

การศึกษาการเก็บกักพลังงานแสงของโครงสร้างเฮเทอโรที่มีช่องนำคลื่นรีดจ์  
เพื่อประยุกต์ใช้ในเลเซอร์ไดโอด



นาย กฤษฏา พรพิทักษ์พงศ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

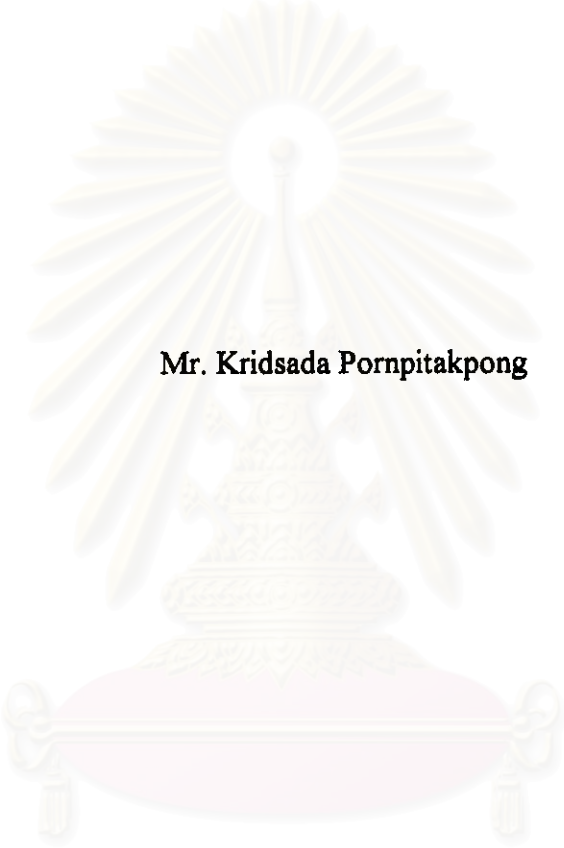
ปีการศึกษา ๒๕๔๐

ISBN 974-638-626-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**STUDY ON OPTICAL CONFINEMENT OF RIDGE WAVEGUIDE  
HETEROSTRUCTURE FOR LASER DIODE APPLICATIONS**

**Mr. Kridsada Pornpitakpong**



**สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

**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 1997  
ISBN 974-638-626-3**


Thesis Title                      Study on Optical Confinement of Ridge Waveguide  
   Heterostructure for Laser Diode Applications  
By    Mr. Kridsada Pornpitakpong  
Department                      Electrical Engineering  
Thesis Advisor                      Dr. Somchai Ratanathammaphan

---


Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University, in partial fulfillment of the requirements for the Master's Degree.


..... Dean of Graduate School  
( Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

Thesis Committee

..... Chairman  
( Professor Dr. Somsak Panyakeow )

..... Thesis Advisor  
( Dr. Somchai Ratanathammaphan )

..... Member  
( Associate Professor Dr. Banyong Toprasertpong )

..... Member  
( Associate Professor Dr. Choopol Antarasena )

กฤษฎา พรพิทักษ์พงศ์ : การศึกษาการเก็บกักพลังงานแสงของโครงสร้างเฮเทอโร ที่มีช่องนำคลื่น  
ริดจ์ เพื่อประยุกต์ใช้ในเลเซอร์ไดโอด ( STUDY ON OPTICAL CONFINEMENT OF RIDGE  
WAVEGUIDE HETEROSTRUCTURE FOR LASER DIODE APPLICATIONS ) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
อ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ , ๘๘ หน้า , ISBN ๙๗๔-๖๓๘-๖๒๖-๓

วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และทดลองสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างของช่องนำ  
คลื่นริดจ์ คุณสมบัติของการนำคลื่นแสงได้ถูกศึกษาด้วยวิธีการประมาณค่าดัชนีหักเหประสิทธิผล จากวิธีการ  
ดังกล่าวสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักแสงซึ่งหมายถึงค่าอัตราส่วนของพลังงานแสงที่ถูกเก็บกักไว้  
ในช่องนำคลื่น และใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลของค่าความหนาของชั้นก้ำเนิดแสง, ชั้นของช่องนำคลื่น และชั้น  
เปลือก ที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเก็บกักพลังงานแสงในทิศทางตั้งฉากกับแนวตั้งจากพื้นฐาน คือ DH,  
LOC และ SCH ซึ่งได้ค่าความหนาที่เหมาะสมที่ทำให้โครงสร้างมีคุณสมบัติแบบโหมดเดียวในแนวตั้งจากกับ  
รอยต่อในแต่ละเงื่อนไขในแต่ละกรณี สำหรับการมีคุณสมบัติแบบโหมดเดียวในแนวนอนกับรอยต่อสามารถ  
วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของค่าความหนาที่เหลือของชั้นเปลือกด้านบน และความกว้างของริดจ์ การ  
ทดลองสร้างเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างเป็นแบบริดจ์ ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานแบบ DH และมีชั้นก้ำเนิดแสงหนา  
๐.๒ ไมครอน ได้ถูกสาธิตด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากสถานะของเหลว สำหรับโครงสร้างริดจ์นี้มีความ  
กว้าง ๔ ไมครอน และความหนาที่เหลือของชั้นเปลือกด้านบน ๐.๓๕ ไมครอนซึ่งได้จากวิธีการกัดทางเคมี  
แบบเปียก ทำให้ได้ค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลในแนวนอนหัวต่อมีค่า ๐.๐๐๒ เพื่อให้ได้  
ลำแสงเลเซอร์เป็นจุดเดี่ยว เลเซอร์ไดโอดที่ผลิตได้นี้มีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์อยู่ระหว่าง  
๑๒๐ ถึง ๑๕๐ มิลลิแอมป์ และมีประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอกอยู่ระหว่าง ๒.๕% ถึง ๓.๖% จาก  
ตัวอย่างที่มีความยาวคาวิตีในช่วง ๕๐๐ ถึง ๖๐๐ ไมครอน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา ..... ๒๕๔๐

ลายมือชื่อนิติ ..... กฤษฎา พรพิทักษ์พงศ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม .....

## C815485 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING  
KEY WORD: Optical Confinement / Effective Refractive Index / Ridge Waveguide

KRIDSADA PORNPITAKPONG : STUDY ON OPTICAL CONFINEMENT OF RIDGE WAVEGUIDE HETEROSTRUCTURE FOR LASER DIODE APPLICATIONS. THESIS ADVISOR : DR. SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN, D. Eng. 88 pp. ISBN 974-638-626-3

The ridge waveguide laser diode is theoretically analyzed and experimentally fabricated in this thesis. The waveguide properties are investigated by using the effective refractive index approximation. The optical confinement, defined as the fraction of the optical power containing in the waveguiding layers, is obtained by this technique. The analyses of the fundamental transverse heterostructures of DH, LOC and SCH are carried out and consequently yields the optimal values of active, waveguiding and cladding layer thickness; such values providing the single transverse mode. In order to obtain the single lateral mode, the optimal values of residual upper-cladding layer thickness ( $t$ ) and ridge width ( $w$ ) are determined by analyzing the effect of cladding layer thickness. The experimental fabrication of ridge waveguide laser with GaAs/AlGaAs DH structure and an 0.2  $\mu\text{m}$  GaAs active layer is demonstrated by the Liquid Phase Epitaxy (LPE) technique. The ridge width of 4  $\mu\text{m}$  and residual thickness of 0.35  $\mu\text{m}$  are established by wet-chemically etching and thereby provide the difference of 0.002 lateral index step for single-spot beam profile ( $\text{TE}_{00}$ ). The threshold current ranging from 120 to 150 mA and the differential quantum efficiency ranging from 2.5 to 3.6% were achieved from the fabricated chips with 500-600  $\mu\text{m}$  cavity length.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา.....2540

ลายมือชื่อนิต..... กอชญา ทรรักษ์กัณฑ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## ACKNOWLEDGMENTS

Special thanks are due to the author's mother for permission to disturb her leisure time.

The author is deeply indebted to Lecturer Somchai Ratanathamphan for helpful guidance and encourage from start of the study. And the author is grateful to Professor Somsak Panyakeow, Associate Professor Banyong Toprasertpong and Associate Professor Choompol Antarasena for helpful observations and a critical reading of the manuscript.

This research was financially supported in part from the National Science and Technology Development Agency of Thailand (NSTDA) and the Sit Kon Kutti Program. This work was also partly supported by the research division of Chulalongkorn University by Rachadaphiseksomphot Fund and National Research Council of Thailand by the QW laser project.

The author was favored to have the assistance of Dr. Suwat Sopitpan and Khun Supachok Thainoi who contributed his experimental skill, sustained effort, and grasp of objectives to the accomplishment of the experimental program. It is a pleasure to acknowledge the hospitality, encouragement and valuable advice of Lecturer Arporn Teeramongkolrasamee.

This thesis owes much to Khun Wilaiporn Kumpirarusk, Khun Rudeesun Songmuang and Khun Narongsak Kumpirarusk for reading the draft and making a number of helpful suggestions. The author also would like to express appreciation to all staffs in SDRL for useful suggestions and moral support.



# CONTENTS

	page
Abstract (Thai) .....	iv
Abstract (English) .....	v
Acknowledgment .....	vi
Contents .....	vii
List of Figures .....	ix
List of Table .....	xii
Chapter	
1 Introduction .....	1
1.1 Background .....	1
1.2 Objective .....	3
1.3 Overview .....	3
2 Basic conception on laser diode structures .....	5
2.1 Homojunction laser diode .....	5
2.2 Double heterojunction (DH) laser diode .....	6
2.3 Broad-area and stripe-geometry laser diode .....	8
2.4 Large optical cavity (LOC) laser diode .....	8
2.5 Separate confinement heterostructure (SCH) laser diode .....	10
2.6 Graded-index separate confinement heterostructure (GRIN-SCH) laser diode .....	10
2.7 Current blocking layer included laser diode .....	11
2.8 Buried heterostructure (BH) laser diode .....	12
2.9 Channeled substrate planar (CSP) laser diode .....	12
2.10 Constricted double heterostructure (CDH) laser diode .....	13
2.11 Ridge waveguide (RW) laser diode .....	13
2.12 Other structures .....	15
3 Optical waveguide .....	17
3.1 Dielectric waveguide .....	17
3.2 Waveguide modes .....	18

## CONTENTS (continued)

Chapter	page
3.3 Effective index approximation .....	19
3.4 Transverse mode .....	23
3.5 Lateral modes .....	29
3.5.1 Index-guided laser diodes .....	29
3.5.2 Gain-guided laser diodes .....	31
4 Ridge waveguide's optical confinement analysis .....	32
4.1 Transverse analysis of DH structure .....	33
4.2 Transverse analysis of LOC structure .....	40
4.3 Transverse analysis of SCH structure .....	47
4.4 Lateral analysis of ridge waveguide structure .....	55
4.5 Proposed ridge waveguide structure .....	62
5 Device Fabrication .....	64
5.1 Epitaxy growth .....	64
5.2 Ridge establishment .....	67
5.3 SiO <sub>2</sub> deposition .....	69
5.4 Stripes opening .....	70
5.5 Substrate lapping .....	70
5.6 Metallization .....	71
6 Ridge Waveguide Laser Diode Characteristics .....	73
6.1 Ridge dimension measurement .....	73
6.2 Current versus voltage (I-V) characteristics .....	75
6.3 Light versus current (L-I) characteristics .....	75
6.4 Spectral characteristics .....	76
6.5 Result discussions .....	78
7 Conclusion .....	79
References .....	80
Appendix .....	86
List of Publication .....	87
Biography .....	88



## LIST OF FIGURES

Figure	Page
1.1 Schematic illustration of (a) homostructure and (b) double-heterostructure laser diode. ....	2
2.1 Energy-band diagram of a p-n junction. ....	6
2.2 Energy-band diagram of a double-heterostructure laser diode. ....	7
2.3 Various laser diode structures. ....	9
2.4 Index profiles of SCH structures (a) conventional SCH (b) parabolic GRIN-SCH and (c) linear GRIN-SCH. ....	11
2.5 Cross-section schematic of ridge waveguide (RW) laser diode. ....	14
2.6 Summary classification of laser diode structures. ....	16
3.1 Dielectric waveguiding in a heterostructure laser diode. ....	18
3.2 Cross-section schematic of (a) gain-guided and (b) index-guided devices. ....	19
3.3 Clarification of the x, y and z axis used in the effective refractive index approximation. ....	20
3.4 Schematic and index profile of a DH structure. Shaded area designates the waveguiding region. ....	24
3.5 Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the active layer thickness ( $d$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs DH lasers with varied cladding-layer indices (a) 3.35, (b) 3.40, (c) 3.45 and (d) 3.50. ....	27
4.1 Schematic and index profile of a DH structure corresponding to the wing region of ridge waveguide laser. Shaded area designates the waveguiding region. ....	33
4.2 Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the residual upper cladding layer thickness ( $t$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs DH lasers with varied cladding-layer indices (a) 3.35, (b) 3.40, (c) 3.45 and (d) 3.50. ....	35

## LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page	
4.3	Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the residual upper cladding layer thickness ( $t$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs DH lasers with varied active layer thickness (a) 0.1, (b) 0.3 and (c) 0.5 $\mu\text{m}$ . ....	37
4.4	Schematic and index profile of a type-A LOC structure corresponding to the wing region of ridge waveguide laser. Shaded area designates the waveguiding region. ....	40
4.5	Schematic and index profile of a type-B LOC structure corresponding to the wing region of ridge waveguide laser. Shaded area designates the waveguiding region. ....	40
4.6	Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the residual upper cladding layer thickness ( $t$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs type-A LOC lasers with varied cladding- and waveguiding-layers indices. ....	42
4.7	Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the residual upper cladding layer thickness ( $t$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs type-B LOC lasers with varied cladding- and waveguiding-layers indices. ....	45
4.8	Schematic and index profile of a SCH structure corresponding to the wing region of ridge waveguide laser. Shaded area designates the waveguiding region. ....	47
4.9	Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the residual upper cladding layer thickness ( $t$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs symmetrical SCH lasers with varied cladding- and waveguiding-layer indices. ....	48
4.10	Comparison of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) in various transverse structures (a) DH with 0.1 $\mu\text{m}$ active layer thickness, (b) type-A LOC, (c) type-B LOC, (d) SCH and (e) DH with 0.5 $\mu\text{m}$ active layer thickness. ....	52

## LIST OF FIGURES (continued)

Figure	Page
4.11	Illustrated schematic of ridge cross section used in the calculation. .... 55
4.12	Simulation results of transverse confinement factor ( $\Gamma_T$ ) and effective refractive index ( $n_e$ ) as the functions of the ridge width ( $W$ ) for 0.870 $\mu\text{m}$ GaAs ridge lasers with varied lateral index step ( $\Delta n_L = n_e^{\text{ridge}} - n_e^{\text{wing}}$ ) (a) 0.001, (b) 0.002, (c) 0.005 and (d) 0.010 . .... 57
4.13	Simulation results of lateral index step ( $\Delta n_L$ ) and cut-off ridge width ( $W_{co}$ ) in variuos transverse structures (a) DH with 0.1 $\mu\text{m}$ active layer thickness, (b) DH with 0.5 $\mu\text{m}$ active layer thickness, (c) type-A LOC, (d) type-B LOC and (d) SCH . .... 60
4.14	Cross-section schematic of the proposed ridge waveguide laser. .... 63
5.1	Major steps of device fabrication. .... 65
5.2	Schematic of LPE epitaxy grown for the transverse DH laser diodes. .... 66
5.3	(a) Cross-section photograph of an epitaxy-grown sample taken by the optical microscope and (b) schematic detail of the photograph to describe the thickness of each layer. .... 67
5.4	Schematic of GaAs profile etched by $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 4 : 44$ ... 68
5.5	Cross-section photograph of an etched sample taken by optical microscope. .... 69
6.1	(a) Cross-section photograph of a fabricated RW laser chip taken by optical microscope and (b) schematic detail of the photograph to describe the dimesions of ridge. .... 74
6.2	Current - voltagete characteristics of a RW laser diode. The curve shows the cut-in voltage of 2.8 V and the series resistance of 43 $\Omega$ . .... 74
6.3	Light - current characteristics of a RW laser diode. The curve shows threshold current of 120 mA and diffieral quantum efficiency of 3.6%. .. 75
6.4	Spectral characteristics of a RW laser diode at (a) under-threshold current of 115 mA and (b) above-threshold current of 120 mA. .... 77

## LIST OF TABLE

Table	Page
6.1 The data of 8 fabricated laser diode chips. All chips are not fabricated from the same LPE sample. ....	76



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย