การศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

นาย ณัฐชัย สร้อยมาดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974 - 331 - 110 - 6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 18709643

A STUDY ON InGaAs/GaAs QUANTUM WELL STRUCTURE GROWN BY MOLECULAR BEAM EPITAXY

Mr. Nutchai Sroymadee

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 1998

ISBN 974 - 331 - 110 - 6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล
โดย	นาย ณัฐชัย สร้อยมาดี
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

_____ คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ ประธานคณะกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

_____ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

_____ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐชัย สร้อยมาดี : การศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (A STUDY ON InGaAs/GaAs QUANTUM WELL STRUCTURE GROWN BY MOLECULAR BEAM EPITAXY) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์, 62 หน้า. ISBN 974-331-110-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเงื่อนไขในการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูก ค่าความกว้างของชั้นเวลล์ ค่าอัตราส่วนอะตอมของอินเดียมต่อแกลเลียม และค่าความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิก พร้อมทั้งศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงที่ได้รับผลจากการแปรค่าเหล่านี้ด้วย โดยอาศัยการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescense, PL)

ผลการวิเคราะห์ยอดแหลมที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขต่างๆ ด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ทำให้ได้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างโครงสร้าง ได้แก่ช่วง 500 - 530 °C พร้อมกับข้อสรุปว่าควรปลูกที่อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การทดลองแปรความกว้างของชั้นเวลล์ทำให้ได้ค่าตำแหน่งยอดแหลมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่แปรตามความกว้างของเวลล์ สภาพความเค้นที่เกิดภายในเวลล์แสดงผลออกมาโดยสังเกตได้จากค่าความกว้างของยอดแหลมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ การทดลองแปรค่าอัตราส่วนอะตอมโดยการควบคุมความดันลำโมเลกุลเทียบกับการควบคุมเวลาในการเปิดปิดชัตเตอร์ทำให้ได้วิธีควบคุมค่าอัตราส่วนอะตอมที่ได้ผลดีและแม่นยำ และทำให้ได้ค่าตำแหน่งยอดแหลมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่แปรตามค่าอัตราส่วนอะตอมสุดท้ายการแปรความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกทำให้ได้ความดันลำโมเลกุลที่เหมาะสมต่อการสร้างโครงสร้าง อยู่ที่ค่า 20 เท่าของความดันลำโมเลกุลของแกลเลียม ข้อมูลทั้งหมดทำให้สามารถประมาณตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต้องการให้โครงสร้างควอนตัมเวลล์เปล่งแสงออกมาได้ โดยจะอยู่ในช่วงประมาณ 870 nm ถึง 1000 nm ที่อุณหภูมิห้อง

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2541		

3970524721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: InGaAs/GaAs / QUANTUM WELL / SUBSTRATE TEMPERATURE / FLUX RATIO / WELL WIDTH / As FLUX / PHOTOLUMINESCENSE

NUTCHAI SROYMADEE : A STUDY ON InGaAs/GaAs QUANTUM WELL STRUCTURE GROWN BY MOLECULAR BEAM EPITAXY. THESIS ADVISOR : SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN, Ph.D., 62 pp. ISBN 974-331-110-6

An experimental study has been performed on the quantum well structures of InGaAs/GaAs grown by Molecular Beam Epitaxy technique (MBE). The investigations were conducted to study the following effects, i.e. substrate temperature used in the growth process, well width of the quantum well, atomic ratio between In and Ga and finally As partial flux pressure. Photoluminescense (PL) technique was an effective tool to characterize all quantum well samples with different growth parameters.

The results gathered from the PL peaks reveal the optimum growth temperature ranging from 500 to 530 °C. In addition, good quantum structures should be grown at the lowest allowed-temperature. PL peaks of quantum samples with different well widths have their positions varying with the well widths. Strain occurring inside the quantum well has been confirmed by the narrow PL peak. Different atomic ratios were experimented by two comparable means, i.e. partial flux control and opened-shutter time control. The later method is very useful to precisely control atomic ratio of InGaAs layer. This experiment divulges the PL peak positions varying with the atomic ratios. The variation of As partial flux pressure eventually confirms that the As pressure value of 20 time over Ga partial flux pressure is the optimum condition to grow the best crystal quality. All experimental data are useful to approximate the wavelength of the photon, ranging from 870 nm to 1000 nm at room temperature, emitted from different designed quantum well structures.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์ เครื่องมือวัด และวัสดุจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้งบประมาณจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสภาวิจัยแห่งชาติ

การวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ปรากฏผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนใหญ่ทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ณ Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Nottingham ประเทศอังกฤษ โดยการดูแลอย่างใกล้ชิดของ Dr. Ian Harrison และการดูแลอบรมวิธีการใช้เครื่องมือจาก Mr. David Lacklison โดยทุนสนับสนุนจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ใช้เวลาปฏิบัติการตั้งแต่ 20 กุมภาพันธ์ 2540 ถึง 15 เมษายน 2540 เป็นเวลาประมาณ 1 เดือนครึ่ง

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. มาตรี สวัสดิ์สฤงฆาร รศ. ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน และ อ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์

ขอขอบคุณ Dr. Karl Eberl ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาฟังการบรรยายสอบวิทยานิพนธ์ และได้ตั้งคำถามและให้คำแนะนำอันมีค่ายิ่งแก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์ ดร. สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ อ. อาภรณ์ ธีรมงคล รัศมี คุณศุภโชค ไทยน้อย ที่ได้ให้คำแนะนำอันมีค่าในเรื่องการเรียน การทำงานวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์แก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

สุดท้าย ขอขอบคุณบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ได้แสดงความห่วงใยและสนใจความเป็นไปในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 วัสดุแกลเลียมอาร์เซไนด์ อินเดียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.... 3

2.2 การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล..... 7

2.3 โครงสร้างควอนตัมเวลล์..... 11

2.4 ผลของโครงสร้างควอนตัมเวลล์และความเค้นที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์..... 20

2.5 การวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์..... 22

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐาน..... 27

3.2 การศึกษาผลของความกว้างเวลล์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์..... 29

3.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนอะตอมของชั้นเวลล์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์.... 31

3.4 การศึกษาผลของความดันที่ผิวหน้าแผ่นฐานที่มีต่อคุณภาพของผลึก..... 33

3.5 ระบบการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์..... 34

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐาน..... 36

4.2 การศึกษาผลของความกว้างเวลล์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์..... 39

4.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนอะตอมของชั้นเวลล์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์.... 44

4.4 การศึกษาผลของความดันที่ผิวหน้าแผ่นฐานที่มีต่อคุณภาพของผลึก..... 46

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 49

บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ..... 51

รายการอ้างอิง..... 53

สารบัญ (ต่อ)

การเผยแพร่ผลงานวิจัย..... 55

ภาคผนวก ก ภาพผลการจำลองโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ /แกลเลียมอาร์เซไนด์..... 56

ภาคผนวก ข การปลูกผลึกด้วยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy).... 59

ประวัติผู้วิจัย..... 62

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์ และแกลเลียมอาร์เซไนด์ 4
ตารางที่ 2.2 ค่ามวลประสิทธิผลของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ในสภาวะต่างๆ บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์และแผ่นฐานอินเดียมฟอสไฟด์ 21
ตารางที่ 3.1 ค่าความไวของหัววัดความดันสำหรับธาตุต่างๆ..... 28
ตารางที่ 3.2 ค่าความดันลำโมเลกุลของแกลเลียมและเวลาในการปลูกชั้นเวลล์และกำแพงในการสร้างชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของค่าอัตราส่วนอะตอมโดยการแปรเปลี่ยนค่าความดันลำโมเลกุล..... 32
ตารางที่ 4.1 ความกว้างของยอดแหลมในรูปที่ 4.5 หลังจากนำไปปรับเทียบกับกราฟรูปแบบเกาเซียน (Gaussian)..... 43
ตารางที่ 4.2 ความกว้างของยอดแหลมที่ได้จากการปรับเทียบผลการวัดในรูปที่ 4.9 กับกราฟรูปแบบเกาเซียน..... 47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบ (Zinc-blende) 4

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกและค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามของสารประกอบกึ่งตัวนำในระบบธาตุ 4 ชนิด (Quaternary Compound)..... 5

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความห่างของระดับพลังงานของโฮลหนักและโฮลเบากับเปอร์เซนต์ความเค้น ε(%)..... 6

รูปที่ 2.4 ค่าความหนาวิกฤตสำหรับ $In_xGa_{1-x}As$ ที่ปลูกบน GaAs..... 6

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล RIBER 32P..... 10

รูปที่ 2.6 โครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบที่มีระดับพลังงานศักย์จำกัดและเป็นขั้น..... 13

รูปที่ 2.7 การหาคำตอบจากสมการของโชรดิงเจอร์ด้วยวิธีทางภาพ (Graphical Solution)..... 15

รูปที่ 2.8 การหาคำตอบจากสมการของโชรดิงเจอร์ด้วยวิธีทางภาพ (Graphical Solution)..... 15

รูปที่ 2.9 การหาคำตอบจากสมการด้วยวิธีของ Newton-Raphson..... 17

รูปที่ 2.10 ระดับพลังงานควอนไตซ์และรูปร่างของฟังก์ชั่นคลื่น 18

รูปที่ 2.11 โครงสร้างและแถบพลังงานของควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ /แกลเลียมอาร์เซไนด์..... 20

รูปที่ 2.12 กลไกการดูดกลืนและการคายโฟตอนใน (ก) อะตอมเดี่ยว และ (ข) สารกึ่งตัวนำ..... 23

รูปที่ 2.13 การกระจายแบบเกาเซียน (Gaussian)..... 25

รูปที่ 3.1 โครงสร้างควอนตัมเวลล์เดี่ยวที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูก... 29

รูปที่ 3.2 โครงสร้างและระดับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลของความกว้างเวลล์ (ก) ชิ้นงานที่มีเวลล์กว้างไว้ข้างนอก (ข) ชิ้นงานที่เวลล์กว้างไว้ข้างใน..... 30

รูปที่ 3.3 โครงสร้างและระดับพลังงานของชิ้นงานที่ใช้ศึกษาผลจากอัตราส่วนอะตอมโดยการแปรเปลี่ยนค่าความดันลำโมเลกุล..... 32

รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงเวลาในการเปิดปิดชัตเตอร์ของอินเดียมและแกลเลียม..... 33

รูปที่ 3.5 ระบบวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์..... 34

รูปที่ 4.1 ผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่แปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K..... 36

รูปที่ 4.2 ผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่แปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง..... 37

รูปที่ 4.3 กราฟสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดแหลมและอุณหภูมิแผ่นฐาน..... 38

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.4 ผลการวัดไฟโตลูมิเนสเซนส์ของ (ก) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลล์ที่กว้างที่สุดไว้ภายนอกสุด (ข) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลล์ที่กว้างที่สุดไว้ในสุด ทำการวัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 10 K ถึงอุณหภูมิห้อง..... 40

รูปที่ 4.5 ผลการวัดไฟโตลูมิเนสเซนส์ของ (ก) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลล์ที่กว้างที่สุดไว้ภายนอกสุด (ข) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลล์ที่กว้างที่สุดไว้ในสุด ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K..... 42

รูปที่ 4.6 กราฟสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดแหลมและความกว้างของเวลล์..... 43

รูปที่ 4.7 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตาส่วนอะตอมอินเดียมต่อแกลเลียมด้วยวิธีไฟโตลูมิเนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K 45

รูปที่ 4.8 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเวลาในการเปิดปิดชัตเตอร์ของอินเดียมและแกลเลียมด้วยวิธีไฟโตลูมิเนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K 46

รูปที่ 4.9 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกด้วยวิธีไฟโตลูมิเนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K..... 47

รูปที่ 4.10 ค่าความเข้มแสงจากการวัดด้วยวิธีไฟโตลูมิเนสเซนส์สูงสุดสัมพัทธ์ ณ ค่าความดันลำโมเลกุลต่างๆ กัน..... 48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย