
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขการปลูกอิพิแทกซ์จากสถานะของเหลว (LPE) ที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 โดยเงื่อนไขการปลูกนี้อิงเงื่อนไขต่างๆ ของการสร้างไดโอดเลเซอร์อูณหภูมิต่ำสารละลาย 800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การปลูกผลึกเริ่มต้นที่ 798°C และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ $0.2^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ แผนภาพอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองนี้ดังรูปที่ 4.2 สารละลายที่ใช้ในการทดลอง $\text{Ga} = 2$ กรัม $\text{Al} = 2.8$ มิลลิกรัม และ $\text{Sn} = 200$ มิลลิกรัม ซึ่งจะได้ผลึกของสารประกอบ $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ สำหรับผลึกฐานนั้นขนาดของร่องที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าความลึก 1 ไมครอนค่าความกว้าง 5 ไมครอนและลึก 1 ไมครอนกว้าง 10 ไมครอน ตัวแปรที่ต้องการศึกษาในการทดลองนี้คือผลของเวลาที่ใช้ในการปลูกตั้งแต่ 10-300 วินาทีและขนาดความกว้างของผลึกฐาน



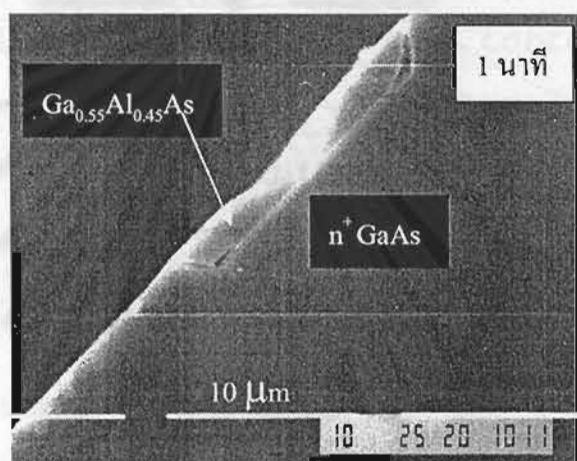
รูปที่ 4.2 แผนภาพอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองปลูกผลึกบนผลึกฐานที่ไม่เรียบ

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

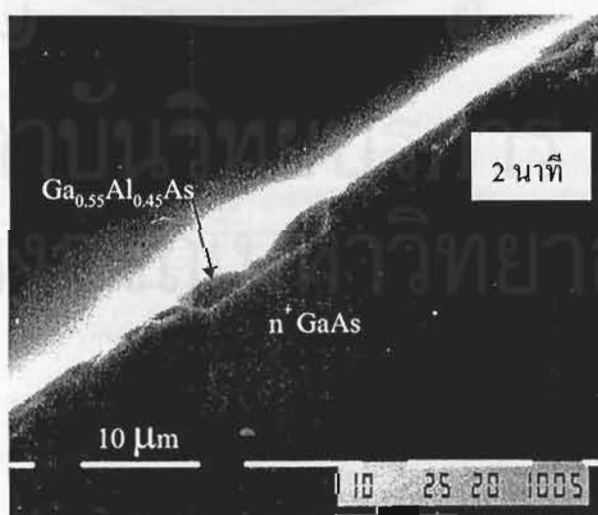
ในการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดนั้นเราเลือกที่จะปลูกผลึกด้วยวิธี LPE (Liquid Phase Epitaxy) ดังเหตุผลที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยการปลูกผลึกบนผลึกแผ่นฐานของ GaAs ที่มีระนาบไม่เท่ากันนั้น จะมีอัตราการเกิดผลึกของสารประกอบ GaAlAs ไม่เท่ากัน[3] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก), (ข), (ค) และ (ง) โดยอัตราการเกิดผลึกขึ้นกับตัวแปรหลายตัว[16] เช่น ความเข้มข้นของสารประกอบ C_0 (Saturation Concentration) เป็นต้น และถ้าขนาดความกว้างของร่อง CSP มีค่าน้อยกว่า 5 ไมครอนแล้วจะมีปรากฏการณ์[4] 2 อย่างคือ (1) สาร As บริเวณปากของหลุม CSP จะละลายออกมาทำให้รูปร่างบริเวณปากของหลุมเปลี่ยนไป (melt-etch at the shoulder) ซึ่งจะมีผลต่อค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล (2) การเคลื่อนย้ายมวลของสารประกอบ (mass-transported) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากปรากฏการณ์แรก ซึ่งสองปรากฏการณ์นี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข)



รูปที่ 4.3(ก) รูปร่างของผลึก $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ที่ปลูกบนร่องของ
วัสดุแผ่นฐาน $n^+ \text{GaAs}$ ที่เวลา 10 วินาที

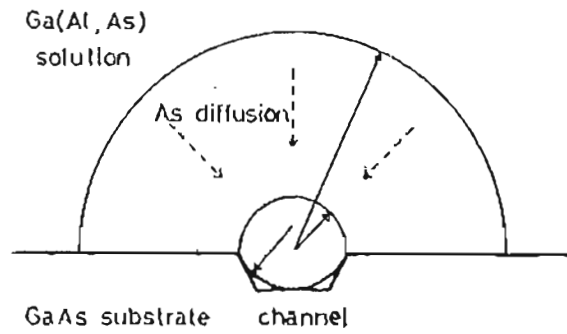


รูปที่ 4.3(ข) รูปร่างของผลึก $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ที่ปลูกบนร่องของ
วัสดุแผ่นฐาน $n^+ \text{GaAs}$ ที่เวลา 1 นาที

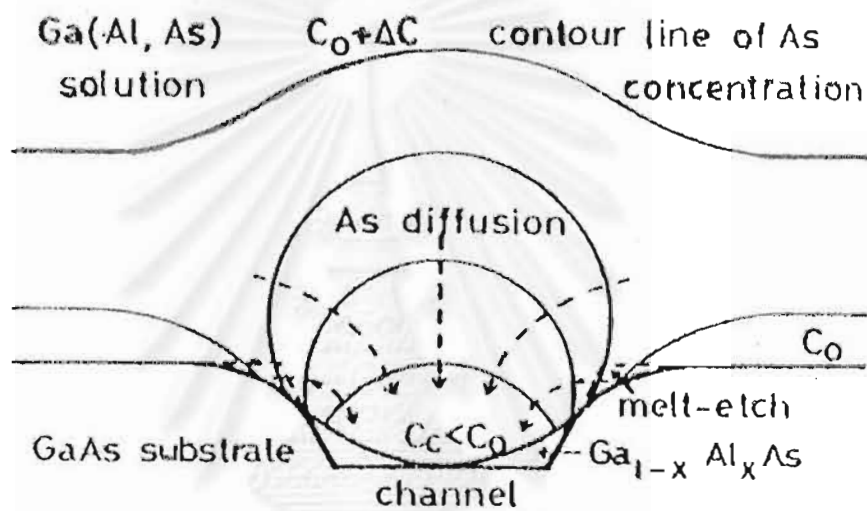


รูปที่ 4.3(ค) รูปร่างของผลึก $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ที่ปลูกบนร่องของ
วัสดุแผ่นฐาน $n^+ \text{GaAs}$ ที่เวลา 2 นาที

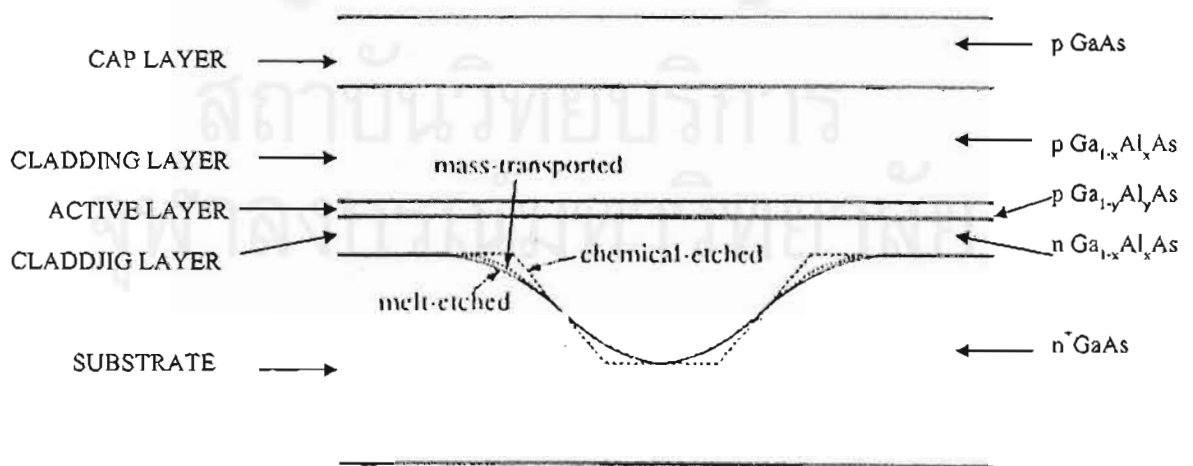
*หมายเหตุ ใช้สาร $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ในการปลูกผลึก, เริ่มปลูกที่อุณหภูมิ 798 องศาเซลเซียส และ
ใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.2 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 4.3 (ง) อัตราการเกิดผลึกของสารประกอบ GaAlAs บนผลึกแผ่นฐาน GaAs บริเวณร่อง CSP[3]



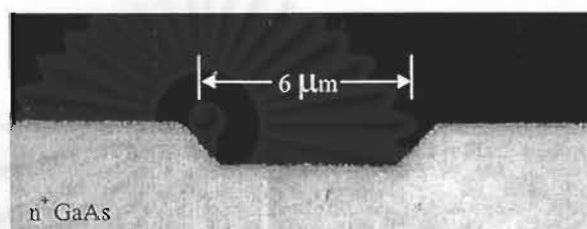
รูปที่ 4.4(ก) ความเข้มข้นของสาร As ที่บริเวณต่างๆของร่อง CSP (channel < 5 μm)



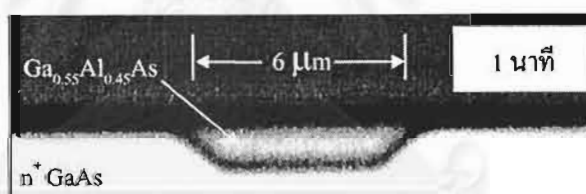
รูปที่ 4.4(ข) ภาพแสดงปรากฏการณ์ 2 ชนิดที่เกิดขึ้นบริเวณร่อง CSP (channel < 5 μm)

(1) melt-etched (2) mass-transported

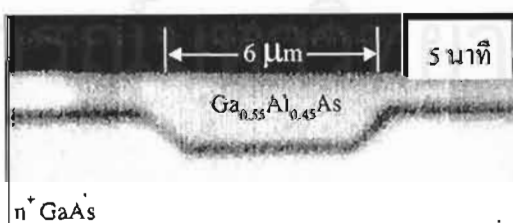
โดยปรากฏการณ์ในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข) (melt-etched และ mass transported) นั้นเกิดขึ้นบ้าง ในการปลูกผลึกของเรา แต่ไม่มากนัก เพราะที่ความกว้างของร่อง CSP ที่เราใช้มีค่ามากกว่า 5 ไมครอน ดังการเปรียบเทียบรูปร่างของร่อง CSP ในรูปที่ 4.5(ก), 4.5(ข) และ 4.5(ค) ซึ่งจะเห็นว่าขนาดและรูปร่างของร่อง CSP หลังทำการปลูกผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย ซึ่งจะส่งผลให้รูปแบบของ Optical mode ของแสงเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย (ดูจากค่า Effective index ในหัวข้อที่ 3.1.1)



รูปที่ 4.5(ก) รูปร่างของร่องบนวัสดุแผ่นฐาน n^+ GaAs ที่ยังไม่มีการปลูกผลึก



รูปที่ 4.5(ข) รูปร่างของผลึก $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ที่ปลูกบนร่องของวัสดุแผ่นฐาน n^+ GaAs ที่เวลา 1 นาที



รูปที่ 4.5(ค) รูปร่างของผลึก $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ที่ปลูกบนร่องของวัสดุแผ่นฐาน n^+ GaAs ที่เวลา 5 นาที

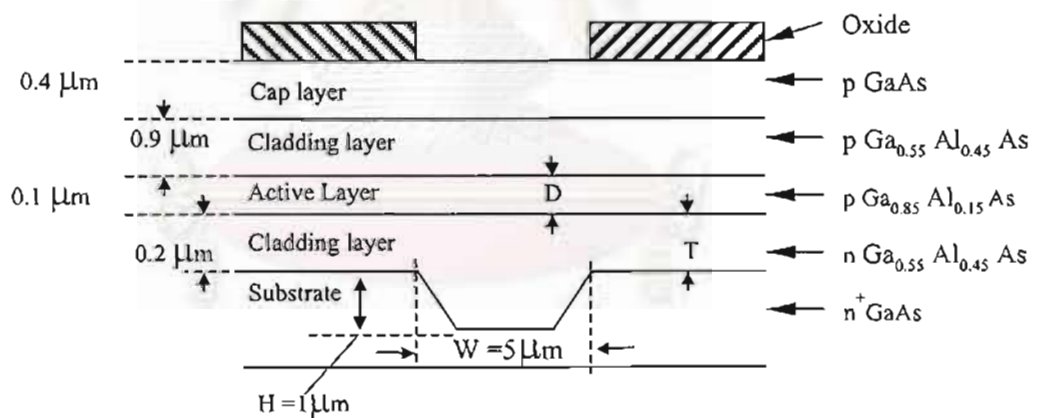
บทที่ 5

การสร้างเลเซอร์ไดโอดโครงสร้าง CSP

จากบทที่ 3 และ 4 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง CSP จาก GaAlAs ในย่านความยาวคลื่น 0.78 ไมครอนและเงื่อนไขในการปลูกผลึกบนผลึกฐานที่ไม่เรียบ ในบทนี้เป็นการทดลองเพื่อผลที่ได้จากข้างต้นมาทดลองใช้ในการประยุกต์ในการสร้างไดโอดเลเซอร์โครงสร้าง CSP

5.1 การเตรียมสารประกอบ

สารประกอบที่เราใช้ในการปลูกผลึกคือ GaAlAs/GaAs (จากเหตุผลในบทที่ 2) โดยได้แสดงโครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะทำการสร้างไว้ตามรูปที่ 5.1 และได้แสดงข้อมูลของสารประกอบที่เราใช้ในการปลูกผลึกด้วยวิธี LPE ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะทำสร้าง

โดยเราเริ่มทำการปลูกผลึกชั้นแรกที่อุณหภูมิ 798 °C และกำหนดอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (colling rate) เท่ากับ 0.2 °C / นาที

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของสารประกอบที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยวิธี LPE

LAYER	Al (mg)	Dopant (mg)	Time (min)	Temperature Start	Al* content	Carrier* density	Thickness (μm)
Cladding	2.8	Sn=200	1	798	45%	$n=5 \times 10^{17}$	0.2
Active	0.7		1 sec		15%	undoped	0.1
Cladding	2.8	Ge= 25	5		45%	$p=1 \times 10^{17}$	1.6
Cap		Ge= 80	15 sec			$p=1 \times 10^{19}$	0.2

*หมายเหตุ : ทุกหลุมใช้ Ga เท่ากับ 2 กรัมเป็นตัวทำละลาย

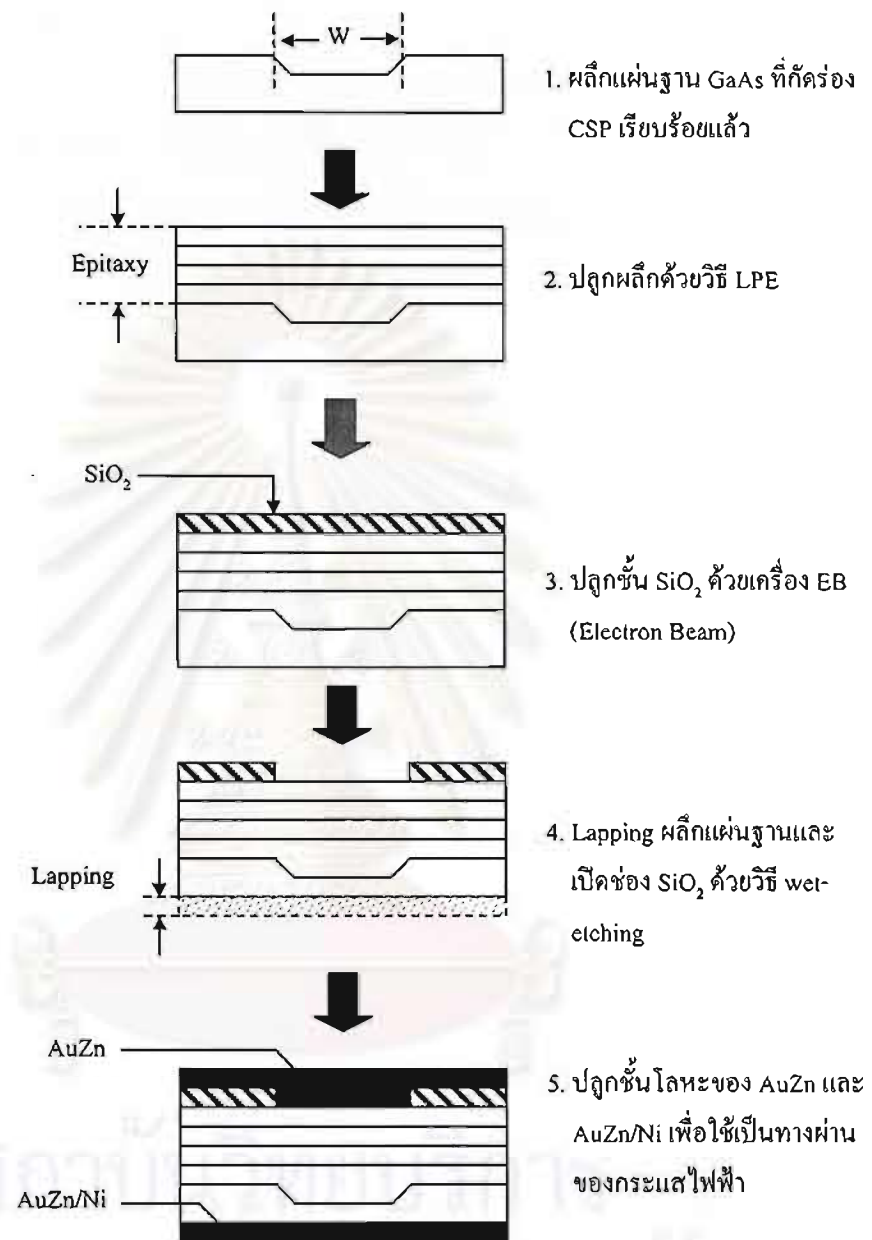
: Saturation temperature = 800 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิเริ่มปลูกผลึกชั้นแรก 798 องศาเซลเซียส

: Al content and Carrier density[6] , colling rate = 0.2 องศาต่อนาที

5.2 ขั้นตอนในการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด

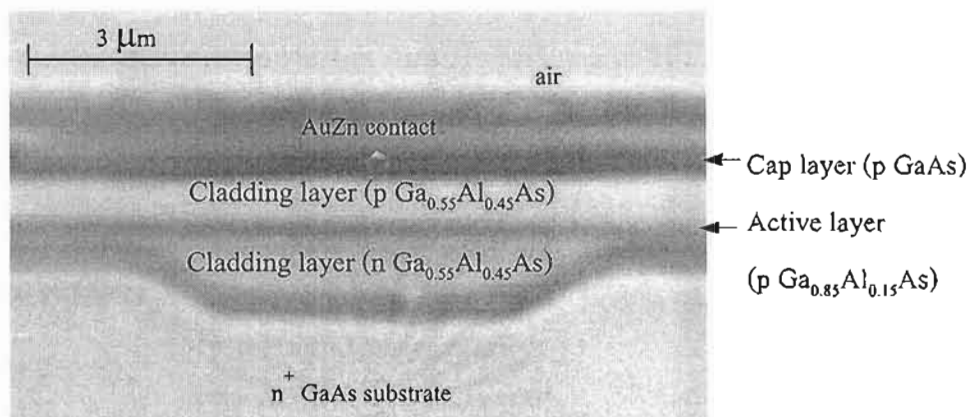
เมื่อเราเตรียมผลึกแผ่นฐานของ GaAs ที่กักรอง CSP ตามที่กำหนดไว้แล้ว ก็นำมาทำการปลูกชั้นของอีพิแทกซ์ตามที่เราต้องการ เสร็จแล้วก็นำเอาส่วนที่เป็นผลึกแผ่นฐานมาทำการ Lapping* ให้ผลึกแผ่นฐานบางลงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่ายขึ้น และนำมาปลูกชั้นของ SiO_2 เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนกันกระแสไฟฟ้าไม่ให้วิ่งผ่านในส่วนที่เราไม่ต้องการ แล้วนำมาทำการเปิดช่องของ SiO_2 ด้วยวิธีการ Wet Etching* และทำขั้วไฟฟ้า* ทั้งสองด้านของ โครงสร้าง ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 5.2

* หมายเหตุ ดูรายละเอียดในภาคผนวก

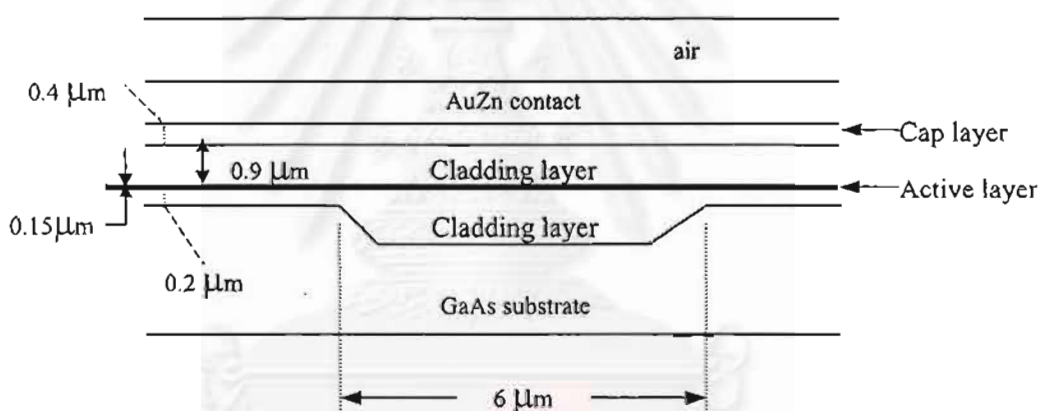


รูปที่ 5.2 แผนภาพขั้นตอนการสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอด

5.3 การทดลอง



รูปที่ 5.3 (ก) ภาพถ่ายตัดขวาง CSP เลเซอร์ไดโอดที่ทำขั้วโลหะเต็มหน้า



รูปที่ 5.3 (ข) แผนภาพขนาดชั้นอิพิแทกซ์ของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่ปลูกได้

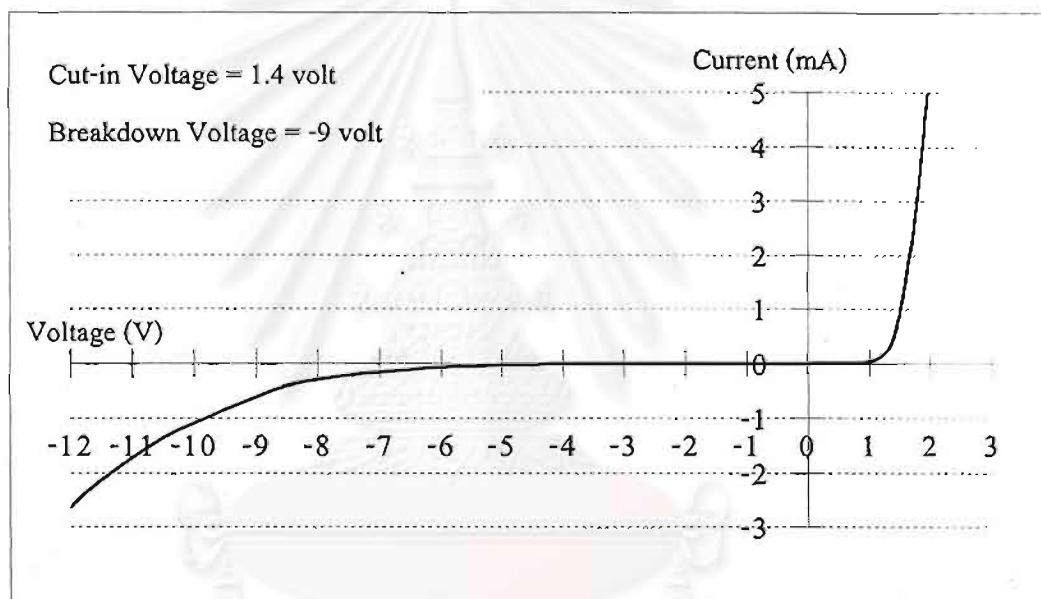
จากรูปที่ 5.3 (ก) เป็นภาพถ่ายด้านข้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่จะนำไปทำการไบแอส กระแสไฟฟ้าเพื่อหาค่าต่างๆที่จะแสดงถึงการมีคุณสมบัติเป็นเลเซอร์ไดโอด ส่วนรูปที่ 5.3 (ข) นั้น เป็นแผนภาพแสดงขนาดของรูปที่ 5.3(ก)

โดยค่าความหนาที่เราสนใจมีสองค่าคือหนึ่ง ค่าความหนาของชั้น cladding (T) ซึ่งตรงกับค่าที่คำนวณ (0.2 μm) และสอง ค่าความหนาของชั้น active (D) ซึ่งไม่ตรงกับค่าที่คำนวณไว้ในตอนแรกคือ 0.15 μm (ที่กำหนด คือ 0.1 μm) แต่ก็ยังอยู่ในย่านที่กำหนดไว้(หัวข้อที่ 3.2.1) ซึ่งถ้าค่าความหนาของชั้น active มีค่าน้อยลงไปอีกก็จะทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดดีขึ้น

(Threshold current น้อยลง) ส่วนค่าความหนาอื่น ๆ นั้นเราสามารถควบคุมได้ง่ายและไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติการเป็นเลเซอร์ไดโอดมากเท่ากับความหนาของชั้น active (D) และชั้น cladding (T)

ส่วนสาเหตุที่ไม่สามารถกำหนดความหนาของชั้น active ให้มีค่าบางเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ ได้ นั้น เนื่องจากข้อจำกัดของวิธีการปลูกผลึกแบบ Liquid Phase Epitaxy (LPE) นั้นไม่สามารถจะปลูกผลึกให้มีความบางได้มากเท่าวิธีการปลูกผลึกแบบอื่นๆ เช่น Molecular Beam Epitaxy (MBE)

5.4 I-V Curve Characteristics

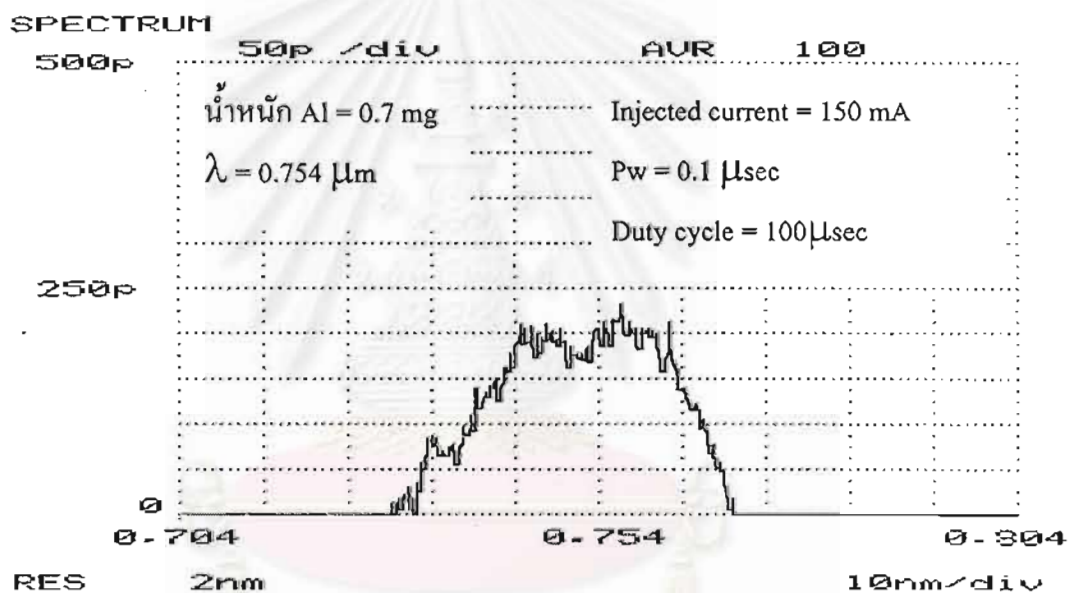


รูปที่ 5.4 I-V Curve Characteristics ของ CSP เลเซอร์ไดโอด

I-V Curve Characteristics ของ CSP เลเซอร์ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 5.4 นั้นเราป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไป แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเลเซอร์ (ไม่ได้้นำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมหรือต่อขนาน) โดยได้ค่าแรงดัน Cut-in เท่ากับ 1.4 volts และได้ค่าแรงดัน Breakdown เท่ากับ -9 volts

5.5 การเก็บกักแสง

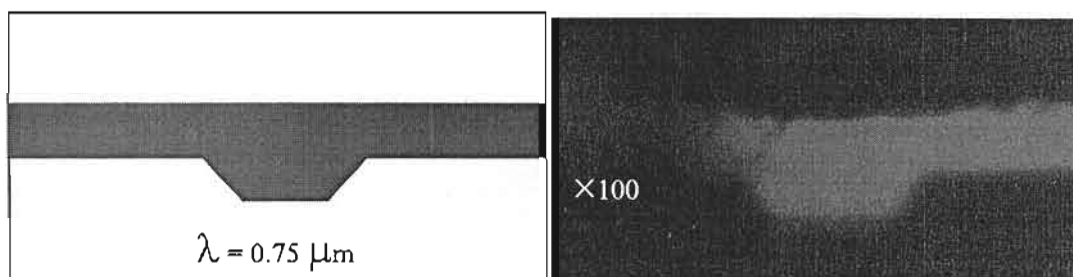
โดยความยาวคลื่นแสงที่ออกมาจากตัวเลเซอร์ไดโอดนั้นเกิดขึ้น โดยการเปล่งแสงบริเวณชั้น Active และมีชั้น Cladding ทำหน้าที่ในการหักเหหรือสะท้อนแสงให้อยู่ในบริเวณชั้น Active โดยในโครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดนี้เราใช้สารประกอบ $Ga_{0.55}Al_{0.45}As$ ทำหน้าที่เป็นชั้น Active ซึ่งสารที่หน้าที่เป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงก็คือ Al (อลูมิเนียม) โดยที่ความยาวคลื่นแสง $0.78 \mu m$ ของสาร $Al_{0.45}$ นั้นจะมีน้ำหนักประมาณ 0.6 มิลลิกรัม[6] ซึ่งในการชั่งน้ำหนักถ้ามีความผิดพลาดไปประมาณ 0.1 มิลลิกรัมก็จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นแสงที่จะเปล่งออกมาจากตัวเลเซอร์ไดโอดเปลี่ยนแปลงค่าไป และก็จะส่งผลต่อกลไกการเก็บกักแสงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6



รูปที่ 5.5(ก) สเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่น $0.75 \mu m$ ซึ่งเกิดจากชั้น Active ที่มีสารอลูมิเนียมอยู่ 0.7 มิลลิกรัม



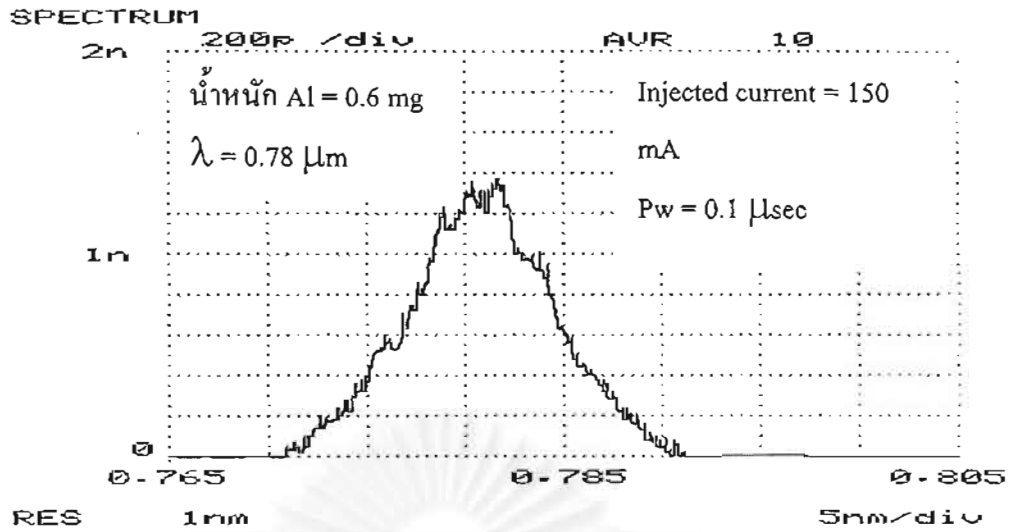
รูปที่ 5.5(ข) ภาพถ่ายด้านบนของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นแสงเท่ากับ $0.75 \mu m$



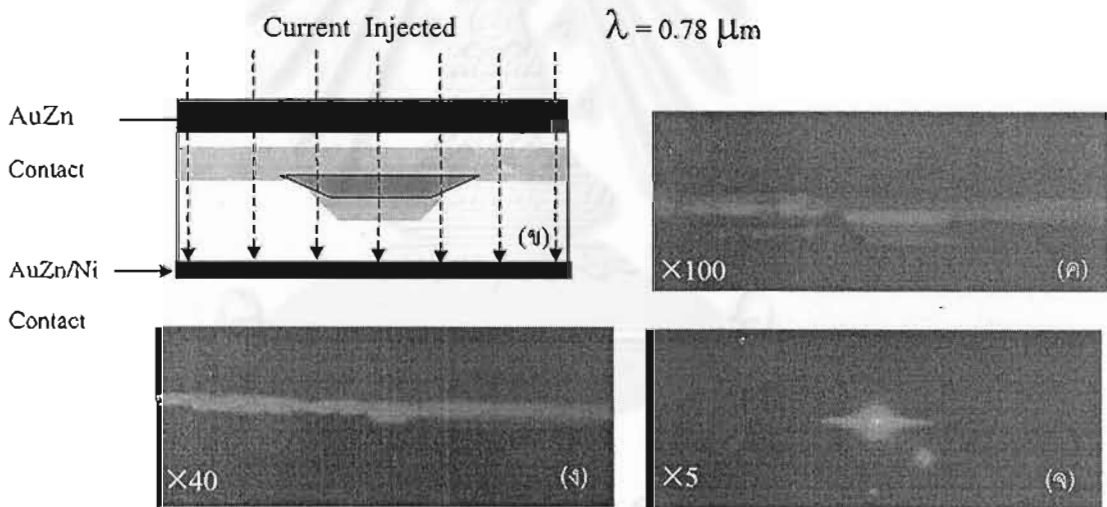
รูปที่ 5.5(ค) ภาพถ่ายด้านข้างบริเวณร่องของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่นแสง $0.75 \mu\text{m}$ ซึ่งไม่มีการเก็บกักแสง

จากรูปที่ 5.5(ก), (ข) และ (ค) นั้นแสดงให้เห็นว่าน้ำหนัของอลูมิเนียมของชั้น Active มีส่วนสำคัญต่อกลไกการเก็บกักแสง เพราะถ้าน้ำหนักของอลูมิเนียมมีค่าคลาดเคลื่อนไปไม่ตรงกับที่คำนวณไว้ (ที่คำนวณไว้ 0.6 mg , ในรูปที่ 5.5 = 0.7 mg) ก็จะส่งผลให้ความยาวคลื่นแสงที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนตามไปด้วยและที่สำคัญก็จะส่งผลต่อารกลไกการเก็บกักแสงให้แย่งหรืออาจจะไม่เก็บกักแสงเลยดังแสดงในรูปที่ 5.5(ค) โดยถ้าเราสามารถกำหนดน้ำหนักของอลูมิเนียมในชั้น Active ได้ตรงตามที่คำนวณไว้ โครงสร้างของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่เราสร้างได้ก็จะสามารถเก็บกักแสงได้ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งจากกลไกการเก็บกักแสงได้นี้เองจะนำไปสู่การมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของเลเซอร์ไดโอด เช่น กำหนดทิศทางของลำแสงเลเซอร์ที่จะเปล่งออกมาได้

ซึ่งในตอนแรกเราทำขั้วโลหะเต็มหน้าตามรูปที่ 5.3(ก) เพื่อทดสอบการเก็บกักแสงในบริเวณร่อง CSP โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ปริมาณเท่ากัน (60 volt DC) ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 5.6 (ข), (ค), (ง) และ (จ) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแสงที่บริเวณร่อง CSP จะมีความสว่างของแสงมากกว่าบริเวณอื่น จึงสรุปได้ว่าโครงสร้าง CSP เลเซอร์ไดโอดสามารถเก็บกักแสงที่บริเวณร่อง CSP ได้จริง



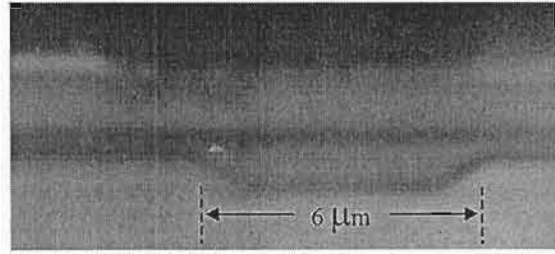
รูปที่ 5.6 (ก) สเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่น 0.78 μm ซึ่งเกิดจากชั้น Active ที่มีสารอลูมิเนียมอยู่ 0.6 มิลลิกรัม



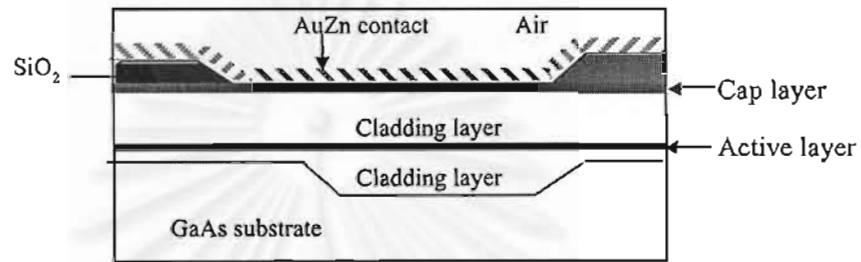
รูปที่ 5.6 (ข),(ค),(ง) และ (จ) การเก็บกักแสงบริเวณร่อง CSP (ทำขั้วโลหะเต็มหน้า)

และในการทำให้เกิดการ เปล่งแสงเลเซอร์นั้น เราจำเป็นต้องจำกัดพื้นที่ของการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Injected Current) ให้เล็กลง เพื่อทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Current Density) มากขึ้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะทำให้เลเซอร์ไดโอดเกิดการเปล่งแสงเลเซอร์ได้ง่ายขึ้น โดยเราทำการปลูกจนวนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากำหนดพื้นที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวชิพ CSP เลเซอร์ไดโอด ซึ่งเราจะจำกัดกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเฉพาะบริเวณร่อง CSP เท่านั้น (ตามรูปที่ 5.7(ก),(ข))

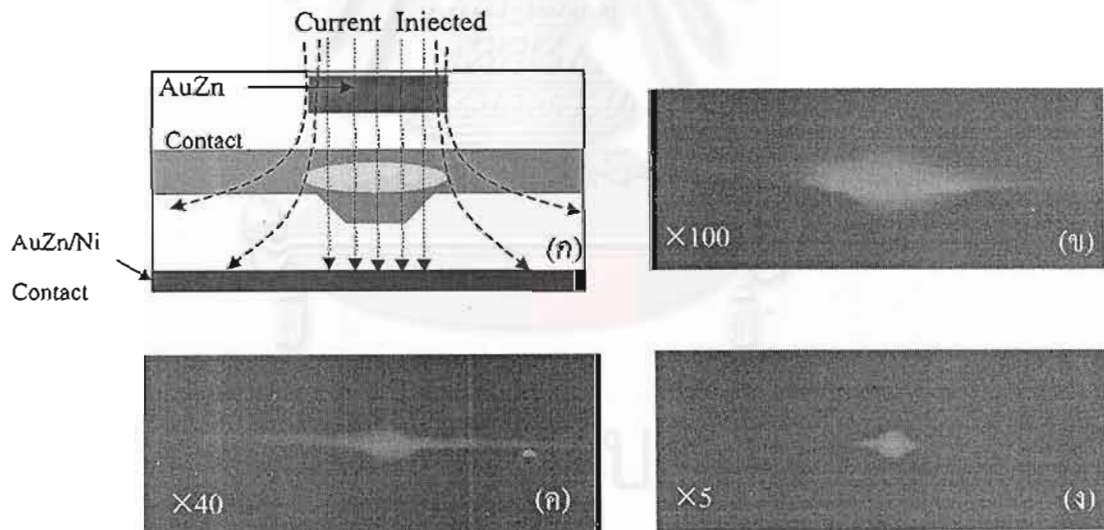
*หมายเหตุ X5 หมายถึง ขยายจากขนาดจริง 5 เท่า



รูปที่ 5.7 (ก) ภาพถ่ายตัดขวาง CSP เลเซอร์ไดโอดที่ทำขั้วโลหะบริเวณร่อง CSP



รูปที่ 5.7 (ข) แผนภาพตำแหน่งชั้นอิพิแทกซีต่างๆของ CSP เลเซอร์ไดโอด(จากรูป 5.5(ก))



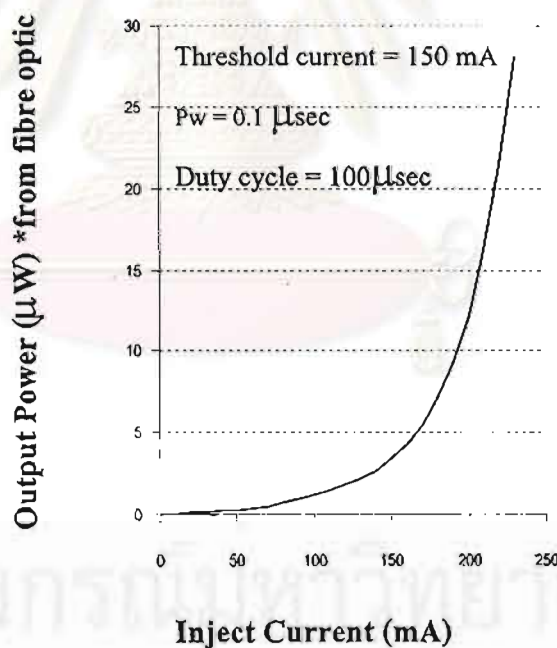
รูปที่ 5.8 (ก,ข,ค,ง) ภาพถ่ายด้านข้างบริเวณร่องของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นแสง $0.78 \mu\text{m}$ ซึ่งมีการเก็บกักแสง(ทำขั้วโลหะบริเวณร่อง CSP)

และจากชิพ CSP เลเซอร์ไดโอดในรูปที่ 5.7(ก) นั้น เมื่อนำมาจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ปริมาณเท่าเดิม(60 volts DC) ก็จะทำให้เกิดแสงที่บริเวณร่อง CSP มากขึ้น อันเนื่องมาจากการมี

Current Density มากขึ้นและโครงสร้างก็จะสามารถเก็บกักแสงที่บริเวณช่อง CSP มากขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.8 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.6

5.6 I-L Curve Characteristics

การที่เราจะตัดสินว่าไดโอดที่เปล่งแสงออกมาเป็นเลเซอร์ไดโอดหรือเป็นไดโอดเปล่งแสงธรรมดา (Light emitting diode ย่อว่า LED) เราจะดูจากรูปร่างลักษณะของ I-L curve โดยถ้าอัตราการเพิ่มขึ้นของแสง (Light ย่อว่า L) มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆที่อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส (Injected Current ย่อว่า I) มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นจุดของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold Current) นั้นแสดงว่าไดโอดตัวนั้นมีคุณสมบัติเป็นเลเซอร์ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งในการจ่ายกระแสไฟให้กับตัวเลเซอร์ไดโอดนี้เราใช้ Pulse current ($P_w = 0.1 \mu\text{sec}$) และให้ Duty cycle = $100 \mu\text{sec}$ และใช้ Avalanche Photodetector เป็นอุปกรณ์ในการวัดกำลังของแสงที่ออกมา



รูปที่ 5.9 I-L curve characteristics ของ CSP เลเซอร์ไดโอดที่มี Threshold current = 150 mA (ทำหัวโลหะเฉพาะบริเวณช่อง CSP)

โดยจุดของการเปล่งแสงเลเซอร์ หรือ Threshold Current ในซีพีเลเซอร์ไดโอดแต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะความยาวของซีพีเลเซอร์แต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้พื้นที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 5.2

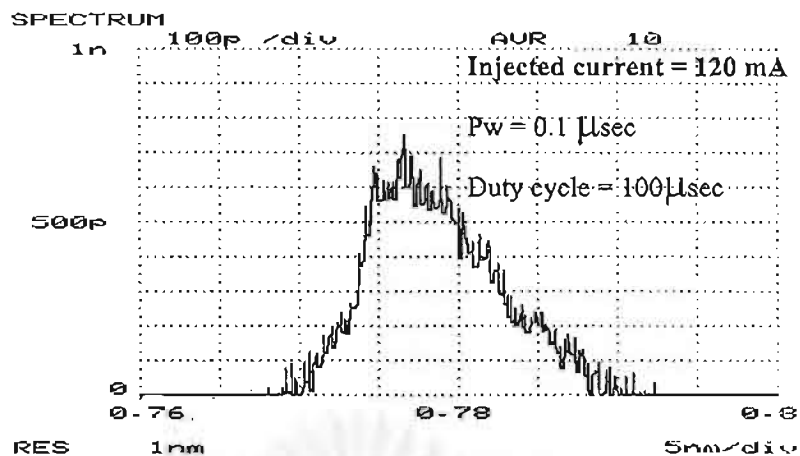
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลของซีพี CSP เลเซอร์ไดโอดแต่ละตัวที่มีค่า Threshold Current และค่าความยาวของ Cavity แตกต่างกัน(โครงสร้างที่ทำขั้วโลหะที่ร่อง CSP)

No.	Cavity Length (μm)	Threshold Current (mA)
1.	500	125
2.	700	160
3.	650	150
4.	600	130

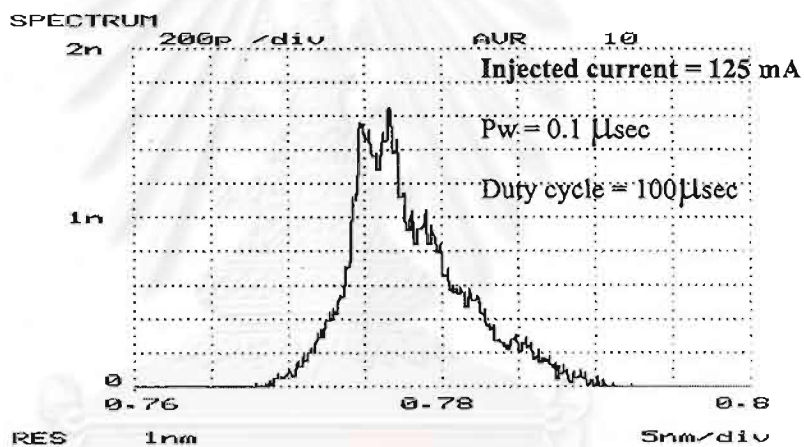
5.7 ลักษณะสเปกตรัมของ CSP เลเซอร์ไดโอด

นอกจากรูปร่างลักษณะของ I-L curve แล้ว ลักษณะสเปกตรัมของแสงก็สามารถจะเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติของแสงเลเซอร์ได้เช่นกัน โดยเราจะสังเกตจาก กำลังของแสงจะเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ และความกว้างของสเปกตรัมจะแคบลง[2]

โดยจากรูปที่ 5.10 (ก) เป็นสเปกตรัมของแสงก่อนที่จะเปล่งแสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งจะมี ความกว้างของสเปกตรัมอยู่พอสมควร ในขณะที่เราจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ 120 mA แต่เมื่อเพิ่ม กระแสไฟฟ้าเป็น 125 mA(Threshold Current) ตามรูปที่ 5.10(ข) สเปกตรัมของแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยมีจุดสูงสุดของสเปกตรัมชัดเจนและความกว้างของสเปกตรัมแคบลงมาก และสิ่งที่สังเกตได้อีกอย่างก็คือ กำลังของแสงในรูปที่ 5.10 (ก) (โดยเราดูจากจุดสูงสุดของสเปกตรัม) นั้นมี กำลังของแสงไม่ถึง 1 nW แต่เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 125 mA ตามรูปที่ 5.10(ข) กำลังของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบถึง 2 nW นั่นแสดงว่าแสงที่วัดได้มีคุณสมบัติเป็นแสงเลเซอร์



รูปที่ 5.10 (ก) สเปกตรัมของแสงก่อนที่จะเปลี่ยนแสงเลเซอร์



รูปที่ 5.10 (ข) สเปกตรัมของแสงขณะเปลี่ยนแสงเลเซอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุป

จากการวิเคราะห์เพื่อผลของตัวแปรต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดโครงสร้าง Channel Substrate Planar (CSP) จากวัสดุ AlGaAs ที่มีเปล่งแสงในย่าน 0.78 ไมครอน ด้วยวิธีการประมาณค่าดัชนีหักเห (Effective Index Approximation) ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น Double Heterostructure ของ $\text{Ga}_{0.85}\text{Al}_{0.15}\text{As}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ ผลของการวิเคราะห์พบว่าในส่วนกลางของโครงสร้างมีค่ากว้างไม่เกิน 5 ไมครอนและค่าความลึกไม่น้อยกว่า 0.4 ไมครอน ส่วนปีกนั้นค่าความหนาของชั้นเปลือกส่วนล่าง (Lower Cladding Layer) มีค่าความหนาในช่วง 0.1-0.3 ไมครอน โดยค่าที่ได้เหมาะสมควรสำหรับกรณีที่ชั้นเปล่งแสงมีค่าในช่วง 0.05-0.2 ไมครอน สำหรับกรณีที่คุณสมบัติทางแสงเป็นแบบ TE_{00} mode สำหรับเงื่อนไขของสร้างด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากสถานะของเหลว (LPE) ภายในเงื่อนไขของการอิมตัวของสารละลายที่ 800 °C ซึ่งการปลูกผลึกเริ่มต้นที่อุณหภูมิที่ 798 °C และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ 0.2 °C/นาที่ และเวลาที่ใช้ในการปลูกในช่วง 50-60 วินาที สำหรับผลึกฐานเริ่มต้นที่มีร่องขนาดกว้าง 5 ไมครอน และลึก 1 ไมครอน สุดท้ายการนำที่ได้ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเลเซอร์ไดโอด CSP ของ Double Heterostructure ของ $\text{Ga}_{0.85}\text{Al}_{0.15}\text{As}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ โดยตัวอย่างของเลเซอร์ไดโอดแบ่งเป็น 2 แบบคือแบบพื้นที่ขั้วนำกระแสกว้าง (Broad Area Contact) และแบบช่องเปิดของชั้น SiO_2 ขนาด 10 ไมครอนในด้านที่ตัวอย่างที่ได้นี้มีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์อยู่ในช่วง 125-160 mA สำหรับไดโอดเลเซอร์ที่มีค่าความยาวในช่วง 500-700 ไมครอน สำหรับแบบช่องเปิดของชั้น SiO_2 ขนาด 8 ไมครอนในด้านที่ส่วนแบบพื้นที่ขั้วนำกระแสกว้างนั้นมีค่ากระแสขีดเริ่มต้นสูงกว่า เนื่องจากพื้นฐานของขั้วนำกระแสที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตามทั้งสองโครงสร้างนี้มีคุณสมบัติทางแสงระยะสนามใกล้ (Near Field Pattern) เป็นแบบ TE_{00}

รายการอ้างอิง

- [1] S.M.Sze. Physics of Semiconductor Devices.(n.p.): A-Wiley-International-Publication,1981.
- [2] Kridsada Pornpitakpong. Study on Optical of Ridge Waveguide Heterostructure for Laser Diode Application.(n.p.):(Master's thesis,Graduate school,Chulalongkorn University, 1997).
- [3] Song Jae Lee , Jae-Kyung Song, Joo-sung Park,Nam-Heon Kim,Woon-Young Song,Seok-Ki Koh, Joon-Young Kim, Dong-Soo Shin, Jae-Ho Lee,Dong-Soo Bang, See-Hyung Lee, Ki-Hwan Kim, and Young W. Huh . Study on channel deformation in the GaAlAs/GaAs V-channeled substrate inner stripe lasers. p1507-p1509, Apply Physics Letters (61) , 28 September 1992.
- [4] K.Funakoshi, A.Do, K.Aiki and R. Ito. LPE growth of $Ga_{1-x}Al_xAs$ on channeled substrate. Journal of Crystal Growth (45). p252-256, North - Holland Publishing Company,1978.
- [5] Richard Syms and John Cozens. Optical Guided Waves And Devide. p111, singapore ,1992.
- [6] Sadao Adachi. GaAs,AlAs and $Al_xGa_{1-x}As$:Material parameters for use in research and device application.(n.p.): Journal Apply Physics (53),1 August 1985.
- [7] Govind P. Agrawal. Semiconductor Lasers.(n.p.): International Thomson Publishing GmbH, Germany, 1993.
- [8] Dan Botez Lytel Inc. Laser Diode are Power-Packed.(n.p.): IEEE Spectrum, Volume 22, June 1985.
- [9] S. J. Lee, L. Figueroa, Leaky-Guide Channeled Substrate Planar (LCSP) Laser with Reduced Substrate Radiation and Heating.(n.p.): IEEE J. of Quantum Elec.,vol. 25 , NO. 7, July 1989.
- [10] William H. Hayt, Jr. Engineering Electromagnetics.(n.p.):McGraw-Hill, Fourth Edition, 1981.
- [11] Donald L. Lee. Electromagnetic Principles of Integreateed Optics.(n.p.): John Wiley & Son, 1986.
- [12] สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ ชุมพล อันตรเสน. การสร้างไดโอดเลเซอร์จากวัสดุGaAs-GaAlAs แบบ Buried Heterostructure ด้วยวิธี Liquid-phase Epitaxy (LPE). หน้า 3-9, รายงานผลการวิจัยทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, มิถุนายน 2540.

ภาคผนวก

1. การทำความสะอาดผลึกแผ่นฐานเริ่มต้น (Substrate) ของ GaAs และ GaAs Source

วัสดุเริ่มต้น

ผลึกเริ่มต้น (Substrate) ที่ใช้การทดลองนี้เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) ของ GaAs ที่มีทิศทางของระนาบผลึก (Orientation) ในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ และมีผิวหน้าด้านหนึ่งเป็นผิวขัดมัน (Polished) ชนิดเอ็น (n-type) ที่เจือด้วยซิลิกอน (Silicon) ที่มีความเข้มข้นของพาหะ $1-4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\text{EPD} \approx 2000 \text{ cm}^{-2}$

GaAs Source เป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกหลายรูป (Polycrystalline) ของ GaAs ชนิด Non-dope

ขั้นตอนในการทำความสะอาด

- 1 ขั้นตอน Degreasing เพื่อล้างสิ่งสกปรกที่เป็นคราบมัน
 - ดมใน Trichloroethylene เดือดเป็นเวลา 5 นาที
 - ดมใน Acetone เดือดเป็นเวลา 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI ที่มีสภาพความต้านทาน $18 \Omega\text{-cm}$
- 2 ขั้นตอนของ Chemical Etching ผลึกฐานเริ่มต้น (Substrate) และ GaAs และ GaAs Source เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิว
 - แช่ในสารละลาย $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}$ (1:1 โดยปริมาตร) จนเวลาพร้อมที่ดำเนินการขั้นตอนต่อไป
 - ล้างด้วยน้ำ DI ที่มีสภาพความต้านทาน $18 \Omega\text{-cm}$
- 3 การทำให้ผลึกแผ่นฐานเริ่มต้นของ GaAs และ GaAs Source แห้ง โดยการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (99.99%) เพื่อนำไปดำเนินการขั้นตอนต่อไป

2. การทำความสะอาดสารเจือ (Dopant)

วัสดุเริ่มต้น

สารเจือ (Dopant) ที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ เจอร์มาเนียม (Ge) และ ดีบุก (Sn) ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นลวด (Wire) หรือรูปแท่งก้อน (Ingot) โดยมีความบริสุทธิ์ 99.999%

ขั้นตอนในการทำความสะอาด

1. ขั้นตอน Degreasing เพื่อล้างสิ่งสกปรกที่เป็นคราบมัน
 - ดั้มใน Trichloroethylene เดือดเป็นเวลา 5 นาที
 - ดั้มใน Acetone เดือดเป็นเวลา 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI ที่มีสภาพความต้านทาน 18 Ω -cm
2. ขั้นตอน Chemical Etching เพื่อขจัดออกไซด์ที่ผิวของสารเจือ
 - กัดด้วยสารละลาย HCl : H₂O (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลา 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI ที่มีสภาพความต้านทาน 18 Ω -cm
4. การทำให้สารเจือแห้ง โดยการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (99.99%) เพื่อนำไปดำเนินการขั้นตอนต่อไป

3. การทำความสะอาดอลูมิเนียม (Al)

วัสดุเริ่มต้น

อลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นลวด (Wire) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการทำความสะอาด

1. ขั้นตอน Chemical Etching เพื่อขจัดออกไซด์ที่ผิวของอลูมิเนียม
 - กัดด้วยกรด H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 วินาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI ที่มีสภาพความต้านทาน 18 Ω -cm

2. เชื้อในเมฆานอลแอลกอฮอล์หรือเอทานอลแอลกอฮอล์ เพื่อเก็บรักษาและรอความพร้อมเพื่อนำไปดำเนินการตามขั้นตอนต่อไป
 3. การทำให้สารเจือแห้ง โดยการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (99.99%) เพื่อนำไปดำเนินการขั้นตอนต่อไป
4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

น้ำยาไวแสง(Photoresist) ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Shipley AZ-1350 และน้ำยาล้างคือ Shipley MF-320 developer โดยมีขั้นตอนดังนี้

Spinning	500 rpm	ใช้เวลา 5 วินาที
	3000 rpm	ใช้เวลา 20 วินาที
Prebreak	90 °C	ใช้เวลา 7 นาที
Expose time	35 วินาที	(ที่ความเข้มแสง 1.1 mW/cm ²)
Develop time	20 วินาที	(ด้วย Shipley MF-320 developer)
Rinse time	30 วินาที	(ด้วยน้ำ DI)
Hardbreak	90 °C	ใช้เวลา 30 นาที

5. วิธีการปลูกเคลือบฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂)

โดยในการเคลือบฉนวน SiO₂ ด้วยเครื่องยิงอิเล็กตรอน (Electron-Beam , EB) โดยมีข้อมูลในการทำดังนี้

อุณหภูมิของผลึกแผ่นฐาน	200 °C
ความดันก่อนทำการปลูก	5 x 10 ⁻⁶ torr
อัตราการปลูกผลึก	3 –5 Å/s
ความหนาที่วัดได้จากเครื่อง	3000 Å
ความหนาแน่นของ SiO ₂	2.20 g/cm ³

6. การเปิดช่องซิกอนไดออกไซด์ (Stripes opening)

เรากำหนดพื้นที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวชิพเลเซอร์ โดยการกำหนดขนาดของช่อง SiO_2 ที่จะทำให้การเปิด ซึ่งในการเปิดช่อง SiO_2 นี้เราทำการถ่ายแบบหน้ากากเหมือนการกัดร่อง CSP แล้วใช้น้ำยา HF buffer กัดผลึก SiO_2 ที่ไม่ต้องการออก ซึ่ง HF buffer นี้เกิดจาก $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 6 : 65$ ซึ่งมีอัตราการกัด SiO_2 ประมาณ 2000 Å ต่อ 10 วินาที เสร็จแล้วทำการกัด photoresist ทิ้งด้วย Acetone

7. Substrate lapping

เราทำการ lapping ผลึกแผ่นฐานเพื่อต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวชิพเลเซอร์ไดโอดได้ง่ายขึ้นและช่วยลดความร้อนในตัวชิพ ซึ่งจะส่งผลให้ได้เลเซอร์ไดโอดที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยเราใช้ผงขัดของ Fujimi Optical เบอร์ 4000 (FO# 4000) ขัดจนความหนาด้านล่างของผลึกแผ่นฐานลดลงจนเหลือความหนาประมาณ 150 μm หรือน้อยกว่า

8. การทำขั้วโลหะไฟฟ้า (Metallization)

ในการทำขั้วโลหะไฟฟ้าเราใช้เครื่อง Filament Evaporator โดยในการทำเราจะใช้สาร AnZn ปลุกทับด้านบน (Cap layer) ของชิพซึ่งเป็นขั้วโลหะด้านพี และใช้สาร AuGe ปลุกทับด้านล่าง (Substrate) ของชิพแล้วใช้สาร Ni ปลุกทับบนผลึก AuGe อีกที แล้วนำไป Annealing โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความดันใน Chamber	10^{-6} torr
ขั้วโลหะด้าน P	
ความหนาของชั้น AuZn	3000 Å
AuZn Annealing	500 °C โดยใช้เวลา 2 นาที
ขั้วโลหะด้าน N	
ความหนาของชั้น AuGe	2000 Å
ความหนาของชั้น Ni	500 Å
AuZn Annealing	480 °C โดยใช้เวลา 2 นาที

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นาย พรพิชญ เหลืองจิรโณทัย
ที่อยู่ปัจจุบัน : 214/2 หมู่ 1 ต. ช้องแคว อ. ตากลิ จ. นครสวรรค์ 60210
โทร. 056-269038
เกิดเมื่อวันที่ : 4 กันยายน 2516
การศึกษา : พ.ศ. 2529-2532 มัธยมต้น



โรงเรียนชาณุวิทยา กำแพงเพชร และ
โรงเรียนตากลิประชาสรรค์ นครสวรรค์
พ.ศ. 2532-2535 มัธยมปลาย
โรงเรียนตากลิประชาสรรค์ นครสวรรค์
พ.ศ. 2535-2539 วศ.บ. ปริญญาตรี
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย กรุงเทพฯ
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ. 2539-2542 เข้าศึกษาหลักสูตร ปริญญาโท
สาขาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย