



E46262

WASHINGTON UNIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



600256078

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E46262

การประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่มีรูปร่างคล้ายวงแหวน  
จากอินเดียมเทลเลไนด์ด้วยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด



นางสาวนราพร ปั่นเก่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 0 7 1 8 6 4 0 2 1

THE FABRICATION OF InGaAs RING-LIKE NANOSTRUCTURES  
BY DROPLET MOLECULAR BEAM EPITAXY



Miss Naraporn Pankaow

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic year 2010

Copyright of Chulalongkorn University


Thesis Title	The Fabrication of InGaAs Ring-Like Nanostructures by Droplet Molecular Beam Epitaxy
By	Miss Naraporn Pankaow
Field of Study	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Somchai Ratanathamphan, D.Eng.
Thesis Co-advisor	Professor Somsak Panyakeow, D.Eng.
Thesis Co-advisor	Professor Charles W. Tu, Ph.D.

---


Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in  
Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctor's Degree


.......... Dean of Faculty of Engineering  
( Associate Professor Boonsom Lerthirunwong, Dr.Ing. )

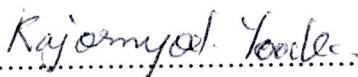
#### THESIS COMMITTEE

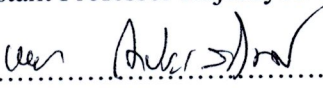
.......... Chairman  
( Professor Virulh Sa-yakanit, Ph.D. )

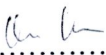
.......... Thesis Advisor  
( Associate Professor Somchai Ratanathamphan, D.Eng. )

.......... Thesis Co-advisor  
( Professor Somsak Panyakeow, D.Eng. )

.......... Thesis Co-advisor  
( Professor Charles W. Tu, Ph.D. )

.......... Examiner  
( Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D. )

.......... Examiner  
( Associate Professor Banyong Toprasertpong, Dr.Ing. )

.......... External Examiner  
( Noppadon Nuntawong, Ph.D. )



นราพร ปันเก่า : การประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่มีรูปร่างคล้ายวงแหวนจากอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ด้วยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด. (THE FABRICATION OF InGaAs RING-LIKE NANOSTRUCTURES BY DROPLET MOLECULAR BEAM EPITAXY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, Prof.Dr. Charles W. Tu, 66 หน้า.

**E46262**

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด โดยมีการแปรเงื่อนไขในการขึ้นรูปหยดของอินเดียมแกลเลียม เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิแผ่นฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะของอินเดียมแกลเลียม ปริมาณอินเดียมแกลเลียมที่ใช้ในการขึ้นรูปหยดโลหะ และค่าสัดส่วนอินเดียมของอินเดียมแกลเลียมที่หยดลงไป ที่มีต่อโครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกอินเดียมแกลเลียมสูงขึ้น จะทำให้ขนาดของโครงสร้างอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์รูปร่างวงแหวนมีขนาดใหญ่มากขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นของจำนวนโครงสร้างนาโนลดลง เนื่องจากกระแสรอบของอะตอมโลหะอินเดียมและแกลเลียมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้หยดของอินเดียมแกลเลียมแผ่ขยายไปในทิศทางสองมิติและหลอมรวมตัวกับหยดที่อยู่ใกล้เคียง ในทางเดียวกันการเพิ่มปริมาณอินเดียมแกลเลียมที่ใช้ในการขึ้นรูปหยดโลหะทำให้ขนาดของโครงสร้างอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์รูปร่างวงแหวนมีขนาดใหญ่มากขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิแผ่นฐานขณะหยดต่ำ (150 องศาเซลเซียส) แต่ความหนาแน่นของโครงสร้างรูปร่างวงแหวนแปรเปลี่ยนไปมาเมื่อเพิ่มปริมาณอินเดียมแกลเลียม อันเป็นผลมาจากการรวมตัวของหยดอินเดียมแกลเลียมขนาดเล็กจนกลายเป็นชั้นเรียบแทนที่จะเป็นหยดเดี่ยวๆ สำหรับกรณีที่อุณหภูมิแผ่นฐานขณะหยดสูงขึ้น (210 องศาเซลเซียส) โครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนมีขนาดสูงขึ้นมีความหนาแน่นมากขึ้นแต่กลับมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง อันเป็นผลมาจากความเครียด (compressive strain) ซึ่งสะสมภายในโครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนที่ใหญ่ขึ้นและเกิดการผ่อนคลายบางส่วน นอกจากนี้การแปรค่าสัดส่วนอินเดียมของอินเดียมแกลเลียมที่ใช้ในการขึ้นรูปหยดโลหะ ไปทำให้ความหนาแน่นและขนาดของโครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน ได้แก่ โครงสร้างรูปร่างวงแหวนขนาดจิ๋วที่มีความหนาแน่นสูงเกิดจากหยดอินเดียมแกลเลียมที่มีปริมาณแกลเลียมมากกว่าอินเดียม ในขณะที่โครงสร้างรูปร่างวงแหวนขนาดปกติที่มีความหนาแน่นต่ำเกิดจากหยดอินเดียมแกลเลียมที่มีปริมาณอินเดียมมากกว่าแกลเลียม

สำหรับการวัดคุณสมบัติทางแสง โครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวนของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ถูกปลูกขึ้นอีกครั้งภายใต้เงื่อนไขที่เลือกและปลูกกลับด้วยชั้นของแกลเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 นาโนเมตร ประกอบด้วยชั้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกด้วยโดยวิธีไมเกรชัน-เอนฮานซ์อีพิแทกซ์ (migration-enhanced epitaxy) และชั้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกด้วยวิธีปกติ คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างรูปร่างวงแหวนของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์สังเกตได้จากการเปล่งแสงของตัวอย่างเมื่อได้รับการกระตุ้นจากแสง (photoluminescence spectra) ที่อุณหภูมิ 20-100 เคลวิน อย่างไรก็ตามค่าความเข้มของแสงที่ได้ยังมีค่าไม่มากนัก เนื่องจากความหนาแน่นของจำนวนโครงสร้างวงแหวนอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ต่ำ ( $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ) ทั้งนี้ ได้มีการแปรค่าตัวแปรในการวัดคุณสมบัติทางแสงอันประกอบไปด้วย ค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการกระตุ้น อุณหภูมิในการวัด และโพลาไรเซชันพบว่าผลทางแสงที่ถูกโพลาไรซ์ของชั้นงานตัวอย่างบ่งบอกถึงความไม่สมมาตรของโครงสร้างนาโนรูปร่างวงแหวน

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... *Pan Sunka* .....  
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ..... *สมชัย รัตนธรรมพันธ์* .....  
 ปีการศึกษา ..... 2553 ..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ..... *สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว* .....  
 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ..... *Charles W. Tu* .....



# # 5071864021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

**E46262**

KEY WORD: InGaAs / GaAs / NANOSTRUCTURES / DROPLET / MOLECULAR BEAM EPITAXY / QUANTUM RING

NARAPORN PANKAOW : THE FABRICATION OF InGaAs RING-LIKE NANOSTRUCTURES BY DROPLET MOLECULAR BEAM EPITAXY.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMCHAI

RATANATHAMMAPHAN, D.Eng., THESIS CO-ADVISORS : PROF.

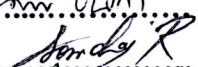
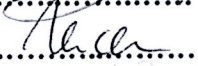
SOMSAK PANYAKEOW, D.Eng., PROF. CHARLES W. TU, Ph.D., 66 pp.

InGaAs ring-shaped nanostructures, or quantum rings (QRs), have been fabricated by droplet epitaxy using solid-source molecular beam epitaxy (MBE). The droplet forming conditions have been varied by changing the growth parameters including substrate temperature ( $T_s \sim 120\text{-}300^\circ\text{C}$ ) during  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  deposition,  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  deposited amount (2-5ML), and In-mole-fraction ( $x \sim 0.3\text{-}0.7$ ) of InGa droplets. The morphology of the QRs was characterized by atomic force microscopy (AFM). The effects of each growth parameters on the InGaAs QRs are investigated. Increasing  $T_s$  results in the InGaAs QRs of a larger size but lower density due to 2-dimensional expansion and merging of InGa droplets. Furthermore, increasing  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  amount deposited results in larger QRs at low  $T_s$ . However, the QR density oscillates with increasing  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  amount due to merging of small droplets into a full-layer. At higher  $T_s$ , increasing  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  amount results in the QRs of a higher height, higher density but smaller diameter due to the accumulating compressive strain inside larger QRs and the partial relaxation. Moreover, varying In-mole-fraction ( $x$ ) of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$  droplets lead to a variation of crystallized-QR size and density, i.e.; high density tiny-size QRs from high-Ga-content droplets and low density large-size QRs from high-In-content droplets. For photoluminescence (PL) measurement, another set of samples were grown under the droplet forming conditions of 2-5 ML  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$  deposition at  $210^\circ\text{C}$ , with an additional 100-nm GaAs capping layer grown by migration-enhanced epitaxy and conventional method. The optical properties of the InGaAs QRs were analyzed by PL spectra of the respective samples at 20-100 K. The PL intensity is relatively low due to low density of the QRs ( $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ). The PL measuring parameters, including excitation intensity, measuring temperature and polarization have been varied. When increase the excitation intensity, the PL intensities increase without shifting, indicating the ground-state energy of the InGaAs QR systems. With increasing the measuring temperature, the PL intensities decrease without thermal broadening. It is also observed that the spectra of 3 ML sample are not shifted. However, the spectra of 4 ML sample are red-shifted, implying the existence of the strain field. Finally, the polarized PL spectra correspond to the elongation of the QRs, confirming the anisotropy of the QRs.

Department ...Electrical Engineering...

Field of study ...Electrical Engineering..

Academic year .....2010.....

Student's signature .....Advisor's signature .....Co-advisor's signature .....Co-advisor's signature .....



## Acknowledgements

The author would like to give special thanks to his family for endless and encouraging support throughout this work.

The author gratefully acknowledges all those who provided invaluable help and encouragement during the research at the Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. In particular, the author would like to acknowledge Associate Professor Dr. Somchai Ratanathamphan, Professor Dr. Somsak Panyakeow, and Professor Dr. Charles W. Tu who are the advisor and co-advisors. The author also would like to thank Lecturer Boonchuay Supmonchai, Assistant Professor Dr. Tara Cholapranee, and Associate Professor Dr. Twittie Senivongse for their advice on English grammar. Moreover, this research is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant no. PHD/0011/2550) to Naraporn Pankaow and Somchai Ratanathamphan. This research is also supported by Nanotechnology Center of Thailand (Nanotec), the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand - Office of the Higher Education Commission (EN264A), Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD), and Chulalongkorn University. Finally, this thesis could not be completed without special helps of the SDRL researchers: Mr. Supachok Thainoi, Mr. Pronchai Changmaung, Mr. Poonyaseri Boonpeng, Mr. Ong-arj Tangmettajittakul, Dr. Wipakorn Jewasuwan, and colleagues.

# CONTENTS

	Page
Abstract (Thai) .....	iv
Abstract (English) .....	v
Acknowledgements .....	vi
Contents .....	vii
List of Figures .....	ix
List of Symbols .....	xv
Chapter I      Introduction .....	1
1.1      Motivation .....	1
1.2      Objective .....	3
1.3      Overview .....	3
Chapter II     Rationale, Theory and Hypothesis .....	5
2.1     Quantum nanostructures .....	5
2.1.1    Carrier confinement and energy level quantization .....	5
2.1.2    Double potential well .....	9
2.1.3    Ring-shaped nanostructures or quantum rings (QRs).....	11
2.1.4    Material considerations .....	12
2.2     Self-assembled growth .....	13
2.2.1    Growth modes .....	13
2.2.2    Droplet epitaxy .....	16
2.2.3    Migration-Enhanced Epitaxy (MEE) .....	17
Chapter III    Experimental Details .....	19
3.1    Molecular Beam Epitaxy (MBE) .....	19
3.2    Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED) .....	21
3.2.1    RHEED intensity oscillation .....	23
3.3    Atomic Force Microscopy (AFM) .....	24
3.4    Photoluminescence (PL) spectroscopy .....	26
3.5    Experimental Procedures .....	28



	Page
Chapter IV    Result and Discussion .....	32
4.1    Evolution of Surface Morphology .....	32
4.2    Surface Morphology .....	35
4.3    Effects of substrate temperature during In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> deposition: T <sub>s</sub> on InGaAs QRs.....	39
4.4    Effects of deposited In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> amount on InGaAs QRs .....	43
4.5    Effects of In-mole-fraction of deposited In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> on InGaAs QRs.....	46
4.6    Photoluminescence (PL) measurement of InGaAs QRs.....	48
 Chapter V    Conclusions .....	 54
 References .....	 57
 Appendix .....	 63
 Vitae .....	 66

## LIST OF FIGURES

Figure		Page
2.1	Schematic comparison of bulk, waveguide, QD, and atom [32] .....	6
2.2	Schematic views and graphs of (a) bulk (3-D structure), (b) quantum wells (2-D structure), (c) quantum wires (1-D structure), and (d) QD (0-D structure) and their density of states (D.O.S.) [33]. $L$ is in macroscopic scale (~cm), while $L_x, L_y, L_z$ , are in nanoscale. ....	6
2.3	The lowest three levels of carrier's energy quantization in potential well with width of $L_z$ (comparable to de Broglie wavelength). The picture shows examples of the three lowest-energy standing waves (solid line) which can happen in a potential well and the corresponding carrier's energy level of the de Broglie wavelength from the standing wave (dotted line), i.e. $E_1, E_2$ and $E_3$ . The energy of each level is given by $E_{n,z} = \hbar^2 (n\pi)^2 / 2m^* L_z^2$ , where $n$ is an integer numbers. ....	8
2.4	Band profile of symmetric GaAs/Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As double potential well [39]. ....	10
2.5	Confinement energies of the lowest two states of a symmetric double potential well as a function of the central barrier width [39]. ....	10
2.6	Wave functions of the lowest two energy levels of the symmetric double potential well with a central barrier width of 40 Å [39]. ....	11
2.7	The relationship between lattice constant and energy gap at room temperature for the III-As material system. The solid line: direct band gap material, and the dotted line: indirect band gap material. ....	12



Figure		Page
2.8	Schematic representation of the 3 important growth modes of a film for different coverage ( $\theta$ ) (a) Frank van der Merwe (FM); (b) Stranski Krastanow (SK) and; (c) Volmer Weber (VM) [44].	14
2.9	Illustration of island formation during epitaxial growth of a semiconductor material on the top of another semiconductor with a smaller lattice constant in Stranski-Krastanow mode.	15
2.10	Schematic representation of the local strain energy density in and around the SK-growth mode QD. The energy barrier has a maximum at the edge of the QD [47].	15
2.11	Simple interpretation of the energy level exhibited in the QDs with different size. The representations in case of (a) small QD show the higher energy level than that of large QD (b) due to the carrier confinement properties.	16
2.12	The illustration of the nanostructure fabricated by droplet epitaxy.	17
2.13	Shutter operation characteristic of migration-enhanced epitaxy (MEE).	18
3.1	The conventional RIBER 32P MBE.	20
3.2	Schematic drawing of the modified III-V MBE growth chamber. The chamber is cooled by liquid N <sub>2</sub> (the base pressure $< 1 \times 10^{-10}$ torr).	21
3.3	Schematic representation of RHEED system.	22
3.4	Schematic diagram of RHEED geometry of the incident electron beam at an angle $\theta$ to the surface plane [44].	23
3.5	Schematic representation of RHEED intensity oscillations related to formation of the first two completed monolayer of GaAs (001) [44].	24
3.6	Schematic drawing of Atomic Force Microscopy (Drawn October 12, 2002 by Allen Timothy Chang).	25
3.7	The schematic representation of AFM measuring modes including contact mode, non-contact mode and tapping mode.	25

Figure		Page
3.8	Schematic of the PL experimental setup.....	26
3.9	A simple interpretation of the PL data from a nanostructure; (a) higher PL peak energy position from a small-size nanostructures and (b) lower PL peak position from a large-size nanostructures.....	27
3.10	A comparative of the PL spectrum from a single QD and QD array; (a) narrow PL spectrum due to the delta-function like density of states of a QD. (b) The PL <i>peak</i> energy position and the PL <i>linewidth</i> interpreting the <i>average size</i> and the <i>size distribution</i> of the QD array, respectively.....	28
3.11	Streak RHEED pattern observed during the de-oxidation process. ....	29
3.12	Schematic illustrations of the sample structures grown in this work (a) after crystallization in As <sub>4</sub> , and (b) after capping with a 100-nm GaAs capping layer. The details of growth sequences and growth conditions for the InGaAs nanostructures are given in the text.....	30
4.1	The formation process model of InGaAs QRs and RHEED patterns during the growth process. (a) RHEED patterns of 300-nm-thick GaAs buffer layers before In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> deposition, (b) RHEED patterns of the droplets during 0-1 minute after In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> deposition, (c) 1-7 minutes, (d) 7-11 minutes after depositing 3ML In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> , and (e) Streaky and spotty RHEED patterns after supplying As <sub>4</sub> flux of $6-7 \times 10^{-6}$ Torr for 5 minutes, indicating the formation of InGaAs QRs. The incident orientation of electron beam is along the [011] and [01-1] direction.....	33



Figure		Page
4.2	Scatterings of grazing electron beam on QD. Upper part: the geometrical arrangement of scattering on several crystal planes in QD. Transmission character dominates here. Lower part: the QD RHEED pattern originated from the product of the diffraction intensity from a crystal cluster and from a pyramid [57].	34
4.3	Scatterings of grazing electron beam on QR. Upper part: the geometrical arrangement of scattering on several crystal planes in QR or on two-dimensional basis plane. Either transmission or reflection character dominates depending in the finite size. Lower part: the product of transmission or reflection-like intensity and the scattering from rotationalshaped nanostructure resulting in near same RHEED pattern [57].	34
4.4	1000 x 1000 nm <sup>2</sup> surface morphology of InGaAs ring-like nanostructures grown on GaAs under different growth conditions, including T <sub>s</sub> 120-300°C and In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> amount corresponding to layer thickness 2-5 ML.	35
4.5	350 x 350 nm <sup>2</sup> AFM image and its cross-section along [011] and [01-1] of an InGaAs QR grown at 210°C with 3 ML In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> deposited.	36
4.6	The formation mechanism model of InGaAs ring-shaped nanostructures (QRs) from metallic InGa droplets. (a) Formation of liquid-phase metallic InGa droplets from coalescence of deposited In and Ga atoms. (b) Drilling effect of droplets and partial crystallization. (c) The crystallization into InGaAs QRs under As <sub>4</sub> flux (QR diameter ~ droplet diameter).	38
4.7	The dependence on substrate temperature (T <sub>s</sub> ) of InGaAs QR average size (diameter, outer height and inner height) and density.	39

Figure		Page
4.8	An illustration of different merging ranges of neighbouring metallic InGa adatoms at different substrate temperatures, showing larger size but low density droplets at high $T_s$ .....	40
4.9	A schematic drawing of 2-dimentional expansion of QRs at different substrate temperature 150-210°C, showing Wider expansion at higher $T_s$ .....	41
4.10	Dependence of InGaAs QR diameter, the outer height, and the inner depth on substrate temperature ( $T_s$ ) during $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ deposition. The distributions of (a) outer diameter, (b) outer height and (c) inner depth of InGaAs rings for each $T_s$ : 210°C, 240°C, 270°C and 300°C (data of 50 rings were collected for each condition). The $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ amount is 3 ML with a constant deposition rate of 1 ML/s .....	42
4.11	The dependence on deposited $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ amount of InGaAs QR size and density. ....	43
4.12	A schematic model of the reduction of QR density with increasing InGa amount, for $T_s = 150^\circ\text{C}$ . The details are given in the text.....	45
4.13	A schematic model of the saturation of QR density for $T_s = 210^\circ\text{C}$ , including the drawing of corresponding crystallized QR to briefly describe diameter decreasing from the vertical-relaxation of the accumulating strain. The details of each step are given in the text. ....	45
4.14	500 x 500 nm <sup>2</sup> AFM images and their corresponding cross-section along [011] and [01-1] of InGaAs QRs grown at 210°C with 2-5 ML $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ deposited. ....	46
4.15	500 × 500 nm <sup>2</sup> AFM images of the samples grown under the conditions of 3 ML $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$ deposited ( $0.3 \leq x \leq 0.7$ ) at $T_s = 150^\circ\text{C}$ , including the corresponding QR diameter distributions for each condition. ....	47



Figure		Page
4.16	The dependence of the density of the tiny-size, large-size InGaAs QRs and overall (including both tiny-size and Large-size QRs) on Indium-mole-fraction ( $x$ ). Deposited $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$ amount is 3 ML with $T_s = 150^\circ\text{C}$ . .....	48
4.17	The PL spectra of the capped InGaAs QRs grown under the conditions of $T_s = 210^\circ\text{C}$ with 3 ML and 4 ML $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ droplets measured at reference PL measuring condition (laser power = 40 mW, measured at 20 K). .....	49
4.18	The PL spectra at 20 K with 20–80 mW excitation power of the capped InGaAs QRs grown under the conditions of $T_s = 210^\circ\text{C}$ with 3 ML and 4 ML $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ droplets. ....	50
4.19	The PL spectra at 20-100 K of the capped InGaAs QRs grown under the conditions of $T_s = 210^\circ\text{C}$ with 3 ML and 4 ML $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ droplets (excitation power = 40 mW). ....	51
4.20	3-D AFM image of a QR with illustration representing coupled-like QD corresponding with the anisotropic-lateral of the QR. QD diameter is approximate to QR-lateral width (30-40 nm) and distance between the adjacent QDs is ~ 40-50 nm at the center and < 10 nm at the ends. ....	52
4.21	The PL spectra at various polarization angles: $0^\circ$ ~[01-1], $90^\circ$ ~[011] of the capped InGaAs QRs grown under the conditions of $210^\circ\text{C}$ substrate with 3 ML and 4 ML $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ droplets (measuring temperature = 20 K with laser power = 40 mW). ....	53

## LIST OF SYMBOLS

$\nabla^2$	Laplacian operator
$\alpha$	fitting parameter
AFM	atomic force microscopy
Al	aluminium
AlAs	aluminium arsenide
AlP	aluminium phosphide
As	arsenic
BEP	beam equivalent pressure
$\delta$	delta function
$\Delta$	total spectrum broadening from all excited quantum dot
$\Delta\gamma$	change of surface free energy
$D_{\text{QD}}(E)$	quantum dot density of state
D.O.S.	density of state
$\varepsilon_0$	lattice mismatch
$E$	carrier energy or total energy per unit cell
$E_g$	band gap energy
$E_{n,x}$	quantized energy in $x$ -direction
$E_{n,y}$	quantized energy in $y$ -direction
$E_{n,z}$	quantized energy in $z$ -direction
$F$	free energy
$F(\mathbf{r})$	envelope wave function
FM	Frank van der Merwe
FWHM	full width at half maximum
$\gamma_F$	surface free energy of the grown film/vacuum interface
$\gamma_{F/S}$	interface energy between grown film and substrate
$\gamma_S$	surface free energy of the substrate/vacuum interface
$g^{\text{sat}}$	maximum optical gain
Ga	gallium
GaAs	gallium arsenide
GaP	gallium phosphide



$h$	Planck's constant
$\hbar$	reduced Planck's constant
$I(\Phi)$	persistent current of a quantum ring
$I(T)$	activation energy of potential wells
In	indium
InAs	indium arsenide
InGaAs	indium gallium arsenide
InGaP	indium gallium phosphide
InP	indium phosphide
$k$	Boltzmann's constant
$k_B$	Boltzmann's constant
$\lambda_{\text{de Broglie}}$	de Broglie wavelength
$l_{C-QD}$	distance between two adjacent coupled quantum dots
$l_b$	center barrier width
$l_w$	potential well width
$L$	macroscopic length scale
$L_x$	nanometer length scale in x direction
$L_y$	nanometer length scale in y direction
$L_z$	nanometer length scale in z direction
$m^*$	effective mass
MBE	molecular beam epitaxy
ML	monolayer
Mo	molybdenum
$n$	quantum number in z-direction (integer)
$N_2$	nitrogen
$N_D$	volume density of quantum dot
$N_e$	number of state per unit surface
$p$	carrier momentum
PBN	pyrolytic boron nitride
PL	photoluminescence
QD	quantum dot
QDM	quantum dot molecule
QR	quantum ring
RHEED	reflection high-electron energy diffraction

Si	silicon
SiGe	silicon germanium
SK	Stranski Krastanow
T	temperature or PL measuring temperature
$T_s$	temperature during $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$ deposition
UHV	ultra high vacuum
$V(\mathbf{r})$	confinement potential function
VM	Volmer Weber
WL	wetting layer
$\Phi$	magnetic flux piercing a ring
$\theta$	angle or coverage