


การผลิตและศึกษาผลตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด GaAlAs/GaAs ที่มีชั้นหน้าต่างคู่



นางสาว ดวงพร ฉัตรวีระชัยกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3633-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**FABRICATION AND STUDY ON SPECTRAL RESPONSE OF GaAlAs/GaAs
DOUBLE LAYER WINDOW PHOTODIODES**



Miss Duangporn Chatweerachaikit

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2003

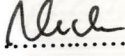
ISBN 974-17-3633-9

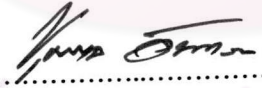
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตและศึกษาผลตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด
GaAlAs/GaAs ที่มีชั้นหน้าต่างคู่
โดย นางสาว ดวงพร ภัตตรีระชัยกิจ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน

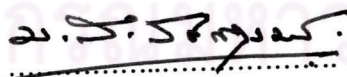
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

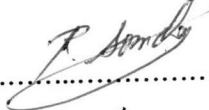
 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มন্ত্রী สวัสดิ์สูงฆาร)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

ดวงพร นัฏวีระชัยกิจ: การผลิตและศึกษาผลตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด
GaAlAs/GaAs ที่มีชั้นหน้าต่างคู่. (FABRICATION AND STUDY ON SPECTRAL
RESPONSE OF GaAlAs/GaAs DOUBLE LAYER WINDOW PHOTODIODES)

อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. ชุมพล อันตรเสน, 113 หน้า. ISBN 974-17-3633-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาส่วนร่วมของกระแสปะรำซึมในผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs กระแสปะรำซึมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุตของโฟโตไดโอดในเชิงเวลา และทำให้ค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดลดลง ดังนั้นชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As (P^+)$ จึงถูกแทรกกระหว่างชั้นหน้าต่างหลักของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As (P^+)$ กับชั้นทำงานของ GaAs (n) เพื่อลดกระแสปะรำซึมที่เกิดจากด้านหน้าต่างบน และชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นยาวของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As (N^+)$ หรือ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As (I)$ จึงถูกแทรกอยู่ใต้ชั้นทำงานของ GaAs (n) เพื่อลดกระแสปะรำซึมที่เกิดจากด้านแผ่นฐาน ผลก็คือได้ทำการออกแบบโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด 4 โครงสร้างต่างกันได้แก่ Pin, PPin, PPinN และ PPin และได้ทำการคำนวณกระแสปะรำซึมของแต่ละโครงสร้างเพื่อเปรียบเทียบซึ่งกันและกัน โดยสรุปพบว่าโครงสร้างโฟโตไดโอดแบบ PPinN ซึ่งแทรกชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานกว้างไว้ด้านหน้าชั้นทำงานและไว้ด้านหน้าแผ่นฐาน เป็นโครงสร้างที่ดีที่สุดในการขจัดกระแสปะรำซึม และพบว่า การเพิ่มความหนาให้กับชั้นทำงานจะไม่มีผลต่อปริมาณกระแสปะรำซึมจากชั้นหน้าต่างบน แต่จะส่งผลให้กระแสปะรำซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐานลดลง ในขณะที่กระแสพัคพาและกระแสสุทธิเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานบางจะได้รับผลกระทบจากกระแสปะรำซึมจากแผ่นฐานมากกว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานหนา สุดท้ายทำการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดจำนวน 3 โครงสร้าง เพื่อศึกษาบทบาทของชั้นหน้าต่างคู่ด้านบน พบว่าแนวโน้มที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองมีความสอดคล้องกันกับแนวคิดในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการสร้างชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้น และการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักอย่างเหมาะสม จะสามารถขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลิ่นสั้นของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดอันเกิดจากกระแสปะรำซึมจากชั้นหน้าต่างบนได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิติ ๑๑๗๗๖ นัฏวีระชัยกิจ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชุมพล อันตรเสน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

##4470311121: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: GaAlAs/GaAs HETEROJUNCTION PHOTODIODE, SPECTRAL RESPONSE, DIFFUSION CURRENT, MAIN WINDOW LAYER, SHORT WAVELENGTH WINDOW LAYER, LONG WAVELENGTH WINDOW LAYER, LIQUID PHASE EPITAXY

DUANGPORN CHATWEERACHAIKIT: FABRICATION AND STUDY ON SPECTRAL RESPONSE OF GaAlAs/GaAs DOUBLE LAYER WINDOW PHOTODIODES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHOOMPOL ANTARASENA, Ph.D. 113 pp. ISBN 974-17-3633-9

This thesis is a study on the contribution of diffusion current to the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiode. The diffusion current is one of the factors that distorts photodiode output signal in time domain and decreases the speed of photodiode. Therefore, $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} (\text{P}^+)$ short wavelength window layer (SWWL) is inserted between $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As} (\text{P}^+)$ main window layer (MWL) and GaAs (n) active region to suppress the diffusion current from the top window side and also $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} (\text{N}^+)$ or $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} (\text{I})$ long wavelength window layer (LWWL) is inserted underneath the GaAs (n) active region to suppress the diffusion from the substrate side. As a result, four different structures of heterojunction photodiodes, namely: Pin, PPin, PPinN and PPinIn, have been designed and the diffusion current of each structure is calculated and compared to each other. In conclusion, PPinN Photodiode with the insertion of wide bandgap semiconductor layers of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ in front of active layer and substrate is the best structure for getting rid of the diffusion current. It is clearly seen that the thicker active layer has no any influence on the amount of diffusion current from top window layer while diminishing the diffusion current from substrate or near to substrate window layer and increasing the drift current and the total current. Besides, the photodiode which has thinner active layer gains more suffer from substrate diffusion current than the one which has thicker active layer. Finally, three structures of photodiodes are fabricated to prove the role of top window layer (double layer windows). The trend obtained from a comparison among experimental results conforms to the idea of the structural design. This confirms that using the short wavelength window layer and providing an appropriate thickness to the main window layer can bring about more effectiveness to abolish the spectral response edge in short wavelength range due to the diffusion current from top window layer.

Department Electrical Engineering
Field of Study Electrical Engineering
Academic year 2003

Student's signature Duangporn Chatweerachakit
Advisor's signature C. Antarasena

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ชุมพล อังตรเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ได้กรุณาให้โอกาสและคำแนะนำที่มีคุณค่ายิ่ง และขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้แก่ ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ รศ.ดร. ชุมพล อังตรเสน ที่ได้กรุณาให้ข้อชี้แนะอันเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณ สุภโชค ไทยน้อย คุณ ขวัญเรือน ไทยน้อย คุณ พรชัย ช่างม่วง และพี่ๆ น้องๆ สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้าย ขอขอบคุณความดีที่พึงมีในงานวิจัยให้กับบิดา มารดา ผู้เป็นกำลังใจและแรงสนับสนุนในด้านการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	2
2. ทฤษฎีของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	3
2.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด	3
2.2 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ค่าการตอบสนอง และความเร็วในการตอบสนอง (Quantum efficiency, Responsivity and Response speed)	11
2.2.1 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมและค่าการตอบสนอง	11
2.2.2 ความเร็วในการตอบสนอง	11
2.3 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำ (Compound semiconductor)	13
2.3.1 ค่าช่องว่างพลังงาน (Energy bandgap)	13
2.3.2 ค่าคงตัวของโครงผลึก (Lattice constant, a)	15
2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient, α)	15
2.4 หัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs และปรากฏการณ์หน้าต่างแสง	18
3. การออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	20
3.1 การออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	20
3.2 แผนผังแถบพลังงานที่แสดงด้วยแบบจำลองของแอนเดอร์สัน (Anderson's model)	27
3.3 อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (The electron-hole pair generation rate)	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การคำนวณผลตอบสนองทางแสง (Spectral response)	41
3.4.1 บทบาทของชั้นทำงาน	42
3.4.2 บทบาทของชั้นหน้าต่างหลัก	73
4. เทคโนโลยีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	76
4.1 เอพิแทกซี (Epitaxy)	79
4.2 เทคโนโลยีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	82
4.2.1 การเตรียมแผ่นฐานและวัสดุที่จะปลูกผลึก	82
4.2.1.1 แวนผลึก (Wafer)	82
4.2.1.2 วัสดุที่ใช้ปลูกผลึก	83
4.2.2 การคำนวณน้ำหนักสารที่ใช้เป็นวัสดุปลูกผลึก	86
4.2.3 กระบวนการปลูกผลึก	88
4.2.4 การสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact)	90
4.2.5 กระบวนการถ่ายภาพ (Photolithography)	91
4.2.6 การกัด Mesa	91
5. ผลการทดลองและบทวิเคราะห์	93
5.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ทำการผลิต	93
5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด	95
5.3 ผลตอบสนองทางแสง	97
5.4 บทวิเคราะห์	101
5.4.1 ความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้น	102
5.4.2 ความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นยาว	103
5.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่วัดได้จากการทดลอง	105
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	107
6.1 บทสรุป	107
6.2 ข้อเสนอแนะ	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 113



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 โครงสร้าง Pin Photodiode	25
3.2 โครงสร้าง PPin Photodiode	26
3.3 โครงสร้าง PPIIn Photodiode	26
3.4 โครงสร้าง PPIIn Photodiode	26
3.5 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างแผนผังแถบพลังงาน ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	30
3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	36
3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	36
3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ GaAs	36
3.9 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 1	64
3.10 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 2	65
3.11 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 3	65
4.1 ขั้นตอนการเตรียมแวนผลึก	82
4.2 นำนักสารที่ใช้เป็นวัสดุปลูกผลึก	88

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) โฟโตไดโอด แสดงย่านที่เกิดกระแสพัลส์และกระแสแปรซิม	4
(ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะถูกกระตุ้นด้วยแสง	4
2.2 การคูกกลืนพลังงานแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลใน Pin โฟโตไดโอด ภายใต้สภาวะไบแอสกลับทาง	6
2.3 แสดงผลของกระแสแปรซิมที่มีต่อ Impulse response ของโฟโตไดโอด	12
2.4 (E,k) โคออร์เดเนต แสดง Energy minima ในแถบนำ สำหรับ GaAs และ AlAs	14
2.5 การเปลี่ยนแปลง Energy minima เทียบกับสัดส่วนของอลูมิเนียม (x) ใน $Ga_{1-x}Al_xAs$	14
2.6 ค่าช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เทียบกับค่าคงตั้งแลตทิซ	16
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การคูกกลืนแสงและขอบของการคูกกลืนของ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง	17
2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การคูกกลืนแสงและขอบของการคูกกลืน ของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ที่อุณหภูมิห้อง	17
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การคูกกลืนแสงและขอบของการคูกกลืน ของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่อุณหภูมิห้อง	18
2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การคูกกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของ GaAs, $Ga_{0.9}Al_{0.1}As$, $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$, $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ และ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ตามลำดับ	18
2.11 ภาพโครงสร้างแถบพลังงานของ GaAlAs และ GaAs ก่อนนำมาสร้างหัวต่อต่างชนิด	19
3.1 (ก) Pin Photodiode	21
(ข) PPin Photodiode	21
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การคูกกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	21
3.3 แผนผังแถบพลังงานที่หัวต่อต่างชนิดของ Pin Photodiode	22
3.4 แผนผังแถบพลังงานแสดงกำแพงพลังงานระหว่างชั้นหน้าต่างหลัก และชั้นหน้าต่างแสงคลีนสัน ใน PPin Photodiode	22
3.5 แผนผังแถบพลังงานที่รอยต่อระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน	23
3.6 (ก) PPin Photodiode	24
(ข) PPin Photodiode	24
3.7 แผนผังแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสองชนิดก่อนนำมาสร้างเป็นหัวต่อ	27
3.8 แผนผังแถบพลังงานของหัวต่อต่างชนิดพี-เอ็นที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ	27
3.9 แผนผังแถบพลังงานของ Pin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.10 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจึงมีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นเป็น $P^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 31

3.11 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจึงมีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นเป็น $P^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped 10^{18} cm^{-3} 32

3.12 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจึงมีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นเป็น $P^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 32

3.13 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจึงมีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นยาวเป็น $N^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Te-doped $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 33

3.14 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิจึงมีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นยาวเป็น $N^- - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Sn-doped 10^{15} cm^{-3} 34

3.15 ค่าความยาวคลิ่นที่เลือกมาคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล 35

3.16 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ Pin Photodiode 37

3.17 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPin Photodiode 38

3.18 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPin Photodiode โดยที่ชั้น N^+ คือ $N^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ 39

3.19 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPin Photodiode โดยที่ชั้น I คือ $N^- - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ 40

3.20 โครงสร้างที่นำมาคำนวณผลตอบสนองทางแสง

(ก) Pin Photodiode 43

(ข) PPin Photodiode 43

(ค) PPin Photodiode 43

(ง) PPin Photodiode 43

3.21 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา $0.5 \mu\text{m}$ 44

3.22 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา $1 \mu\text{m}$ 45

3.23 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา $1.5 \mu\text{m}$ 46

3.24 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน 47

3.25 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน 47

3.26 กระแสพัคพาในชั้นทำงานของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 กระแสสุทริของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	48
3.28 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5 μm	49
3.29 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1 μm	50
3.30 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1.5 μm	51
3.31 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน ...	52
3.32 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	52
3.33 กระแสพิคพาในชั้นทำงานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	53
3.34 กระแสสุทริของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	53
3.35 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPinN Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5 μm	54
3.36 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPinN Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1 μm	55
3.37 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPinN Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1.5 μm	56
3.38 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPinN Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	57
3.39 กระแสแพร่ซึมจากชั้น $\text{N}^+ - \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ ของ PPinN Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	57
3.40 กระแสพิคพาในชั้นทำงานของ PPinN Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	58
3.41 กระแสสุทริของ PPinN Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	58
3.42 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n) หนา 0.5 μm บวก $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (N) หนา 0.5 μm	59
3.43 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n) หนา 1 μm บวก $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (N) หนา 0.5 μm	60
3.44 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n) หนา 1.5 μm บวก $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (N) หนา 0.5 μm	61
3.45 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน ..	62
3.46 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	62
3.47 กระแสพิคพาในชั้นทำงานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	63
3.48 กระแสสุทริของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน	63
3.49 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของโครงสร้างในกรณีที่ 1	66
3.50 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของโครงสร้างในกรณีที่ 1	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.51 เปรียบเทียบกระแสพัลส์ไฟฟ้าในชั้นทำงาน ของ โครงสร้างในกรณีที่ 1	67
3.52 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของ โครงสร้างในกรณีที่ 1	67
3.53 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของ โครงสร้างในกรณีที่ 2	68
3.54 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของ โครงสร้างในกรณีที่ 2	68
3.55 เปรียบเทียบกระแสพัลส์ไฟฟ้าในชั้นทำงาน ของ โครงสร้างในกรณีที่ 2	69
3.56 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของ โครงสร้างในกรณีที่ 2	69
3.57 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของ โครงสร้างในกรณีที่ 3	70
3.58 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของ โครงสร้างในกรณีที่ 3	70
3.59 เปรียบเทียบกระแสพัลส์ไฟฟ้าในชั้นทำงาน ของ โครงสร้างในกรณีที่ 3	71
3.60 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของ โครงสร้างในกรณีที่ 3	71
3.61 โครงสร้างที่นำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาผลของการเพิ่มความหนาให้กับชั้น หน้าต่างหลักให้พอเหมาะที่มีต่อการช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงบน.....	73
3.62 ผลตอบสนองทางแสงของ โครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นหน้าต่างหลักหนา 1.5 μm ...	74
3.63 ผลตอบสนองทางแสงของ โครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นหน้าต่างหลักหนา 2 μm	75
3.64 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนระหว่าง โครงสร้างตามรูปที่ 3.61.....	76
3.65 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานระหว่าง โครงสร้างตามรูปที่ 3.61.....	76
3.66 เปรียบเทียบกระแสพัลส์ไฟฟ้าในชั้นทำงานระหว่าง โครงสร้างตามรูปที่ 3.61	77
3.67 เปรียบเทียบกระแสสุทธิระหว่าง โครงสร้างตามรูปที่ 3.61	77
4.1 เตาเอพิแทกซีสถานะของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy)	81
4.2 เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite boat)	81
4.3 กราฟ Liquidus composition พล็อตกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	84
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของสารเจือ Ge และ Sn กับระดับความเข้มข้นของการเติมสารเจือที่อุณหภูมิต่างๆของการปลูกผลึก	84
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของ AlAs กับเศษส่วนอะตอมของ Al ใน GaAlAs ที่อุณหภูมิต่างๆ	85
4.6 กราฟ Liquidus isotherms ในระบบ Al-Ga-As	85
4.7 การใส่สารในหลุมต่างๆของเบ้ารองรับสารละลายชนิด Multi bin	89
4.8 แผนผังระหว่างอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซีและเวลาการปลูกผลึก	89
4.9 หน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในกระบวนการถ่ายแบบ หน่วยเป็น ไมครอน (μm)	92

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 โฟโตไดโอดที่ผลิตได้เมื่อมองจากทางด้านบน	92
4.11 รูปวาดในลักษณะ 3 มิติของโฟโตไดโอดที่ผลิตได้	92
5.1 โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ผลิตเพื่อทดลองในวิทยานิพนธ์	
(ก) โครงสร้างที่ 1	94
(ข) โครงสร้างที่ 2	94
(ค) โครงสร้างที่ 3	94
5.2 ตัวอย่างภาพ SEM ของชิ้นงานซึ่งหนาประมาณ 10 μm	95
5.3 แทนทดสอบ (Testing house)	95
5.4 เครื่องวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน	95
5.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด	
(ก) โครงสร้างที่ 1	96
(ข) โครงสร้างที่ 2	96
(ค) โครงสร้างที่ 3	96
5.6 ระบบวัดกำลังแสงของหลอดทั้งสแตนด์ในแต่ละค่าความยาวคลื่น	98
5.7 ระบบวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด	98
5.8 กำลังแสงของหลอดทั้งสแตนด์ที่วัดด้วยระบบวัดตามรูปที่ 5.6	99
5.9 ค่าการตอบสนองของกระแสแสงที่วัดได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ	
(ก) โครงสร้างที่ 1	100
(ข) โครงสร้างที่ 2	100
(ค) โครงสร้างที่ 3	100
5.10 ค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับสัญญาณแสงในอุณหภูมิต่ำ	102
5.11 การคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดโครงสร้างที่ 1	
เมื่อให้ความหนาชั้นหน้าต่างหลักเป็น 0.5, 0.7 และ 1 μm ตามลำดับ	103
5.12 การคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ	
(ก) โครงสร้างที่ 1	104
(ข) โครงสร้างที่ 2	104
(ค) โครงสร้างที่ 3	104
5.13 เปรียบเทียบค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดในแต่ละโครงสร้าง	105