



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ทุนวิจัย  
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย  
เรื่อง

ไดโอดรับแสงชนิด Graded Band Gap GaAlAs/GaAs

โดย

ชุมพล อันตรเสน  
สมชัย รัตนธรรมพันธ์  
ศุภโชค ไทยน้อย

ธันวาคม ๒๕๔๓

จท  
วศ 15  
010552

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

ไดโอดรับแสงชนิด Graded Band Gap GaAlAs/GaAs

โดย

ชุมพล อंतरเสน

สมชัย รัตนธรรมพันธ์

ศุภโชค ไทยน้อย

ธันวาคม 2543

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจาก กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีการเงิน 2542 (ครั้งที่ 2) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และ รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ที่ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้ คุณพรชัย ช่างม่วง คุณสุวัฒน์ โสภิตพันธ์ และคุณทศพร ชวนะปราณี ที่ช่วยเหลือในการวัดผลตอบสนองทางแสง และคุณขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ช่วยพิมพ์รายงาน และทำรายงานการเงิน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	คพ
	๐๕๑๕
เลขทะเบียน	๐๑๐๕๕๒
วัน.เดือน.ปี	๑๓ มิ.ย. ๕๔

ชื่อโครงการวิจัย	ไดโอดรับแสงชนิด Graded Band Gap GaAlAs/GaAs
ชื่อผู้วิจัย	ชุมพล อัครเสน สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ศุภโชค ไทยน้อย
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	ธันวาคม 2543

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอวิธีการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs โดยเทคโนโลยีเอพิแทกซีในสถานะของเหลว ทำการสร้างชั้นรับแสงชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานคงที่ที่ 1.674 eV ของ  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  และมีค่าคงที่ที่ 1.942 eV ของ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  และชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดจาก 1.942 eV ถึง 1.55 eV ของ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  ชั้นรับแสงที่ทำด้วย  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  และ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  จะไม่ดูดกลืนแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานของมัน ทำให้มีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วง ~725 nm ถึง ~875 nm และ ~655 nm ถึง ~875 nm ตามลำดับ ในขณะที่โฟโตไดโอดที่มีช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงแบบลาด แม้จะเกิดการดูดกลืนแสงในชั้นรับแสงจาก ~1.924 eV ถึง ~1.55 eV แต่กลับมีผลตอบสนองทางแสงจาก ~650 nm ถึง ~870 nm คล้ายคลึงกับผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีสามารถสรุปได้ว่าโฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาด มีสนามไฟฟ้าในชั้นรับแสงที่ช่วยพัดพาพาหะที่เกิดในช่วง ~650 nm ถึง ~800 nm ให้ข้ามหัวต่อได้ ดังนั้นจึงเกิดกระแสทางแสงขึ้นในช่วงความยาวคลื่นนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	Graded Band Gap GaAlAs/GaAs Photodiodes
Name of the Investigators	Choopol ANTARASENA Somchai RATANATHAMPHAN Supachok THAINOI
Year	December 2000

### Abstract

GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiodes have been fabricated by Liquid Phase Epitaxy Technology. Constant band gap of  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  (1.674 eV) and  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  (1.924 eV) and graded band gap of  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  (1.924 eV)/ $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  (1.8 eV)/ $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  (1.674 eV)/ $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  (1.55 eV) multilayers have been realized as the top layers of photodiodes. The surface layers of  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  and  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  will not absorb light of energy smaller than their band gap energy thus the spectral response occur from  $\sim 725$  nm to  $\sim 875$  nm and from  $\sim 655$  nm to  $\sim 875$  nm respectively. In the contrary, although Graded band gap GaAlAs top layer photodiode can absorb the light energy between 1.924 to 1.55 eV., the spectral response can be measured from  $\sim 650$  nm to  $\sim 870$  nm, similar to that of  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  top layer photodiode. By comparison with the theoretical calculation, we can conclude that the built-in electric field in the top layer drift the generated carriers through the junction, therefore the photocurrent can be detected in this spectral range.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ii
บทคัดย่อภาษาไทย .....	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	iv
สารบัญ .....	v
รายการรูปภาพประกอบ .....	vi
รายการตารางประกอบ .....	viii
1. บทนำ .....	1
2. พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด .....	3
3. สมรรถนะการทำงานของโฟโตไดโอด .....	8
3.1 ความเร็วในการตอบสนอง .....	8
3.2 ความไวในการตอบสนอง .....	8
4. ช่องว่างแถบพลังงานของ $Ga_{1-x}Al_xAs$ และ Window Effect .....	11
5. การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง .....	11
6. ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	13
6.1 ออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด .....	13
6.2 การคำนวณผลตอบสนองทางแสง .....	14
6.3 เทคโนโลยีในการปลูกผลึก GaAs และ GaAlAs .....	22
6.4 ขั้นตอนการเตรียมแวนผลึกฐาน วัสดุของสารละลาย การปลูกผลึก และการผลิต สิ่งประดิษฐ์ .....	24
6.5 การตรวจสอบสมรรถนะของสิ่งประดิษฐ์ .....	33
7. การอภิปรายผลการทดลอง .....	36
7.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน .....	36
7.2 ผลตอบสนองทางแสง .....	36
8. ข้อเสนอสรุป .....	40
9. ข้อเสนอแนะ .....	41
10. เอกสารอ้างอิง .....	42
11. ส่วนผนวก (การวัดผลตอบสนองทางแสง) .....	43
12. การเผยแพร่ผลงานวิจัย .....	45

## รายการรูปภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	Heterojunction Photodiode ชนิดช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงคงที่ .....	2
รูปที่ 2	Graded Band Gap GaAlAs/GaAs Photodiode ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียง .....	2
รูปที่ 3	การจ่ายแรงดันเมื่อใช้งานโฟโตไดโอดและกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน .	4
รูปที่ 4	การดูดกลืนแสงและการเกิดพาหะในโฟโตไดโอดในขณะที่ไบแอสด้วยแรงดัน $V_R$ .....	10
รูปที่ 5	Absorption edge ของ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง .....	12
รูปที่ 6	Absorption edge ของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ที่อุณหภูมิห้อง .....	12
รูปที่ 7	Absorption edge ของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่อุณหภูมิห้อง .....	12
รูปที่ 8	โครงสร้างที่ 3 โฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap .....	14
รูปที่ 9	สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นผิว .....	15
รูปที่ 10	แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ $P^+-GaAs/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode .....	16
รูปที่ 11	แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ photodiode .....	17
รูปที่ 12	แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ $P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode (โครงสร้างที่ 1) .....	18
รูปที่ 13	แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode (โครงสร้างที่ 2) .....	19
รูปที่ 14	แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode (โครงสร้างที่ 3) .	20
รูปที่ 15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสพัชพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นหน้าต่างๆ ของ $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode กับความยาวคลื่น .....	21
รูปที่ 16	กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงที่เกิดขึ้นในกรณีของ $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode กับกรณีของ $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$ Photodiode .....	22

## รายการรูปภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 17 (ก)	เตาเอพิแทกซ์ .....	23
รูปที่ 17 (ข)	แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย .....	24
รูปที่ 18	ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของธาตุหมู่ V และค่าส่วนกลับของ อุณหภูมิของ GaAs, GaP และ InP .....	26
รูปที่ 19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะในของแข็งและเศษส่วน อะตอมของ Ge และ Sn ในสารละลาย GaAs ที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C .....	27
รูปที่ 20	กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วน โมลของ AlAs (x) ในรูปของแข็งและเศษส่วน อะตอมของ Al ในรูปของเหลว .....	27
รูปที่ 21	กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วนอะตอมของ As และเศษส่วนอะตอมของ Al ....	28
รูปที่ 22	แผนภูมิอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซ์ และเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก .....	29
รูปที่ 23	mask ที่ใช้ทำ contact ด้าน P (ก) และทำ Mesa (ข) ขนาดแสดงในหน่วย $\mu\text{m}$ ...	31
รูปที่ 24	แสดงภาพด้านหน้าของ Photodiode ที่ผลิตได้ ถ่ายด้วย Optical Microscope .....	32
รูปที่ 25	Temperature Profile ของการสร้าง Graded Band Gap GaAlAs แบบ Isothermal Growth .....	32
รูปที่ 26	ตัวอย่างลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของโฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ 1 (ข) โครงสร้างที่ 3 (ค) เมื่อถูกไบแอสกลับทางถึง 40 Volt .....	34
รูปที่ 27	ผลตอบสนองทางแสงของ (ก) โครงสร้างที่ 1 (ข) โครงสร้างที่ 2 (ค) โครงสร้างที่ 3 .....	35
รูปที่ 28	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ .....	37
รูปที่ 29	พลังงานแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ ...	37
รูปที่ 30	กำลังงานแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ ..	39
รูปที่ a1	การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดกำลังแสง .....	43
รูปที่ a2	การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดผลตอบสนองทางแสง .....	43



## รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่าง ๆ .....	29



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 1. บทนำ

Photodetectors คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และมีหลายชนิดตามลักษณะโครงสร้าง สามารถจัดลำดับจากโครงสร้างที่ง่ายไปหายากได้ดังนี้

1. **Photoconductive Cells** ใช้ชั้นผลึกสารกึ่งตัวนำโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของความนำไฟฟ้าที่มีมากน้อยตามจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งเกิดขึ้นจากแสงหรือโฟตอนเป็นตัวบ่งชี้ความเข้มแสง

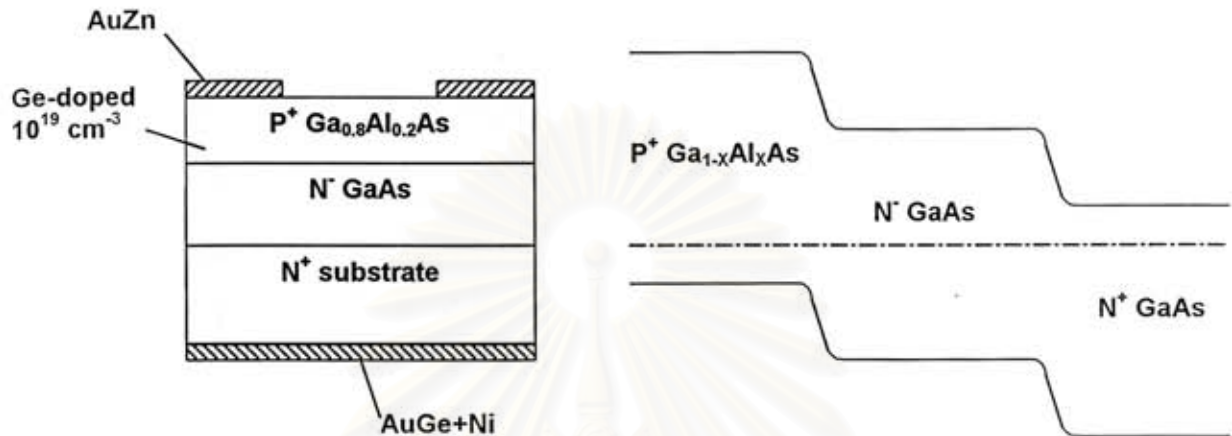
2. **หัวต่อพี-เอ็น (P-N Junction)** ในสภาวะมืดนั้น เมื่อหัวต่อพี-เอ็นถูกไบแอสกลับทาง กระแสที่ไหลผ่านหัวต่อมีเพียงแต่กระแสที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลบริเวณหัวต่อ ที่เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อน ซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นกับขนาดแรงดันที่ไบแอส อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยกระตุ้นด้วยแสงหรือโฟตอน ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวต่อจะเป็นปฏิภาคกับความเข้มแสง สิ่งประดิษฐ์ในกลุ่มนี้อยู่ในความสนใจโดยเฉพาะในการประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารทางแสงในปัจจุบัน ซึ่งมีหลายโครงสร้างและทำจากสารกึ่งตัวนำหลาย ๆ ชนิดขึ้นกับจุดประสงค์ ตัวอย่างเช่น Homojunction Photodiodes, Heterojunction Photodiodes, PIN Photodiodes และ Avalanche Photodiodes

3. **Phototransistors** ถือเป็น Photodetectors ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น โดยใช้โครงสร้างของทรานซิสเตอร์สองหัวต่อ (Bipolar Junction Transistors) เพื่อให้เกิดการขยายสัญญาณอีกต่อหนึ่ง

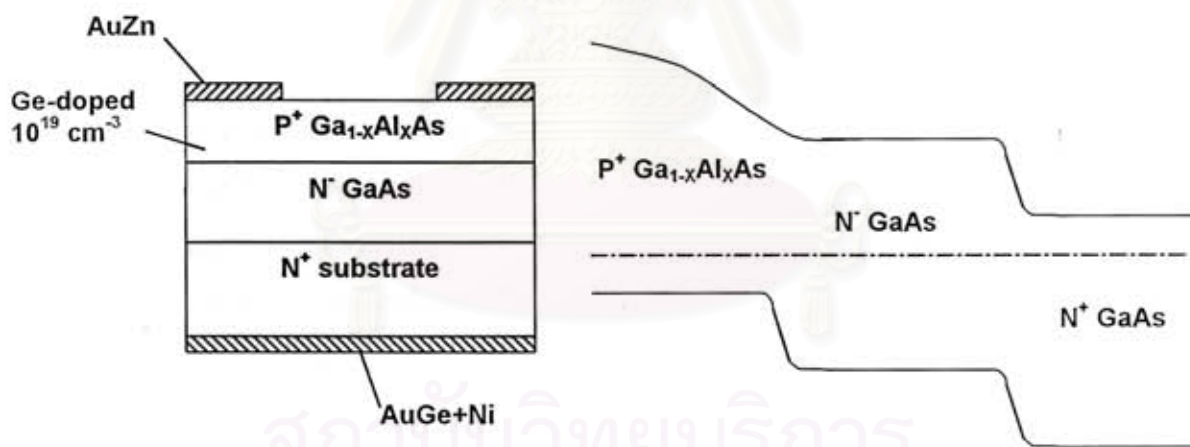
นอกจากนั้นยังอาจมี Photodetectors ที่มีโครงสร้างเฉพาะตัว เช่น Modulated Barrier Photodiode, Metal-Semiconductor (Schottky Barrier) Photodiode, Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodiode etc.

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ริเริ่มพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ในกลุ่มนี้ โดยเริ่มจาก Si-Photodiodes โดยใช้เทคโนโลยีแพร์ซิม [1] และเมื่อได้ติดตั้งเตาปลูกผลึกเอพิแทกซ์ในสถานะของเหลวแบบแนวนอน การพัฒนา GaAlAs/GaAs Photodetectors จึงได้เริ่มขึ้น โดยช่วงแรกมุ่งความสนใจไปที่ GaAlAs/GaAs Heterojunction Phototransistors แม้จะมีโครงสร้างหรือพื้นฐานการทำงานที่ยุ่งยากกว่า แต่มีอัตราขยายแสงและความไวที่เหนือกว่า อย่างไรก็ตามหลังจากเสร็จสิ้นการพัฒนา Phototransistors [2] ผู้วิจัยจึงย้อนกลับมาพิจารณา GaAlAs/GaAs Photodiodes เนื่องจากมีโครงสร้างและพื้นฐานการทำงานที่ง่ายกว่า แม้ว่าสมรรถนะจะต่ำกว่า ว่ามีจุดไหนที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีขึ้นได้บ้าง

จากโครงสร้างของ Heterojunction Photodiode ตามรูปที่ 1 ซึ่งได้พัฒนาไว้ [3] ชี้ดจำกัดการทำงานของสิ่งประดิษฐ์อันหนึ่งที่สำคัญมาก ๆ ก็คือลักษณะของชั้นรับแสง  $P^+ Ga_{1-x}Al_xAs$  ในรูปที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน้าต่างรับแสงด้วย จะต้องไม่หนาเกินไป เนื่องจากแสงที่มีพลังงานสูงกว่า



รูปที่ 1 Heterojunction Photodiode ชนิดช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงคงที่



รูปที่ 2 Graded Band Gap GaAlAs/GaAs Photodiode ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียง

ช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงจะกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากกว่าชั้นผิว ซึ่งจะรวมตัวกลับเพราะมีความเร็วในการรวมตัวสูงมากที่ผิว ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ไม่มีผลตอบสนองต่อแสงที่มีค่าพลังงานสูง การเพิ่มความไว (Sensitivity) ของสิ่งประดิษฐ์ทางด้านแสงพลังงานสูงให้มากขึ้นสามารถกระทำได้โดยใส่สนามไฟฟ้าในชั้นผิวเพื่อขับเคลื่อนคู่อิเล็กตรอน-โฮลออกจากชั้นผิวเข้าสู่ย่านทำงานให้ได้ไวกว่าความเร็วในการรวมตัว

การใส่สนามไฟฟ้าดัดคร่อมชั้นผิวหรือชั้นหน้าต่างซึ่งแสดงตามรูปที่ 2 สามารถกระทำได้ โดยอาศัยกระบวนการปลูกผลึกชั้นผิวให้มีช่องว่างแถบพลังงานแปรเปลี่ยนตามระยะทาง เนื่องจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  มีช่องว่างแถบพลังงานขึ้นกับปริมาณของ Al ด้วยกลไกการปลูกผลึกแบบ Isothermal [4] สามารถแปรปริมาณ Al ของชั้นหน้าต่างจากค่ามากมาน้อย จากผิวบนสู่ด้านล่าง ค่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานจะถูกลงจากชั้นผิวสู่ด้านล่าง ซึ่งจะสามารถช่วยขจัดพันธะออกหากันได้ และช่วยลดโอกาสในการรวมตัวกลับของพาหะในชั้นหน้าต่างได้ อย่างไรก็ตามการปลูกผลึกแบบ Isothermal ชั้นผลึกที่ได้มีคุณภาพต่ำซึ่งจะกล่าวไว้ในช่วงทดลองปลูกผลึก

ในรายงานนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด องค์ประกอบที่มีผลต่อสมรรถนะของโฟโตไดโอด ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ จากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน การวัดผล การอภิปรายผล ข้อสรุป และข้อเสนอแนะ

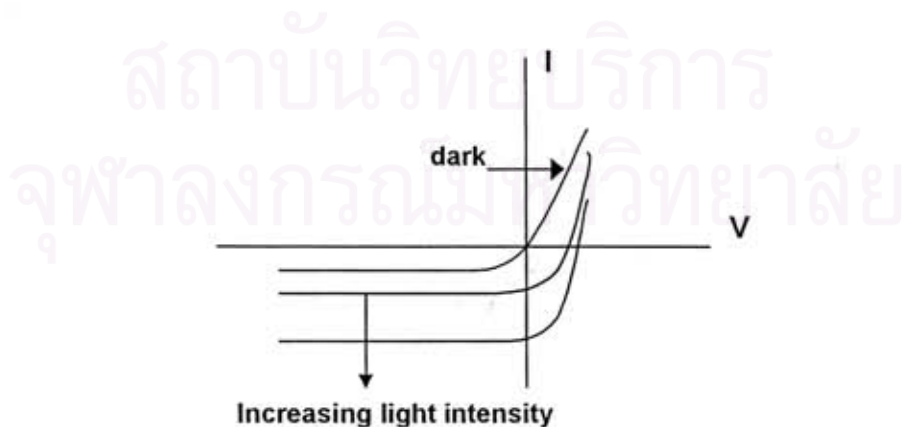
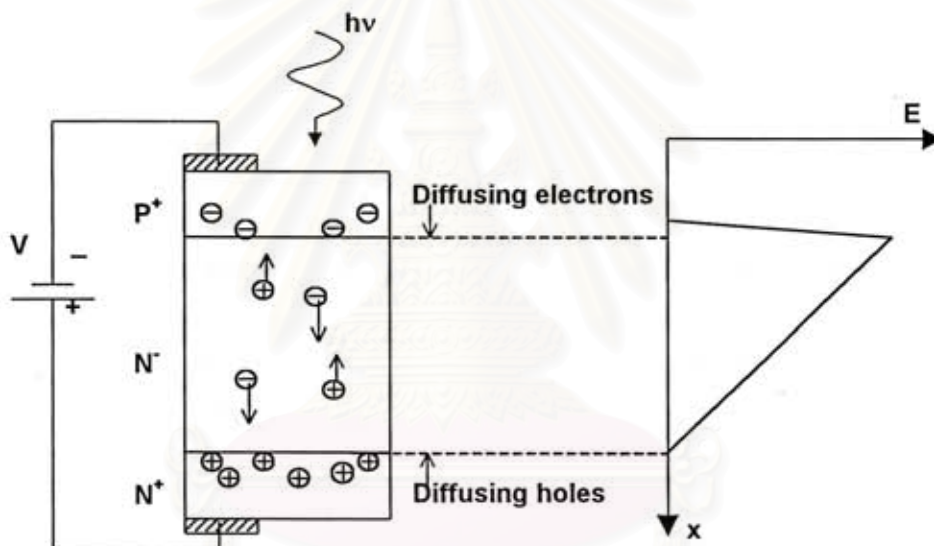
## 2. พื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอด [5]

เมื่อโฟโตไดโอดถูกไบแอสกลับทางกระแสที่ไหลจะไม่ขึ้นกับค่าแรงดันที่ไบแอส แต่จะขึ้นกับอัตราการเกิดทางแสง (Optical Generation Rate) ของคูพาหะอิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs, EHPs) ที่เกิดจากแสงตกกระทบ โดยแสงนั้นจะต้องมีพลังงานของโฟตอน (Photon Energy) เท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นชั้นทำงานของโฟโตไดโอด โดยทั่วไปโฟโตไดโอดที่ดีจะถูกออกแบบให้พลังงานแสงถูกดูดกลืนมากที่สุดที่บริเวณย่านปลอดพาหะ หรือย่านทำงาน

เนื่องจากแรงดันที่ใส่เข้าไปเกือบทั้งหมดจะดัดคร่อมย่านทำงาน ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ถูกพัดพา (Drift) โดยสนามไฟฟ้าที่ดัดคร่อม โดยจะพัดพาอิเล็กตรอนและโฮลไปยังย่าน  $N^+$  และ  $P^+$  ตามลำดับ ส่วนพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นในย่านเป็นกลาง กล่าวคือ อิเล็กตรอนในชั้น  $p^+$  และโฮลในชั้น  $n^+$  ภายในระยะแพร่ซึม (Diffusion Length) จะอาศัยการแพร่ซึม (Diffusion) ของพาหะมายังบริเวณหัวต่อ จากนั้นจึงถูกสนามไฟฟ้าในย่านปลอดพาหะพัดพาไปยังอีกด้านหนึ่ง ผลของการเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางย้อนกลับของไดโอด (ออกทางขั้ว  $P^+$ ) และเมื่อรวมกระแสมืด (Dark Current) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_p \quad (1)$$

- เมื่อ  $I_0$  คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Saturation Current) หรือกระแสมืด (Dark Current) ของไดโอดเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์
- $V$  คือแรงดันที่บริเวณหัวต่อ
- $n$  คือ Ideality Factor ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 กับ 2
- $k$  คือค่าคงที่ของ Boltzmann
- $T$  คืออุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน
- $I_p$  คือ Photocurrent ที่ถูกกระตุ้นจากแสง



รูปที่ 3 การจ่ายแรงดันเมื่อใช้งานโฟโตไดโอดและกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

เนื่องจากการใช้งานโฟโตไดโอดนั้นเราจะไบแอสกลับทางด้วยแรงดันที่มีค่ามากพอที่จะทำให้  $\exp\left(\frac{qv}{nkt}\right) \leq 1$  จึงทำให้กระแสรวมของโฟโตไดโอด จะมีค่าเท่ากับ

$$I = -(I_0 + I_p) \quad (2)$$

นั่นคือกระแสรวมที่ได้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มแสง เราจึงสามารถใช้โฟโตไดโอดในการตรวจจับแสง โดยทำการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency) โดยพิจารณาการทำงานของโฟโตไดโอดดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าพาหะที่เกิดขึ้นในส่วนของย่านปลอดพาหะหรือในระยะทางแพร่ซึมจากบริเวณย่านปลอดพาหะนั้น จะถูกพัฒนาโดยสนามไฟฟ้าและจากการเคลื่อนที่ของพาหะเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่วงจรภายนอก เนื่องจากพาหะที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการพัฒนาและการแพร่ซึม ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสภายใต้การไบแอสกลับทางจะเท่ากับ

$$\begin{aligned} J &= J_{dr} + J_{diff} \\ &= \text{ความหนาแน่นกระแสส่วนพัฒนา} + \text{ความหนาแน่นกระแสส่วนแพร่ซึม} \end{aligned} \quad (3)$$

เราเขียนสมการของ  $J$  โดยจะละเลยผลของ Thermal Generation ในส่วนของย่านแปรเปลี่ยน และการดูดกลืนในชั้น  $P^+$  ที่อยู่บนสุด ซึ่งประเด็นหลังนั้นความหนาของชั้นบนสุดต้องน้อยกว่า  $\alpha^{-1}$  มากๆ โดยที่  $\alpha$  คือ Absorption Coefficient และ/หรือมี "Window Effect" ที่ความยาวคลื่นนั้นๆ

ถ้าระยะทาง  $x$  เริ่มนับจากบริเวณหัวต่อ  $P^+ - N^-$  (ดูรูปที่ 4) อัตราการเกิดคู่ EHPs  $G(x)$  เมื่อกำหนดให้ค่า Internal Quantum Efficiency,  $\eta_i = 1$  จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} G(x) &= \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \\ &= \frac{P_{inc} (1 - \Theta_R)}{Ah\nu} \alpha e^{-\alpha x} \end{aligned} \quad (4)$$

โดย  $\phi_0$  คือ Incident Photon Flux (photon/sec/cm<sup>2</sup>)

$P_{inc}$  คือ กำลังแสงตกกระทบบ (Incident Optical Power)

$\Theta_R$  คือ ค่า Reflectivity ของผิวด้านบน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโฟโตไดโอด

ในทางปฏิบัติ ค่า  $\Theta_r$  สามารถทำให้มีค่าน้อยตามต้องการได้โดยการเคลือบสารกันการสะท้อน (Antireflection) บนผิวด้านบน ค่ากระแสพัคพาจึงเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} J_{dr} &= -q \int_0^W G(x) dx \\ &= -q \phi_0 (1 - e^{-\alpha W}) \end{aligned} \quad (5)$$

โดยที่  $W$  คือความกว้างของชั้น  $N'$

เราจะพิจารณากระแสแสงในส่วนของกระแสแพร่ซึ่งเนื่องจากเราละเลยการดูดกลืนแสงและพาหะที่เกิดขึ้นในชั้น  $P'$  บนสุด เราจึงสนใจเฉพาะการแพร่ซึ่งของโฮลที่เกิดขึ้นในชั้น  $N'$  ดังนั้นสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) ของโฮล ( $p_n$ ) ที่สภาวะอยู่ตัวซึ่งรวมการเกิด (Generation) และการรวมตัว (Recombination) จะเขียนได้ดังนี้

$$D_h \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} + G(x) = 0 \quad (6)$$

สามารถแก้สมการนี้โดยมีค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ดังนี้

$$\begin{aligned} p_n &= p_{n0} \quad \text{ที่} \quad x = \infty \\ p_n &= 0 \quad \text{ที่} \quad x = W \end{aligned} \quad (7)$$

ความหมายของเงื่อนไขที่ 2 ก็คือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย จะเป็นศูนย์ที่บริเวณขอบของย่านแปรเปลี่ยน เมื่อทำการไปแอสกลับทาง ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (6) จึงอยู่ในรูปของ

$$p_n = p_{n0} - (p_{n0} + C e^{-\alpha W}) e^{(W-x)/L_h} + C e^{-\alpha x} \quad (8)$$

โดยที่

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (9)$$

และ 
$$C = \frac{\phi_0 \alpha L_h^2}{D_h (1 - \alpha^2 L_h^2)} \quad (10)$$

กระแสแพร่ซึมหาได้จาก 
$$J_{diff} = -qD_h \left( \frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=W}$$

$$= -q\phi_0 \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} e^{-\alpha W} - qp_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (11)$$

รวมสมการ (5) และ (11) เข้าด้วยกันจะได้กระแสรวมสุทธิเป็น

$$J = -q\phi_0 \left( 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_h} \right) - qp_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (12)$$

ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานปกติ พจน์ที่ 2 ในสมการ (12) จะมีค่าน้อยมากพอๆ กับค่า  $P_{n0}$  ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ค่ากระแสรวมสุทธิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแสงที่ตกกระทบ ซึ่งเป็นผลตามที่คาดไว้ ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency) ของโฟโตไดโอดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_{ext} = \frac{|J/q|}{P_{inc}/Ah\nu}$$

$$= (1 - \Theta_R) \left( 1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_h} \right) \quad (13)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดมีค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมสูงๆ แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflection Coefficient) ที่ผิวด้านบนควรมีค่าน้อยๆ เช่น เคลือบด้วยสารไดอิเล็กทริกชนิดที่มีค่า  $\Theta_R \approx 0$  นอกจากนั้นเพื่อให้ค่า  $\eta_{ext}$  มีค่าสูง ยังต้องมีเงื่อนไขอื่นอีกคือ

$$\alpha W \gg 1 \quad (14)$$

ค่า  $\alpha$  หรือ  $W$  มีค่ามากๆ เป็นเงื่อนไขที่ทำให้แน่ใจว่าโฟตอนที่ตกกระทบเกือบทั้งหมดถูกดูดกลืน อย่างไรก็ตาม ถ้า  $W$  กว้างมากๆ แล้วค่าเวลาพัลซของพาหะข้ามบริเวณข่านปลอดพาหะก็จะ



มีค่ามากไปด้วย ส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง จึงต้องอาศัยค่า  $\alpha$  สูงซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ค่า  $\alpha$  ที่บริเวณขอบพลังงานจะขึ้นกับลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทำให้เราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ สุดท้ายถ้าเราให้ค่าความยาวแห่งการแพร่ซึม (Diffusion Length)  $L_n$  มีค่าน้อยมากๆ และ  $\eta_i < 1$  แล้วจะได้ว่า

$$\eta_{ext} = \eta_i(1 - \Theta_R)(1 - e^{-\alpha W}) \quad (15)$$

### 3. สมรรถนะการทำงานของโฟโตไดโอด

ความกว้างของเขตปลอดพาหะนั้นจะมีผลต่อการทำงานของโฟโตไดโอด เนื่องจากเป็นบริเวณที่ดูดกลืนพลังงานแสงส่วนใหญ่และก่อให้เกิด EHPs จำนวนมาก รวมทั้งเป็นบริเวณที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง จึงทำให้มีผลอย่างมากต่อความเร็วในการตอบสนองและความไวของโฟโตไดโอด ดังนี้

#### 3.1 ความเร็วในการตอบสนอง

พิจารณาในแง่ของความเร็วในการตอบสนอง พบว่าเมื่อแสงตกกระทบถึงประติขั้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความนำ (Conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ คือจะทำให้เกิดพาหะข้างน้อยในชั้น  $P^+$  และชั้น  $N^+$  และเกิดคู่ EHPs ขึ้นในย่านปลอดพาหะ เนื่องจากความเร็วในการตอบสนองขึ้นกับเวลาที่อิเล็กตรอน และ โฮล ใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังชั้น  $N^+$  และ  $P^+$  ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อให้ความเร็วในการตอบสนองของถึงประติขั้วสูงเราจะต้องลดระยะทางที่พาหะต้องเคลื่อนที่ กล่าวคือความกว้างของเขตปลอดพาหะควรมีค่าน้อยที่สุด เพื่อเป็นการลดเวลาขนถ่าย (Transit Time) ของพาหะ

#### 3.2 ความไวในการตอบสนอง

แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของความไวในการตอบสนอง พบว่า เมื่อแสงตกกระทบบนผิวของชั้น  $P^+$  แล้วจะทะลุเข้าไปในเนื้อสาร โดยจะมีความเข้มของแสงลดลงเนื่องจากการดูดกลืน ทำให้ Optical Generation Rate ที่ระยะทาง  $x$  จากผิวลดลงได้ดังสมการ (4) เป็นผลให้ความไวลดลง การให้แสงส่วนใหญ่ตกลงบนบริเวณเขตปลอดพาหะมากกว่าในบริเวณเป็นกลางนั้น ชั้น  $P^+$  จะต้องบางมากๆ และผนวก Window Effect เข้าช่วย โดยโครงสร้างหัวต่อต่างชนิด  $P^+N^-$  ซึ่งทำได้โดยให้ชั้น  $P^+$  เป็นสารกึ่งตัวนำที่มี Bandgap Energy สูงกว่า Bandgap Energy ของบริเวณเขตปลอดพาหะ ทำให้แสงส่วนที่มีพลังงานน้อยกว่า Bandgap Energy ของชั้น  $P^+$  สามารถทะลุผ่านชั้น  $P^+$  โดยไม่ถูกดูดกลืน จึงนำไปสู่การสร้างหัวต่อ  $P^+N^-$  แบบหัวต่อต่างชนิดขึ้น

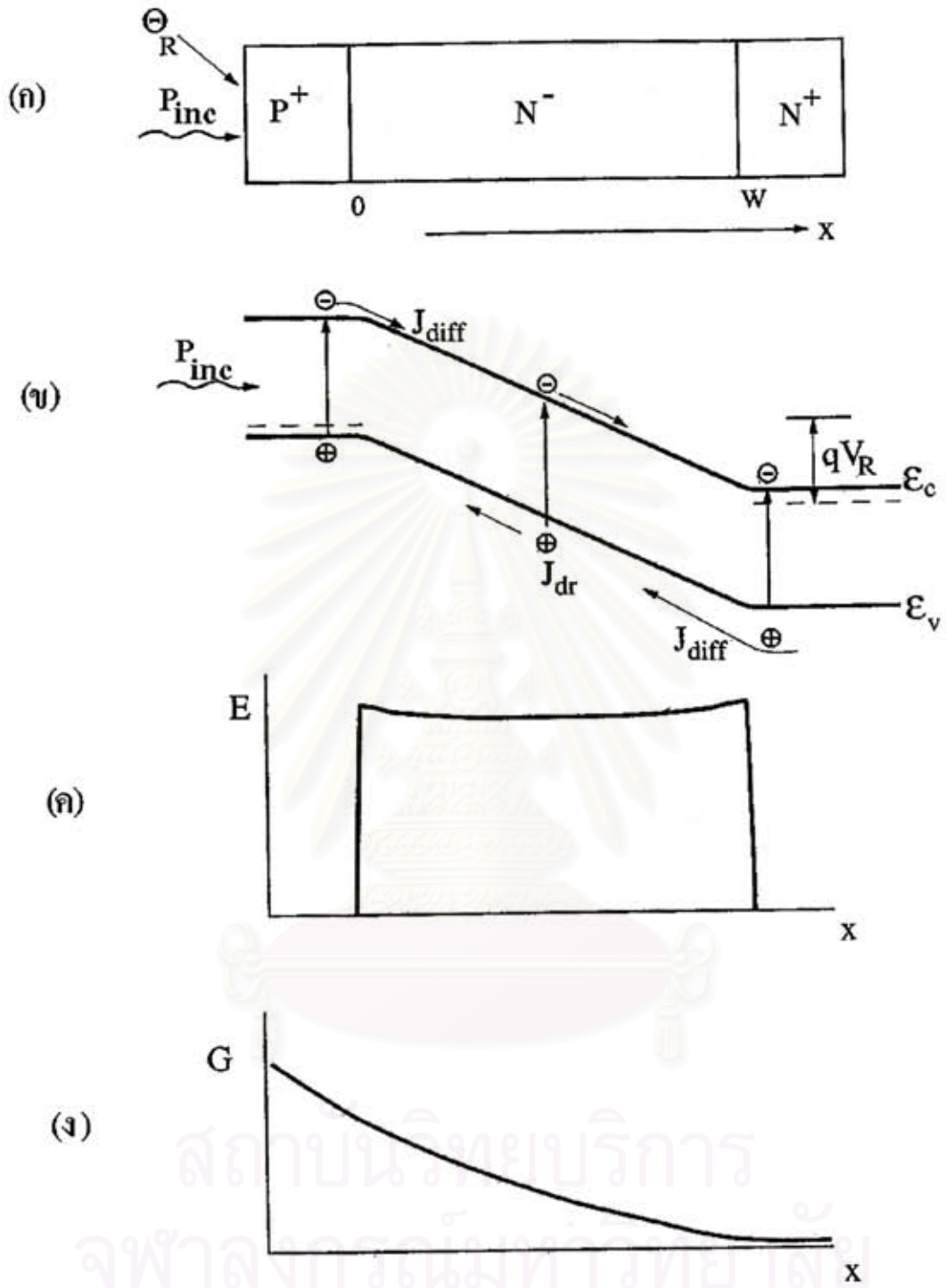
เพื่อเพิ่มเนื้อที่ในการรับแสงของสิ่งประดิษฐ์ ความกว้างของเขตปลอดพาหะควรมีค่ามากๆ  
อย่างไรก็ตามความกว้างของเขตปลอดพาหะมีผลต่อค่า Junction Capacitance ตามสมการ

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (16)$$

- เมื่อ A คือ พื้นที่ตัดขวางของหัวต่อ  
W คือ ความกว้างของเขตปลอดพาหะ  
 $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำโฟโตไดโอด

ในการทำงานค่า Junction Capacitance ควรมีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลให้ค่าคงตัวเวลา ( $\tau = RC$ )  
น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น แต่ในการลดค่า Junction Capacitance นั้นจะลด  
โดยลดพื้นที่หน้าตัดของหัวต่อมากกว่าที่จะเพิ่มค่าความกว้างเขตปลอดพาหะ เนื่องจากจะส่งผลต่อ  
Transit Time ของพาหะให้เพิ่มขึ้นในขณะเดียวกัน

ในกรณี "Window Effect" ยังมีข้อเด่นที่มีผลต่อความเร็วที่กล่าวถึงในช่วงแรก (หัวข้อ  
3.1) กล่าวคือ จะสามารถลดค่ากระแสแพร่ซึมในช่วงพลังงานแสงที่สนใจ ต้องเข้าใจว่า พาหะที่  
เคลื่อนที่โดยการแพร่ซึมจะใช้เวลามากกว่ากรณีพัดพา



รูปที่ 4 การดูดกลืนแสงและการเกิดพาหะในโฟโตไดโอดในขณะที่ไบแอสด้วยแรงดัน  $V_R$

#### 4. ช่องว่างแถบพลังงานของ $Ga_{1-x}Al_xAs$ และ Window Effect

เราสามารถเพิ่มความไว (Sensitivity) ของโฟโตไดโอด โดยใช้โฟโตไดโอดที่ผลิตจาก หัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) โดยสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่าทำหน้าที่เป็น ชั้นรับแสงส่งผ่านพลังงานแสงไปยังชั้นทำงานได้โดยตรง ทำให้การดูดกลืนแสงทั้งหมดเกิดในชั้นทำงานซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ Window Effect ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs ซึ่งมีชั้น  $P^+$  ของ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  เป็น Window Layer สำหรับส่งผ่านพลังงานแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของ GaAlAs ไปชั้นทำงาน ( $N^-GaAs$ ) ได้โดยไม่เกิดการลดทอนกำลังงาน คุณสมบัติของ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ซึ่งเป็นสารประกอบ 3 ธาตุ (Ternary Alloy) มีค่าช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) เมื่อ  $x < 0.45$  ตามสมการ

$$E_g = 1.425 + 1.247x \quad \dots\dots\dots eV \quad (17)$$

เมื่อ  $x$  คือ เศษส่วนอะตอมของ Al ใน GaAlAs

ในทางปฏิบัติกำลังงานแสงที่ตกกระทบ ( $P_{inc}$ ) ชั้นปลอดพาหะจะถูกลดทอนโดยชั้นรับแสง ( $P^+ Ga_{1-x}Al_xAs$ ) ก่อนกล่าวคือ

$$P_{inc} = P_0 e^{-\alpha x} \quad (18)$$

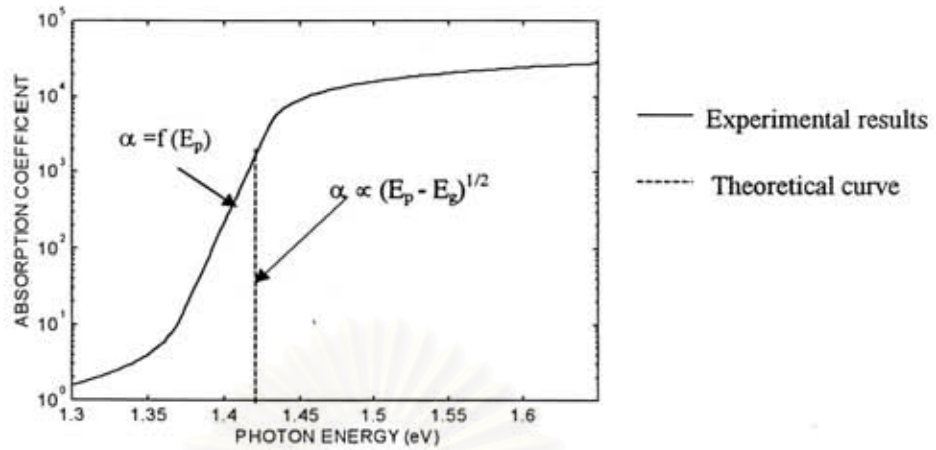
เมื่อ  $P_0$  คือ กำลังของแหล่งกำเนิดแสง (watt)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $cm^{-1}$ )

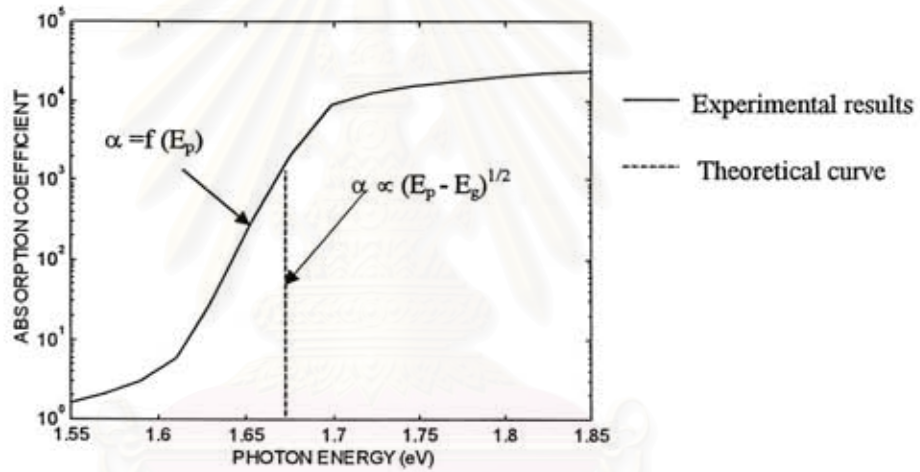
$x$  คือ ความหนาของชั้นผิวบน (cm)

#### 5. การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง [6]

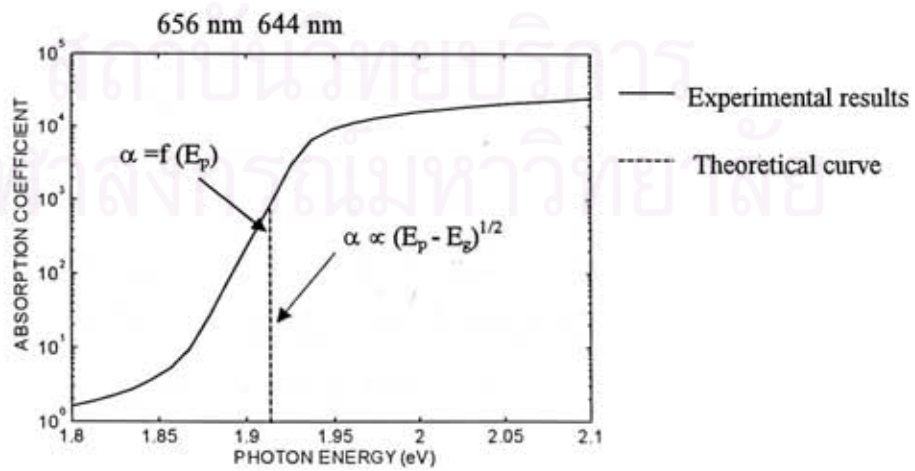
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient;  $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำ ไดโอดมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานโฟตอนดังสมการที่ 19 และแสดงในกราฟรูปที่ 5-7 เห็นได้ว่ามีลักษณะของ Absorption Edge ที่ค่าสัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5 Absorption edge ของ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 6 Absorption edge ของ  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7 Absorption edge ของ  $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$  ที่อุณหภูมิห้อง

$$\alpha = \begin{cases} 5.8 \times 10^4 \sqrt{(E_p - E_g)} & \dots\dots\dots (E_a \leq E_p) \\ \exp [100 (E_p - E_g) + 7.82] & \dots\dots\dots (E_b \leq E_p \leq E_a) \\ 0.13 (E_g - E_p - 4.25 \times 10^{-2}) & \dots\dots\dots (E_p \leq E_b) \end{cases} \quad (19)$$

โดย  $E_p$  คือ ค่าพลังงานโฟตอน ( $\frac{h\nu}{q}$ ). หน่วย eV

$E_g$  คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs หรือ GaAlAs

$E_a$  คือ  $E_g + 0.005$  eV

$E_b$  คือ  $E_g - 0.0526$  eV

## ๖. ขั้นตอนการดำเนินงาน

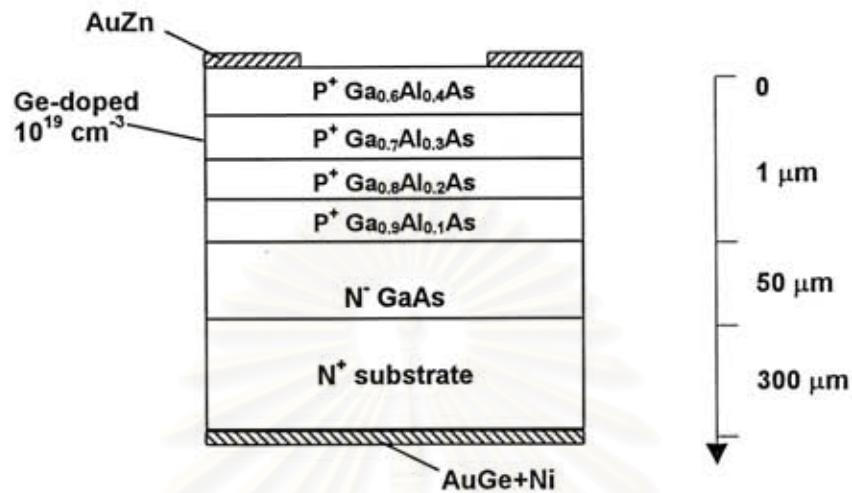
### 6.1 ออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด

#### 6.1.1 โฟโตไดโอดชนิด Constant Band Gap $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ Heterojunction

โฟโตไดโอดที่ออกแบบจะประกอบด้วยชั้นรับแสงของ  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}(p^+)$  โดยโครงสร้างที่ 1 สัดส่วนอลูมิเนียม x มีค่า 0.2 ในขณะที่โครงสร้างที่ 2 x มีค่า 0.4 สารเจือใช้ Ge จำนวน  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  และหนา  $1 \mu\text{m}$  ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างสำหรับแสงที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานของตัวมัน ชั้นถัดมาจะเป็นชั้นปลอดพาหะซึ่งจะเป็นชั้นทำงานของ GaAs (n) หนา  $50 \mu\text{m}$  ส่วนชั้นสุดท้ายจะเป็นชั้นแวนดัลิก GaAs ( $n^+$ ) เจือ Si  $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  หนาประมาณ  $300 \mu\text{m}$  ผิวสัมผัสโอห์มมิกของชั้น  $p^+$  จะฉาบด้วย AuZn ส่วนของชั้น  $n^+$  ฉาบด้วย AuGe+Ni ภาพสเก็ทของโครงสร้างแสดงไว้แล้วในรูปที่ 1

#### 6.1.2 โฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ Heterojunction

ถือเป็นโครงสร้างที่ 3 ที่ทำการออกแบบและสร้างโดยโฟโตไดโอดที่ออกแบบจะประกอบด้วยชั้นรับแสงจำนวน 4 ชั้นของ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$   $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$   $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$   $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  และ  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  ตามลำดับ จากบนลงล่างแต่ละชั้นหนา  $0.25 \mu\text{m}$  และมีปริมาณสารเจือของ Ge  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  เท่ากันทั้งหมด โครงสร้างของชั้น Graded Band Gap จะคล้ายกับ Multilayer ของ  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  ที่ x แปรจาก 0.1 ไป 0.4 ส่วนในโครงสร้างที่เหลือจะเหมือนกับโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด Constant Band Gap ภาพสเก็ทของโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 8

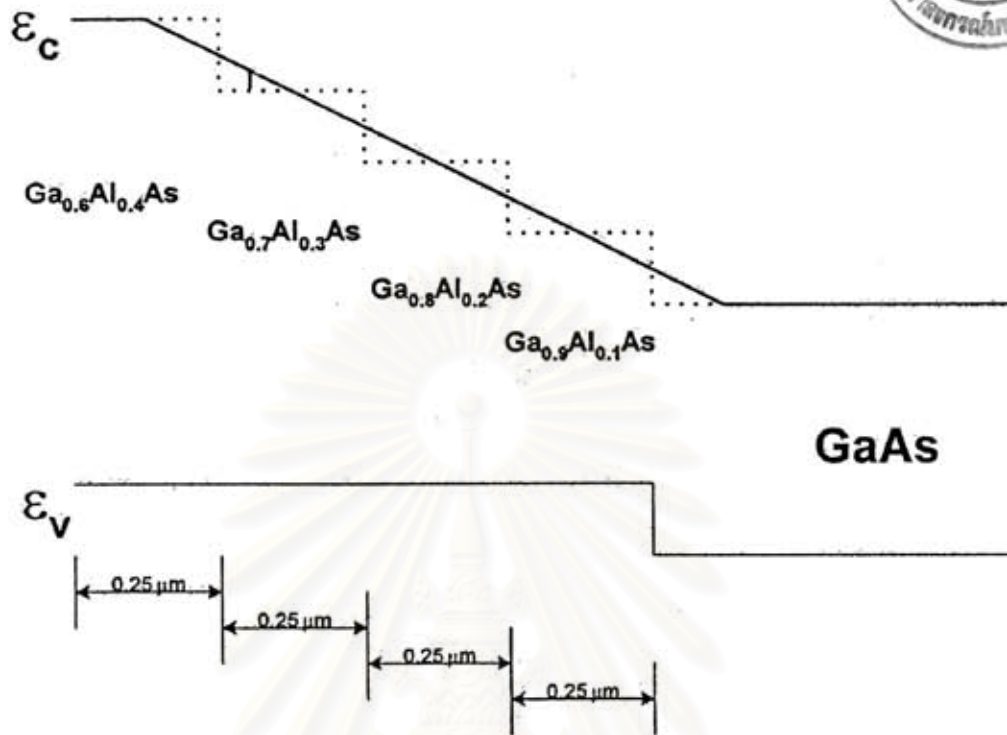


รูปที่ 8 โครงสร้างที่ 3 โฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap

## 6.2 การคำนวณผลตอบสนองทางแสง

การทราบผลตอบสนองทางแสงล่วงหน้า ก่อนทำการผลิตจริงโดยการคำนวณ เป็นสิ่งที่มีคุณค่ายิ่งเพราะสามารถทำการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ได้อย่างเหมาะสม ทั้งยังสามารถนำผลที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายหลัง ในการคำนวณชนิดนี้ทฤษฎีพื้นฐานในหัวข้อ 2 เป็นหลัก โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณของโฟโตไดโอดทุกโครงสร้างจะกำหนดให้กำลังแสงตกกระทบบนหน้ามีค่าคงที่ที่  $3.5 \times 10^{-5}$  วัตต์ ทุกค่าความยาวคลื่นเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบผลตอบสนอง โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงตามสมการที่ 19 สามารถคำนวณค่ากำลังแสงที่สามารถตกกระทบบนชั้นทำงาน (Active Layer) ของโฟโตไดโอดได้ จากนั้นคำนวณค่ากระแสพัลพาและกระแสแพร่ซึมที่เกิดขึ้นในชั้นทำงาน และชั้น GaAs (n<sup>+</sup>) ล่างสุด สำหรับกรณีของโฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap อิเล็กตรอนส่วนที่ถูกกระตุ้นด้วยกำลังแสงส่วนที่ถูกดูดกลืนในชั้นรับแสง จะถูกพัลพาข้ามหัวต่อด้วยสนามไฟฟ้าของชั้นผิวได้ โดยอนุโมลค่าสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 9 ทำให้ผลตอบสนองทางแสงมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นสั้น ผลการคำนวณทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 10, 11, 12, 13, 14, 15 และ 16

รูปที่ 10 แสดงผลการคำนวณของโฟโตไดโอดชนิดหัวต่อเหมือน (Homojunction) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า พลังงานแสงที่มากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs จะถูกกลทอน ทำให้ได้ผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงแคบๆ ที่ 870 nm



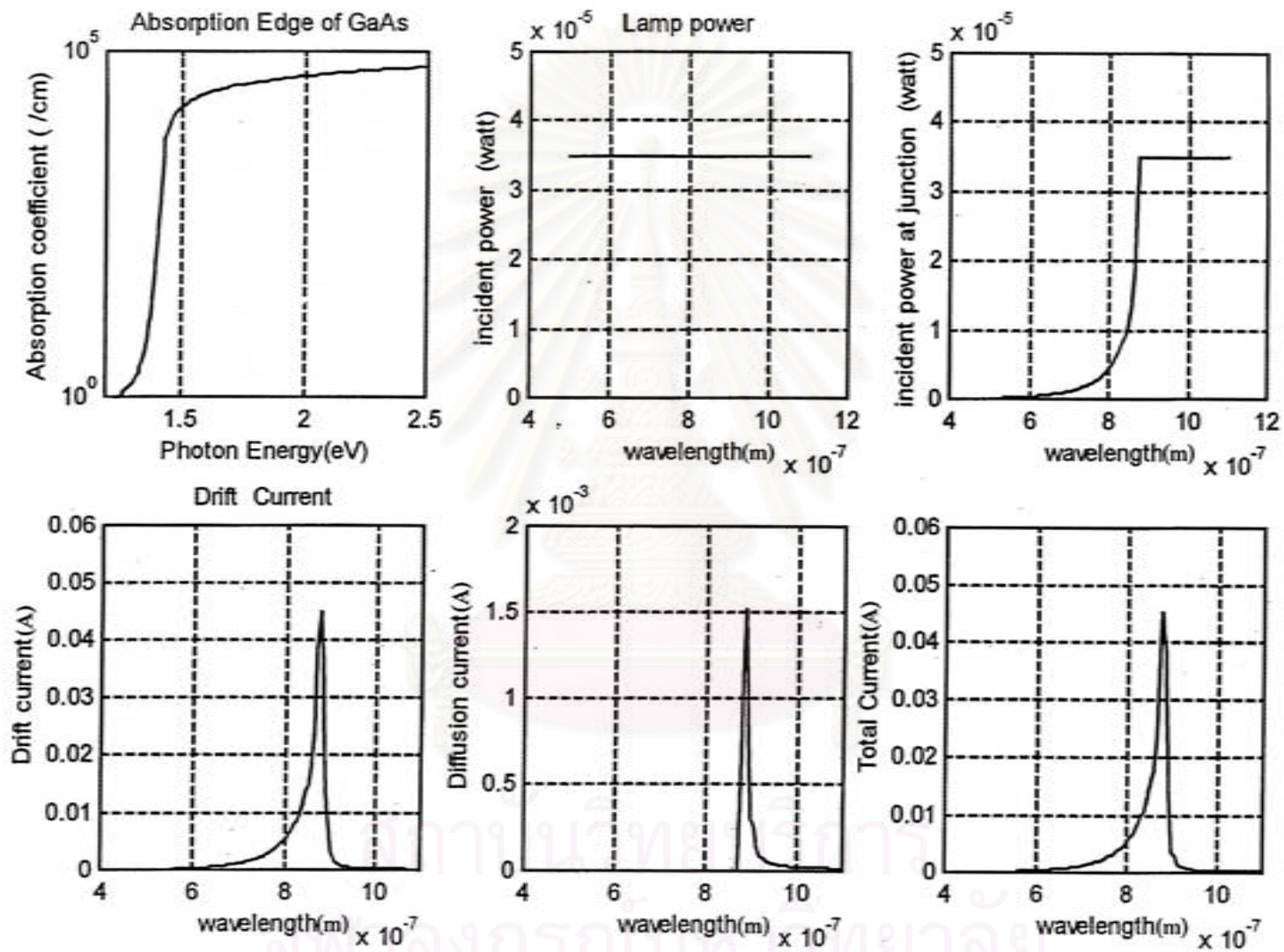
รูปที่ 9 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นผิว

รูปที่ 11 แสดงผลการคำนวณของโฟโตไดโอดชนิดหัวต่อต่างชนิดของ  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}(\text{p}^+)$ / $\text{GaAs}(\text{n})$  ด้วยปริมาณอลูมิเนียมเท่ากับ 0.1 ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของชั้นผิวกว้างขึ้นเป็น 1.55 eV แสงที่มีความยาวคลื่นเกิน 800 nm (1240/1.55) สามารถทะลุผ่านชั้นผิวได้ ดังนั้นผลตอบสนองทางแสงจะกว้างขึ้น อยู่ในช่วง 800-870 nm

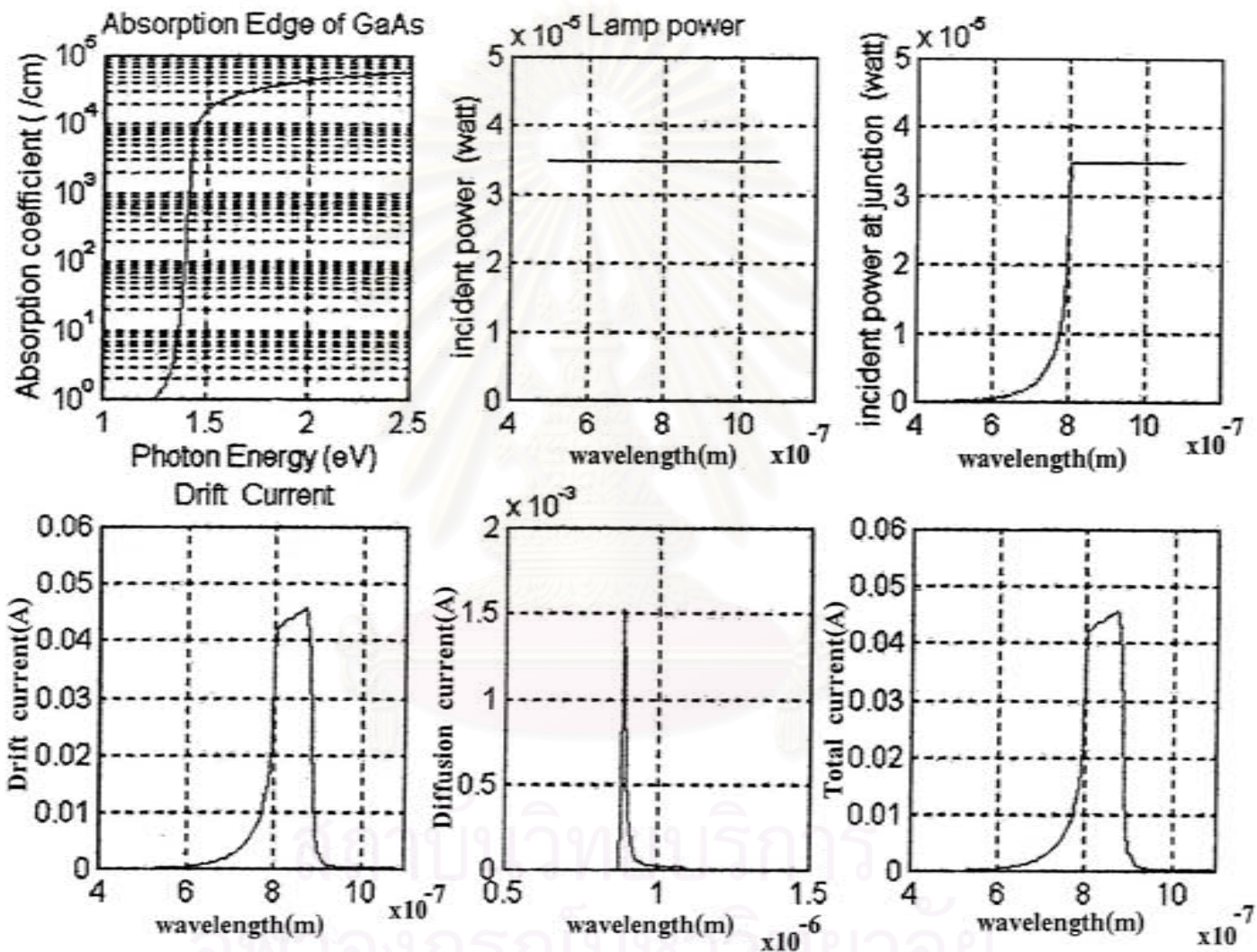
รูปที่ 12 และรูปที่ 13 เป็นผลการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 11 เพียงแต่ชั้นหน้าต่างเปลี่ยนเป็น  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}(\text{p}^+)$  และ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}(\text{p}^+)$  ตามลำดับ ดังนั้นช่วงหน้าต่างจะกว้างขึ้น ผลตอบสนองทางแสงจะกว้างขึ้นตาม

รูปที่ 14 และรูปที่ 15 เป็นผลการคำนวณของโฟโตไดโอดชนิด Grade Band Gap GaAlAs ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในรูปที่ 8 จากโครงสร้างของชั้นหน้าต่างที่ประกอบด้วย Multilayer ของ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน 1.92, 1.80, 1.67 และ 1.55 eV ตามลำดับ โดยโครงสร้างค่าพลังงาน 1.55 eV น่าจะเป็นขีดจำกัดสูงสุดของค่าพลังงานที่ทะลุถึงหัวต่อได้ พลังงานแสงเกิน 1.55 eV จะถูกดูดกลืนโดยชั้นผิวทั้ง 4 จากผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่า ถ้าปราศจากผลของสนามไฟฟ้าในชั้นผิว ผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง

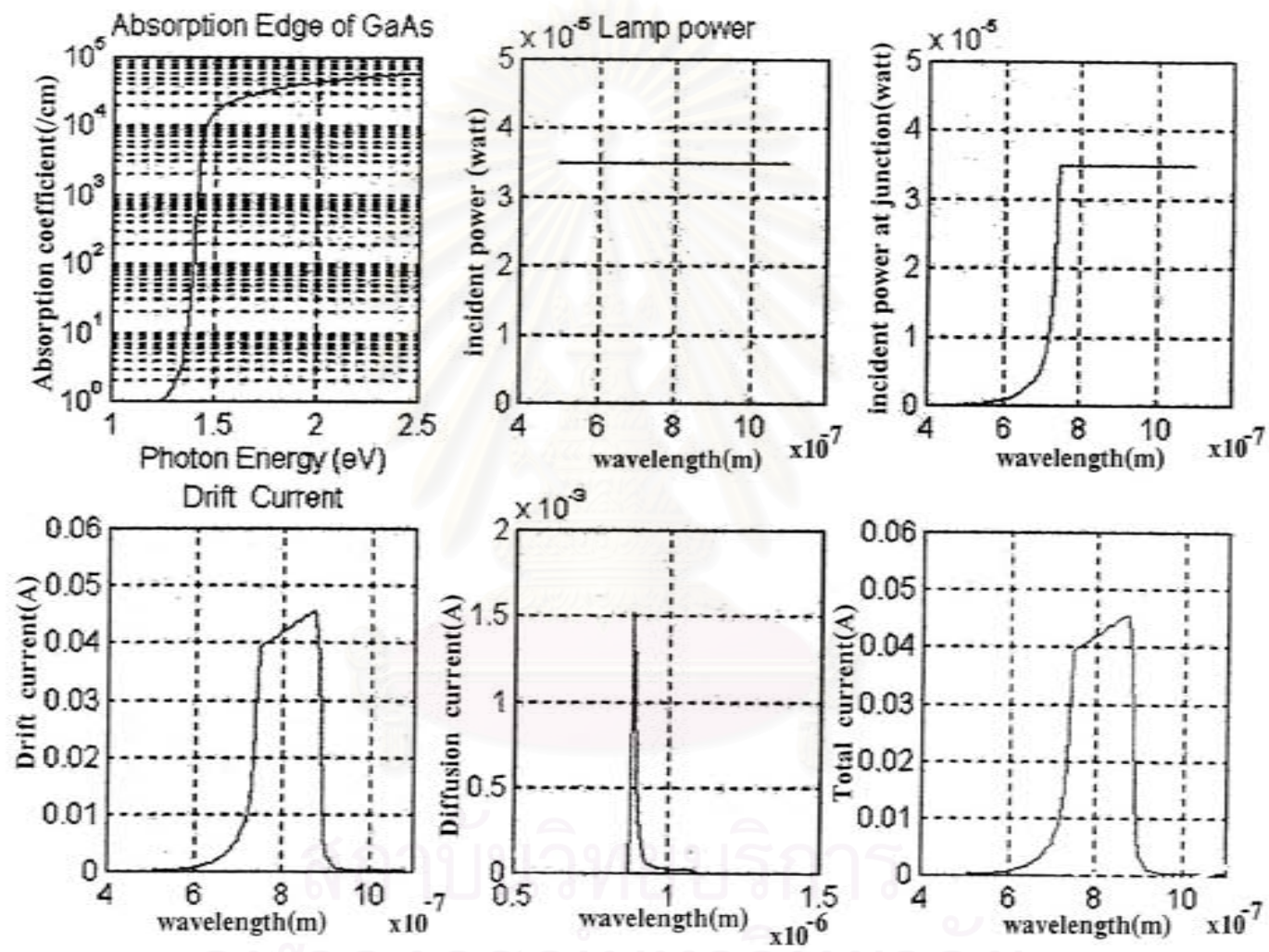




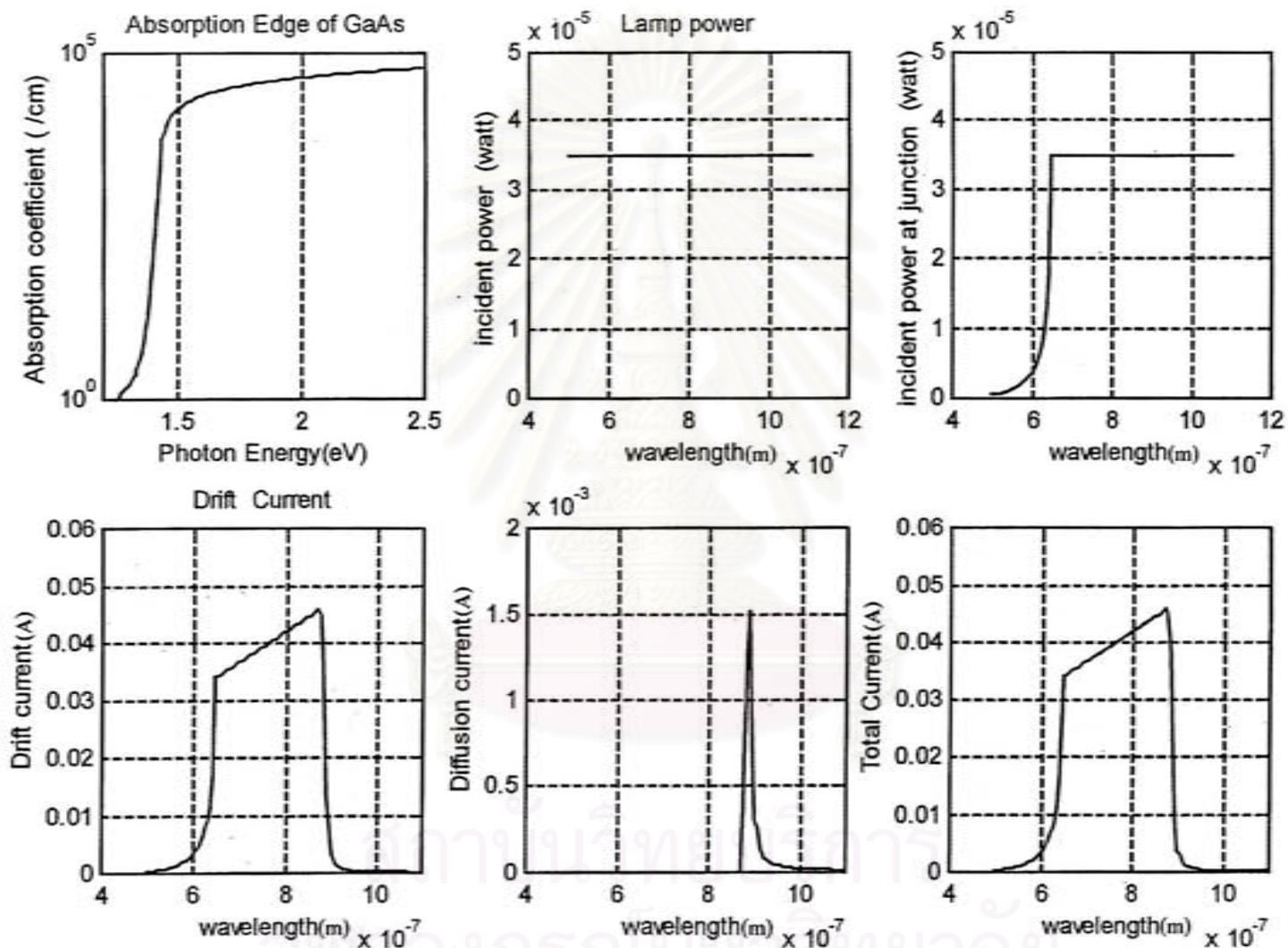
รูปที่ 10 แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ  $P^+-GaAs/N-GaAs/N^+-GaAs$  Photodiode



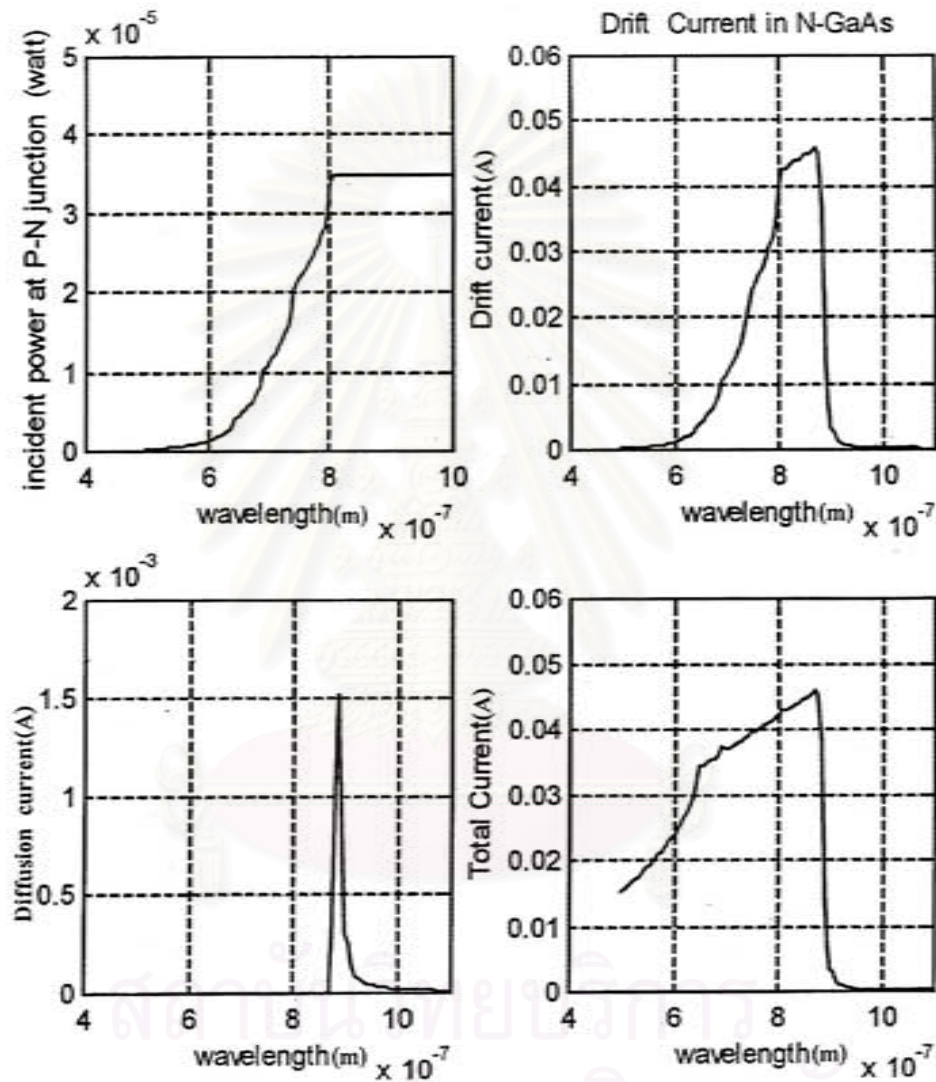
รูปที่ 11 แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ  $P\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/N\text{-GaAs}/N^+\text{-GaAs}$  photodiode



รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ  $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^+-GaAs/N^+-GaAs$  Photodiode (โครงสร้างที่ 1)

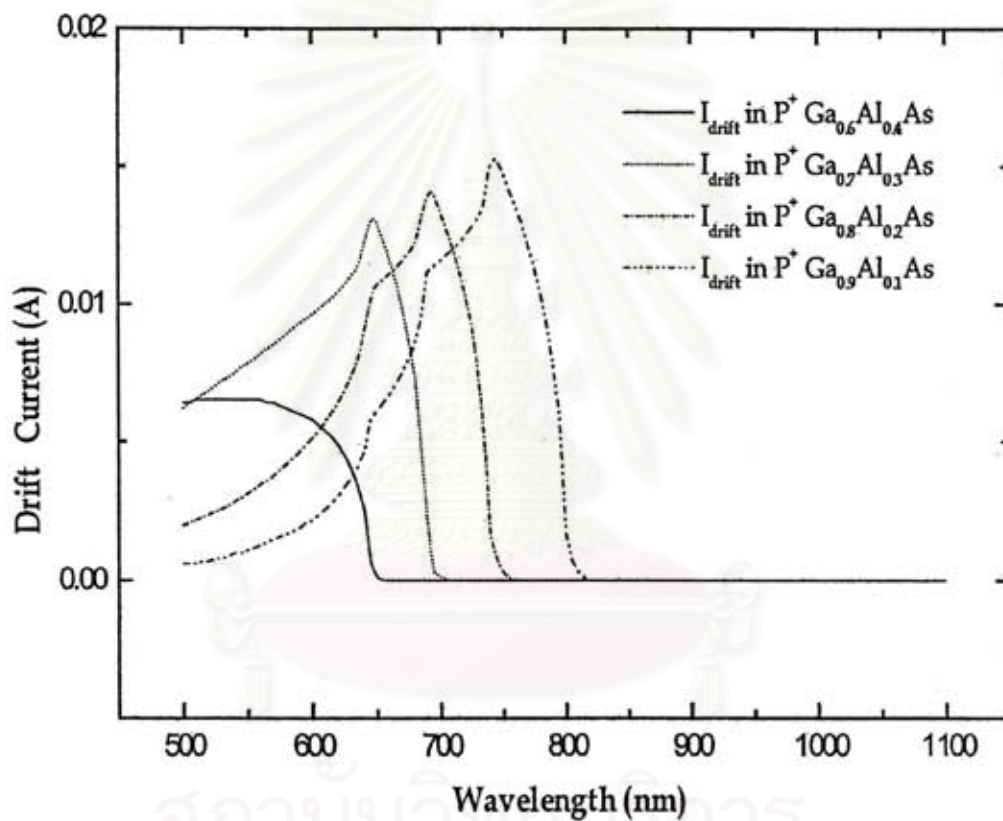


รูปที่ 13 แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ  $P\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/N\text{-GaAs}/N\text{-GaAs}$  Photodiode (โครงสร้างที่ 2)

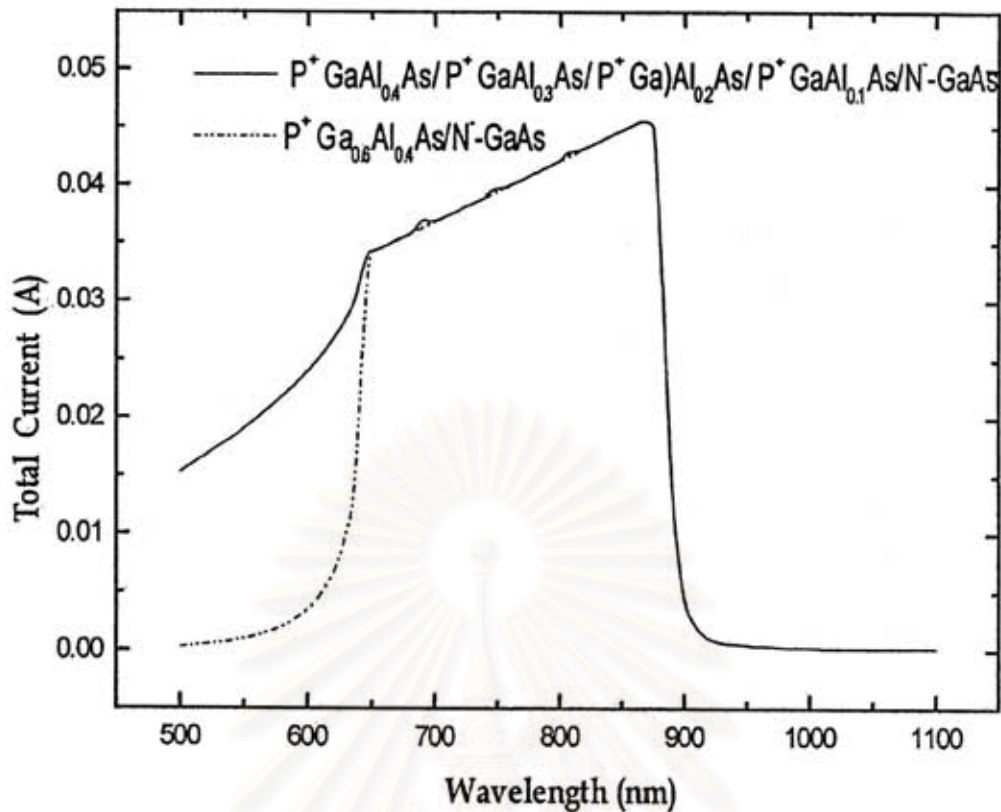


รูปที่ 14 แสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของ  $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$  Photodiode (โครงสร้างที่ 3)

นี้จะใกล้เคียงกับของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างของ  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  ( $p^+$ )/ $\text{GaAs}$  ( $n$ ) (เปรียบเทียบรูป Drift Current ในชั้น  $N^-$ - $\text{GaAs}$  ของทั้งสองกรณี) และเมื่อมีสนามไฟฟ้าในชั้นผิว ค่ากระแสพิศพา (Drift Current) ในรูปที่ 15 จะสามารถไหลผ่านรวมกับกระแส Drift Current ในชั้น  $N^-$ - $\text{GaAs}$  ในรูปที่ 14 กลายเป็นกระแสรวม (Total Current ในรูปที่ 14) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดชนิด  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  ( $p^+$ )/ $\text{GaAs}$  ( $n$ ) ผลตอบสนองทางแสงเกือบซ้อนกันได้พอดียกเว้นช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 645 nm โฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap จะมีความไวแสงมากกว่า การเปรียบเทียบของผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดทั้งสองโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสพิศพาที่เกิดขึ้นในชั้นหน้าต่างๆ ของ  $P^+ - \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} / P^+ - \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As} / P^+ - \text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As} / P^+ - \text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As} / N^- \text{GaAs} / N^- \text{GaAs}$  Photodiode กับความยาวคลื่น



รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงที่เกิดขึ้นในกรณีของ  $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$  Photodiode กับกรณีของ  $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/N^-GaAs/N^+-GaAs$  Photodiode

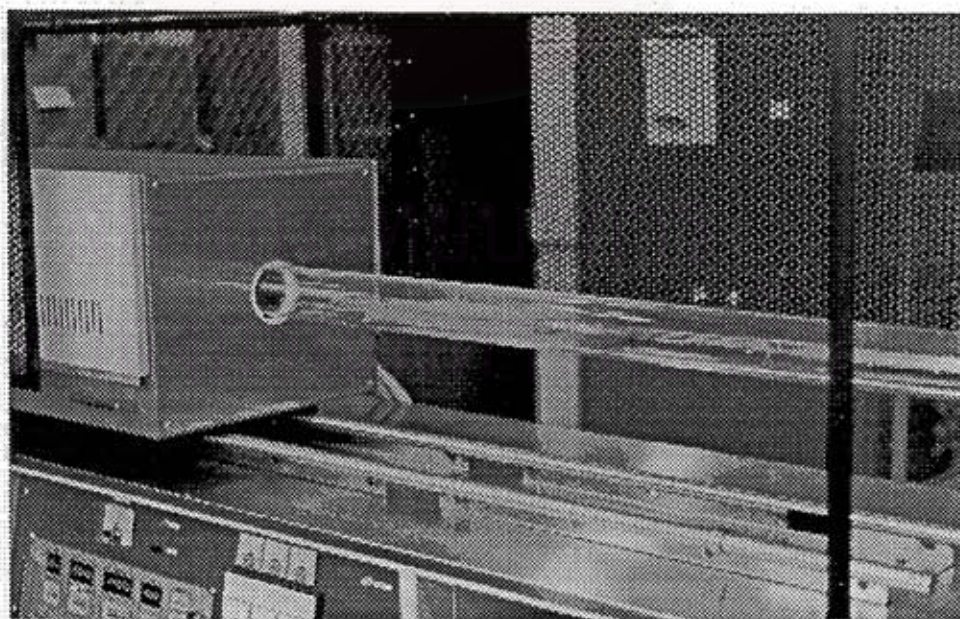
### 6.3 เทคโนโลยีในการปลูกผลึก GaAs และ GaAlAs [7]

Epitaxy คือเทคโนโลยีที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นบางๆ ซึ่งสามารถปลูกซ้อนทับกันหลายๆ ชั้นในกระบวนการเดียวกัน และในแต่ละชั้นยังสามารถกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำและชนิดของสารเจือปนได้ด้วย โดยมีข้อแม้เพียงข้อเดียวก็คือ ชั้นผลึกที่อยู่ประชิดกันจะต้องมีขนาดของโครงผลึก (Lattice Constant) ใกล้เคียงกันเพื่อไม่ให้ Lattice Mismatch มีค่ามากเกินไป Lattice Mismatch มีผลต่อประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์เป็นอย่างมาก

Epitaxy มีหลายชนิด เช่น Vapor Phase Epitaxy (VPE), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE) ฯลฯ แต่ละชนิดมีทั้งข้อเด่นและข้อด้อย ในงานวิจัยชิ้นนี้ เราใช้ Liquid Phase Epitaxy (LPE) เป็นเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างหลายๆ ชั้น (Multilayer Structure) ของสิ่งประดิษฐ์ด้วยเหตุผลที่ว่า LPE มีราคาถูก ระบบไม่ยุ่งยาก และที่สำคัญคุณภาพของชั้นผลึกที่ปลูกได้ดีกว่าที่ได้จากวิธีการอื่นๆ เพราะการปลูกชั้นผลึกจาก LPE เป็นการปลูกภายใต้จุดสมดุลอุณหภูมิ (Thermal Equilibrium) ข้อเสียก็คือ ไม่สามารถปลูกชั้นผลึกบางมากๆ ได้ (น้อยกว่า 0.1 ไมครอน)

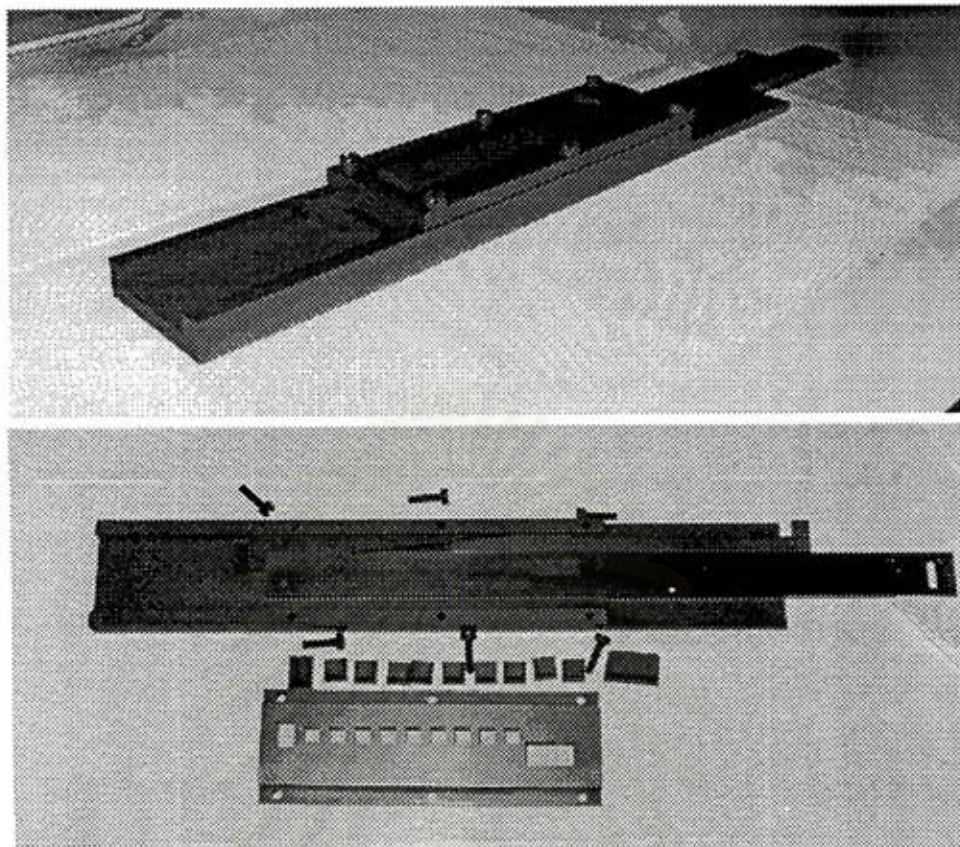
รูปที่ 17 (ก) แสดงส่วนต่าง ๆ ของเตา Horizontal Liquid Phase Epitaxy ซึ่งติดตั้งที่ห้องวิจัยสังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ ดังนี้

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้ (Programmable Temperature Controller) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  และสามารถลดหรือเพิ่มอุณหภูมิด้วยความชันที่กำหนดให้ (0 ถึง  $9.99\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Min}$ )
2. เตาความต้านทานซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform Heated Length) 200 mm.
3. ท่อควอทซ์ยาว 2400 mm. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 74 mm.
4. ระบบก๊าซ และ Hydrogen Purifier
5. เครื่องวัดความชื้น (Hygrometer) ซึ่งสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.1 ppm.
6. Nitrogen Hood เพื่อป้องกันฝุ่นละออง และหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์กับวัสดุต่างๆ ก่อนเริ่มทำงาน
7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
8. เบ้ารองรับสารละลาย (Graphite Boat) ซึ่งสามารถสร้างชั้นของผลึก 9 ชั้น ในกระบวนการ 1 ครั้ง ดังรูปที่ 17 (ข)
9. ก้านแก้ว (Quartz Rod) สำหรับเลื่อน (Slide) แวนผลึกไปได้หลุมของสารละลาย Ga+Al+As



รูปที่ 17 (ก) เตาเอพิแทกซี





รูปที่ 17 (ข) แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย

สำหรับขั้นตอนในการปลูกผลึกนั้น นอกจากความพร้อมของระบบ LPE ที่กล่าวแล้ว การเตรียมวัสดุ และสารเจือต่างๆ อย่างพิถีพิถันก็มีส่วนต่อคุณภาพของผลึก ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อการผลิตสิ่งประดิษฐ์

#### 6.4 ขั้นตอนการเตรียมแวนผลึกฐาน วัสดุของสารละลาย การปลูกผลึก และการผลิตสิ่งประดิษฐ์

##### 6.4.1 การเตรียมผลึกแผ่นฐาน

ผลึกแผ่นฐานเป็นแวนผลึก GaAs ชนิด  $N^+$  มีความเข้มข้นของสารเจือปนประมาณ  $3-5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ตัดแวนผลึกให้มีขนาด  $11 \times 11 \text{ mm}^2$  จำนวน 2 แผ่นเพื่อใช้เป็นซับสเตรต ของสิ่งประดิษฐ์ที่จะผลิต นำแวนผลึกทั้งสองมาทำความสะอาดทางเคมีโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างด้วย Trichloethylene แล้วทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้างคราบไขมัน
2. ล้างด้วย Acetone แล้วไปทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้าง Trichloethylene และคราบไขมันที่เหลือ
3. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป้า  $N_2$  จนแห้ง

4. กัดออกไซด์ที่ผิวออกและกัดผิวให้มันด้วยสารละลาย  $H_2SO_4+H_2O+H_2O$  (4:1:1 ผสมแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ได้คุณภาพประมาณ 75 องศาเซลเซียส)
5. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า  $N_2$  จนแห้ง
6. ล้างด้วย HCl (50 %) มากกว่า 5 นาที เพื่อกัดออกไซด์ที่เหลือ
7. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า  $N_2$  จนแห้ง

ในขั้นตอนนี้ต้องเตรียมแผ่นผลึก GaAs (Non-doped) ขนาด  $6 \times 11 \text{ mm}^2$  เพื่อเป็นตัวซดเซช As ให้สารละลายทุกหลุม โดยใช้กระบวนการทำความสะอาดเช่นเดียวกับแผ่นผลึกฐาน

#### 6.4.2 การเตรียมวัสดุของสารละลาย

สารละลายเตรียมอยู่ในรูปของของแข็งซึ่งมีแกเลียม (Ga) เป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลายมี อาร์เซนิก (As) อลูมิเนียม (Al) และสารเจือปนที่ต้องการ โดยสารเจือปนชนิด P จะใช้เจอร์เมเนียม (Ge) สารเจือปนชนิด N ใช้ดีบุก (Sn) และชนิด  $N^+$  ใช้เทลลูเรียม (Te) ในหัวข้อนี้แสดงถึงการคำนวณน้ำหนักของตัวถูกละลายในตัวทำละลายในชั้นต่างของโพโตไดโอด

ให้ X เป็นเศษส่วนอะตอมของสารใดๆ ในสารละลายจะได้

$$X_{Ga} + X_{As} + X_{Al} + X_{im} = 1$$

เมื่อเทียบกับแกเลียมจะได้น้ำหนักของอาร์เซนิกเป็น

$$W_{As} = (X_{As} / X_{Ga})(M_{As} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

และได้น้ำหนักของอลูมิเนียมเป็น

$$W_{Al} = (X_{Al} / X_{Ga})(M_{Al} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

น้ำหนักของสารเจือปนเป็น

$$W_{im} = (X_{im} / X_{Ga})(M_{im} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

โดยที่อาร์เซนิกจะต้องเตรียมในรูปของแกเลียมอาร์เซไนด์ จะได้น้ำหนักของแกเลียมอาร์เซไนด์เป็น

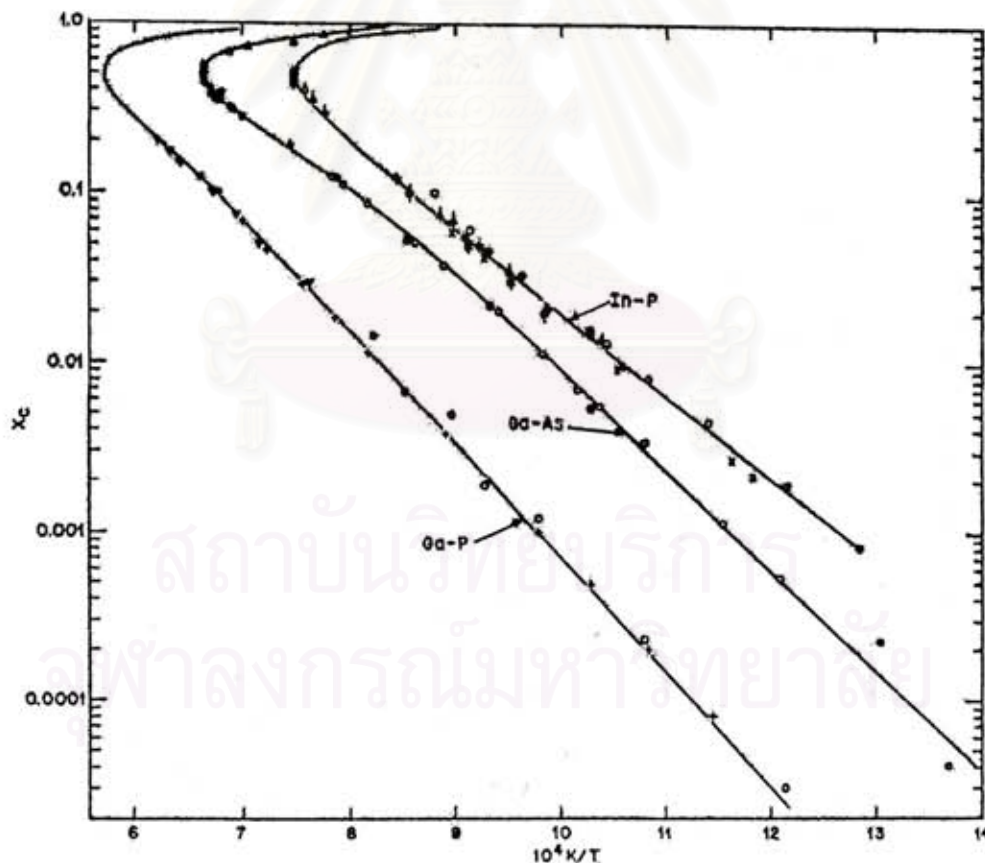
$$W_{GaAs} = (X_{GaAs} / X_{Ga})(M_{GaAs} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

โดยที่	$M_{Ga} = 69.72$	$M_{As} = 74.92$
	$M_{Al} = 26.98$	$M_{Ge} = 72.59$
	$M_{Sn} = 118.69$	$M_{Te} = 127.60$
	$M_{GaAs} = 144.64$	

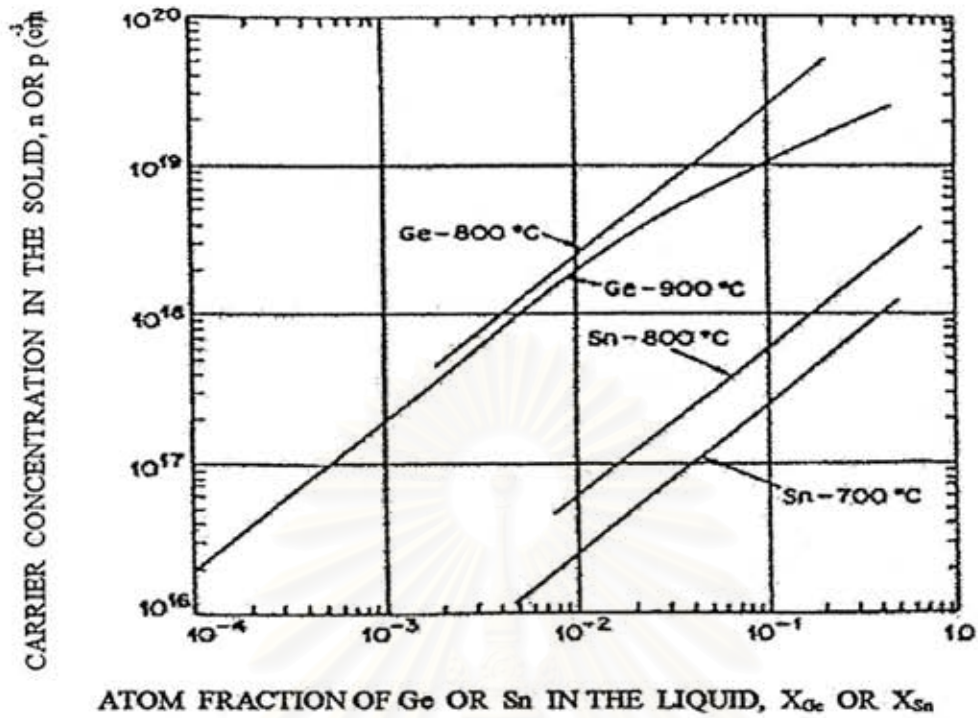
ค่าเศษส่วนอะตอมของตัวถูกละลายพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 18, 19, 20 และ 21

#### 6.4.3 การคำนวณน้ำหนักวัสดุเพื่อเตรียมสารละลาย

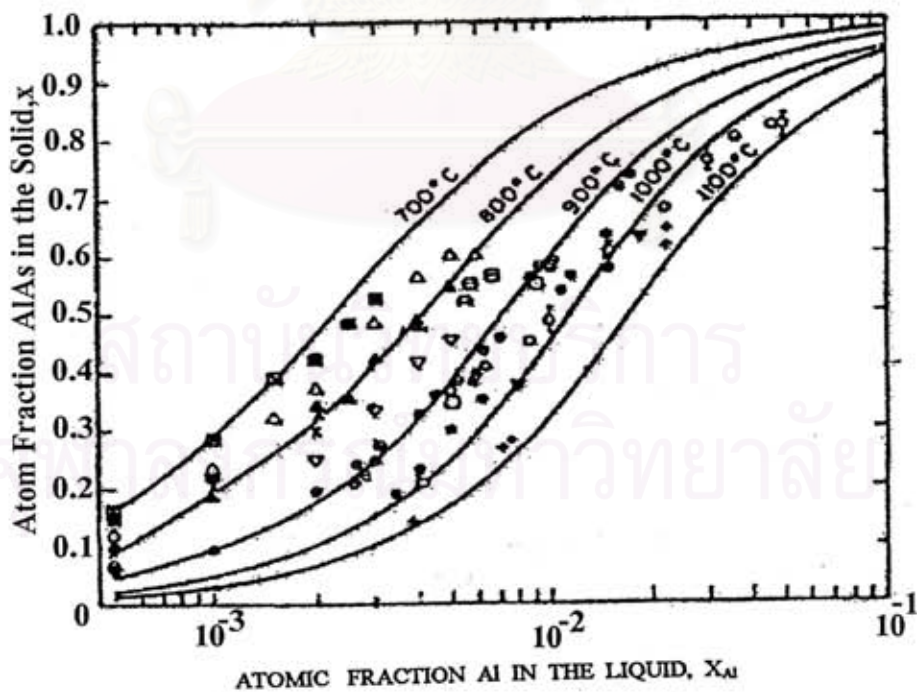
สามารถคำนวณหาน้ำหนักของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิ 800 °C ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ และ 3 ธาตุ ทั้งที่มีการเจือสารและไม่เจือสารได้ โดยอาศัยกราฟในรูปที่ 18 รูปที่ 19 รูปที่ 20 และรูปที่ 21 แล้วแต่กรณีดังตัวอย่าง



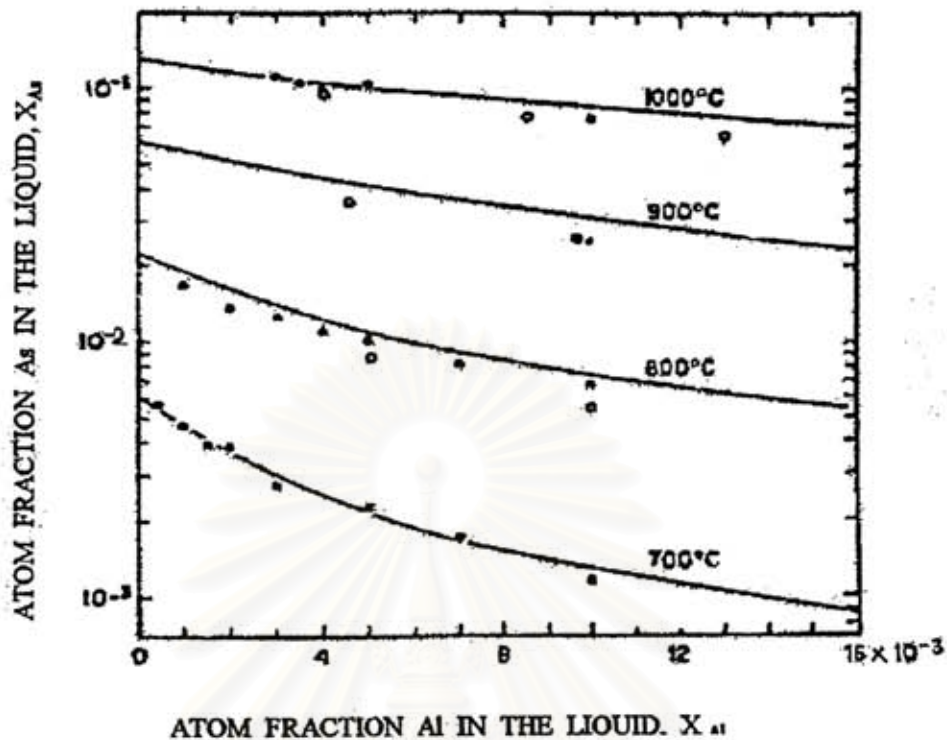
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของธาตุหมู่ V และค่าส่วนกลับของอุณหภูมิของ GaAs, GaP และ InP



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะในของแข็งและเศษส่วนอะตอมของ Ge และ Sn ในสารละลาย GaAs ที่อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C



รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วน โมลของ AlAs ( $x$ ) ในรูปของแข็งและเศษส่วนอะตอมของ Al ในรูปของเหลว



รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วนอะตอมของ As และเศษส่วนอะตอมของ Al

สารละลายสำหรับปลูกชั้น  $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As 10^{19} \text{ cm}^{-3} (\text{Ge})$

จากกราฟรูปที่ 20 ที่ Atom Fraction AlAs in the Solid = 0.2 และอุณหภูมิ 800 °C จะได้

$$X_{Al} = 0.0011$$

จากกราฟรูปที่ 21 ที่  $X_{Al} = 0.0011$  และอุณหภูมิ 800 °C จะได้

$$X_{As} = 0.018$$

จากกราฟรูปที่ 19 ที่  $p = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ของ Ge -800 °C จะได้

$$X_{Ge} = 0.04$$

ดังนั้น

$$X_{Ga} = 1 - X_{Al} - X_{As} - X_{Ge} = 0.9409$$

เมื่อใช้  $W_{Ga} = 1$  กรัมจะได้  $W_{Al} = 0.4524 \text{ mg}$ ,  $W_{GaAs} = 39.688 \text{ mg}$ ,  $W_{Ge} = 44.2625 \text{ mg}$

ในทำนองเดียวกันสารละลายสำหรับปลูกชั้น  $P^+ Ga_{0.6}Al_{0.4}As 10^{19} \text{ cm}^{-3} (\text{Ge})$  ก็สามารถคำนวณได้ โดย

จากกราฟรูปที่ 20 จะได้  $X_{Al} = 0.003$

จากกราฟรูปที่ 21 จะได้  $X_{As} = 0.015$

จากกราฟรูปที่ 19 จะได้  $X_{Ge} = 0.04$

ดังนั้น

$$X_{Ga} = 1 - X_{Al} - X_{As} - X_{Ge} = 0.942$$

เมื่อใช้  $W_{Ga} = 1$  กรัมจะได้  $W_{Al} = 1.2324 \text{ mg}$ ,  $W_{GaAs} = 33.034 \text{ mg}$ ,  $W_{Ge} = 44.21 \text{ mg}$

ในส่วนของการละลายสำหรับปลูกชั้น N<sup>-</sup> GaAs

จากกราฟรูปที่ 18 ที่อุณหภูมิ 800 °C ของเส้นกราฟ GaAs จะได้

$$X_{As} = 0.022$$

ดังนั้น

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} = 0.978$$

เมื่อใช้  $W_{Ga} = 1$  กรัมจะได้  $W_{GaAs} = 46.67$  mg

สำหรับสารละลายชั้นอื่นๆ ก็สามารถทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน ผลการคำนวณทั้งหมดสรุปรวมในตารางที่ 1

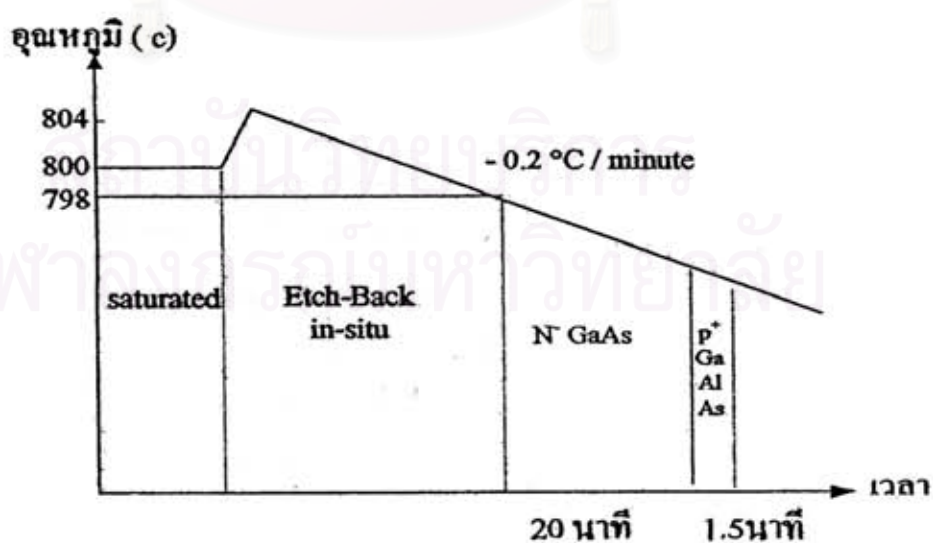
ตารางที่ 1 แสดงน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่างๆ

ชั้นผลึกที่ปลูก	Ga (g)	GaAs (mg)	Al (mg)	Ge (mg)
N <sup>-</sup> -GaAs	3	140	-	-
p <sup>+</sup> -Ga <sub>0.9</sub> Al <sub>0.1</sub> As	3	132.46	0.5	132.95
p <sup>+</sup> -Ga <sub>0.8</sub> Al <sub>0.2</sub> As	3	119.06	1.36	132.78
p <sup>+</sup> -Ga <sub>0.7</sub> Al <sub>0.3</sub> As	3	112.42	2.34	132.75
p <sup>+</sup> -Ga <sub>0.6</sub> Al <sub>0.4</sub> As	3	99.1	3.69	132.63

#### 6.4.4 การผลิตสิ่งประดิษฐ์

ขั้นตอนที่ 1 การปลูกผลึกด้วย Liquid Phase Epitaxy

ทำการปลูกผลึกตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดยมีแผนภูมิอุณหภูมิตามรูปที่ 22 โดยมีช่วงอุณหภูมิ 3 ช่วงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 22 แผนภูมิอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซี และเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก

ช่วงแรกจะเป็นการเตรียมสารละลายให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $T_s$  ซึ่งมีค่าประมาณ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานมากกว่า 4 ชั่วโมงขึ้นไป ช่วงต่อมาจะทำการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายเกิดสภาวะ Undersaturate ช่วงนี้แว่นผลึกจะถูก etching เพื่อทำความสะอาด หลังจากนั้นจะเป็นช่วงการปลูกชั้นผลึก โดยทำการลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 0.2 องศาเซลเซียส/นาที่ ในช่วงนี้จะทำการปลูกชั้น GaAs (n) เมื่อลดอุณหภูมิจนถึง  $T_s - \Delta T$  โดย  $\Delta T \approx 2$  องศาเซลเซียส จะปลูกผลึกชั้น  $p^+ \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  โดยวิธี Supercooling จำนวนชั้นขึ้นกับโครงสร้างที่ออกแบบ ชั้นผลึกที่ปลูกได้จะมีความหนา (d) สัมพันธ์กับเวลา (t) เป็นไป ดังสมการ[7]

$$d = K(\Delta T t^{1/2} + \frac{2}{3} \alpha t^{3/2})$$

โดยที่ K เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความหนาแน่นของ As ในของเหลว ซึ่งจากการทดลองใช้  $\Delta T = 2$  องศาเซลเซียส,  $\alpha$  คือ อัตราการลดลงจริงของอุณหภูมิมิมีค่าประมาณ 0.167 องศาเซลเซียส/นาที่ จากผลึกที่ปลูกได้นำไปตรวจสอบชั้นต่างๆ ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากนั้นทำการปรับเวลาที่ใช้ปลูกในแต่ละชั้นให้มีความหนาตามที่ได้ออกแบบไว้

ก่อนการปลูกผลึกทุกครั้งจะต้องทำการเผาแกรไฟต์โบดเปล่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ภายในบรรยากาศ  $\text{H}_2$  เพื่อขจัดความชื้นและสิ่งแปลกปลอมในแกรไฟต์โบด

หลังจากทำการปลูกผลึก นำผลึกที่ได้ไปดูชั้นต่างๆ ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่อชั้นต่างๆครบตามต้องการ นำไปกัดออกไซด์และล้างเศษแก๊สเลียมที่ติดออกมาด้วย  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$  (1:1) หลังจากนั้นนำไปทำ Ultrasonic จนหมดแล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## ขั้นตอนที่ 2 ทำขั้วโลหะด้าน P และด้าน N

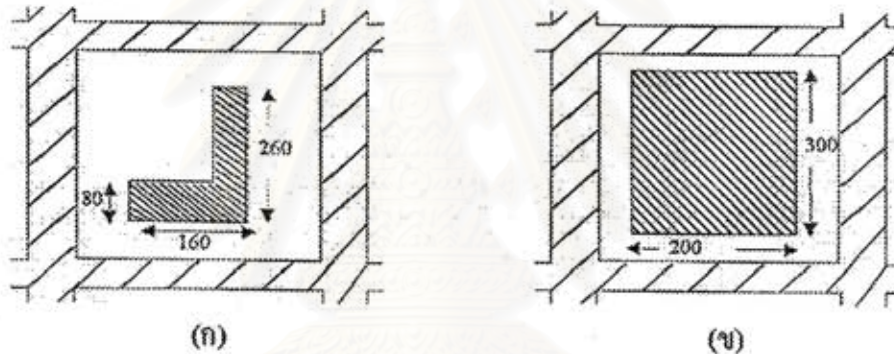
1. ด้าน N ฉาบผิวโลหะด้วย AuGe หนา 2500 Å และฉาบผิวด้วย Ni หนา 500 Å
2. ด้าน P ฉาบผิวโลหะด้วย AuZn หนา 2500 Å
3. ทำ Photolithography ที่ด้าน P ดังนี้

- 1) อบไล่ความชื้นที่ 90 °C 3 นาที แล้ว spin coat positive photoresist และอบที่อุณหภูมิ 90 °C 7 นาที
- 2) ฉาบแสงผ่าน mask ดังรูปที่ 23 ก นาน 30 วินาที
- 3) ล้างด้วย Positive Developer +DI water (1:1) ประมาณ 30 วินาที แล้วล้างด้วย DI Water และอบที่ 90 °C 30 นาที
- 4) ทา WAX ที่ด้านหลังแผ่นชิ้นงาน รอจนแห้ง

- 5) กัด AuZn ด้วย KI + I<sub>2</sub> แล้วล้างด้วย DI-Water
  - 6) ล้าง WAX และ Positive resist ด้วย Trichloethylene และ Acetone ตามลำดับ แล้วล้างด้วย DI-Water
4. ทำ Anneal ที่ 450-500 90 °C 2 นาทีภายใต้บรรยากาศของ Forming Gas 10 % H<sub>2</sub>+ 90 % N<sub>2</sub>

#### ขั้นตอนที่ 3 ทำโครงสร้าง Mesa

โดยการทำให้ Photolithography เหมือนกับข้อที่ 3.3 โดยใช้ mask ดังรูปที่ 23 ข. และกัดด้วย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+ H<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ 35-40 °C 3 นาที รูปที่ 24 แสดงภาพด้านบนของโพโตไดโอดที่ใช้หลังจากการกัด Mesa



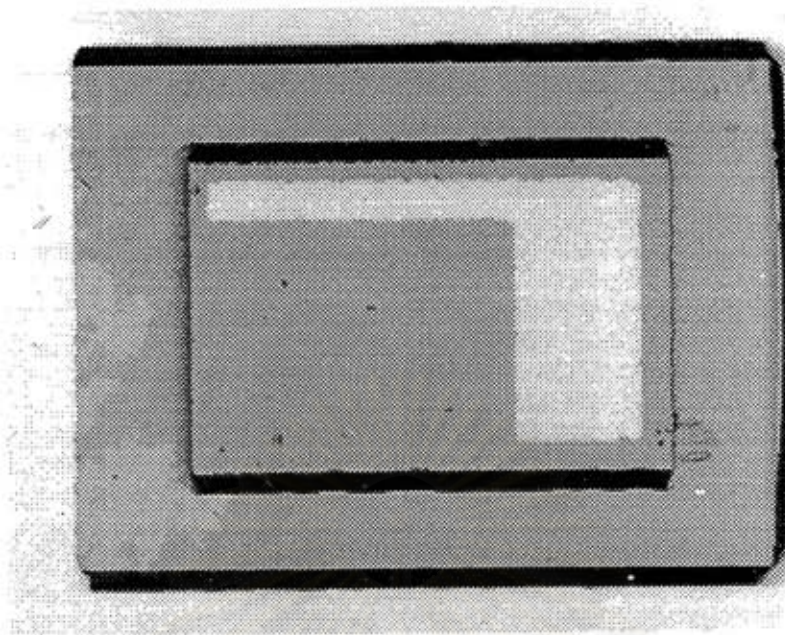
รูปที่ 23 mask ที่ใช้ทำ contact ด้าน P (ก) และทำ Mesa (ข) ขนาดแสดงในหน่วย  $\mu\text{m}$

#### ขั้นตอนที่ 4 Bonding

นำโพโตไดโอดมาตัดแบ่งและติดชิปบนฐานโลหะเพื่อให้เกิดผิวสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างชั้นสเตรต (N') กับขาหนึ่งของ package และต่อสายเพื่อเชื่อมด้าน P' กับอีกขาหนึ่งของ package

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

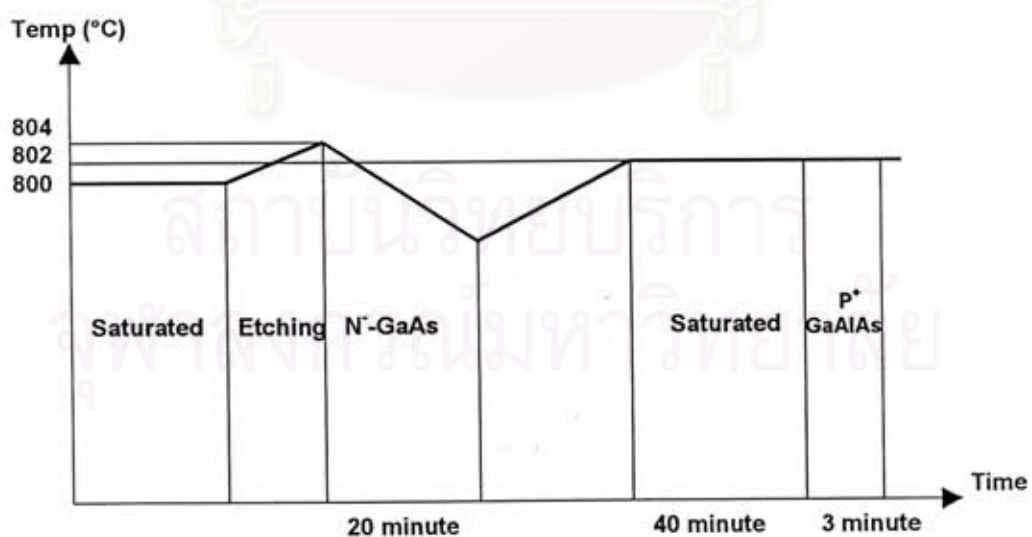




รูปที่ 24 แสดงภาพด้านหน้าของ Photodiode ที่ผลิตได้ ถ่ายด้วย Optical Microscope

#### 6.4.5 การปลูกผลึกชนิด Graded Band Gap GaAlAs ด้วยวิธี Isothermal Growth

ก่อนที่จะกำหนดขั้นตอนการผลิตโฟโตไดโอดได้สำเร็จนั้นได้มีความพยายามปลูกผลึกชนิด Graded Band Gap GaAlAs ด้วยวิธี Isothermal Growth ตาม Profile อุณหภูมิรูปที่ 25 ปรากฏว่าชั้นผลึกที่ได้มีความบกพร่อง มีรูพูน ความหนาไม่สม่ำเสมอ สภาพผิวไม่เรียบ จึงไม่สามารถ



รูปที่ 25 Temperature Profile ของการสร้าง Graded Band Gap GaAlAs แบบ Isothermal Growth

ดำเนินการขั้นตอนต่อไปได้ สาเหตุน่าจะเกิดจากการเกิดผลึกของ GaAlAs ในช่วง 40+3 นาทีสุดท้าย ด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบ Equilibrium Cooling โดยทฤษฎีของการปลูกผลึกแบบนี้อัตราการโตของผลึกจะต่ำมาก เหมาะสำหรับการปลูกผลึกแบบบาง แต่ในทางปฏิบัติคุณภาพของผลึกจะด้อย เนื่องจากการแกว่งของอุณหภูมิเตามีอิทธิพลเหนือกว่าแรงขับเคลื่อนระหว่างอะตอมที่ผิวผลึกกับอะตอมในสารละลาย ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของผิวผลึก [7] จึงกำหนดวิธีสร้างชั้น Graded Band Gap GaAlAs ใหม่ด้วยวิธี “Super Cooling” ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณ Al ด้วยการเตรียม (คำนวณ) จากภายนอก โครงสร้างของชั้น Graded Band Gap GaAlAs จะคล้ายกับ “Multilayer” ของ GaAlAs ที่  $x$  แปรค่าจากน้อยไปมากดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2

## 6.5 การตรวจสอบสมรรถนะของสิ่งประดิษฐ์

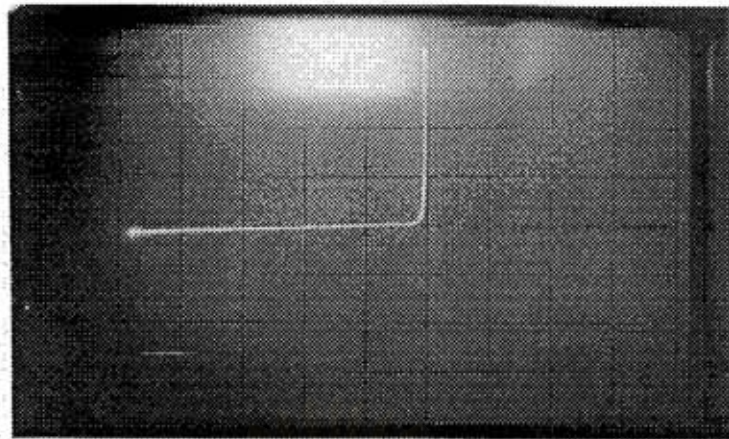
### 6.5.1 วัดลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน

ก่อนขั้นตอนที่ 4 นำเวเน่ผลึกมาตรวจสอบลักษณะสมบัติกระแสแรงดันด้วย Prob Station ร่วมกับ Curve Tracer ทั้งทางด้านไบแอสตามและไบแอสย้อน จุดประสงค์เพื่อคัดเลือกสิ่งประดิษฐ์ที่จะนำไป Packaging เพื่อวัดคุณสมบัติทางแสง นอกจากนี้ยังทราบจุดทำงานที่เหมาะสมของสิ่งประดิษฐ์ด้วย จากโครงสร้างที่ออกแบบทั้ง 3 โครงสร้าง สามารถวัดค่าแรงดัน Cut-in แรงดันพังทลาย ข้อมูลทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 26

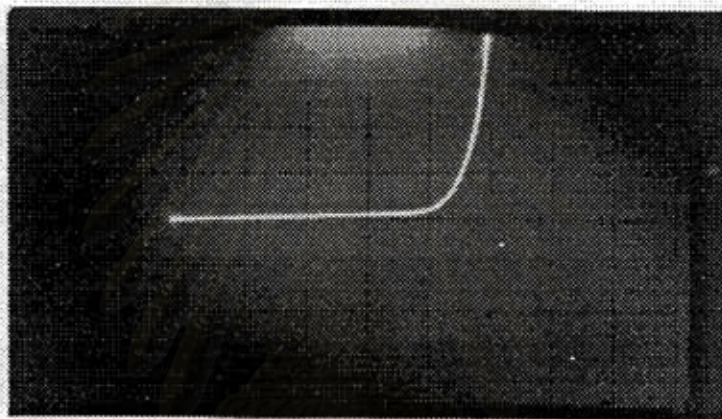
### 6.5.2 วัดผลตอบสนองทางแสง

สิ่งประดิษฐ์ที่ได้รับการคัดเลือกจากข้อ 6.5.1 ถูกนำไปติดตั้งบนฐานโลหะตามขั้นตอนที่ 4 ของหัวข้อ 6.4.4 จากนั้นจะถูกนำไปวัดผลตอบสนองทางแสงด้วยชุดเครื่องคือ [8] ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในส่วนผนวก (Appendix) ผลการวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดทั้ง 3 โครงสร้าง แสดงไว้ในรูปที่ 27

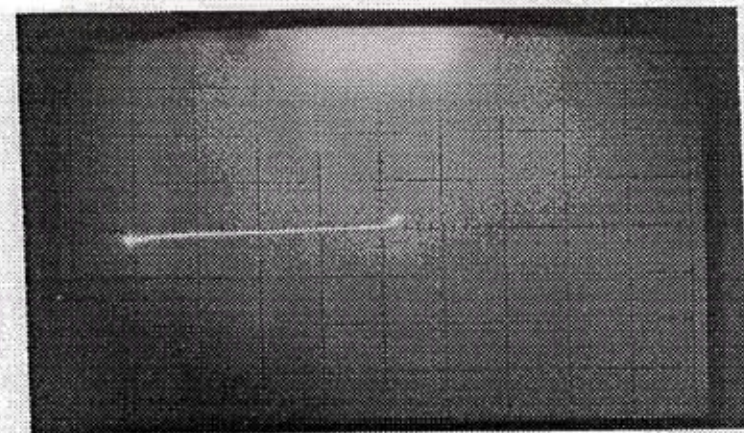
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สเกล แกนนอน : 1 V/Div แกนตั้ง : 0.1 mA/Div

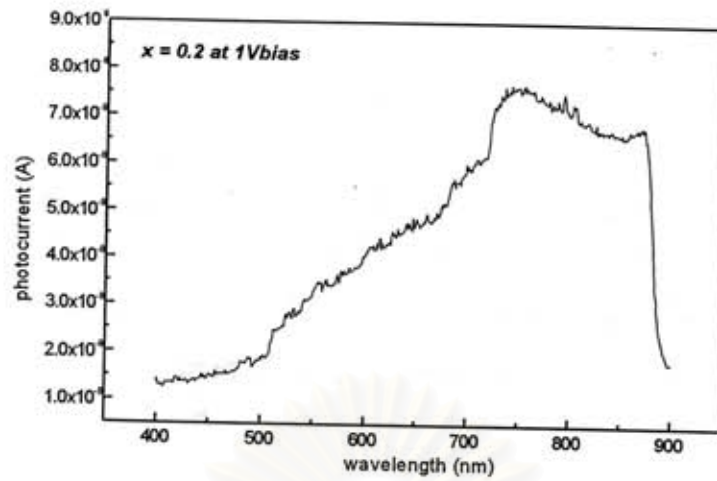


(ข) สเกล แกนนอน : 2 V/Div แกนตั้ง : 20  $\mu$ A/Div

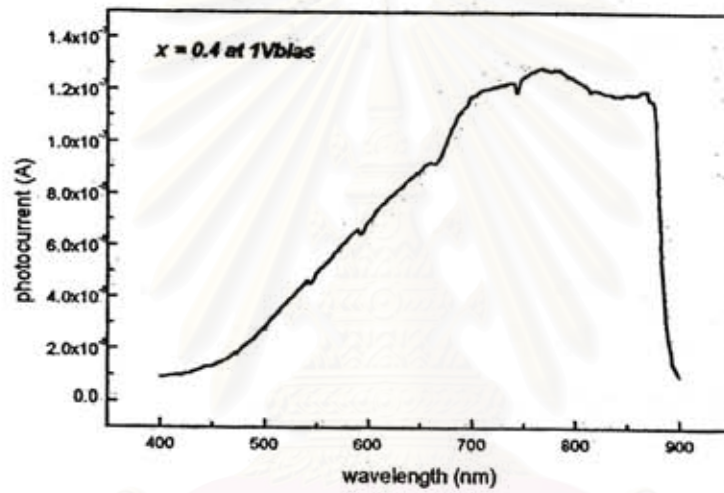


(ค) สเกล แกนนอน : 10 V/Div แกนตั้ง : 0.2 mA/Div

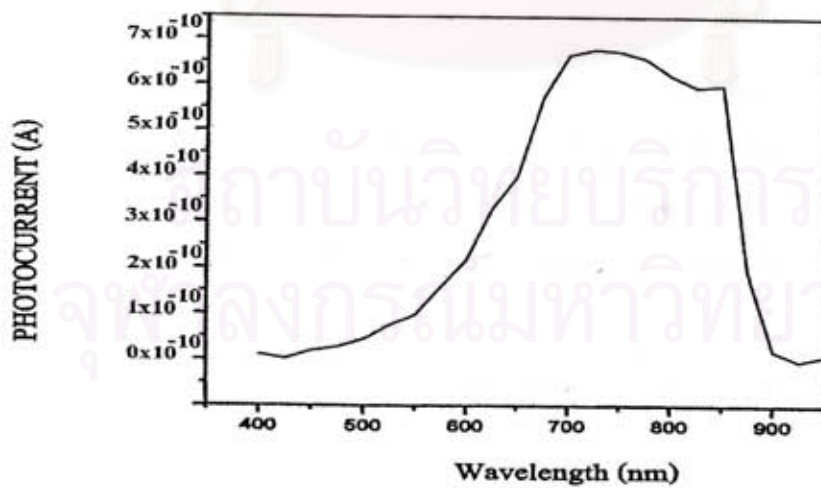
รูปที่ 26 ตัวอย่างลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของโฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ 1  
(ข) โครงสร้างที่ 3 (ค) เมื่อถูกไบแอสกลับทางถึง 40 Volt



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 27 ผลตอบสนองทางแสงของ (ก) โครงสร้างที่ 1  
(ข) โครงสร้างที่ 2 (ค) โครงสร้างที่ 3

## 7. การอภิปรายผลการทดลอง

### 7.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

โครงสร้างที่ 1 มีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก Cut-in voltage มีค่าประมาณ 1-1.2 โวลต์ และคมชัด ในขณะที่โครงสร้างที่ 2 และ 3 มีค่า Cut-in voltage ประมาณ 1.6-1.8 โวลต์ เป็นสัดส่วนกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของหัวต่อต่างชนิด  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ( $p^+$ )/GaAs ( $n$ ) ในขณะที่การนำกระแสทางด้านไบแอสตามเมื่อเลขจุดแรงดัน Cut-in ไปแล้ว โครงสร้างที่ 1 จะชันกว่าโครงสร้างที่ 3 น่าจะมีผลจากความต้านทานของผิวสัมผัสโอห์มมิกที่ต่างกัน ผิวสัมผัสโอห์มมิกบนชั้น  $p^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  จะดีกว่าผิวสัมผัสโอห์มมิกบนชั้น  $p^+ Ga_{0.6}Al_{0.4}As$  เสมอ เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่า สำหรับลักษณะสมบัติทางด้านไบแอสกลับในรูปที่ 26 (ค) ค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) มีค่าถึง 40 โวลต์ แต่โดยส่วนใหญ่สิ่งประดิษฐ์มีค่าแรงดันพังทลายอยู่ในช่วง 15-20 โวลต์ ทั้งนี้จะขึ้นกับค่าสารเจือที่ตกค้าง และความหนาของชั้น  $n^- GaAs$

### 7.2 ผลตอบสนองทางแสง (Spectral Response)

จากการวัดผลตอบสนองทางแสงเมื่อไบแอสกลับทางโฟโตไดโอดที่ค่าแรงดัน 1 Volt จะได้กระแสขาออก (Photocurrent) ของโฟโตไดโอดที่ผลิตอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงประมาณ 400 nm - 875 nm ตาม Spectral Response ในรูปที่ 27 ทำให้ทราบว่าโฟโตไดโอดแต่ละ โครงสร้างตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นใดได้ดี

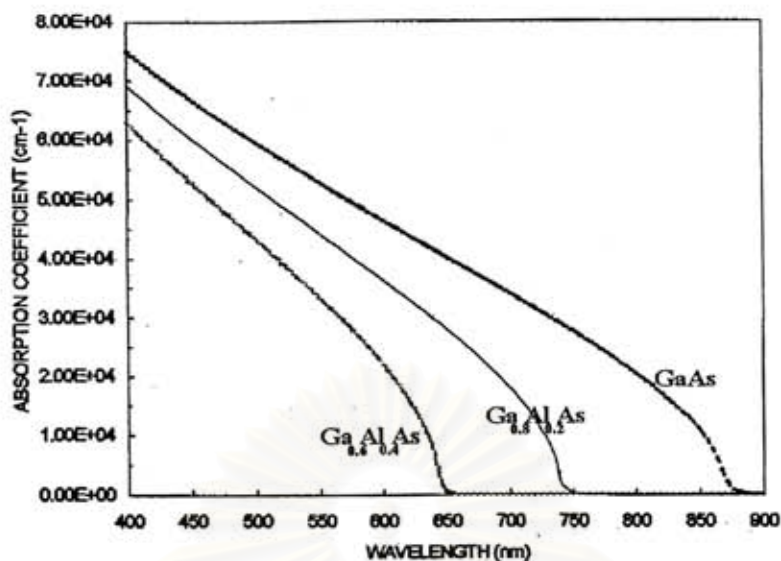
#### 7.2.1 โครงสร้างที่ 1 $Ga_{0.8}Al_{0.2}As/GaAs$ Heterojunction Photodiode

จากผลตอบสนองทางแสงในรูปของกระแส Photocurrent ขาออกของโฟโตไดโอด โครงสร้างที่ 1 (เศษส่วนอะตอมของ Al;  $x = 0.2$ ) โดยแบ่งการวิเคราะห์ที่ได้เป็น 3 ช่วง ตามลักษณะของผลตอบสนองคือ มี กระแสโฟโตขาออกค่อนข้างต่ำที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 725 nm, กระแสสูงและค่อนข้างคงที่ใน แสงช่วง 725-875 nm และกระแสลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นมากกว่า 875 nm

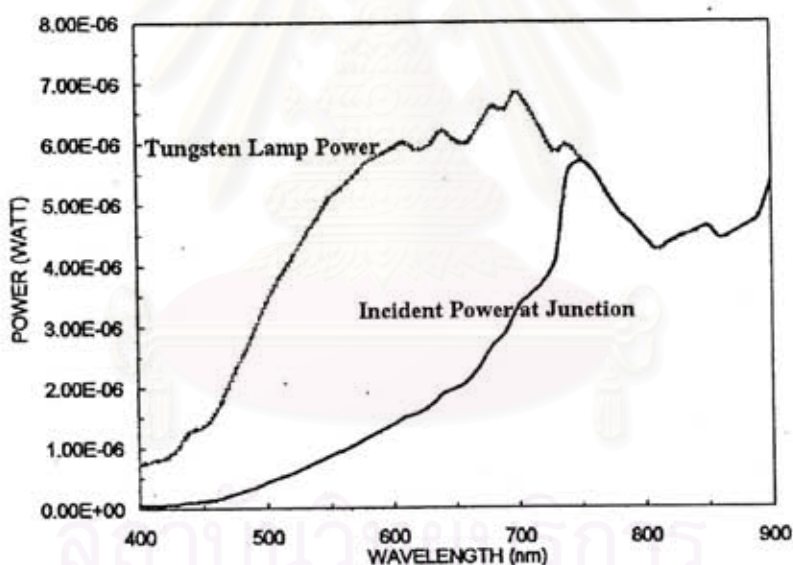
จากสมการที่ 17 ค่า Bandgap Energy ของชั้น  $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As = 1.674$  eV

Bandgap Energy ของชั้น  $N^- GaAs = 1.425$  eV

จากสมการที่ 19 ได้กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น  $P^+ GaAlAs$  และชั้น  $N^- GaAs$  ดังรูปที่ 28 และจากสมการที่ 18 ได้กราฟของกำลังงานแสงที่ตกกระทบชั้น  $N^- GaAs$  ดังรูปที่ 29



รูปที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ



รูปที่ 29 พลังงานแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 1 ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ

ในความเป็นจริงค่าพลังงานที่แบ่งช่วงผลตอบสนอง 2 ช่วงแรกน่าจะมีค่า 1.674 eV เพื่อให้สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ  $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  ( $p^+$ ) ค่าพลังงาน 1.71 eV จะสอดคล้องกับชั้นหน้าต่างของ  $\text{Ga}_{0.77}\text{Al}_{0.23}\text{As}$  ( $p^+$ ) ค่าความต่างของปริมาณ Al = 0.03 (0.23-0.2) อยู่ในวิสัยที่จะเกิดขึ้นได้จากการปลูกผลึก

### วิเคราะห์ผลโครงสร้างที่ 1

- ความยาวคลื่นแสง < 725 nm หรือพลังงานโฟตอน > 1.71 eV

แสงในช่วงนี้มีค่าพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้น  $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  ทำให้เกิดการลดทอนกำลังงานตามสมการที่ 18 ดังรูปที่ 29 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแสงที่ตกกระทบชั้นทำงานถูกลดทอนกำลังงานลงมาก ทำให้มีเพียงโฟตอนค่าพลังงานต่ำๆ เท่านั้น (น้อยกว่า 1.71 eV) ที่สามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าในชั้นทำงาน แต่ยังคงมีส่วนของกระแสแพร่ซึมเล็กน้อยที่ได้จากพาหะข้างน้อยซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงในชั้นรับแสง GaAlAs บริเวณใกล้รอยต่อที่ไม่ไกลกว่าความยาวแพร่ซึมของพาหะ

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 725-875 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.71-1.42 eV

ชั้น  $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  ทำหน้าที่เป็นเพียง Window Layer ส่งผ่านแสงโดยไม่ถูกลดทอนหรือดูดกลืน เนื่องจากมีค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่า Bandgap Energy ของ  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  ทำให้โฟตอนทั้งหมดถูกดูดกลืนในชั้นทำงานตามที่ออกแบบ เกิดการกระตุ้นพาหะอิสระจำนวนมากซึ่งถูกสนามไฟฟ้าพัฒนาข้ามหัวต่อได้เป็นกระแสขาออก (Photocurrent) ค่าสูงด้วย

- ความยาวคลื่นแสง > 875 nm หรือพลังงานโฟตอน < 1.42 eV

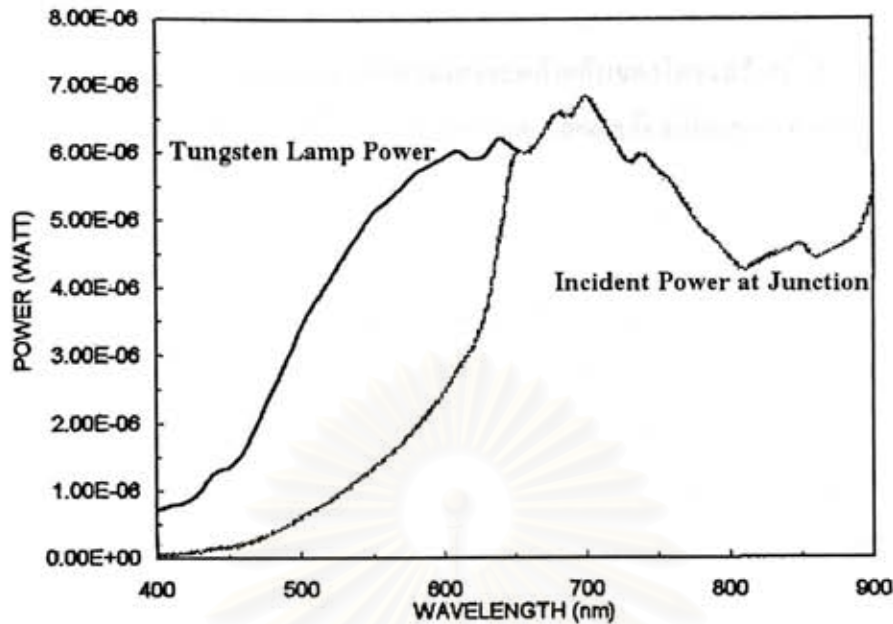
โฟโตไดโอดจะไม่ดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นนี้ เนื่องจากแสงมีค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs (1.425 eV) ดังนั้นจะไม่เกิดการกระตุ้นพาหะนำไฟฟ้าใดๆ

### 7.2.2 โครงสร้างที่ 2 $Ga_{0.6}Al_{0.4}As/GaAs$ Heterojunction Photodiode

จากรูปที่ 27 ข ผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2 (เศษส่วนอะตอมของ Al;  $x = 0.4$ ) มีลักษณะผลตอบที่คล้ายกับของโครงสร้างที่ 1 คือ มีกระแสโฟโตขาออกค่อนข้างต่ำที่ ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 655 nm, กระแสมีค่าสูงคงที่ระหว่างความยาวคลื่น 655-875 nm และ กระแสลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นแสงมากกว่า 875 nm

จากสมการที่ 17 ค่า Bandgap Energy ของชั้น  $P^+ Ga_{0.6}Al_{0.4}As = 1.924$  eV และมีกราฟของกำลังงานแสงที่ตกกระทบชั้นทำงานดังรูปที่ 30

การวิเคราะห์รูป Spectrum Response ของโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2 สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 1 แต่มีข้อแตกต่าง ตรงความยาวคลื่นที่แบ่งช่วงผลตอบสนอง 2 ช่องแรกเคลื่อนที่ไปที่ความยาวคลื่น 655 nm ซึ่งสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงานของ  $Ga_{0.62}Al_{0.38}As (p^+)$  แทนที่จะเป็น 645 nm ซึ่งสอดคล้องกับแถบพลังงานของ  $Ga_{0.6}Al_{0.4}As (p^+)$  ความคลาดเคลื่อนของ



รูปที่ 30 กำลังงานแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2 ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ

ปริมาณอุมิเนียม  $\cong 0.02$  (0.4-0.38) อยู่ในวิสัยที่จะเกิดขึ้นได้จากการปลูกผลึกเช่นเดียวกับกรณีของโครงสร้างแรก

### วิเคราะห์ผลโครงสร้างที่ 2

- ความยาวคลื่นแสง  $< 655$  nm หรือพลังงานโฟตอน  $> 1.89$  eV

แสงถูกลดทอนกำลังงานตามรูปที่ 30 เนื่องจากการดูดกลืนในชั้นรับแสง GaAlAs ทำให้มีโฟตอนต่ำกว่า 1.89 eV เท่านั้นที่สามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะในชั้นทำงาน อย่างไรก็ตามผลการดูดกลืนในชั้นรับแสง ณ จุดนี้ไม่ไกลจากรอยต่อมากกว่าความยาวแพร่ซึมก่อนให้เกิดกระแสแพร่ซึม แต่มีปริมาณน้อยเช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 1

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 655-875 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.89-1.42 eV

ชั้น GaAlAs เป็น Window Layer ส่งผ่านแสงช่วงนี้ไปยังชั้นทำงานโดยไม่เกิดการดูดกลืนและลดทอนกำลัง ทำให้ได้กำลังงานโฟตอนทั้งหมดในการกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระในชั้นทำงานได้กระแสขาออกค่าสูง

- ความยาวคลื่นแสง  $> 875$  nm หรือพลังงานโฟตอน  $< 1.42$  eV

ไม่เกิดการดูดกลืนแสงเนื่องจากมีค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานของ

GaAs



### 7.2.3 โครงสร้างที่ 3 Graded Band Gap GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiode

จากรูปที่ 27 ค ผลตอบสนองทางแสงจะคล้ายกับของโครงสร้างที่ 2 กล่าวคือช่วงกว้าง (Bandwidth) ของผลตอบสนองอยู่ระหว่าง 650-870 nm สอดคล้องกับผลการคำนวณก่อนหน้านี้

#### วิเคราะห์ผลโครงสร้างที่ 3

- ความยาวคลื่นแสง < 650 nm หรือพลังงานโฟตอน > 1.9 eV

แสงมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของ  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  ( $p^+$ ) ของชั้นผิวบนสุด จึงถูกดูดกลืนกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (EHP) EHP ที่ผิวหน้าเนื่องจากอยู่นอกสนามไฟฟ้าของ Graded Band Gap GaAlAs (ครึ่งบนของชั้น  $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} = 0.125 \mu\text{m}$ ) จะรวมตัวกลับ แต่ EHP ที่อยู่ด้านล่างจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพา ( $I_{\text{drift}}$  in  $P^+ \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$  ของรูปที่ 15)

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 650–689 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.9-1.8 eV

จะถูกดูดกลืนโดยชั้น  $P^+ \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  และถูกสนามไฟฟ้าพัดพา ( $I_{\text{drift}}$  in  $P^+ \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  ของรูปที่ 15)

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 689–743 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.8-1.67 eV

จะถูกดูดกลืนโดยชั้น  $P^+ \text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  และถูกสนามไฟฟ้าพัดพา ( $I_{\text{drift}}$  in  $P^+ \text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$  ของรูปที่ 15)

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 743–800 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.67-1.55 eV

จะถูกดูดกลืนโดยชั้น  $P^+ \text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  และถูกสนามไฟฟ้าพัดพา ( $I_{\text{drift}}$  in  $P^+ \text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  ของรูปที่ 15)

- ความยาวคลื่นแสงระหว่าง 800–870 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.55-1.42 eV

จะถูกดูดกลืนโดยชั้นทำงาน GaAs ( $n$ ) และถูกพัดพาโดยสนามไฟฟ้าในชั้นทำงาน (Drift Current ของรูปที่ 14 ข)

- ความยาวคลื่น > 870 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง > 1.42 eV

ไม่เกิดการดูดกลืนแสงเนื่องจากค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของ GaAs

## 8. ข้อสรุป

สมรรถนะของโฟโตไดโอดหัวต่อพี-เอ็นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นรับแสงเป็นอย่างมาก โครงสร้างที่มีการประยุกต์ใช้มากที่สุดคือ หัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) เนื่องจากชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าของชั้นทำงาน โฟโตไดโอดชนิดนี้จึงมีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงของช่องว่างแถบพลังงานทั้งสอง ซึ่งเป็นผลจาก Window Effect การเพิ่มความกว้างของผลตอบ

สนองทางแสงให้มากขึ้น จึงมีขีดจำกัด การใช้ Graded Band Gap Heterojunction Photodiodes เป็นทางออกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ แสงส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยชั้นรับแสงจะถูกพาด้วยสนามไฟฟ้าในชั้นรับแสง ทำให้ผลตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

เพื่อสนับสนุนแนวคิดนี้ โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs ชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานคงที่ที่ 1.674 และ 1.924 eV และชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงจาก 1.924 eV ที่ผิวถึง 1.55 eV ที่บริเวณหัวต่อ จึงถูกสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซีในสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy) นอกจากนั้นยังได้ทำการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดทั้งสองกลุ่มเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่า

8.1 โฟโตไดโอดชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานคงที่จะมีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงของช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงกับช่องว่างแถบพลังงานของชั้นทำงาน ดังผลการทดลองของโครงสร้างที่ 1 และ 2

8.2 โฟโตไดโอดชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงจาก 1.924 eV ที่ผิวถึง 1.55 eV ที่บริเวณหัวต่อจะมีช่วงผลตอบสนองทางแสงใกล้เคียงกันกับโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานคงที่ที่ 1.924 eV ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าในชั้นรับแสงมีส่วนร่วมในการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดนี้ด้วย ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่มีบทบาทใดๆ โฟโตไดโอดชนิดนี้น่าจะมีผลตอบสนองทางแสงใกล้เคียงกับโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานคงที่ที่ 1.55 eV ( $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  (p<sup>+</sup>)/GaAs (n) Heterojunction photodiode) เนื่องจาก Multilayer ของชั้นรับแสงมีชั้น  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  เป็นชั้นล่างสุด

8.3 ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองจึงยืนยันแนวคิดการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานลาดเอียงได้เป็นอย่างดี

## 9. ข้อเสนอแนะ

ผลสรุปจากงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถนำไปสู่ 3 แนวทางที่เป็นไปได้

1. สร้าง High Sensitivity Photodiode ที่มีผลตอบสนองทางแสงกว้าง (Wide Spectral Response) โดยใช้ชั้นรับแสงแบบโครงสร้างที่ 3 พร้อมทั้งลดความหนาของชั้นรับแสง และเพิ่มคุณภาพของชั้นทำงาน

2. สร้าง High Efficiency Solar Cell โดยใช้โครงสร้างของชั้นรับแสงแบบโครงสร้างที่ 3

3. สร้าง Narrow Spectral Response Photodiode โดยใช้โครงสร้างที่ 1 และ 2 เป็นแม่แบบ

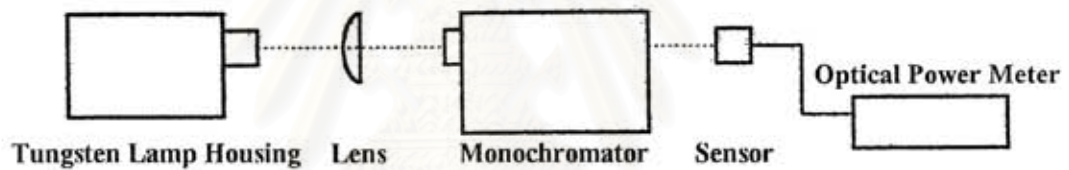
## 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] "Fabrication and Analysis of Photodiodes", B. Toprasertpong, Proceedings of Regional Symposium on Optoelectronics Optical Communication and Solar Cell, Bangkok, 19-20 November 1984.
- [2] "การประดิษฐ์โฟโตทรานซิสเตอร์  $\text{Ga}_{0.65}\text{Al}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$  อัตราขยายกระแสสูง", ชุมพล อันตรเสน, โครงการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ปีงบประมาณ 2533, เล่ม 1.
- [3] "ไดโอดรับแสงชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์" รายงานผลการวิจัยทุนสิ่งประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2531.
- [4] "Isothermal LPE growth of thin graded band-gap  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layers" P. Kordos et al, J. Appl. Phys. 50 (11), Nov. 1979, pp. 6902-6906.
- [5] "Semiconductor Optoelectronic Devices", Pallab Bhattacharya, second edition, Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [6] "Band-Edge Emphasizing Photodetector Response", Ken-ichi Sugimoto, Kazutoshi Nakajima, and Yoshihiko Mizushima, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 37, No. 11, November 1990.
- [7] "รายงานวิจัยและพัฒนาโครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์", ชุมพล อันตรเสน, มนตรี สวัสดิ์สูงฆาร, บรรยง โดประเสริฐพงษ์ และชารา ชลปราณี, ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [8] "PIN Photodiode", นางสาวทศพร ชวนะปราณี, Senior Project ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปีการศึกษา 2540

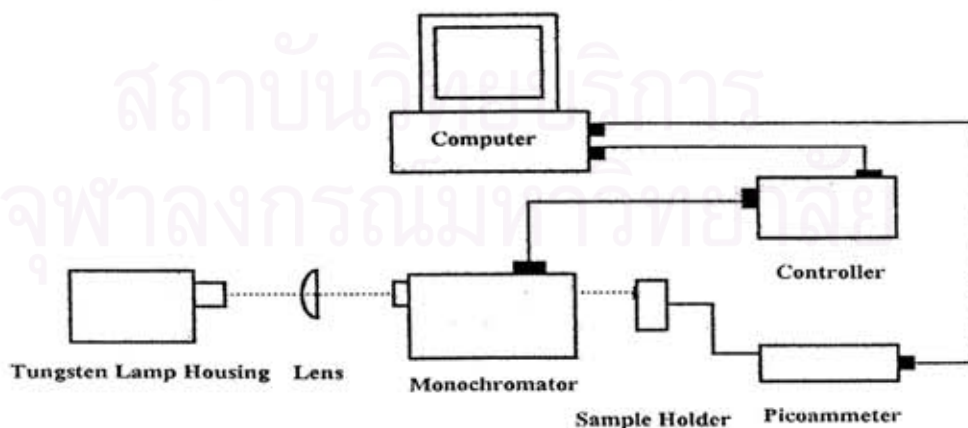
## 11. ส่วนผนวก (Appendix) (การวัดผลตอบสนองทางแสง)

การวัดผลตอบสนองทางแสงของ Photodiode นั้นทำให้เราสามารถทราบความไวต่อแสงของสิ่งประดิษฐ์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ชุดอุปกรณ์วัดมีแสดงไว้ในรูปที่ 1 a และ 2 a ซึ่งประกอบด้วย

1. หลอดทังสเตน ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง
2. เลนส์ ใช้ในการโฟกัสแสงของหลอดทังสเตนให้เข้าสู่ Monochromator
3. Monochromator ใช้แยกแสงจากหลอดทังสเตนให้เป็นแสงสีเดียว
4. Sample Holder ใช้ยึดชิ้นงานให้อยู่กับที่ขณะทำการวัด โดยมีวงจรสำหรับจ่ายแรงดัน Bias และสำหรับวัดค่า Photocurrent ที่เกิดขึ้น
5. Autoranging Picoammeter ใช้อ่านค่า Photocurrent ที่เกิดขึ้น
6. Power Supply ใช้สำหรับจ่ายแรงดัน Bias ให้สิ่งประดิษฐ์ และจ่ายไฟให้หลอดทังสเตน



รูปที่ a1 การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดกำลังแสง



รูปที่ a2 การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดผลตอบสนองทางแสง

7. เครื่อง Computer และโปรแกรม pico.exe ใช้ควบคุมการทำงานของ Monochromator ในการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสงที่ส่งตกกระทบสิ่งประดิษฐ์ตามค่าที่กำหนดไว้ รวมถึงบันทึกค่า Photocurrent ที่อ่านได้จาก Picoammeter ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ
8. Optical Power Meter ใช้ในการวัด Power ของ Lamp ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

#### ขั้นตอนในการวัดผลตอบสนองทางแสง

1. เตรียม Photodiode สำหรับทำการวัดผลตอบสนองทางแสง โดยนำ Photodiode ที่ทำการปลุกมาทำการตัดแบ่งและ bonding บนฐานโลหะ
2. นำ Photodiode ที่เตรียมในข้อหนึ่งมาทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อวัดค่า Breakdown Voltage
3. จัดอุปกรณ์สำหรับทำการวัด Power ของหลอดทั้งสแตน ดังรูปที่ a1
4. ทำการวัด Power ของหลอดทั้งสแตนที่แต่ละความยาวคลื่น โดยจะทำการวัดความยาวคลื่นตั้งแต่ 500 นาโนเมตรจนถึง 1100 นาโนเมตรด้วย Optical Power Meter
5. จัดอุปกรณ์สำหรับทำการวัด Spectral Response ของ Photodiode ดังรูปที่ a2
6. ทำการวัด Spectral Response ของ Photodiode โดยใช้โปรแกรม pico.exe ในการควบคุมการทำงานของ Monochromator และทำการเก็บค่า Photocurrent ที่เกิดขึ้นที่แต่ละความยาวคลื่นจาก autoranging picoammeter ทั้งนี้จะทำการวัดที่ความยาวคลื่นระหว่าง 500 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร
7. เปลี่ยนโครงสร้างของ Photodiode แล้วทำซ้ำในข้อที่ 6 จนครบทั้ง 3 โครงสร้าง
8. ทำการวัด Spectral Response ของ Photodiode ที่มีขายตามท้องตลาด เพื่อให้เป็นข้อมูลอ้างอิง
9. ทำการประมวลผลที่ได้ด้วยโปรแกรม Microcal Origin

ในการประมวลผลนั้น เนื่องจาก Power ของหลอดทั้งสแตน ที่ความยาวคลื่นต่างกันนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า Photocurrent ที่วัด ได้จึงจำเป็นต้องมีการ normalize ด้วย Power ของหลอดทั้งสแตน ที่แต่ละความยาวคลื่น โดยเราจะพิจารณาค่า Sensitivity ของ Photodiode ที่แต่ละความยาวคลื่นแทน

นอกจากนี้จะเห็นว่าเราได้ทำการวัด Photodiode แบบที่มีขายตามท้องตลาด ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าวิธีที่ใช้วัดนี้ว่าสามารถวัด Spectral Response ได้จริง โดยทำการเปรียบเทียบกับผลใน data book ที่ทางผู้ผลิตแนบมาว่าใกล้เคียงกันหรือไม่



## 12. การเผยแพร่ผลงานวิจัย

จะทำการเผยแพร่บทความทางด้านวิชาการเรื่อง “การผลิตและศึกษาผลตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs” (Fabrication and study on the spectral response of GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiodes) ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 ในช่วงเดือนธันวาคม 2544 นี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

