ไดโอดเลเซอร์โครงสร้างเฮตเทอโรชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ สร้างโดยการปลูกผลึกแบบอิพิแทกซีสถานะของเหลว

นายสมชัย รัตนธรรมพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2536

ISBN 974-582-474-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019500

GaAs/GaAlAs Heterostructure Laser Diodes Grown by Liquid Phase Epitaxy (LPE)

Mr. Somchai RATANATHAMMAPHAN

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Engineering

Department of Electrical Engineeering

Graduate School

Chulalongkorn University

1993

ISBN 974-582-474-7

Dissertation Title	GaAs/GaAlAs Heterostructure Laser Diodes grown by Liquid Phase Epitaxy (LPE)
By	Mr. Somchai RATANTHAMMAPHAN
Department	Electrical Engineering
Dissertation Advisor	Professor Dr. Somsak PANYAKEOW **Associate Professor Dr. Choompol ANTARASENA**

Accepted by the graduate school, Chulalongkorn University in Partial Fulfilment of the requirements for the Doctor's Degree

Thavorn Vajrabhaya
.....Dean of Graduate School

(Professor Dr. Thavorn VAJRABHAYA)

Thesis Committee

V. Sayakanit
.....Chairman

(Professor Dr. Virulh SAYAKANIT)

多田邦雄
.....Invited Committee

(Professor Dr. Kunio TADA)

Somsak Panyakeow
.....Dissertation Advisor

(Professor Dr. Somsak PANYAKEOW)

C. Antarasena
.....Dissertation Co-advisor

(Associate Professor Dr. Choompol ANTARASENA)

Banyong Toprasertpong
.....Member

(Associate Professor Dr. Banyong TOPRASERTPONG)

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ : ไดโอดเลเซอร์โครงสร้างเฮตเทอโรชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ สร้างโดยการปลูกผลึกแบบอิพิแทกซีสถานะของเหลว (GaAs/GaAlAs Heterostructure Laser Diodes Grown by Liquid Phase Epitaxy) อ.ปรึกษา : ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และ รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน, 97 หน้า. ISBN 974-582-474-7

ไดโอดเลเซอร์ถูกประดิษฐ์สร้างขึ้นจากวิธีการปลูกผลึกแบบอิพิแทกซีสถานะของเหลวและนำเอาไดโอดเลเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้มาตรวจสอบลักษณะสมบัติต่างๆ ในการสร้างนั้นได้ใช้การรวมเทคนิกของสารละลายสองสถานะและซุปเปอร์คูลลิงเพื่อประยุกต์ในการสร้างไดโอดเลเซอร์ที่มีชั้นเปล่งแสงและชั้นนำคลื่นที่ความบางมาก ซึ่งการรวมเทคนิกนี้สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิผล ด้วยการใช้เบ้าหลอมกราไฟต์แบบใหม่ที่ได้ออกแบบให้มีกลไกของการเลื่อนด้านข้าง โครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ ดับเบิลเฮตเทอโร เฮตเตอโรแบบสี่ชั้น และ เฮตเทอโรแบบเซพาเรทคอนไฟน์เมนท์ ไดโอดเลเซอร์แบบควันตัมเวลล์เดี่ยวที่มีโครงสร้างเฮตเทอโรแบบเซพาเรทคอนไฟน์เมนท์ ซึ่งมีแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นชั้นเปล่งแสง หนา 300 อังสตรอม ได้ถูกสร้างขึ้นที่อุณหภูมิ 795 °C ด้วยเทคนิกดังกล่าว คุณสมบัติของไดโอดเลเซอร์แบบควันตัมเวลล์เดี่ยวนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ควันตัมไซส์ อันได้แก่ การมีสเปกตรัมของการเปล่งแสงแบบเกิดเองที่กว้างกว่าปกติ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นแบบอิเลกโตรลูมิเนสเซนซ์และโฟโตลูมิเนสเซนซ์และมีการเปลี่ยนเลื่อนของค่าคลื่นยอดของแสงเลเซอร์จากด้านความยาวคลื่นยาวไปยังด้านความยาวคลื่นสั้นเมื่อกระแสฉีดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของไดโอดเลเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งขนาดของคาวิตียาว 600 ไมครอน มีค่า 500 A/cm^2 และได้กำลังแสงขาออกที่มากกว่า 400 มิลลิวัตต์ ภายใต้การไบอัสกระแสแบบพลัส ประสิทธิภาพควันตัมภายนอกของไดโอดเลเซอร์แบบควันตัมเวลล์เดี่ยวโครงสร้างเฮตเทอโรแบบเซพาเรทคอนไฟน์เมนท์ ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เปิดช่องกว้าง 25 ไมครอน และมีคาวิตียาว 450 ไมครอน มีค่า 65%

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต R. somchai

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C115934 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: GaAs-GaAlAs / LIQUID PHASE EPITAXY / HETEROSTRUCTURE / LASER DIODE / TWO-PHASE SOLUTION / SUPERCOOLING
SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN : GaAs/GaAlAs HETEROSTRUCTURE LASER DIODES GROWN BY LIQUID PHASE EPITAXY (LPE).
THESIS ADVISOR : PROFESSOR DR. SOMSAK PANYAKEOW, Ph.D. AND ASSOCIATE PROFESSOR DR. CHOOMPOL ANTARASENA, Ph.D. 97 pp.
ISBN 974-582-474-7

A series of experimental study on the liquid phase epitaxy (LPE) growth of GaAs-GaAlAs laser diodes and their characteristics was carried out. Combined techniques of two-phase solution and supercooling were applied to fabricate laser diodes with very thin active layers and thin waveguide layers by using novel design of a graphite boat with lateral sliding. The double heterostructure, the four-layer heterostructure and the separate-confinement heterostructure of laser diodes were fabricated and characterized. The single-quantum-well separate-confinement heterostructure (SQW-SCH) lasers with 300 Å GaAs active layer could be grown by this proposed technique at the typical growth temperature of 795 °C. The characteristics of these single quantum well lasers showed the quantum size effect, such as the broadening spectrum of spontaneous emission in photoluminescence and electroluminescence, and the blue shift of lasing spectrum when increasing the bias current. The threshold current density of these single-quantum-well laser with broad-area structure was 500 A/cm^2 for cavity length of 600 µm. The output power of more than 400 mW/facet under pulsed condition was observed. The external quantum efficiency of 65% was obtained from SQW-SCH laser with cavity length of 450 µm having 25 µm-wide SiO_2 stripe-geometry structure.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

Acknowledgements

Most of this work was been carried out at Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

The author would like to thank Professor Somsak PANYAKEOW, Associate Professor Choompol ANTARASENA and Associate Professor Banyong TOPRASERTPONG for their kind advice and guidance in this work.

The author wishes to express his deep sincere appreciation to Professors Y. SUEMATSU, Y. NAITO, and T. MORIIZUMI of Tokyo Institute of Technology, Japan for their kind encouragement during his research in Japan.

The author is deeply grateful to Chulalongkorn University for supporting this work, to Associate Professor Montri SAWADSARINGKARN, Assistant Professor Kriengsak CHALERMTIRAGOOL, Assistant Professor Tara CHOLAPRANEE, Assistant Professor Dusit KRUANGAM, and Assistant Professor Mana SRIYUDTHSAK for their continuous encouragement and valuable discussion.

The author is indebted to Ms. Bunditha RATWISET, Mr. Supachok THAINOI, Ms. Kwanruan THAINOI, Mr. S. SOPITPAN, and Mr. W. BOONKOSOM for their assistance and cooperation in this work.

Finally, the author wishes to thank his parents for their endless and warm encouragement.

TABLE OF CONTENTS

Page

Abstract (in Thai).....IV

Abstract.....V

Acknowledgements.....VI

Table Index.....X

Figure Index.....XI

Notation List.....XV

Chapter 1. Background.....1

1.1 Introduction.....1

1.2 Objectives.....2

Chapter 2. Basic Concepts.....3

2.1 Introduction.....3

2.2 Heterostructure.....3

2.2.1 Types of Heterojunctions.....4

2.2.2 Advantages of using HJ's.....8

2.3 Maxwell's Equations.....13

2.4 Waveguide Analysis.....15

2.4.1 Three-Layer Slab Waveguide.....16

2.4.2 Four-Layer Slab Waveguide.....18

2.4.3 Five-Layer Slab Waveguide.....20

2.4.4 Confinement Factor.....23

2.5 Threshold Condition.....24

2.5.1 Linear Gain Theory.....24

2.5.2 Threshold Current Density.....24

Chapter 3. Liquid Phase Epitaxy Growth of GaAs-GaAlAs.....27

Page

3.1 Introduction.....27
3.2 Experimental Apparatus and Procedure.....28
3.3 Principle of LPE Growth.....31
3.3.1 The Equilibrium Cooling Technique.....32
3.3.2 The Step-Cooling Technique.....33
3.3.3 The Supercooling Technique.....33
3.3.4 The Two-Phase Solution Technique.....34
3.4 Phase Diagram of GaAs and GaAlAs.....35
3.5 Summary.....38
Chapter 4. Fabrication and Characteristics of GaAs-GaAlAs Laser Diodes by LPE.....39
4.1 Introduction.....39
4.2. Theoretical Analysis.....39
4.2.1 Double Heterostructure Lasers.....40
4.2.2 Four-layer Heterostructure Lasers.....42
4.2.3 Separate-Confinement Heterostructure Lasers...46
4.3 Fabrication Procedure.....49
4.3.1 Double Heterostructure Lasers.....51
4.3.2 Four-layer Heterostructure Lasers.....53
4.3.3 Separate-Confinement Heterostructure Lasers...54
4.4 Results on Characteristics of Lasers with different Structures and Discussion.....57
4.4.1 Double Heterostructure Lasers.....57
4.4.2 Four-Layer Heterostructure Lasers.....58
4.4.3 Separate-confinement Heterostructure Lasers...59
4.5 Summary.....62
Chapter 5. LPE-Grown GaAs-GaAlAs Single Quantum Well Lasers.....64
5.1 Introduction.....64

Page

5.2 Fabrication Consideration for SQW Structures.....65
5.3 Experimental Procedure.....66
5.4 Characteristics of GaAs-GaAlAs Single Quantum Well Lasers.....67
5.5 Photoluminescence Measurement.....71
5.6 Broad area Structure Results.....72
5.7 Summary.....73
Chapter 6. Conclusion.....74
References.....76
Publication list of this work.....82
Appendix.....83
Vita.....97

TABLE INDEX

Page

Table 2.1 Types of Heterostructure.....6

Table 2.2 Refractive indices of GaAs and GaAlAs at 0.88 μm.....22

Table 4.1 Layer structure of DH lasers.....52

Table 4.2 Layer structure of four-layer heterostructure lasers.....54

Table 4.3 Layer structure of SCH lasers.....56

Table 4.4 Summary of characteristics of LPE-Grown GaAs-GaAlAs lasers.....63

FIGURE INDEX

Page

Fig.2.1 Band line-up in heterojunctions.....5

Fig.2.2 Optical confinement Γ, emission angle θ and gain g of DH lasers as function of active layer thickness.....11

Fig.2.3 Reflection from 20-period GaAs-GaAlAs Bragg reflector.....12

Fig.2.4 Geometry for the computing of the boundary condition.....14

Fig.2.5 The schematic diagram of three-layer slab waveguide.....16

Fig.2.6 Effective index of symmetrics three-layer slab waveguide..17

Fig.2.7 The schematic diagram of four-layer slab waveguide.....18

Fig.2.8 Effective index of symmetrics four-layer slab waveguide...19

Fig.2.9 The schematic diagram of five-layer slab waveguide.....20

Fig.2.10 Effective index of symmetrics five-layer slab waveguide...22

Fig.2.11 Confinement factor for GaAs-GaAlAs (X_{Al}=0.5) DH structure as a function of active layer thickness.....23

Fig.3.1 Horizontal LPE system for multilayer growth by the sliding technique.....28

Fig.3.2 a) The disassembled graphite boat apparatus.....30

b) The assembled graphite boat.....31

Fig.3.3 Solution cooling procedure for four different LPE growth techniques.....32

Fig.3.4 Liquidus isotherms of the Ga-As system for Ga-rich solution.....35

Fig.3.5 Liquidus isotherms of the Ga-Al-As system for Ga-rich solution.....36

Fig.3.6 Solidus isotherms of the Ga-Al-As system for Ga-rich solution.....36

Page

Fig.4.1 The schematic diagram of DH structure.....40

Fig.4.2 The predicted J_{th} values versus d_a (active layer thickness) of GaAs-GaAlAs DH LD's having cavity length (L) = 400 μm with different Al contents in the cladding layers (X_c)....41

Fig.4.3 The predicted J_{th} values cavity length of GaAs-GaAlAs DH LD's having active layer thickness = 0.05 μm with different Al contents in the cladding layers.....42

Fig.4.4 The schematic diagram of four-layer heterostructure.....43

Fig.4.5 The predicted J_{th} values versus d_a of GaAs-GaAlAs four-layer heterostrcuture LD's having Al content in the waveguide layer (X_w) = 0.2, L = 400 μm and X_c = 0.5 with different waveguide layer thicknesses (d_w).....43

Fig.4.6 The predicted J_{th} values versus waveguide layer thickness of GaAs-GaAlAs four-layer heterostrcuture LD's having d_a = 300 Å, X_w = 0.2 and L = 400 μm with different Al contents in the cladding layers.....44

Fig.4.7 The predicted J_{th} values versus X_{Al} in the waveguide layer of GaAs-GaAlAs four-layer heterostructure LD's having d_a = 300 Å, d_w = 0.1 μm, L = 400 μm with different Al contents in the cladding layer.....45

Fig.4.8 The schematic diagram of SCH structure.....46

Fig.4.9 The predicted J_{th} values versus d_a of GaAs-GaAlAs SCH LD's having Al content in barrier layer (X_b)= 0.2, L = 400 μm and X_c = 0.5 with different barrier layer thicknesses (d_b).....47

Fig.4.10 The predicted J_{th} values versus d_b of GaAs-GaAlAs SCH LD's having d_a = 200 Å, X_b =0.2 and L = 400 μm with different Al contents in the cladding layer.....48

Page

Fig.4.11 The predicted J_{th} values versus X_{Al} in barrier layer of GaAs-GaAlAs SCH LD's having d_a = 200 Å, d_b = 0.06 μm and L = 400 μm with different Al contents in the cladding layers.....49

Fig.4.12 a) The schematic structure of DH structure.....51

b) SEM image of DH structure grown by LPE using supercooling technique.....51

Fig.4.13 SEM image of DH structure with 500 Å active layer grown by LPE using combined techniques of two-phase solution and supercooling.....53

Fig.4.14 The schematic structure of four-layer structure.....54

Fig.4.15 a) Schematic structure of SCH structure.....55

b) SEM image of SCH structure grown by LPE using combined techniques of two-phase solution and supercooling.....56

Fig.4.16 The I-L characteristic and lasing spectrum of DH LD.....58

Fig.4.17 The I-L characteristic and lasing spectrum of four layers heterstructure LD grown by combined techniques.....59

Fig.4.18 The I-L characteristic and lasing spectrum of SCH LD.....60

Fig.4.19 The dependence of external quantum efficiency versus cavity length.....61

Fig.4.20 The spectrum of SCH LD under different bias conditions....61

Fig.5.1 Schematic structure of SQW-SCH.....67

Fig.5.2 SEM image of LPE-Grown of GaAs-GaAlAs SQW-SCH structure...67

Fig.5.3 Spontaneous emission spectrum at different bias currents of LPE grown of GaAs-GaAlAs SQW-SCH structure.....68

Fig.5.4 I-L characteristic of LPE grown GaAs-GaAlAs SQW-SCH laser and its lasing spectrum.....69

Page

Fig.5.5 The dependence of threshold current density and lasing wavelength on cavity length.....70
Fig.5.6 Lasing spectrum at different bias currents of LPE-Grown GaAs-GaAlAs SQW-SCH laser.....71
Fig.5.7 The photoluminescence (PL) spectrum of GaAs-GaAlAs SQW-SCH.....72
Fig.5.8 I-L characteristic of LPE-Grown GaAs-GaAlAs SQW-SCH laser with 100-μm SiO_2 stripe-Geometry.....73
Fig.F.1 The drawing of basement part.....93
Fig.F.2 The drawing of upper part.....93
Fig.F.3 The drawing of slider.....94
Fig.F.4 The drawing of taper slider.....94
Fig.F.5 a) The drawing of assembled boat in soaking state.....95
b) The boat in soaking state which removed upper part.....95
Fig.F.6 a) The drawing of assembled boat in pre-growth run state..96
b) The boat in pre-growth run state which removed upper part.....96

Notation List

B	:	Magnetic induction
B_o	:	Band-to-band recombination coefficient
D	:	Electric displacement
d_a	:	Active layer thickness
d_b	:	Barrier layer thickness
d_w	:	Waveguide layer thickness
DH	:	Double Heterostructure
E	:	Electric field
E_g	:	Band gap energy
GaAs	:	Gallium Arsenide
GaAlAs	:	Gallium Aluminium Arsenide
g	:	Gain
H	:	Magnetic field
HJ	:	Heterojunction
I_{th}	:	Threshold current
J_{th}	:	Threshold current density
L	:	Laser cavity length
LD	:	Laser Diode
LED	:	Light Emitting Diodes
N	:	Refractive index
N_a	:	Refractive index of the active layer
N_b	:	Refractive index of the barrier layer
N_c	:	Refractive index of the cladding layer
N_w	:	Refractive index of the waveguide layer
N_{eff}	:	Effective index
q	:	Electronic charge
R_1	:	Facet reflectivity

S	:	Interface Recombination
SCH	:	Separate-confinememt Heterostructure
SEM	:	Scanning Electron Microscope
SLS	:	Strained Layer Superlattice
SQW	:	Single Quantum Well
T	:	Liquidus Temperature
ΔT_o	:	Degree of supersaturation
X_{Al}	:	Aluminium content
X_b	:	Aluminium content in barrier layer
X_c	:	Aluminium content in cladding layer
X_w	:	Aluminium content in waveguide layer
τ_r	:	Radiative minority lifetime
τ_{nr}	:	Nonradiative minority lifetime
ρ	:	Electric charge denisty
α_{int}	:	Internal loss coefficient of the active layer
α_{ext}	:	External loss coefficient in the passive layer
η_i	:	Internal quantum efficiency
η_d	:	Differential quantum efficiency
λ	:	Wavelength
λ_p	:	Peak Wavelength
Γ	:	Optical confinement
θ	:	Emission angle