การปลูกและวัดลักษณะสมบัติของควอนตัมดอตชนิดอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีการจัดเรียงตนเองบนแผ่นฐานเสมือนซึ่งมีผิวหน้าชนิด cross-hatch

นางสาวโช โช เท็ต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

GROWTH AND CHARACTERISATION OF ORDERED INDIUM ARSENIDE QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH VIRTUAL SUBSTRATE

Miss. Cho Cho Thet

A Dissertation Submitted in Partial Fullfillment 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 2006

Thesis Title	GROWTH AND CHARACTERISATION OF ORDERED INDIUM ARSENIDE QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH VIRTUAL SUBSTRATE
By	Miss. Cho Cho Thet
Department	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Songphol Kanjanachuchai, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Professor Shunri Oda, D.Eng.

Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctoral Degree

..... Dean of the Faculty of Engineering

(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman

(Professor Somsak Panyakeow, D. Eng.)

..... Thesis Advisor

(Associate Professor Songphol Kanjanachuchai, Ph.D.)

..... Thesis Co-advisor

(Professor Shunri Oda, D. Eng.)

..... Member

(Associate Professor Montri Sawadsaringkarn, D.Ing.)

..... Member

(Professor Chua Soo-Jin, Ph.D.)

..... Member

(Sakuntam Sanorpim, Ph.D.)

โช โช เท็ต : การปลูกและวัดลักษณะสมบัติของควอนตัมดอตชนิดอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีการจัดเรียงตนเองบนแผ่นฐานเสมือนซึ่งมีผิวหน้าชนิด cross-hatch. (GROWTH AND CHARACTERISATION OF ORDERED INDIUM ARSENIDE QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH VIRTUAL SUBSTRATE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย, อ. ที่ปรึกษาร่วม Dr. Shunri Oda, 115 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอผลการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตบนรูปแบบตาราง (cross-hatch) ผิวหน้าแผ่นฐานเสมือน (virtual substrate, VS) ซึ่งเกิดจากการปลูก $In_xGa_{1-x}As$ บน GaAs (001) ด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (molecular beam epitaxy, MBE) โดยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายถึงการเกิดการจัดเรียงควอนตัมดอต นอกจากนี้ยังใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) ในการศึกษาผิวหน้าของแผ่นฐานเสมือน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) ในการวิเคราะห์หาต้นกำเนิดการเรียงตัวของควอนตัมดอต

โครงสร้างตารางเกิดจากสารประกอบ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ หนา 50 นาโนเมตรที่ถูกปลูกบนแผ่นฐาน GaAs หน้าตัด 001 ซึ่งมีความบกพร่องอันเนื่องมาจากค่าความต่างของค่าคงตัวผลึกซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วย TEM การแปลงฟูเรียน์และการกวาดเส้นที่แสดงให้เห็นถึงผิวหน้ารูปแบบตารางมีการแสดงผลอย่างไม่เป็นคาบด้วยค่าความต่างเฉลี่ยของระยะทางในแนวข้างของทิศทาง [110] และ [1-10]

ปริมาณความเครียดและอัตราส่วนอินเดียมของแผ่นฐานเสมือน ที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ความละเอียดสูง (high resolution x-ray diffraction, HRXRD) พบว่าระดับการคลายความเครียดของ InGaAs ขึ้นอยู่กับความหนาและอัตราส่วนอินเดียม ดังนั้นควอนตัมดอตที่ปลูกบนชั้น InGaAs ที่แตกต่างกันทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตที่แตกต่างกันด้วย โดยจะได้ควอนตัมดอตเรียงแถวเมื่อความหนาของ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ เท่ากับ 50 นาโนเมตร และจะได้กลุ่มของควอนตัมดอตโมเลกุลเมื่อความหนาดังกล่าวเปลี่ยนไปเป็น 100-150 นาโนเมตร โดยที่ผลการวัดคุณสมบัติทางแสงด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนต์สอดคล้องกับผลจาก HRXRD

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาหน่วงของการปลูก (Growth Interruption, GI) หลังจากที่ควอนตัมดอตก่อตัวขึ้น เพื่อปรับปรุงขนาดของดอตให้สม่ำเสมอ จากการทดลองพบว่าเวลาหน่วง 30 วินาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานเสมือนซึ่งมีผิวหน้าเป็น $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ นอกจากนี้ยังได้ทำการปลูกกลบควอนตัมดอตด้วยชั้น GaAs บางๆ เพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าซึ่งอาจถูกใช้เป็นแม่แบบสำหรับการปลูกในชั้นถัดไป จากการทดลองกลบชั้นบางพบว่า จะเกิดนาโนโฮลขึ้นบนควอนตัมดอตที่ก่อตัวบน GaAs แต่จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการกลบควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนรูปแบบตาราง โดยกลับพบควอนตัมดอตที่จัดเรียงตัวเองในทิศทาง [1-10] มากกว่าในทิศทาง [110] ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เพียงพอและความไม่สมมาตรของพลังงานความเครียดในระนาบที่ทำการปลูกควอนตัมดอต

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา .....2549..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

##4671853321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ORDERED InAs QUANTUM DOTS / InGaAs / GaAs CROSS-HATCH / VIRTUAL SUBSTRATE / MOLECULAR BEAM EPITAXY

CHO CHO THET:GROWTH AND CHARACTERISATION OF ORDERED INDIUM ARSENIDE QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH VIRTUAL SUBSTRATE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. SONGPHOL KANJANACHUCHAI.THESIS CO-ADVISOR: PROF. DR. SHUNRI ODA, pp 115.

Growth of InAs quantum dots (QDs) on $In_xGa_{1-x}As$/GaAs (001) cross-hatch virtual substrates (VS) has been carried out by molecular beam epitaxy (MBE). A model explaining the origin of QD alignment on the VS is developed. Cross-hatch surface morphology of the VS is studied by atomic force microscopy (AFM), and its origin by cross-sectional transmission electron microscopy (TEM).

The cross-hatch VS consists of 50-nm thick $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ on GaAs (001). Cross-hatch morphology on the surface of the VS is revealed by AFM and its origin from the networks of misfit dislocations (MDs) is confirmed by TEM. Fast Fourier transform (FFT) and line scan analyses indicate that the cross-hatch is aperiodic with different average lateral spacings in the two orthogonal ([1-10] and [110]) directions.

The strain and In composition of the VS are examined by high resolution X-ray diffraction (HRXRD). It is found that the degree of strain relaxation of the InGaAs layer increases with increasing thickness and In composition. Consequently, QDs grown on the different InGaAs layers result in different arrangements of QDs on the cross-hatch surfaces: ordered QDs are obtained when they are grown on partially-relaxed $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ (50 nm) layer; and groups of QDs are obtained when they are grown on more relaxed $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ (100 and 150 nm) layers. Photoluminescence (PL) measurements qualitatively agree with the HRXRD results.

Various growth interruption (GI) times are introduced after the formation of QDs in order to improve QD uniformity. It is found that a 30-second GI time is the optimum value for the growth of InAs QDs on $In_{0.15}Ga_{0.85}As$/GaAs VS. After InAs QD formation, the QDs are capped with a thin layer of GaAs in order to study the surface evolution with an aim to using it as a template for further QD growth. It is found that nano holes are seen in the middle of the QDs directly grown on GaAs (which has been reported in the literature) but none are seen when the QDs are grown on the cross-hatch VS (which has not been reported). Instead, QDs which are nucleated along the [110] direction become *less* prominent while those nucleated along the [1-10] direction become *more* prominent. This result is attributed to the insufficient and asymmetry of strain energies in the underlying plane on which QDs are grown.

Department....Electrical Engineering. Student's signature .....

Field of study..Electrical Engineering.. Advisor's signature .....

Academic year.....2006..... Co-advisor's signature.....

Acknowledgements

First I would like to express my greatest gratitude to my advisor, Assoc. Prof. Dr. Songphol Kanjanachuchai for his continuous support in the PhD program. He always teaches me how to ask the questions, shows me the different ways how to solve the research problem and guide me a systematic approach in experimental works and data analysis. Without his guidance and encouragement, I could not have finished the dissertation.

I am also greatly indebted to my co-advisor, Prof. Dr. Shunri Oda, Quantum Nanoelectronics Research Center, Tokyo Institute of Technology (TIT), Japan, who accompanied this work and for a large number of excellent discussions during his short staying in Bangkok.

My special thanks go to Prof. Dr. Somsak Panyakeow, who accepted me as a PhD student and favors me to operate MBE machine in Semiconductor Device Research Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. Besides, his helpful comments, discussions, suggestions, and kindness encourage me a full strength to continue doing a research until I finish.

Specifically, I am very grateful to Assoc. Prof. Dr. Montri Sawadsaringkarn for his generous explanations whenever I encounter the problem in Engineering Mathematics and course work. It is a pleasure to acknowledge to Prof. Chua Soo-Jin for his participation as a committee member in this dissertation and Dr. Sakuntam Sanorpim for his fruitful and valuable discussions in XRD results and patient explanations in general idea for MBE growth.

I would like to acknowledge the Japan International Cooperation Agency Office for the South East Asia Engineering Education Development Network of Asean University Network (AUN/SEED-Net), Asian Office for Aerospace Research and Development (AOARD), Thailand Research Fund (TRF), Chulalongkorn University and Nanotech Center (NANOTEC) of Thailand for the financial supports. Finally, I would like to express my adequately gratitude to my parents and all of my associates, Dr. Suwit Kiravittaya, Ms. Suwaree Surapraparpich, Ms. Naparat Siripitakchai, Mr. Supachok Thainoi, Mr. Pornchai Changmong, Mr. Nuttawut Budsayaplakorn and Mr. Teeravat Limwongse who have contributed to this work.

CONTENTS

page

page

page

LIST OF FIGURES

Page

Page

Page

Page

Page

Page

Page

Page

Page

a_l	lattice constant of overlayer
a_s	lattice constant of substrate
AFM	atomic force microscopy
As	arsenic
b_e	edge Burger's vector component
b_s	screw Burger's vector component
$b_{//}$	parallel Burger vector
$b_\perp$	perpendicular Burger vector
BEP	beam equivalent pressure
BP	background pressure
C	elastic constant
CO	carbon monoxide
δ	delta function
$D_{bulk}(E)$	bulk density of state
$D_{QD}(E)$	quantum dot density of state
$D_{QW}(E)$	quantum well density of state
$D_{QWR}(E)$	quantum wire density of state
DFM	dynamic force microscopy
E_0	characteristic energy
E_A	barrier for formation of islands
E_c	conduction band energy
E_{edge}	edge energy
$E(el)$	elastic strain energy
$E_{elastic}$	elastic energy
E_g	energy gap
E_{st}	strain energy
E_{surf}	surface energy
FM	Frank-van der Merwe
Ga	gallium
GaAlAsP	gallium aluminum arsenide phosphide

GaAs	gallium arsenide
GaSb	gallium antimonite
Ge	germanium
GI	growth interruption
h	Planck's constant
h_c	critical thickness
HRXRD	high resolution X-ray diffraction
In	indium
InGaAs	indium gallium arsenide
InP	indium phosphide
$\mathbf{k}=(k_x,k_y,k_z)$	carrier wave vector
k_B	Boltzmann's constant
$k_{//}$	amplitude of in-plane (y-z) wave vector
$k_{\perp}$	amplitude of wave vector in x-direction
l	quantum number in x-direction
λ	elastic modulus
L_0	characteristic length
LN_2	liquid nitrogen
LPE	liquid phase epitaxy
m	quantum number in y-direction
ML	monolayer
m/z	mass-to-charge ratio
n	quantum number in z-direction
N_D	volume density of quantum dot
N_{wi}	area density of quantum wire
m*	effective mass
m_{eff}	effective mass of carrier
MBE	molecular beam epitaxy
MD	misfit dislocation
MO	molybdenum block
MOCVD	metal organic chemical vapor deposition
p	momentum

PL	photoluminescence
RHEED	reflection high-energy electron diffraction
T_{std}	standby temperature
T_{sub}	substrate temperature
QD	quantum dot
QW	quantum well
QWR	quantum wire
ρ	island density
r_f	film surface energy
r_i	interface energy between the film and substrate
r_s	substrate surface energy
R_{GaAs}	growth rate of gallium arsenide
R_{InAs}	growth rate of indium arsenide
R_{InGaAs}	growth rate of indium gallium arsenide
σ	Poisson ratio
ε	lattice mismatch or strain
SAQD	self assembled quantum dot
SK	Stranski-Krastanow
SL	superlattice
Si	silicon
SiGe	silicon germanium
t	film thickness
t_{cd}	critical thickness for formation of dislocations
t_{cw}	critical thickness for formation of islands
T	temperature
TD	threading dislocation
θ_e	diffraction angle from epilayer
θ_s	diffraction angle from substrate
Θ	Heaviside's unit step function
TEM	transmission electron microscopy
VPE	vapor phase epitaxy
VS	virtual substrate

VW	Volmer-Weber
WL	wetting layer
x_0	island size
XRD	X-ray diffraction