

การผลิตและศึกษาผลตอบสนองของทางสเปกตรัม
ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs



นางสาวทศพร ชวนะปราณี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0648-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION AND STUDY ON SPECTRUM RESPONSE OF GaAlAs/GaAs
HETEROJUNCTION PHOTODIODES

Miss Tosaporn Chavanapranee



สถาบันวิทยบริการ
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 2001

ISBN 974-03-0648-9

Thesis Title Fabrication and Study on Spectrum Response of GaAlAs/GaAs
Heterojunction Photodiodes
By Miss Tosaporn Chavanapranee
Field of Study Electrical Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Dr. Choopol Antarasena

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

..... Dean of Faculty of Engineering
(Professor Somsak Panyakeow, D.Eng.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman
(Professor Somsak Panyakeow, D.Eng.)

..... Thesis Advisor
(Associate Professor Choopol Antarasena, Dr.-Ing.)

..... Member
(Associate Professor Montri Sawadsaringkarn, Dr.-Ing)

..... Member
(Assistant Professor Somchai Ratanathamphan, D.Eng.)

ทศพร ชวนะปราณี : การผลิตและศึกษาผลตอบสนองของทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด
หัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs. (FABRICATION AND STUDY ON SPECTRUM
RESPONSE OF GaAlAs/GaAs HETEROJUNCTION PHOTODIODES)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ชุมพล อंत्रเสน, 83 หน้า. ISBN 974-03-0648-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการศึกษาทบทวนของชั้นรับแสงต่อผลตอบสนองทางแสง
ของโฟโตไดโอด โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของชั้นรับแสงทั้งกรณีของ GaAlAs
(P⁺) กับ GaAlAs (P⁺) และของ GaAlAs (P⁺) กับ GaAs (n⁻) จากนั้นคำนวณผลตอบสนองทาง
สเปกตรัมของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs ที่มีชั้นรับแสงต่างๆ กัน ลำดับต่อมา
โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs จำนวน 3 โครงสร้างได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้น
โดยวิธีการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซีในสถานะของเหลว ด้วยชั้นรับแสงที่มีช่องว่างแถบพลังงานคงที่
ที่ 1.674 eV และที่ 1.924 eV และมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงเชิงเส้นจาก 1.924 eV ถึง
1.55 eV ปรากฏว่าโฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานคงที่มีผลตอบสนองทางแสงอยู่
ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นทำงาน เนื่องจาก
มี Window Effect ส่งผลให้ค่ากระแสโฟโตที่สอดคล้องกันเกิดขึ้นในช่วง ~725 nm ถึง ~875 nm
และในช่วง ~655 nm ถึง ~875 nm ในกรณีของชั้นรับแสง Ga_{0.8}Al_{0.2}As และ Ga_{0.6}Al_{0.4}As ตาม
ลำดับ ในขณะที่โฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงนั้น ถึงแม้จะมีการดูด
กลืนแสงในบริเวณชั้นรับแสง ในช่วง 1.924 ถึง 1.55 eV แต่ก็ยังมีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วง
650-875 nm ซึ่งใกล้เคียงกับผลของโฟโตไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น Ga_{0.6}Al_{0.4}As แต่ความไวต่ำกว่า
เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี พบว่าผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้โดยพิจารณา
สนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในชั้นรับแสงที่ช่วยพัดพาพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นรับแสงให้เคลื่อนที่ข้าม
หัวต่อ ดังนั้นด้วยการออกแบบโครงสร้างของชั้นรับแสงอย่างเหมาะสม จะสามารถสร้างโฟโตได
โอดที่มีผลตอบสนองทางสเปกตรัมที่สอดคล้องกับความต้องการได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170320521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD : GaAlAs/GaAs HETEROJUNCTION, PHOTODIODE, LIQUID PHASE EPITAXY (LPE), SPECTRAL RESPONSE, WINDOW EFFECT, GRADED BAND GAP

TOSAPORN CHAVANAPRANEE : FABRICATION AND STUDY ON
SPECTRUM RESPONSE OF GaAlAs/GaAs HETEROJUNCTION PHOTODIODES.

THESIS ADVISOR : Assoc. Prof. Dr. CHOOMPOL ANTARASENA,
83 pp. ISBN : 974-03-0648-9

A study on the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes has been performed by concentrating on an important role of the P^+ top layer in defining the bandwidth of the spectral response of photodiodes. The energy band diagrams of the top layer, both of the isotype of P^+ GaAlAs layers and the anisotype P^+ - GaAlAs/ n^- - GaAs, are considered, and then the spectral response of a number of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes with different top layers are theoretically calculated. Next, three different structures of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes were designed and fabricated by Liquid Phase Epitaxy (LPE) Technology with the constant band gap absorbing layers of 1.674 eV and 1.924 eV and linear graded band gap of 1.924 to 1.55 eV. The constant band gap structures apparently respond to the incident photon whose energy is in between of the surface layer and the active layer owing to the window effect. As a result, the corresponding photocurrent occurs in the range between ~ 725 nm and ~ 875 nm and between ~ 655 nm and ~ 875 nm in $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ and $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ top layer photodiodes, respectively. On 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 ~ 650 nm to ~ 875 nm, similar to that of $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ top layer photodiodes but its sensitivity is lower. By comparison with the theoretical calculation, this result can be explained by considering that the photoexcited carriers in absorbing layers are caused to drift through the junction by the built-in electric field. Therefore, by a suitable architectural design of the top layer, the photodiode with optimal spectral response can be realized.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....
Field of Study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year.....2001..... Co-advisor's signature..... -

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been done at the Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University under the supervision of Associate Professor Dr. Choopol Antarasena.

The author would like to express her greatest gratitude to the supervisor, Associate Professor Dr. Choopol Antarasena for providing the opportunity to do this research in the laboratory with valuable guidance.

The author wishes to make deep acknowledgement to the members of the Thesis Committee: Professor Dr. Somsak Panyakeow, Associate Professor Dr. Montri Sawadsaringkarn, Assistant Professor Dr. Somchai Ratanathamaphan and Associate Professor Dr. Choopol Antarasena for very useful discussions and guidance.

A special thank is concerned to Mr. Supachok Thainoi for technical assistance with the LPE experiments in this thesis.

In addition, the author is grateful to the staffs in SDRL for providing help while doing the research and her family and her friends for warm encouragement.

This work reported here was supported by Rachadapiseksompoch Research Fund of Chulalongkorn University.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTENTS

	Page
Abstract (Thai)	iv
Abstract (English).....	v
Acknowledgement.....	vi
Contents.....	vii
List of Figures.....	ix
List of Tables.....	xiii
CHAPTER	
1 Introduction.....	1
1.1 Background.....	1
1.2 Objectives.....	2
1.3 Structure of the Thesis.....	2
2 Theory of Heterojunction Photodiode.....	3
2.1 Operation Principle of a Photodiode.....	3
2.2 Quantum Efficiency, Responsivity and Response Speed.....	10
2.2.1 Quantum Efficiency and Responsivity.....	10
2.2.2 Response Speed.....	10
2.3 Properties of Compound Semiconductors.....	11
2.3.1 Energy Bandgap.....	12
2.3.2 Lattice constant.....	14
2.3.3 Absorption Coefficient.....	15
2.4 GaAlAs/GaAs Heterojunction and Window Effect.....	17
3 Structures of GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiode.....	20
3.1 Construction of a Heterojunction Energy Band Diagram.....	20
3.2 Heterojunction Photodiode Structures.....	32
3.3 Calculation of the Spectral Response.....	33

CONTENTS (continued)

CHAPTER		Page
4	Fabrication of GaAlAs/GaAs Photodiode.....	44
4.1	Epitaxial Growth.....	44
4.2	Fabrication Technology.....	47
4.2.1	Preparation of Substrate and Materials.....	47
4.2.2	Calculation Method of Material Weight.....	52
4.2.3	Growth Processes.....	55
4.2.4	Formation of Ohmic Contact.....	57
4.2.5	Mesa Structure.....	58
4.2.6	Bonding.....	58
5	Experimental Results and Discussion.....	60
5.1	Current-Voltage Characteristic.....	60
5.2	The Spectral Response.....	62
5.3	Discussions.....	66
6	Conclusions.....	71
	References.....	74
	Appendix.....	76
	Biography.....	83

LIST OF FIGURES

ix

Figures	Page
2.1 (a) Junction photodiode showing carrier drift and diffusion regions and (b) Current-voltage characteristics in the dark and under illumination.....	4
2.2 Absorption and carrier generation in a reverse-biased depletion layer photodiode.....	7
2.3 The (E,k) diagram for GaAs and AlAs showing three minima in the conduction band.....	13
2.4 Composition dependence of the direct (Γ) and indirect (X and L) conduction band minima in the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ mixed crystals.....	13
2.5 Low temperature energy bandgaps of a number of semiconductors versus their lattice constants.....	15
2.6 Absorption edge of GaAs at room temperature.....	16
2.7 Absorption edge of $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ at room temperature.....	17
2.8 Absorption edge of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ at room temperature.....	17
2.9 Ideal band diagrams of GaAlAs and GaAs before forming a junction.....	18
3.1 Energy band diagram for two isolated semiconductors.....	24
3.2 Energy band diagram of an ideal P-n heterojunction at thermal equilibrium.....	24
3.3 $\text{P}^+-\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^- -\text{GaAs}$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium.....	25
3.4 $\text{P}^+-\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{n}^- -\text{GaAs}$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium.....	25
3.5 $\text{P}^+-\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{n}^- -\text{GaAs}$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium.....	26

LIST OF FIGURES (continued)

x

Figures	Page
3.6	$P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/n^-GaAs$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium..... 26
3.7	$P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/$ n^-GaAs heterojunctions energy diagram..... 27
3.8	$P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/$ n^-GaAs heterojunctions energy diagram in Case A..... 29
3.9	$P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/$ n^-GaAs heterojunctions energy diagram in Case B..... 30
3.10	$P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/$ n^-GaAs heterojunctions energy diagram in Case C..... 31
3.11	The sample structures of (a) Structure I and II with $x=0.2$ and 0.4 , respectively (b) Structure III..... 32
3.12	The linear built-in electric field existing in the GaAlAs top layers..... 33
3.13	Calculated results for GaAs homojunction photodiode..... 37
3.14	Calculated results for $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode..... 38
3.15	Calculated results for $P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode..... 39
3.16	Calculated results for $P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode..... 40
3.17	Calculated results for $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode..... 41
3.18	Calculated results for $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/$ $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode..... 42

LIST OF FIGURES (continued)

Figures		Page
3.19	Drift current generated in each window layer of $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/$ $P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/ P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/ P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode versus wavelength.....	43
3.20	A comparison of the calculated results of three structures of interest.....	43
4.1	Photograph of Horizontal LPE System at Semiconductor Devices Research Laboratory, Chulalongkorn University.....	46
4.2	A multiple-bin graphite boat for the sequential deposition of several layers during one growth cycle.....	47
4.3	Liquidus composition versus reciprocal temperature for Ga-As, Ga-P and In-P.....	50
4.4	The upper curves are the room-temperature hole concentrations in GaAs versus the atom fraction of Ge in the liquid along the 800°C and 900°C, and the lower curves are the room-temperature electron concentrations in GaAs versus the atom fraction of Sn in the liquid along the 700°C and 800°C.....	50
4.5	Solidus compositions in $Ga_{1-x}Al_xAs$ as a function of liquidus composition.....	51
4.6	Liquidus isotherms in the Al-Ga-As system.....	51
4.7	The diagram of the furnace temperature versus the growing time duration.....	56
4.8	Masks used in fabrication process (a) contact P^+ (b) mesa structure.....	58
4.9	A fabricated photodiode.....	59
5.1	The curve tracer and the probe station used in current voltage characteristics measurement.....	60

Figures	Page
5.2 Current voltage characteristics of (a) Structure I (b) Structure III and (c) Structure III under reverse bias range.....	61
5.3 A schematic of the lamp power measurement.....	63
5.4 A schematic of the spectral response measurement.....	63
5.5 The measured spectral response of (a) Structure I (b) Structure II and (c) Structure III.....	65
5.6 The incident power at the junction of the structure I versus wavelength.....	67
5.7 The incident power at the junction of the structure II versus wavelength.....	69

LIST OF TABLES

xiii

Tables	Page
3.1 Calculated Values in Construction of the P-n $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ Heterojunction Band Diagram.....	23
3.2 The doping concentration in each layer of the $\text{P}^+-\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^- -\text{GaAs}$ heterojunctions.....	28



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHAPTER 1

INTRODUCTION

1.1 Background

Photodiode is one of the most common photodetectors that is sensitive to optical radiation and converts this radiation into an electric current. Photodiode has a variety of applications such as those in optical communication systems, optical computing systems, etc. Many studies have been done in order to improve the performance of the photodiode, but most of them have concentrated on the active layer of a photodiode and neglected the absorption and carrier production that occurred in the P^+ top layer. These processes can be neglected by realizing the window effect of the heterojunction or assuming that the thickness of the P^+ top layer is very small when the absorption is negligible.

In fact, when the light impinges upon a photodiode, some of the light is absorbed in the P^+ top layer and creates electron-hole pairs, but only the carriers not beyond the diffusion length from the depletion region edge can contribute to the output current. This part of current may severe the response speed of photodiode, therefore, the generated carriers should be suppressed. However, if the sensitivity is a major objective, the carriers recombination in this region should be reduced by any means of a built-in electric field in the P^+ top layer created by producing a graded semiconductor layer bandgap.

It is also interesting to note that the P^+ top layer of a photodiode restricts the bandwidth of the spectral response of that photodiode because the bandgap energy of the P^+ top layer does determine the light that can penetrate the active region. Thus, the graded bandgap top layer photodiode would have the spectral response that differs from that of the constant bandgap top layer photodiode.

In this research, a study on the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes has been done. This type of photodiode is applicable to

Optoelectronic Integrated Circuits (OEICs) for local-area networks and optical information processing where GaAs/GaAlAs sources are usually used. The photodiodes with a constant-bandgap top layer and graded-bandgap top layer are fabricated for comparison.

1.2 Objectives

1. To study and develop the fabrication of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes grown by Liquid Phase Epitaxy Technology.
2. To study on the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes
3. To study the role of P⁺ - top layer contributing to its spectral response.

1.3 Structure of the Thesis

The thesis consists of six chapters.

In chapter 1, a brief background and objectives of the work are described. In chapter 2, the description is done on the theory of heterojunction photodiode. The basic principle of operation of photodiode and its important characteristics are described. Then, the properties of compound semiconductors which are the widely used materials for optoelectronic devices are considered.

In chapter 3, the details of the structure of heterojunction photodiodes are discussed. The important role of the P⁺ top layer is considered. This is followed by the theoretical calculation of the spectral response. In chapter 4, the epitaxial growth and related fabrication technologies of GaAlAs/GaAs photodiode are described. In chapter 5, the experimental results of electrical characteristics and the spectral response of some heterojunction photodiodes are presented and discussed.

In chapter 6, the conclusion of the work and some suggestions for further work are given.

CHAPTER 2

THEORY OF HETEROJUNCTION PHOTODIODE

In this chapter, we consider the concept of heterojunction photodiodes. We begin with the basic principle of operation of a photodiode and its important characteristics. Next, we consider some basic properties of compound semiconductors by concentrating on the III-V compound. In the last section of this chapter, the concepts of heterojunction and its window effect are described.

2.1 Operation Principle of a Photodiode

A photodiode is basically a P-N junction operated under reverse bias. The basic principle of operation of a photodiode is the conversion of the incident optical signals into electrical currents by the absorption process in the material employed. This operation is based on the fact that under reverse bias, the current flowing in P-N junction diode is relatively small and voltage-independent but is proportional to the optical generation rate of electron-hole pairs due to the incident light.

To illustrate the process of photogeneration of carriers when the light impinges upon a photodiode, we consider the schematic of a diode shown in Fig. 2.1. This type of device is commonly called a depletion layer photodiode with a large depletion layer width; as a result, more photons can be absorbed. Radiation is assumed to be incident on the whole surface of the P^+ top surface. When the incident photons are absorbed, electron-hole pairs are generated primarily in the depletion region. Both the electrons and the holes generated are swept separately by the electric field existing in the region, the electrons going into the N^+ region and the holes going into the P^+ region, both contributing to the photogenerated current in the external circuit. In addition to the carriers generated in the depletion region, electron-hole pairs are also photogenerated in the bulk of P^+ and N^+ regions. But only the carriers generated within a distance of one diffusion length from the edge of the depletion layer will diffuse to the edges of

the depletion layer and drift across it to contribute to the photogenerated current. The carriers photogenerated on the average more than a diffusion length distance from the depletion layer would recombine before they reach the depletion layer and do not contribute to the current.

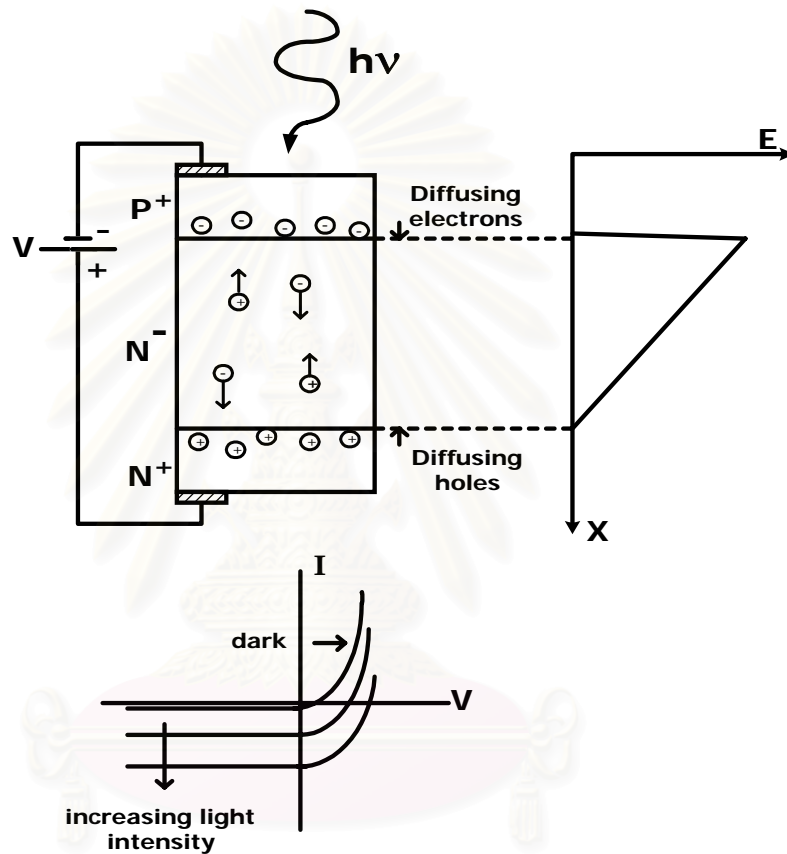


Fig. 2.1 (a) Junction photodiode showing carrier drift and diffusion regions

(b) Current-voltage characteristics in the dark and under illumination

Therefore, the total current in the external circuit consists of carriers photogenerated in or very near the depletion layer and those thermally generated.

The total current in the photodiode is given by the light generated current and the thermal generated dark current of the diode. Using this definition, the expression for the total current becomes

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_p \quad (2.1)$$

where I_0 is the saturation current or dark current of the diode under zero bias condition

V is the voltage across the diode

n is ideality factor with a value between 1 and 2

k is the Boltzmann's constant

T is temperature (°K)

I_p is generated photocurrent.

Photodiode is usually reverse biased with relatively large biasing voltage. As a result, $\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \ll 1$ and the total current in Eq. (2.1) is approximated as

$$I = -(I_0 + I_p) \quad (2.2)$$

Equation (2.2) is indicating that the total current of a photodiode under reverse biased condition is proportional to light intensity so that the resulting characteristics of the photodiode become as shown in Fig. 2.1. Thus we can use photodiode for detecting optical signal by converting it into electrical signal.

As mentioned previously, photogenerated carriers move in drift and diffusion. Therefore, under steady-state conditions, the total current density (J) through the reverse biased depletion layer is composed of the sum of the drift and diffusion components given by [1]

$$J = J_{dr} + J_{diff} \quad (2.3)$$

To derive an expression for J , we shall neglect thermal generation within the depletion region and light absorption in the P^+ top layer. This absorption is negligible only if the thickness of the P^+ top layer is much smaller than α^{-1} , where α is the absorption coefficient, or there is a window effect at operating wavelength of the incident light.

When internal quantum efficiency, $\eta_i = 1$, the electron-hole pair generation rate $G(x)$ is given by

$$\begin{aligned} G(x) &= \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \\ &= \frac{P_{inc} (1 - \Theta_R)}{Ah \nu} \alpha e^{-\alpha x} \end{aligned} \quad (2.4)$$

where ϕ_0 is incident photon flux per unit area (photon/sec/cm²)

P_{inc} is incident optical power

Θ_R is reflection coefficient of the top surface

h is the Plank's constant

ν is the frequency of the light

A is the device area

x is the distance from the $P^+ - N^-$ junction (shown in Fig. 2.2).

The value of Θ_R is practically made as small as possible by placing anti-reflective coatings on the top surface. Therefore, the drift current J_{dr} is given by

$$\begin{aligned} J_{dr} &= -q \int_0^w G(x) dx \\ &= -q \phi_0 (1 - e^{-\alpha w}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

where w is the depletion-layer width

Next, we consider a diffusion current component by neglecting the diffusion current in the P^+ top layer. Thus only minority holes photogenerated in the N^+ layer is considered. For $x > W$, the minority-hole density is determined by the one-dimensional continuity equation:

$$D_h \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} + G(x) = 0 \quad (2.6)$$

where D_h is the diffusion coefficient for holes

τ_h is the lifetime of excess carriers

p_{n0} is the equilibrium hole density

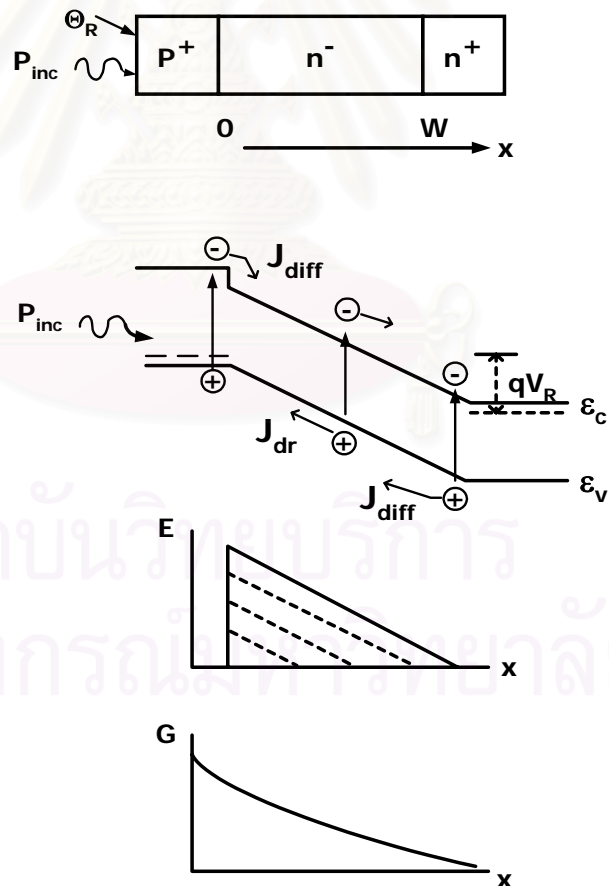


Fig. 2.2 Absorption and carrier generation in a reverse-biased depletion layer photodiode

This equation is subject to the boundary conditions:

$$\begin{aligned} p_n &= p_{n0} & \text{at} & \quad x = \infty \\ p_n &= 0 & \text{at} & \quad x = W \end{aligned} \quad (2.7)$$

The solution of Equation (2.6) then becomes

$$p_n = p_{n0} - (p_{n0} + Ce^{-\alpha W}) e^{(W-x)/L_h} + Ce^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

with

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.9)$$

and

$$C = \frac{\phi_0 \alpha L_h^2}{D_h (1 - \alpha^2 L_h^2)} \quad (2.10)$$

The diffusion current density is then given by

$$\begin{aligned} J_{diff} &= -qD_h \left(\frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=W} \\ &= -q\phi_0 \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} e^{-\alpha W} - q p_{n0} \frac{D_h}{L_h} \end{aligned} \quad (2.11)$$

and the total current density is obtained as

$$J_{total} = -q\phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_h} \right) - q p_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (2.12)$$

Under normal operation conditions, the term involving p_{no} is very small so that the total photocurrent is, as expected, proportional to the incident photon flux ϕ_0 . The external quantum efficiency η_{ext} of a photodiode can be obtained as

$$\begin{aligned}\eta_{ext} &= \frac{|J/q|}{P_{inc}/AhV} \\ &= (1-\Theta_R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1+\alpha L_h} \right)\end{aligned}\quad (2.13)$$

which is the number of carriers collected to produce the photocurrent divided by the number of incident photons. High quantum efficiency requires minimization of light reflection at the photodiode surface. This, as mentioned above, can be done with an antireflection coating. The other necessary condition to increase η_{ext} is

$$\alpha W \gg 1 \quad (2.14)$$

Equation (2.14) is suggesting a high value of α or W which can be interpreted as the large absorption in the depletion region. However, for $W \gg 1/\alpha$, the transit-time delay of the carriers may be considerable because the speed of response of a photodiode is determined by the drift time across the depletion region. Therefore, the value of W is limited. The only way left is to increase the value of α ; unfortunately, the value of absorption coefficient at the bandedge is determined by the energy gap of the semiconductor, thus it also cannot be changed.

From Eq. (2.13), if the value of diffusion length L_h is very small and the internal quantum efficiency η_i is less than 1, the external quantum efficiency can be written as

$$\eta_{ext} = \eta_i (1-\Theta_R) (1 - e^{-\alpha W}) \quad (2.15)$$

2.2 Quantum Efficiency, Responsivity and Response Speed

In its applications, we are particularly interested in three properties of the photodiode: the quantum efficiency, the responsivity and the speed of response of the device.

2.2.1 Quantum Efficiency and Responsivity

The quantum efficiency, η , as mentioned previously is the number of electron-hole pairs generated for each incident photon. For high detector efficiency, the depletion layer should be sufficiently thick to allow a large fraction of the incident light to be absorbed. The other option to increase the quantum efficiency can be done by realizing a heterojunction. A large-bandgap material can be used as a window for transmission of incident photons whose energy is less than its bandgap energy. These photons can be absorbed in the depletion layer without being attenuated. In other words, the property of a photodiode is described by its responsivity, which is an important figure of merit of a photodiode. The responsivity, \mathfrak{R} , is defined as the ratio of the photocurrent to the optical power:

$$\begin{aligned}\mathfrak{R} &= \frac{I_p}{P_{opt}} \\ &= \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta\lambda (\mu m)}{1.24} \quad \text{A/W} \quad (2.16)\end{aligned}$$

2.2.2 Response Speed

The speed of response of a photodiode is determined by three factors:

- (1) diffusion of carriers outside depletion region within a diffusion length
- (2) drift time across the depletion region
- (3) capacitance of the junction

Carriers generated outside the depletion region within a diffusion length can diffuse to the junction, but, with a considerable time delay. To get rid of this diffusion effect, the generated carriers should be suppressed by the window effect or by the special design of the P⁺ top layer. If the quantum efficiency is the primary interest, the depletion region should be sufficiently wide to absorb all of the incident light. However, the depletion layer must not be too wide, or the transit time effects will limit the frequency response. On the other hand, making the depletion region too thin results in a large junction capacitance which is given by

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.17)$$

where A is the device area

W is the device depletion width

ϵ is the dielectric constant of the employed material

The excessive diode capacitance, together with the load resistance, R_L , will result in a large time constant, $R_L C$. As mentioned above, for the purpose of high-speed response, very thin depletion layer is needed to reduce the transit time. However, this sacrifices the quantum efficiency. Thus there is a trade-off between the response speed and quantum efficiency.

2.3 Properties of Compound Semiconductors

Semiconductors occur in many different chemical compositions with a large variety of crystal structures. They can be elemental semiconductors or compound semiconductors. The elemental semiconductors are composed of single species of atoms such as Si or Ge, whereas the compound semiconductors are composed of two or more elements, for example, binary compounds such as GaAs and InP. By alloying, the binary compounds could form ternary such as GaAsP and GaAlAs or quaternary compounds such as InGaAsP. An attractive feature of these alloys is the possibility to

change their properties by changing the alloy composition, for example, bandstructure, electronic, and optical properties. Now we will examine some of the characteristics of compound semiconductor alloys.

2.3.1 Energy Bandgap

The energy structure of a particular semiconductor determines its optical and, in part, its electrical properties. For naturally existing semiconductor crystals like monoatomic Ge and Si, binary GaAs, etc., their fixed and unalterable energy-band structures restrict their applications. One of the powerful tools for varying the band structure is based on alloying two or more semiconductor materials. As the composition of an alloy varies, the internal structure of energy bands changes significantly. So we can conclude that the band structure of the alloy can be characterized as a function of the composition fraction.

For example, we will consider the change of band structure of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ alloy which is a typical ternary alloy widely used for high-speed microelectronics and optoelectronics. Since the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ is formed from the binary compounds, GaAs and AlAs, we will first consider the band structures of GaAs and AlAs shown in Fig. 2.3. It is clearly seen that there are three conduction band minima, called direct Γ minimum, indirect X minimum and indirect L minimum in both compounds. From the figure, GaAs is a direct gap material because the direct Γ minimum is the lowest energy minimum. But AlAs is an indirect gap material because the lowest one is the indirect X minimum. Figure 2.4 shows the evolution of these three energy minima with the composition x .

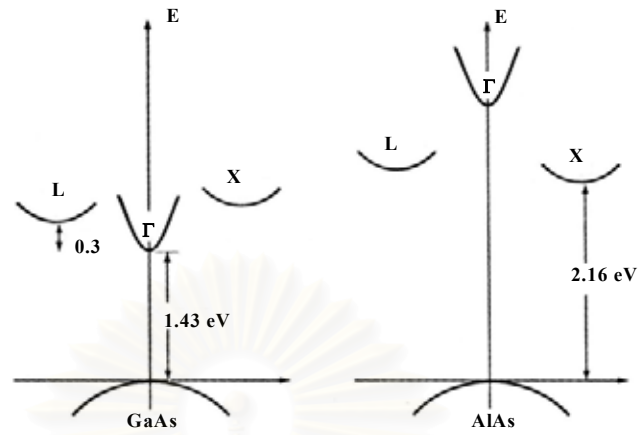


Fig. 2.3 The (E,k) diagram for GaAs and AlAs showing three minima in the conduction band

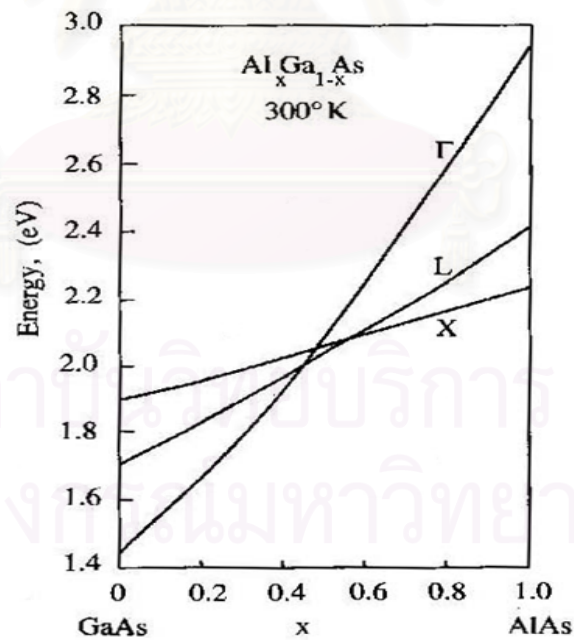


Fig. 2.4 Composition dependence of the direct (Γ) and indirect (X and L) conduction band minima in the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ mixed crystals

From this figure, we found that near the composition $x \approx 0.45$, the GaAlAs transforms from a direct to an indirect gap material. The bandgap of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ can be described as a function of the fraction x as [1]

$$\begin{aligned}
 E_g^\Gamma &= 1.425 + 1.247x && \text{direct - bandgap condition } x \leq 0.45 \\
 &= 1.425 + 1.247x + 1.147(x - 0.45)^2 && \text{indirect - bandgap condition } x \geq 0.45 \\
 E_g^X &= 1.9 + 0.125x + 0.143x^2 \\
 E_g^L &= 1.708 + 0.642x
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

The monotonic variation of bandgap with alloy composition allows us to realize the heterojunction which is widely used in the design of optoelectronic devices.

2.3.2 Lattice Constant

Lattice constant is also one of the parameters of the compound semiconductors that depends on the alloy composition. Figure 2.5 plots the low temperature energy bandgaps of a number of semiconductors versus their lattice constants. The shaded vertical regions show the groups of semiconductors with similar lattice constants. Materials within the same shaded region but having different bandgaps can, in principle at least, be combined to form heterojunctions with a particular band offset. The choice of band offsets can be widened by growing binary (such as SiGe), ternary (such as AlGaAs) and quaternary (such as GaInAsP) alloys indicated by the solid lines in the figure.

For example, the lattice constant (a) of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ as a function of the Al content (x) is given by [2]

$$a = 5.6533 + 0.0078x \tag{2.19}$$

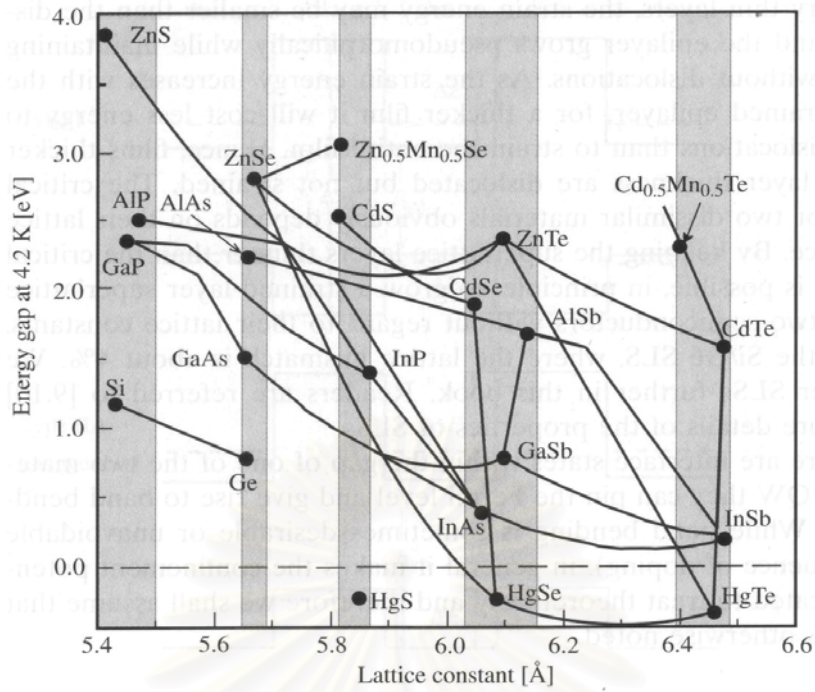


Fig. 2.5 Low temperature energy bandgaps of a number of semiconductors versus their lattice constants

2.3.3 Absorption Coefficient

The absorption coefficients for semiconductor materials vary with the photon wavelength and with the material. For GaAs, the absorption coefficient is expressed as [3]

$$\alpha = \begin{cases} 5.8 \times 10^4 \sqrt{(E_p - E_g)} \dots\dots\dots (E_a \leq E_p) \\ \exp[100(E_p - E_g) + 7.82] \dots\dots\dots (E_b \leq E_p \leq E_a) \\ 0.13(E_g - E_p - 4.25 \times 10^{-2}) \dots\dots\dots (E_p \leq E_b) \end{cases} \quad (2.20)$$

where E_p is the photon energy given by $\frac{h\nu}{q}$ (eV)

E_g is the bandgap energy (eV)

E_a is given by $E_g + 0.005$ eV

E_b is given by $E_g - 0.0526$ eV.

Figure 2.6 shows the absorption coefficient α of GaAs at room temperature calculated with Eq. (2.20) corresponding to the theoretical values. It should be pointed out that the values of the absorption coefficient change significantly near the band edge. This sharp rise of the absorption coefficient curve is known as the absorption edge. GaAs has a steep absorption edge because it is a direct gap material.

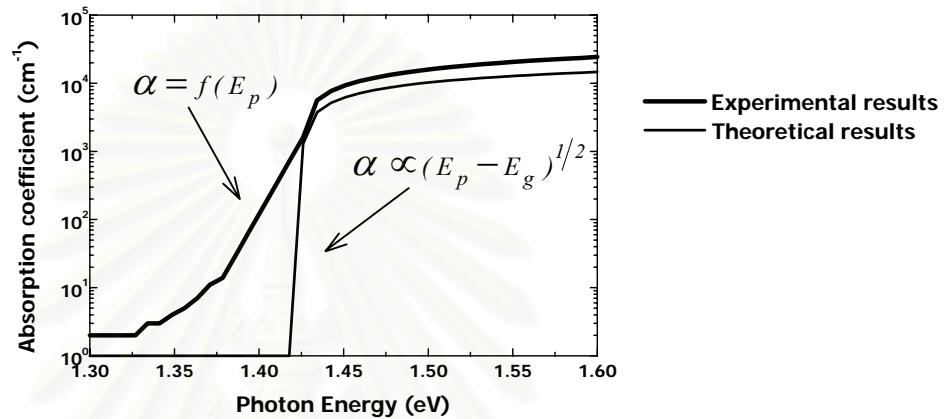


Fig. 2.6 Absorption edge of GaAs at room temperature

The energy bandgap of the alloy semiconductor is strongly dependent on the alloy composition. Therefore, the absorption coefficient is also dependent on the alloy composition. For example, in the case of GaAlAs alloy, the shape of the direct-gap absorption edge in GaAlAs alloy is quite similar to that in GaAs. Figures 2.7 and 2.8 show the absorption edge of $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ and $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$, respectively.

Since α is a strong function of the photon wavelength, for a given photodiode material, the wavelength range in which appreciable photocurrent can be generated is limited. Therefore, the absorption coefficient is one of the key factors that determine the quantum efficiency of a photodiode.

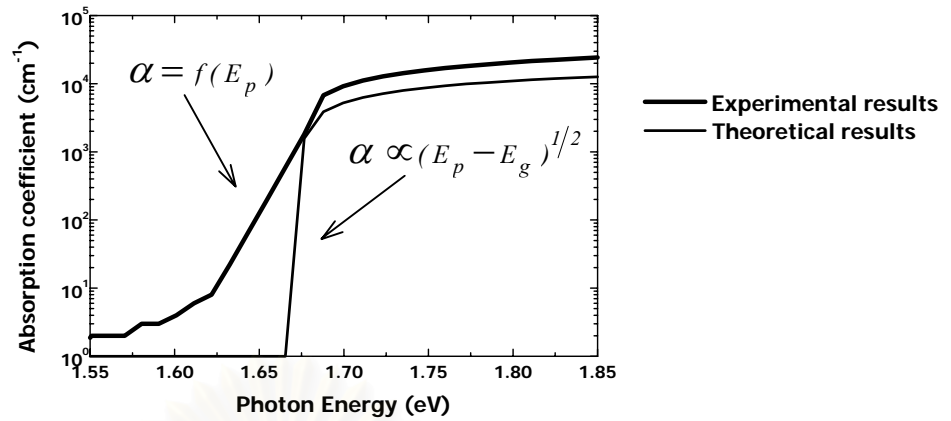


Fig. 2.7 Absorption edge of $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ at room temperature

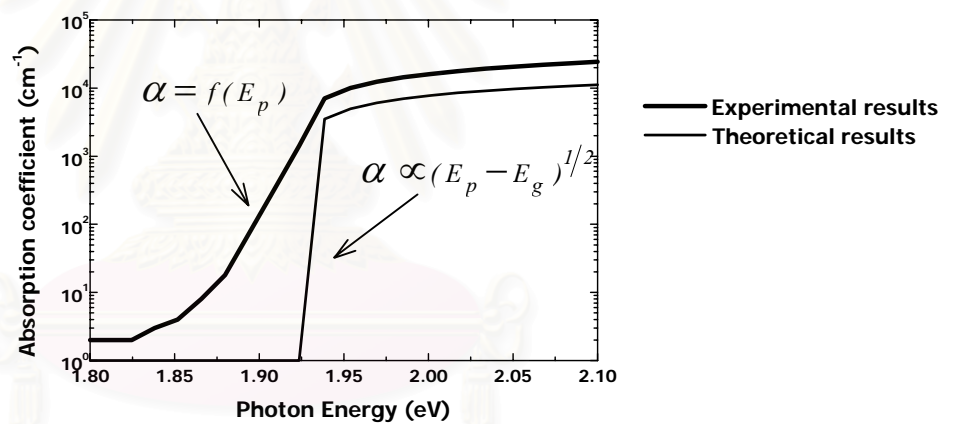


Fig. 2.8 Absorption edge of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ at room temperature

2.4 GaAlAs/GaAs Heterojunction and Window Effect

Heterojunction is a junction formed between two dissimilar semiconductors. When the two semiconductors have the same type of conductivity, the junction is called an isotype heterojunction. When the conductivity types differ, the junction is called an anisotype heterojunction. Heterojunctions have been extensively studied, and

many important applications have been made. The most important applications are in photonic devices, including semiconductor lasers, photodetectors and solar cells.

The heterojunction pairs are limited to those of close lattice match and reasonably close thermal coefficients of expansion. The GaAlAs/GaAs heterojunction system is a lattice-matched material. This system has a very small mismatch of the lattice constants of only 0.1% over the entire range of possible Al-to-Ga ratios in the GaAlAs. As a result, very few interface states are expected to exist at the boundary between the two materials. Therefore, such heterostructure can be grown free of a mechanical strain and significant imperfection.

The optical properties of the heterojunction are of interest. When a heterojunction is formed between GaAlAs and GaAs, their band diagrams before joining are shown in Fig. 2.9 and light is incident on a heterojunction from the GaAlAs side. Conceptually, GaAlAs which is a wide band-gap semiconductor would act as a window that admits photons of energy less than E_{g1} . Those of energy between E_{g1} and E_{g2} (the GaAs band gap) would pass freely through the GaAlAs and then are absorbed in the GaAs. As a result, the photogenerated carriers are created. This is known as the window effect in heterojunction.

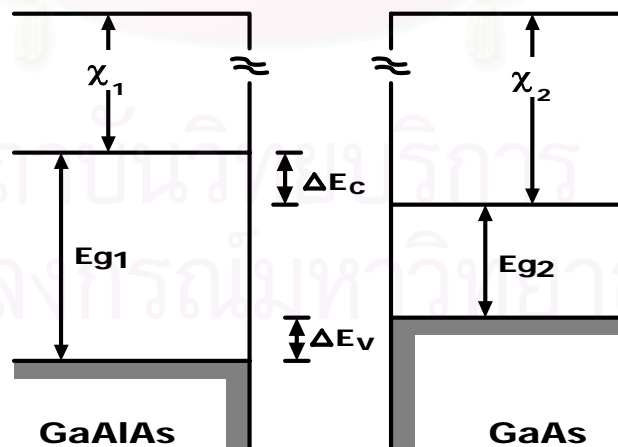


Fig. 2.9 Ideal band diagrams of GaAlAs and GaAs before forming a junction

The window effect creates a band-pass region of the sensitivity to photons of energy between E_{g1} and E_{g2} and also allows the junction to be placed deeper from the surface than in a homojunction. Therefore, in a heterojunction photodiode, the quantum efficiency does not critically depend on the distance of the junction from the surface. In addition, the heterojunction can provide unique material combinations so that the quantum efficiency and response speed can be optimized for a given optical-signal wavelength. For example, a $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunction photodiode has a spectral response from ~ 650 to ~ 850 nm, which is wider than GaAs homojunction photodiode.

Anyway, we will account for the fact that as photons penetrate a material, their intensity decrease through absorption. In the same manner, when light enters the P^+ -top layer, the fraction of light is absorbed. Hence, the power entering the depletion region is given by

$$P_{inc} = P_0 e^{-\alpha d} \quad (2.21)$$

where P_0 is the power incident on the P^+ region (watt)

P_{inc} is the power entering the depletion region (watt)

α is the absorption coefficient (cm^{-1})

d is the width of the P^+ region (cm).

Thus, the amount of optical power absorbed in the depletion region is given by

$$\begin{aligned} P_{absorb} &= P_{inc} - P_{inc} e^{-\alpha W} \\ &= P_{inc} (1 - e^{-\alpha W}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

where W is the width of the depletion region

Therefore, a smaller P^+ region and wider depletion region increase the quantum efficiency of a photodiode.

CHAPTER 3

STRUCTURES OF GaAlAs/GaAs

HETEROJUNCTION PHOTODIODE

As mentioned in section 1.1, the top layer can restrict the bandwidth of the spectral response of photodiodes by window effect. The understanding in terms of energy of heterostructure is necessary. Therefore, in this chapter, the energy band diagrams of top layer, both the isotype of P⁺-GaAlAs layers and the anisotype of P⁺-GaAlAs/n⁻-GaAs are described. Then, the structures of photodiode are designed and the calculation of the spectral response is presented.

3.1 Construction of a Heterojunction Energy Band Diagram

We now consider the energy band diagram of a heterojunction, which is complicated than that of a homojunction due to the bandgap energy difference. Figure 3.1 shows the energy band diagram of two isolated pieces of semiconductors prior to the formation of a heterojunction. The two semiconductors are assumed to have different energy bandgaps E_g , different dielectric permittivities ϵ_s , different work function ϕ_s , and different electron affinities χ_e .

The work function of a semiconductor is defined as the energy required to remove an electron from the Fermi level E_F through the bulk surface to the energy level of vacuum outside the material. Therefore, the work function is dependent on the Fermi level that varies as a function of the doping level. The electron affinity, defined as the energy to take an electron from the bottom of the conduction band E_C to the vacuum level, is a material property that is invariant with normal doping.

The differences in energy in the conduction and valence band edges are represented by ΔE_C and ΔE_V , respectively.

In drawing the band diagram for a heterojunction, there are two basic criteria we have to consider:

- (a) The Fermi level must be the same on both sides of the interface in thermal equilibrium.
- (b) The vacuum level must be continuous and parallel to the band edges

Figure 3.2 shows the equilibrium band diagram of an ideal abrupt heterojunction formed between the two semiconductors in Fig. 3.1. The criteria mentioned above cause the band edges to bend at the interface as shown in the figure, a phenomenon known as band bending. The band bending will be assigned the symbols V_{b1} and V_{b2} . From Fig. 3.2, the amount of the Fermi displacement $E_{F1} - E_{F2}$ is given by

$$\begin{aligned} E_{F1} - E_{F2} &= (\chi_1 + E_{g1} - \delta_1) - (\chi_2 + \delta_2) \\ &= V_{b1} + V_{b2} \end{aligned} \quad (3.1)$$

which corresponds to the total of the band bending, $V_{b1} + V_{b2}$. According to simple geometrical considerations, the conduction band offset, ΔE_C , is given by

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 \quad (3.2)$$

Then the valence band offset is given by

$$\begin{aligned} \Delta E_V &= (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) \\ &= \Delta E_g - \Delta \chi \end{aligned} \quad (3.3)$$

Therefore,

$$\Delta E_g = \Delta E_C + \Delta E_V \quad (3.4)$$

To draw the band diagram accurately, we also account for the band bending, V_{b1} and V_{b2} , in the junction in addition to the band discontinuities. To do this, we must solve the Poisson's equation across the heterojunction, taking into account the details of doping and space charge. The transition regions are assumed to be completely depleted over the distances x_n and x_p , where [4]

$$x_n/x_p = N_A/N_D \quad (3.5)$$

to satisfy charge conservation. According to the Poisson's equation, we have

$$V_{b1} = N_D x_n^2 / 2 \epsilon_1 \quad (3.6)$$

and

$$V_{b2} = N_A x_p^2 / 2 \epsilon_2 \quad (3.7)$$

Whence

$$V_{b1}/V_{b2} = N_A \epsilon_1 / N_D \epsilon_2 \quad (3.8)$$

Next we will examine the approximate diagrams without a detailed calculation of the anisotype p-n junctions formed by p-type $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ and n-type GaAs with the Al content of 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4, respectively. To make the band diagrams, we assume that the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ is p-type, doped to 10^{19} donors/cm³, and the GaAs is undoped. The parameters we use to construct the energy band diagram are the static dielectric constant ϵ_s , band gap energy E_g , and the electron affinity χ_e . Since the properties of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ are significantly dependent on the Al composition, these parameters can be written as a function of Al content (x) as [5]

$$\epsilon_s = 13.18 - 3.12x \quad (3.9)$$

$$\chi_e = 3.64 - 0.14x \quad \text{for } x < 0.45 \quad (3.10)$$

$$E_g = 1.425 + 1.247x \quad \text{for } x < 0.45 \quad (3.11)$$

The relevant material properties are summarized in Table 3.1. The heterojunction energy diagrams of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ with Al content 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4 are shown in Figs. 3.3, 3.4, 3.5, and 3.6, respectively. It should be noted that all of the diagrams are not drawn strictly to scale.

For an isotype p-p heterojunction, for example, that formed by p-type $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ and $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ with different Al contents can also be done in the same manner. Figure 3.7 shows the energy band diagram of the $\text{P}^+-\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+-\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^- -\text{GaAs}$ heterojunctions with uniform doping of 10^{19} donors/cm³.

TABLE 3.1

**Calculated Values in Construction of the P-n $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$
Heterojunction Band Diagram**

	GaAs	$\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$	$\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$	$\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$	$\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$
Energy Gap	1.425eV	1.5497eV	1.6744eV	1.7991eV	1.9238eV
Electron Affinity, χ_e	4.07eV	3.626eV	3.612eV	3.598eV	3.584eV
Net Donor Doping, N_D	-	10^{19} cm^{-3}	10^{19} cm^{-3}	10^{19} cm^{-3}	10^{19} cm^{-3}
$E_C - E_F$	0.7125eV	-	-	-	-
$E_F - E_V$	0.7125eV	0.5187eV	0.5807eV	0.643	0.7054eV
Dielectric constant	13.18	12.868	12.556	12.244	11.932
Intrinsic carrier concentration [6]	$2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

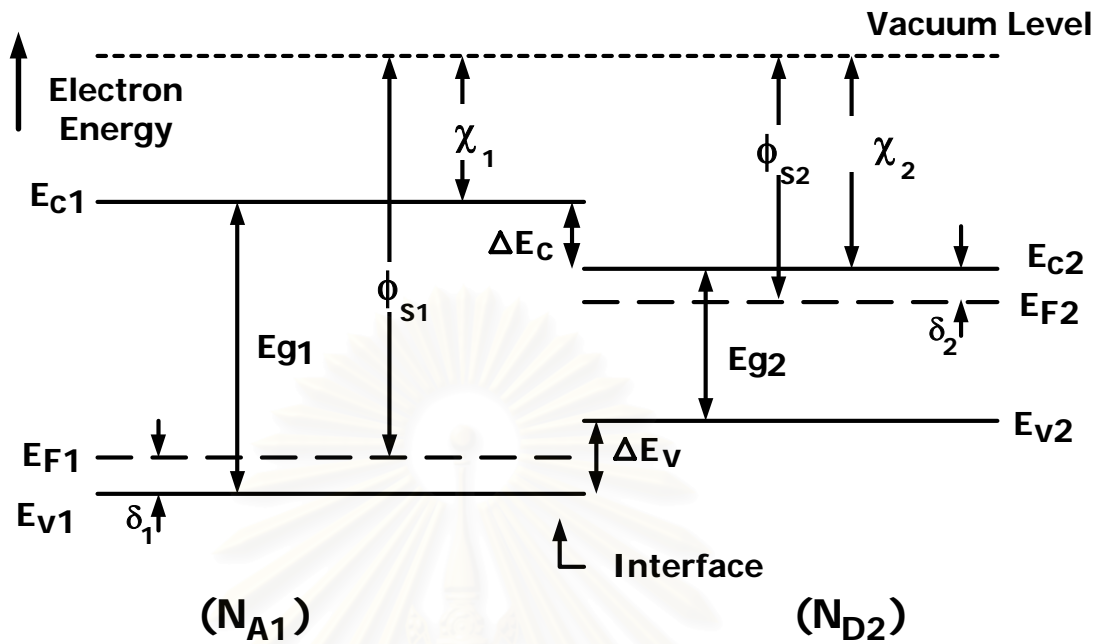


Fig. 3.1 Energy band diagram for two isolated semiconductors

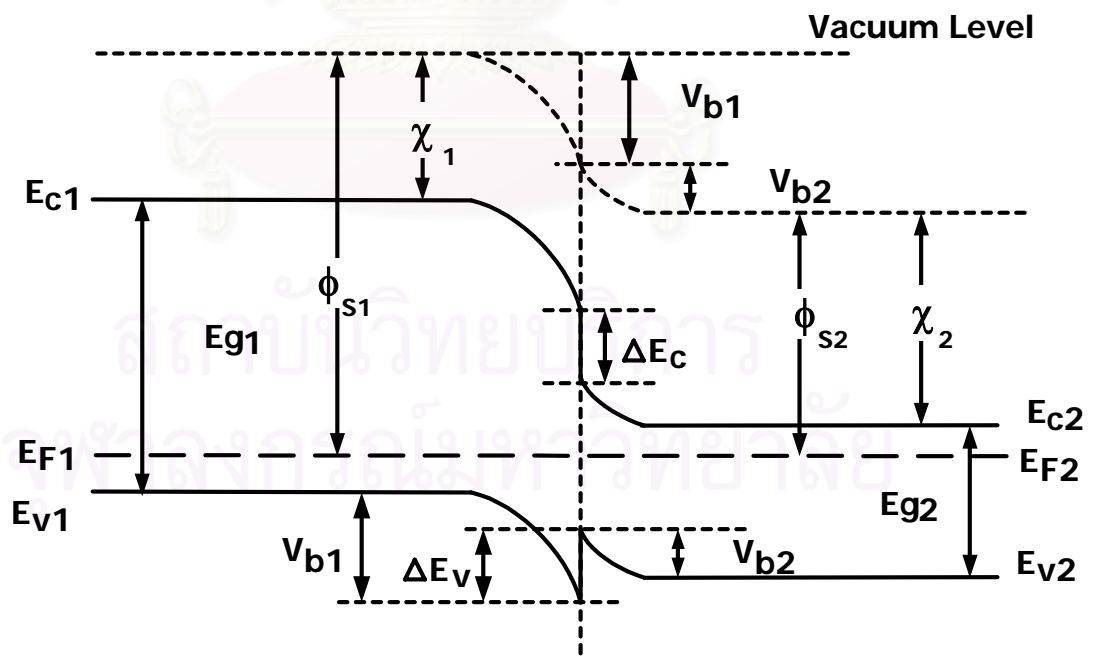


Fig. 3.2 Energy band diagram of an ideal P-n heterojunction at thermal equilibrium

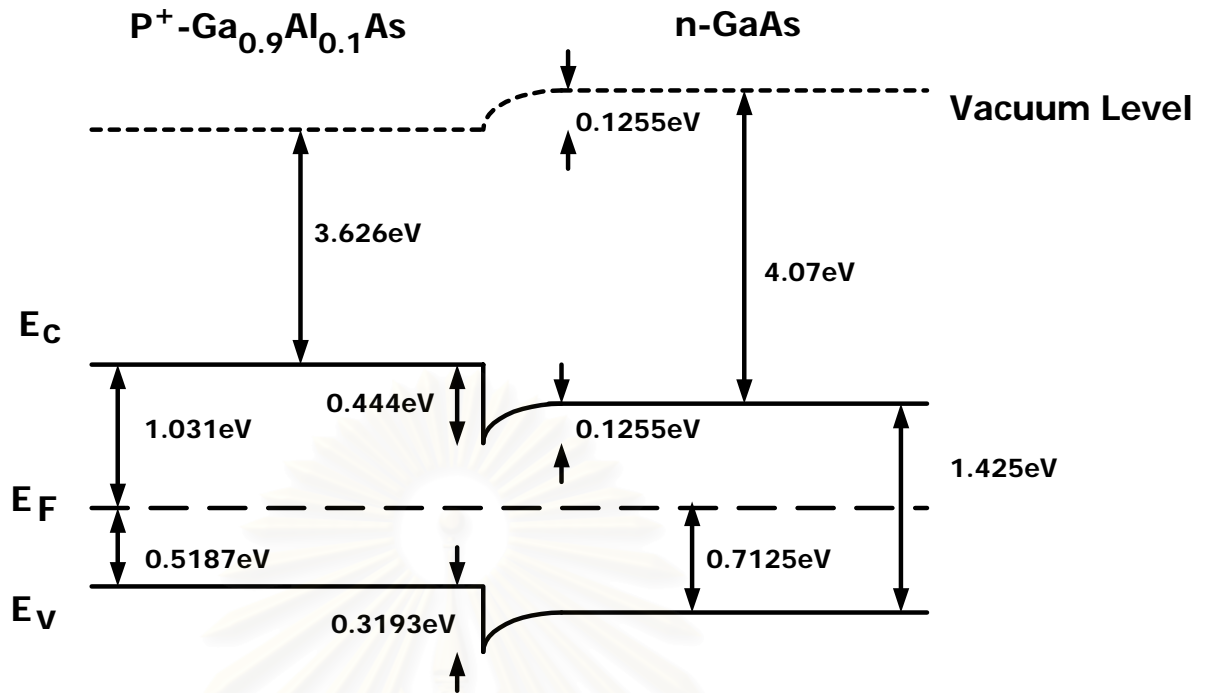


Fig. 3.3 $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium

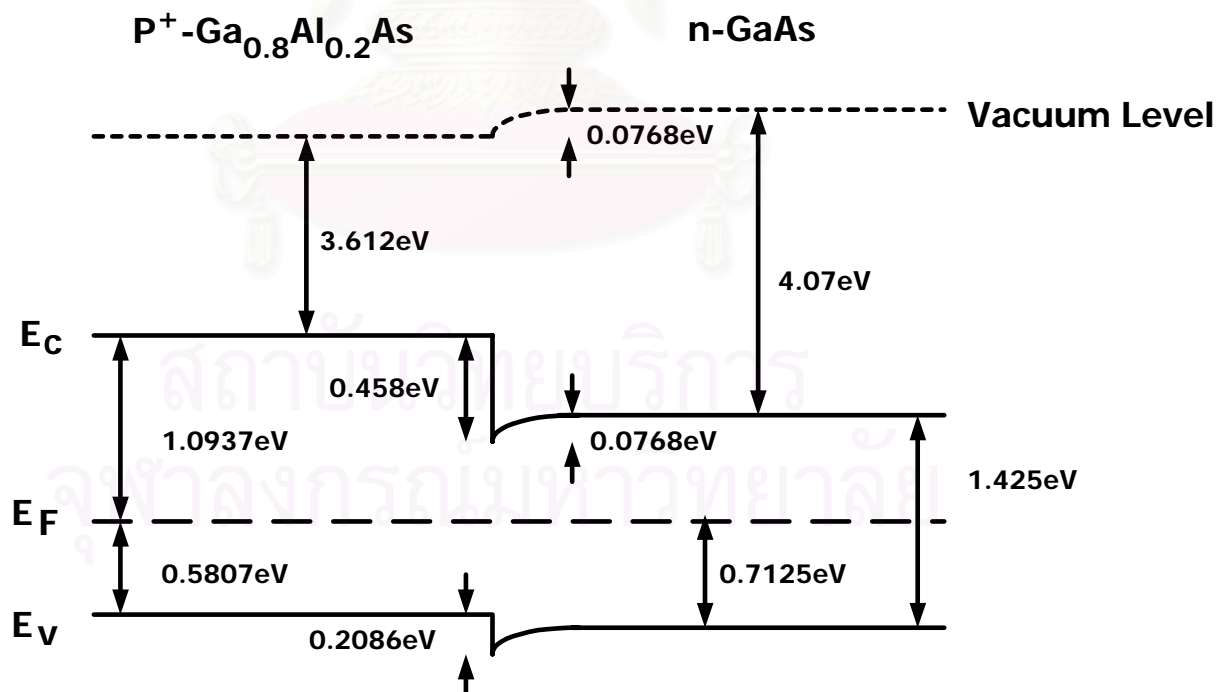


Fig. 3.4 $P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/n^-GaAs$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium

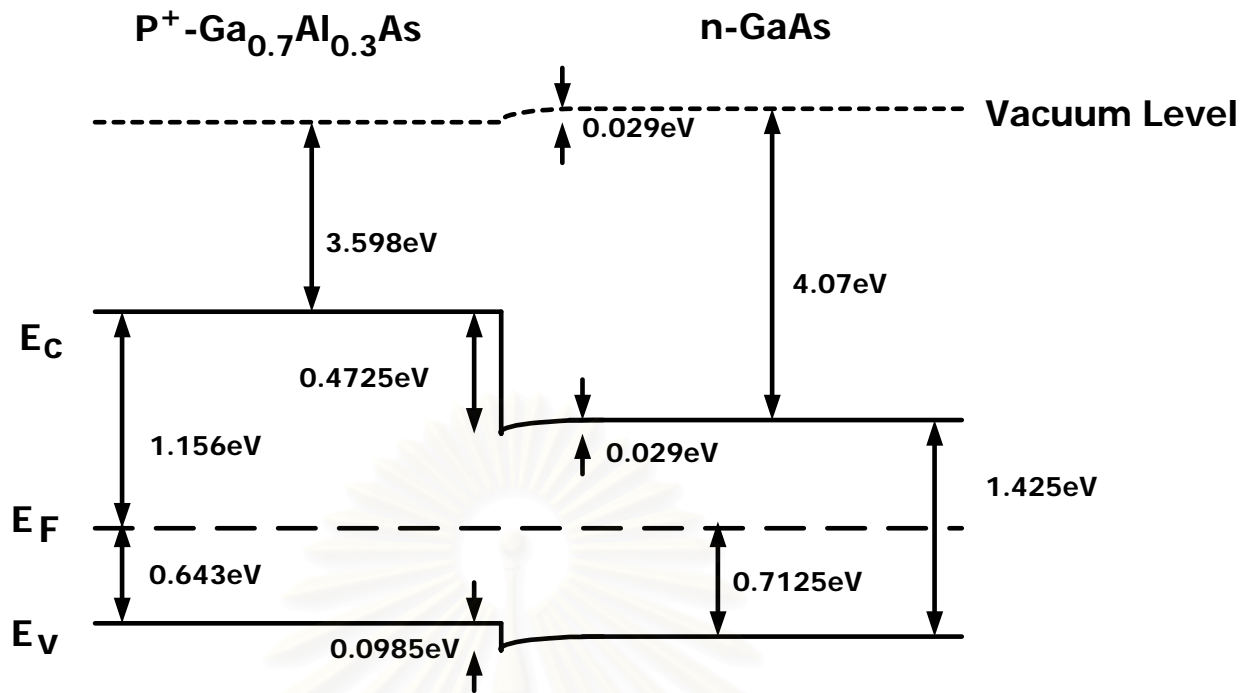


Fig. 3.5 $P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/n^-GaAs$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium

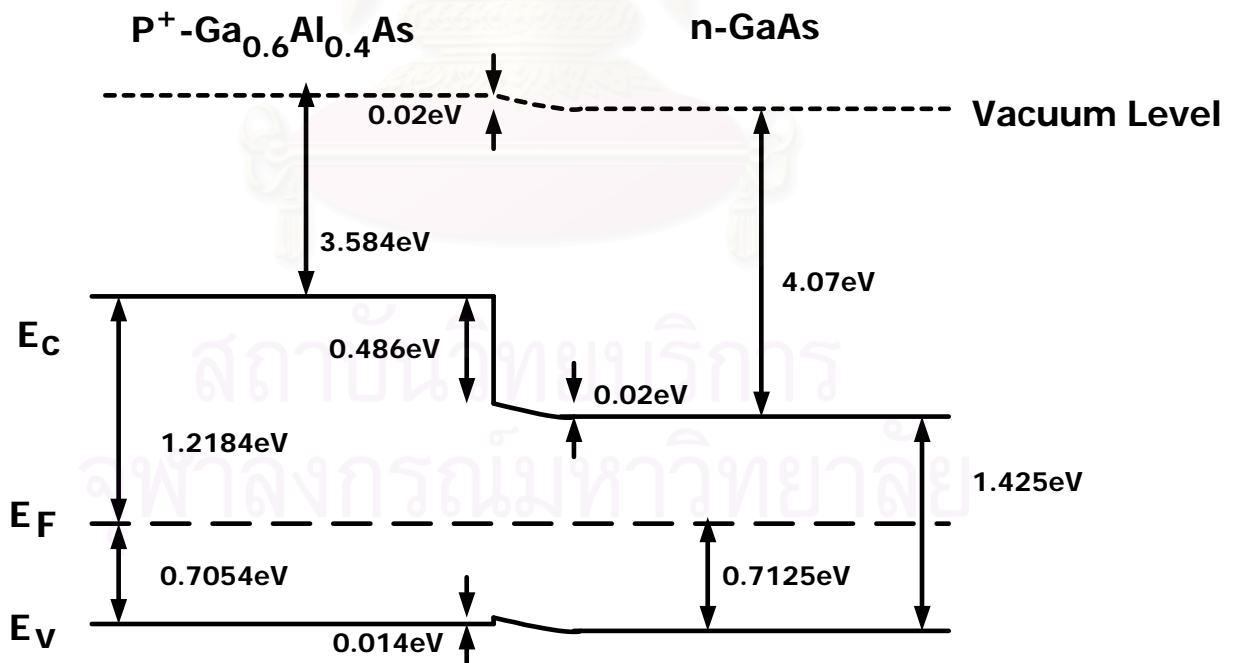


Fig. 3.6 $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/n^-GaAs$ heterojunction energy diagram at thermal equilibrium

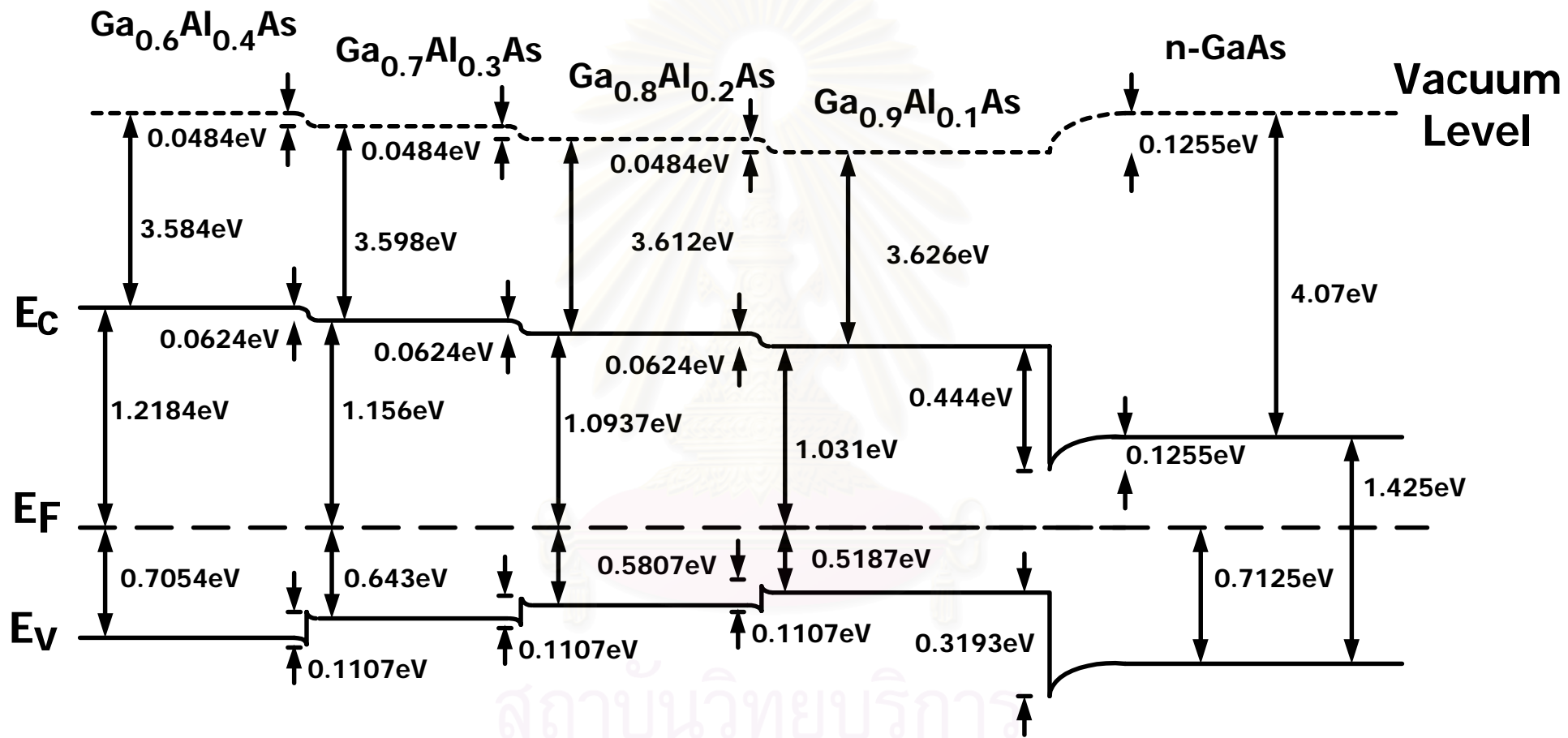


Fig. 3.7 $\text{P}^+\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^-\text{-GaAs}$ heterojunctions energy diagram

The energy band diagrams of the $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs$ heterojunctions with different doping profiles are shown in Figs. 3.8, 3.9, and 3.10. The details of the doping concentration in each structure are concluded in Table 3.2.

These results show that the discontinuity in conduction-band edges, ΔE_C , and valence-band edges, ΔE_V , is variant with doping level. But, by choosing the suitable doping conditions, the band-edge profile with no energy steps ΔE_V can be achieved as shown in Case C (Fig. 3.10)

TABLE 3.2

The doping concentration in each layer of the $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs$ heterojunctions

Case	Doping Concentration				
	GaAs	$Ga_{0.9}Al_{0.1}As$	$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	$Ga_{0.7}Al_{0.3}As$	$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$
A	$2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	10^{19} cm^{-3}	$8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
B	$2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	10^{19} cm^{-3}	$2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
C	$2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	10^{19} cm^{-3}	$9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$7.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

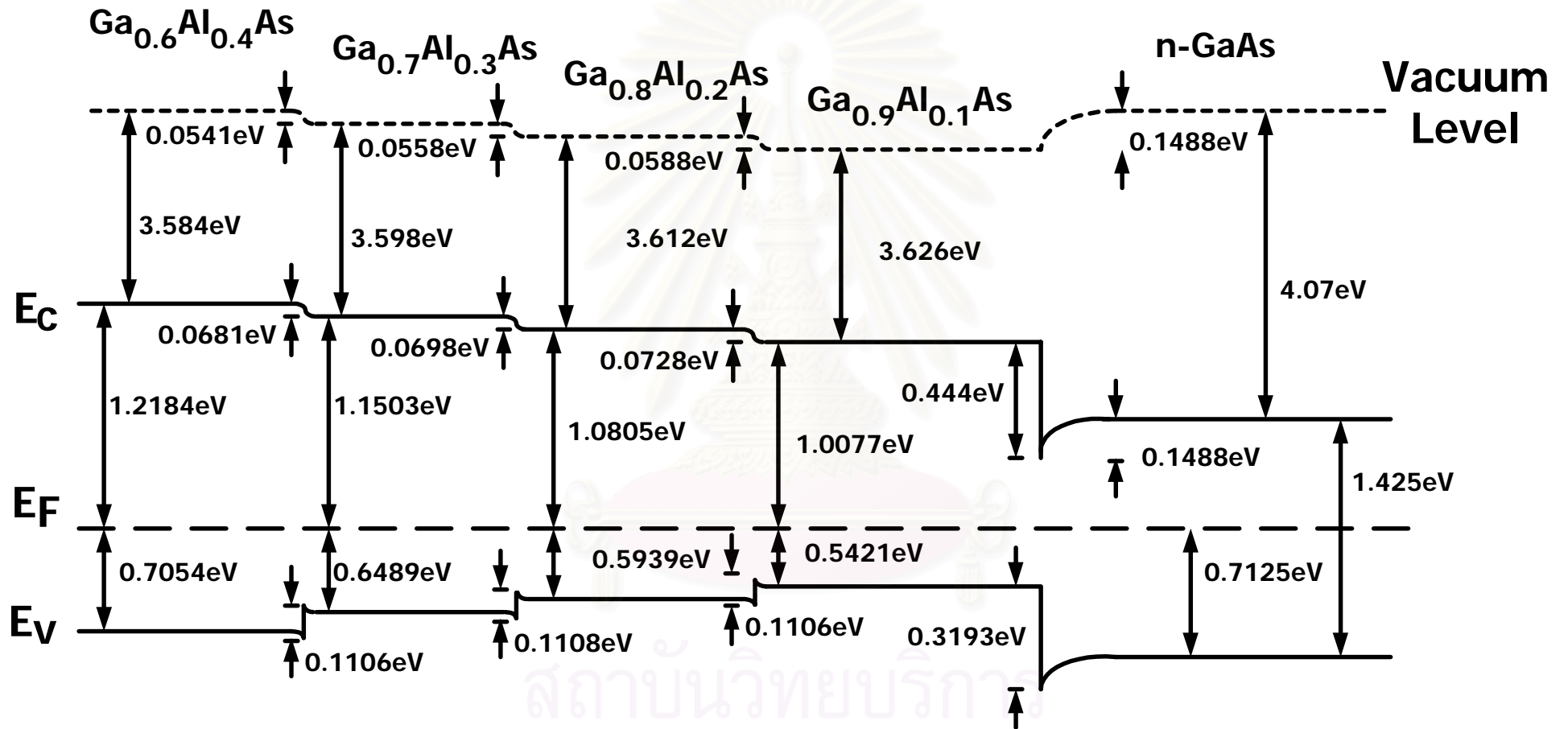


Fig. 3.8 $\text{P}^+\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^-\text{-GaAs}$ heterojunctions energy diagram in Case A

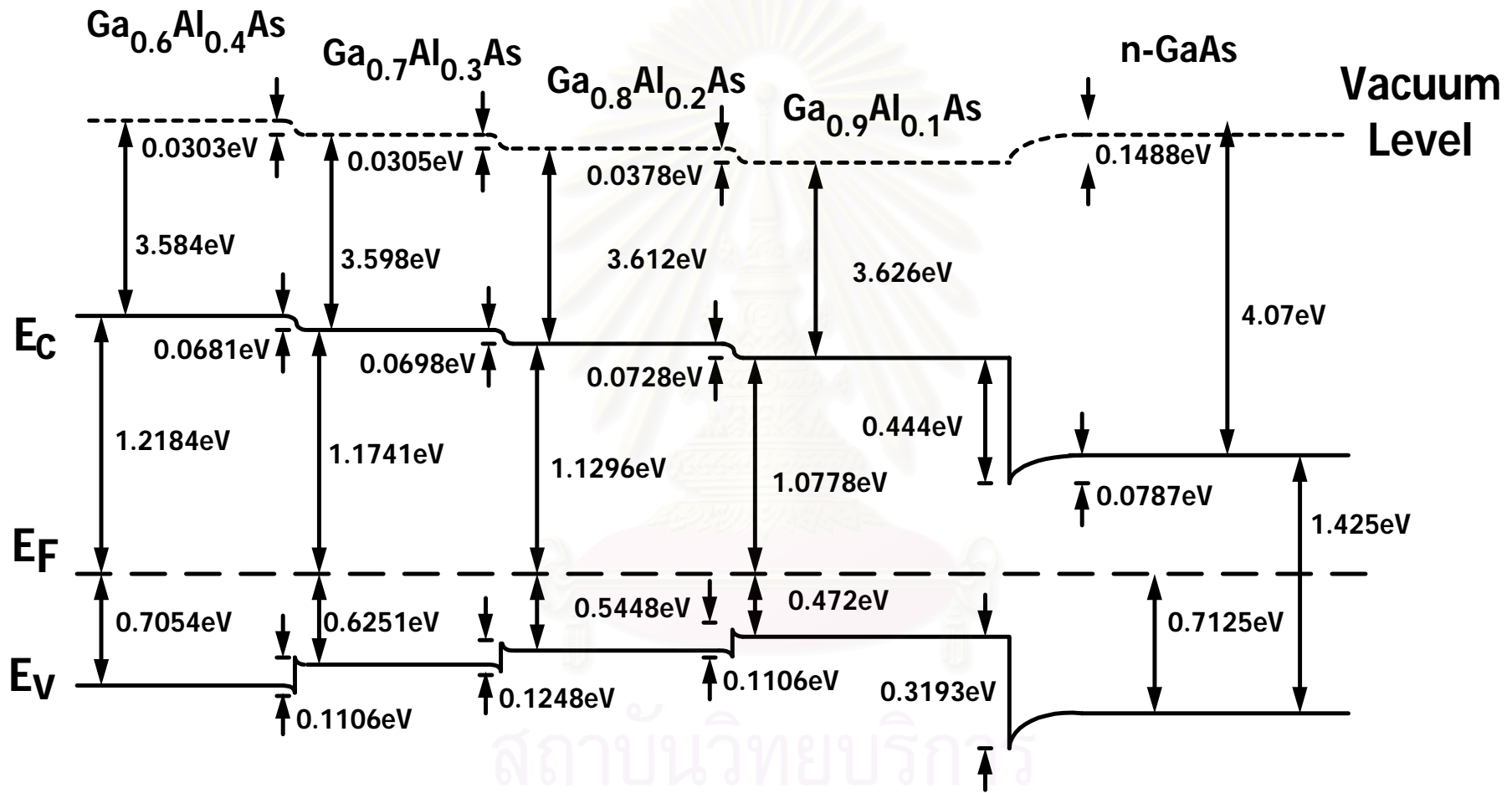


Fig. 3.9 $\text{P}^+\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^-\text{-GaAs}$ heterojunctions energy diagram in Case B

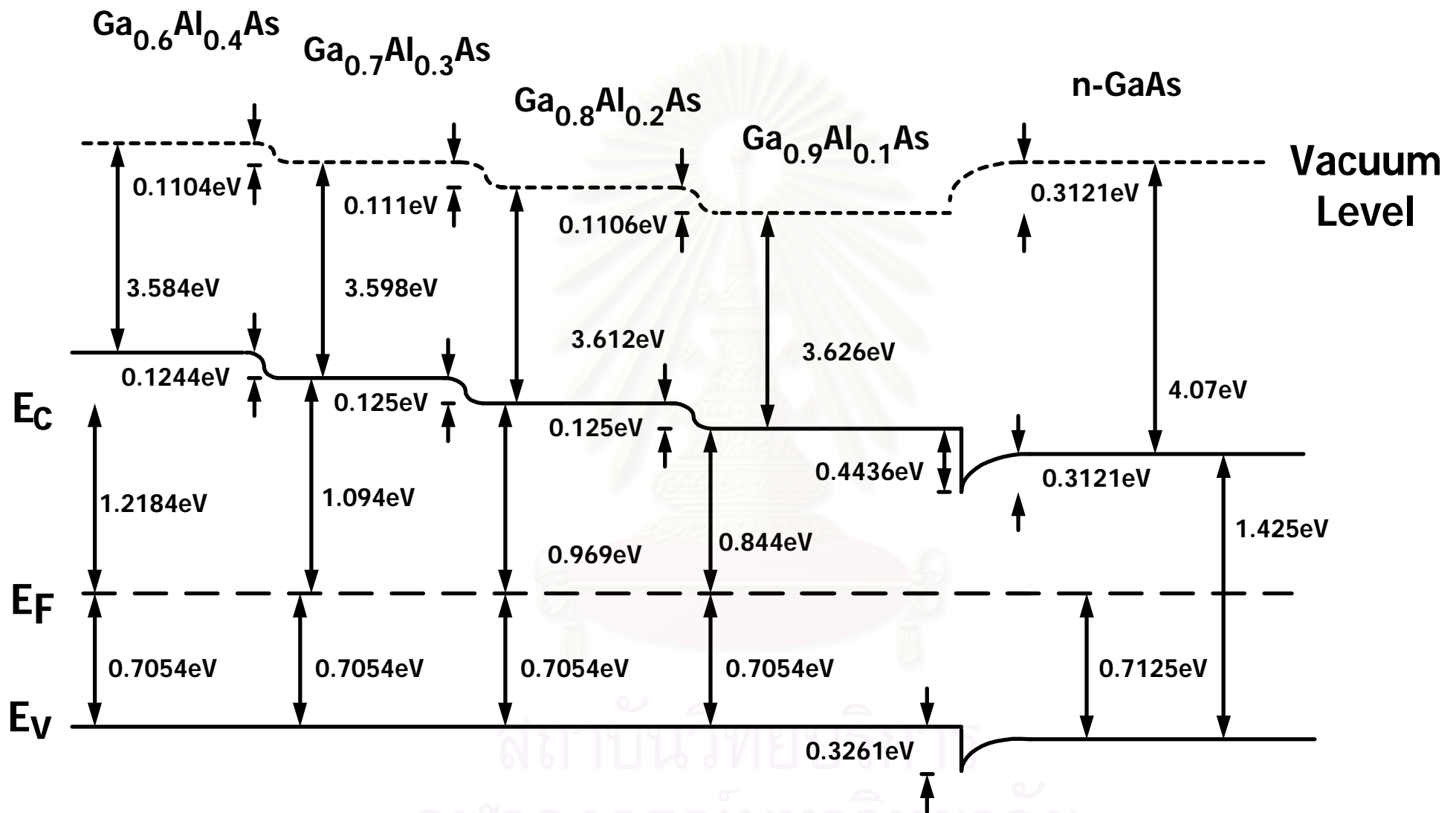


Fig. 3.10 $\text{P}^+\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^-\text{-GaAs}$ heterojunctions energy diagram in Case C

3.2 Heterojunction Photodiode Structures

To study the importance of the P^+ top layer in the photodiode structure, three different structures of a GaAlAs/GaAs heterojunction photodiode have been fabricated in this research. The basic structure is a depletion layer photodiode which is composed of a 50- μm -thick undoped GaAs and 1- μm -thick P^+ - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ top layer which acts as the wide gap window layer of the photodiode grown on n^+ - GaAs substrate by Liquid Phase Epitaxy Technique. The difference between these three structures is the energy gap of P^+ - GaAlAs layer. In Structures I and II, the constant band gap of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ is grown as the top layer in which x is 0.2 and 0.4 in Structures I and II, respectively. On the other hand, the multilayers of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ / $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ / $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ / $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ are grown in Structure III.

In order to apply electric field, AuZn is evaporated and alloyed on the P^+ - GaAlAs top layer. Then AuGe+Ni electrode is evaporated and alloyed on the n^+ -GaAs substrate. The sample structures are shown in Fig. 3.11.

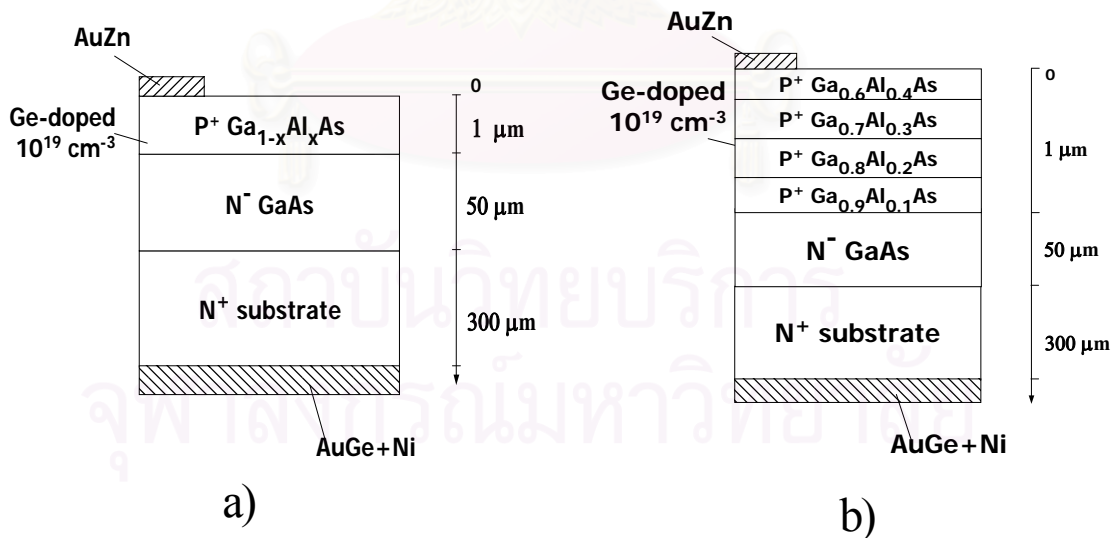


Fig. 3.11 The sample structures of (a) Structure I and II with $x=0.2$ and 0.4 , respectively (b) Structure III

3.3 Calculation of the Spectral Response

In various applications, specific photodiodes are required which depend mainly on the wavelength of operation. Hence, in order to design the photodiode more suitably, the spectral responses of each photodiode structure are calculated before fabricating. Thus, we can compare these calculated results with the experimentally measured results afterwards. The technique used to calculate the spectral response of photodiodes is using the semiconductor current density equations and taking into account the attenuation loss of incident light and the wavelength dependence of the absorption coefficient which has already been discussed in chapter 2.

For calculating the spectral response, the incident light power is fixed at 3.5×10^{-5} watt for comparison. Incorporation with the value of absorption coefficient in Eq. (2.20), we can calculate the light power entering the depletion region which generates electron-hole pairs. As a result, we can compute the drift current and diffusion current in the depletion region and n^+ region, respectively.

For the P^+ top layer of the third structure of the heterojunction photodiode (shown in Fig. 3.11b), we assume the linear electric field existing in the P^+ GaAlAs layers by neglecting the effect of doping level. The simplest case of no energy offset ΔE_V in the valence-band edge is assumed as shown in Fig. 3.12. The built-in electric field can be calculated as follows:

From Eq. (2.18) $\mathcal{E}_g^\Gamma(x) = 1.425 + 1.247x$ for $x \leq 0.45$

Therefore, for $x = 0.4$, we have $\mathcal{E}_g^\Gamma(x) = 1.9238$ eV

and for $x = 0.2$, we have $\mathcal{E}_g^\Gamma(x) = 1.6744$ eV

from electric field $E = -\frac{dv}{dy}$ where y is a distance

$$= -\frac{d\mathcal{E}}{qdy}$$

$$= -\frac{(1.6744 - 1.9238)eV}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}}$$

$$= 4988 \text{ V/cm}$$

Since in very high electric fields, the drift velocities of carriers in semiconductors tend to saturate. Then we may assume that the electrons in this region move with a constant velocity V_{sat} . Thus, we have

$$V_{drift} = V_{sat} = 10^7 \text{ cm/s}$$

The minority-carrier lifetime in GaAlAs appears to be dependent on the epitaxial growth technique, as well as the Al content. For LPE growth technique, the lifetime of 2.5 ns for $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ is reported [7]. Therefore, from the lifetime of 2.5 ns, we may have

$$\begin{aligned} V_{drift} \tau &= 10^7 \text{ cm/s} \times 2.5 \text{ ns} \\ &= 2.5 \times 10^{-2} \text{ cm} \\ &= 2500 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

This suggests that the photogenerated electrons in the window layers can drift in a distance of 2500 μm before recombining. It means that all of the electrons in the window layers can reach the depletion region and contribute to the photocurrent. As a result, the response at short wavelengths increases.

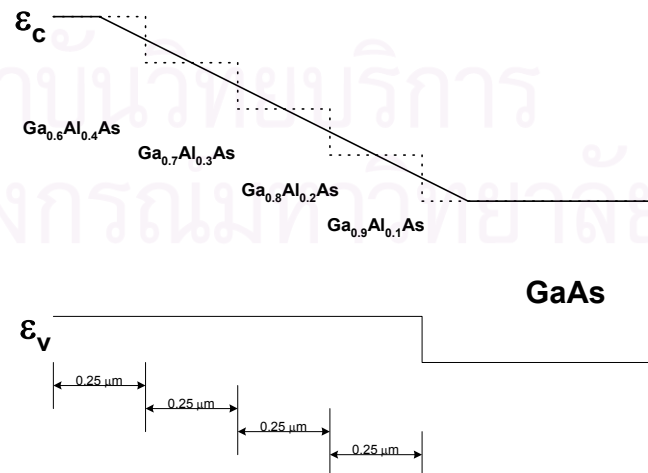


Fig. 3.12 The linear built-in electric field existing in the GaAlAs top layers

It should be pointed out that even though we calculate the built-in electric field of the third structure by considering the energy band diagram in Fig. 3.7, the calculated built-in electric field is about 2496 V/cm, which is also high enough to cause the drift velocities of carriers to be saturated.

The results of calculations for the spectral response of a number of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes are shown in Figs. 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 and 3.18.

Figure 3.13 shows the results of calculations of GaAs homojunction photodiode. In this case, the observed spectral response is very narrow at the wavelength of about 875 nm, conforming to the early experimental study [8]. This is because almost all of the incident light power whose energy is higher than bandgap energy of GaAs is absorbed in the P⁺-GaAs layer.

Figure 3.14 shows the results of calculations for the Ga_{0.9}Al_{0.1}As/GaAs heterojunction photodiode. In this case, the spectral response is observed in the wavelength range of ~800 to ~875 nm. The spectral response of this structure is wider than that of the GaAs homojunction diode because the incident light with energy less than bandgap energy of Ga_{0.9}Al_{0.1}As (1.55 eV) can pass through the Ga_{0.9}Al_{0.1}As layer without being absorbed, resulting in the photocurrent observed in the range of ~800 to ~875 nm. This is reflecting the window effect of the Ga_{0.9}Al_{0.1}As/GaAs heterojunction.

Similar results of calculations for the Ga_{0.8}Al_{0.2}As/GaAs heterojunction photodiode (Structure I), Ga_{0.7}Al_{0.3}As/GaAs heterojunction photodiode and Ga_{0.6}Al_{0.4}As/GaAs heterojunction photodiode (Structure II) are shown in Figs. 3.15, 3.16, and 3.17, respectively. The only difference between these results is the short-wavelength cutoff of the photoresponse which is established by the bandgap of GaAlAs top layer.

Figure 3.18 shows the calculated results of the graded bandgap 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 heterojunction

photodiode (Structure III). In this case, the spectral response occurs from ~650 to ~875 nm, similar to that of the $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunction photodiode. If we consider the spectral response of this structure without an assumption of the built-in electric field, the observed spectral response in this structure should be similar to that of the $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunction photodiode because the layer with the smallest bandgap energy would define the energy of the photons that can pass to the active region (depletion region). But, with the assumption of built-in electric field, the photogenerated carriers in the multilayer of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ can drift and contribute to the photocurrent, in addition to the drift current in depletion region and diffusion current in n^+ -layer, due to the existence of the built-in electric field. Figure 3.19 shows the drift current component in each P^+ GaAlAs layer of this structure.

Figure 3.20 shows the comparison of the calculated results of the three structures of interest. From this figure, it is clearly seen that the spectral response of the graded band gap GaAlAs top layer photodiode is very similar to that of the structure with constant band gap of the $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ top layer except for the higher response in the short wavelength range (less than 645 nm).

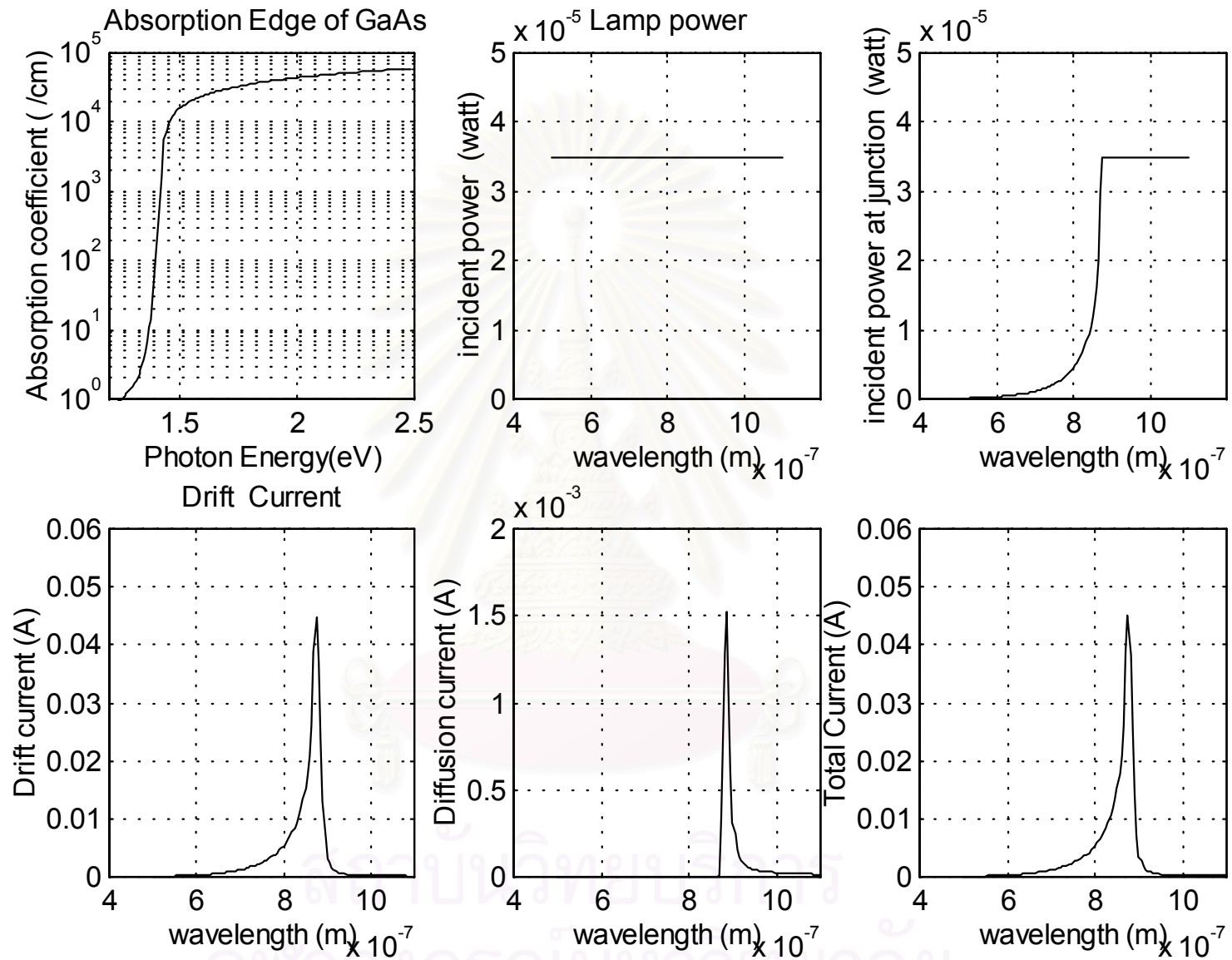


Fig. 3.13 Calculated results for GaAs homojunction photodiode

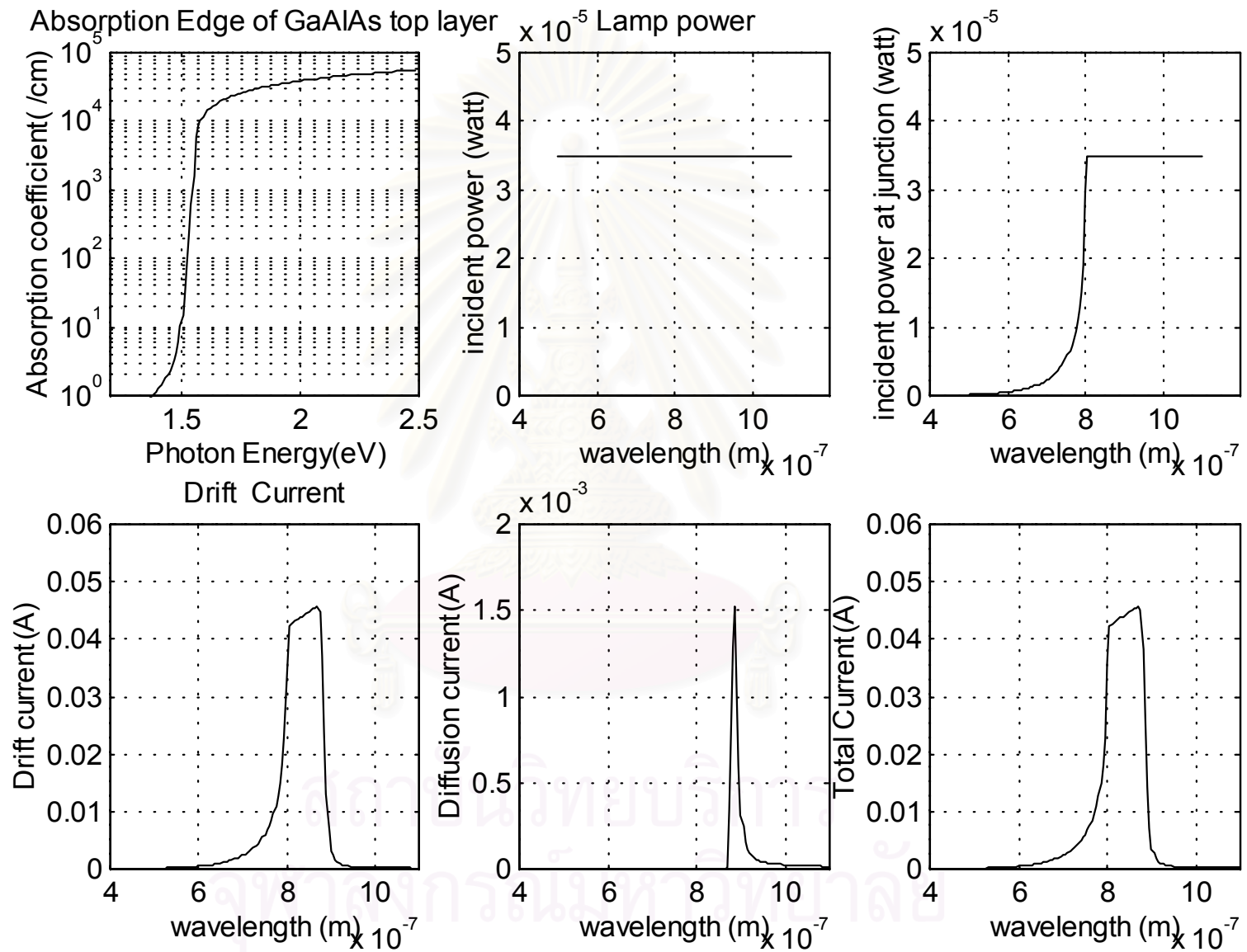


Fig. 3.14 Calculated results for $P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+-GaAs$ heterojunction photodiode

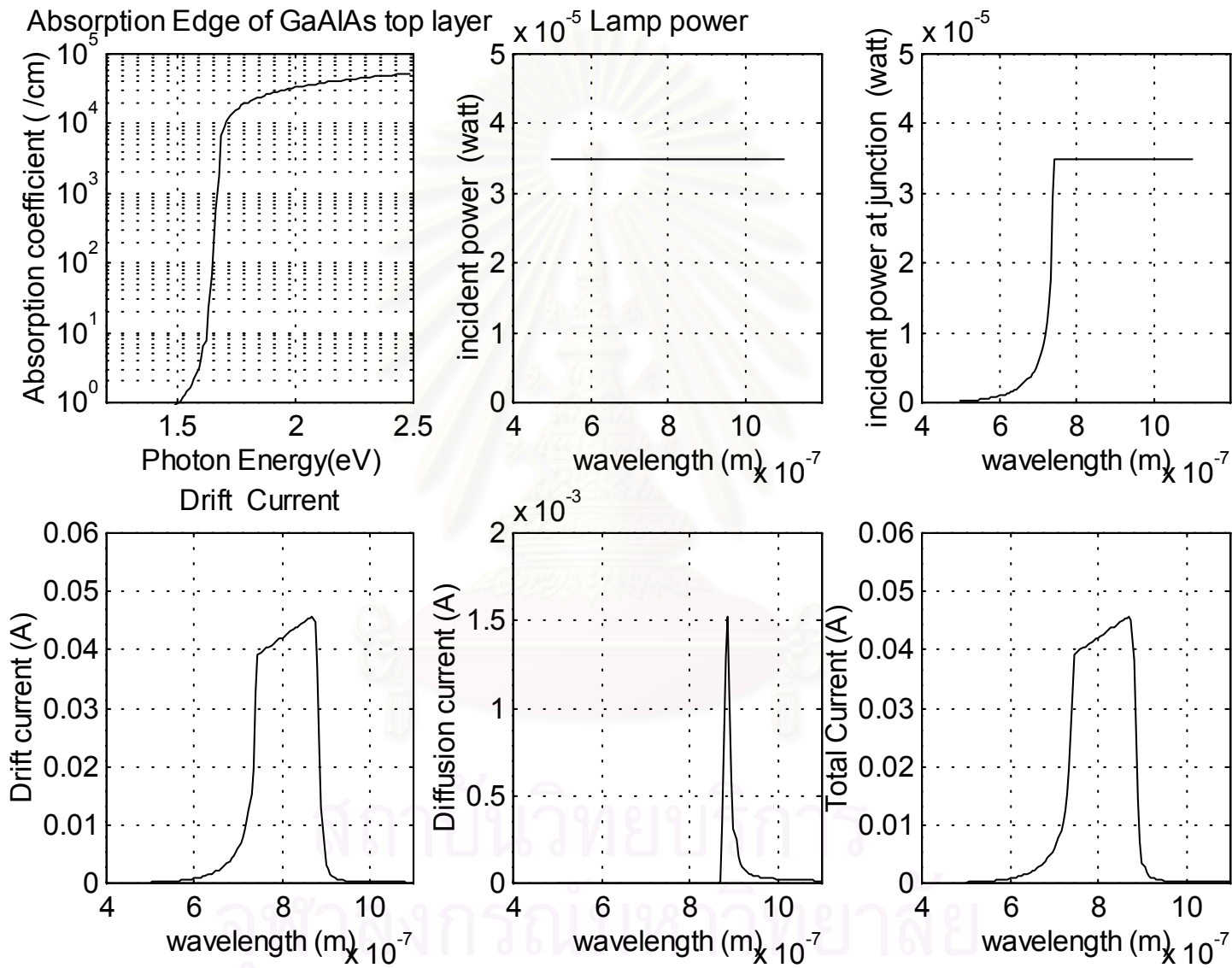


Fig. 3.15 Calculated results for $P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/n^--GaAs/n^+-GaAs$ heterojunction photodiode

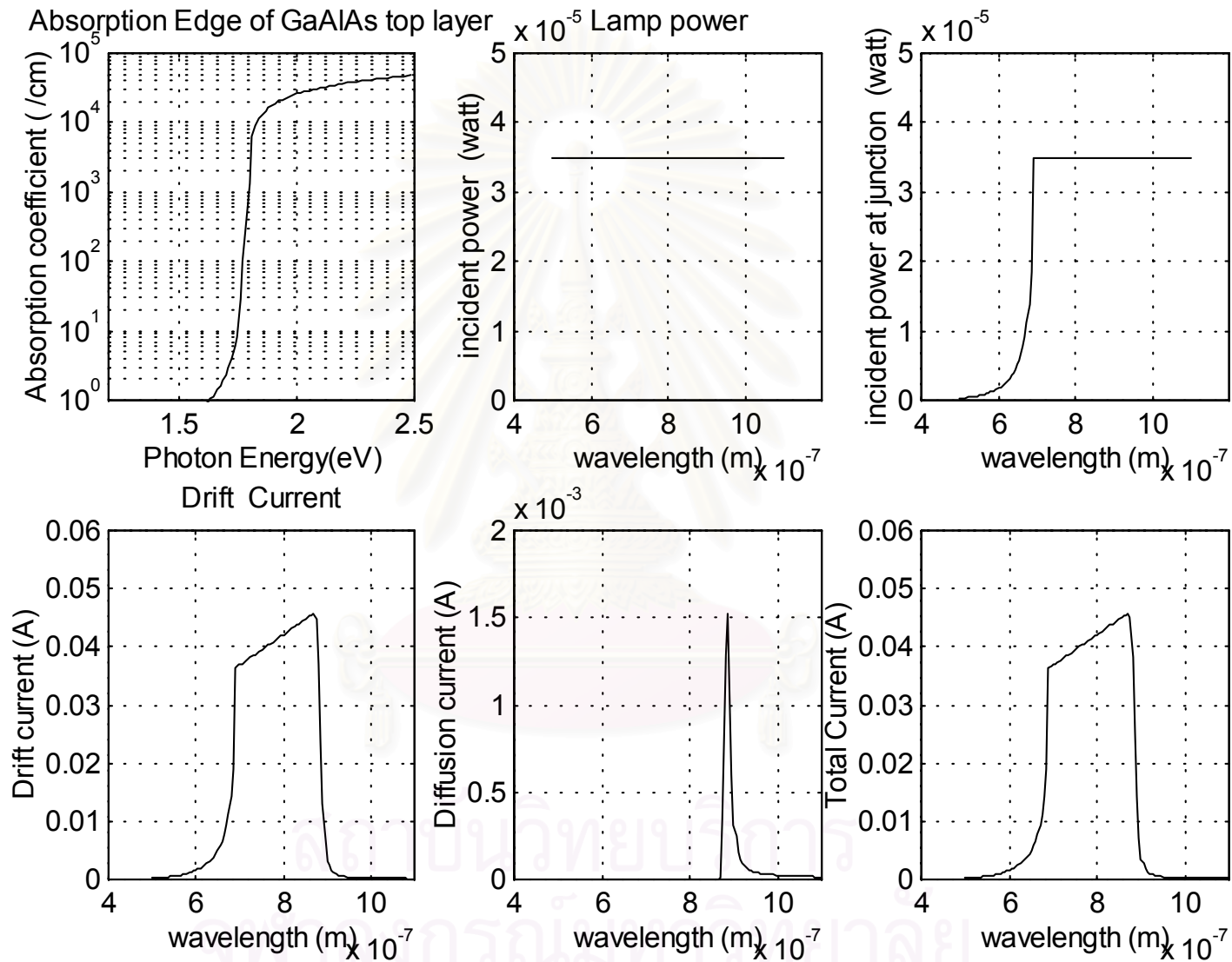


Fig. 3.16 Calculated results for $P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/n^- - GaAs/n^+ - GaAs$ heterojunction photodiode

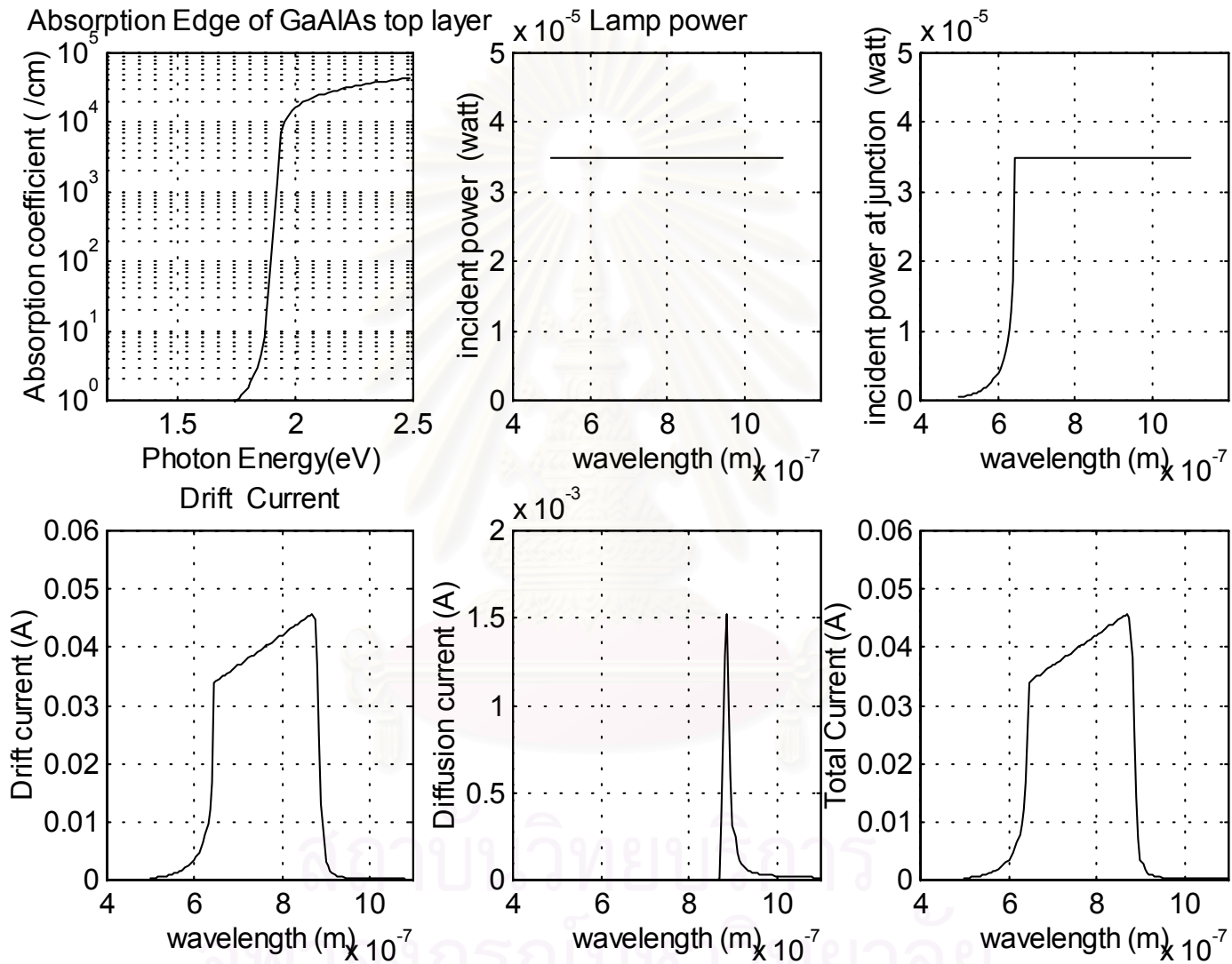


Fig. 3.17 Calculated results for $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/n^-GaAs/n^-GaAs$ heterojunction photodiode

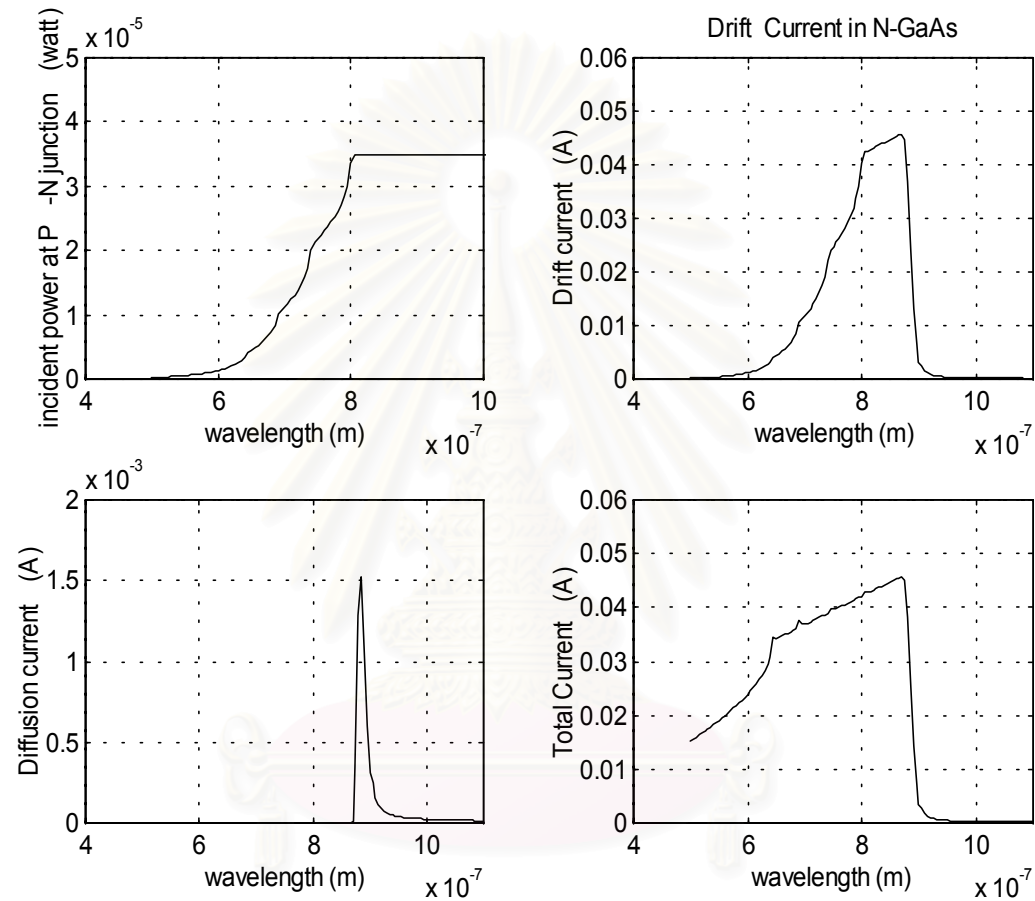


Fig. 3.18 Calculated results for $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+-GaAs$ heterojunction photodiode

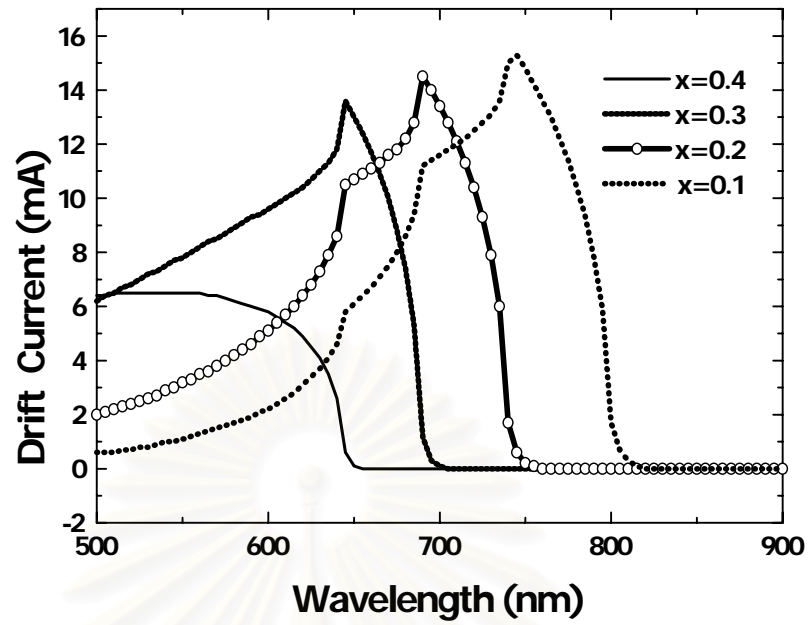


Fig. 3.19 Drift current generated in each window layer of $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode versus wavelength

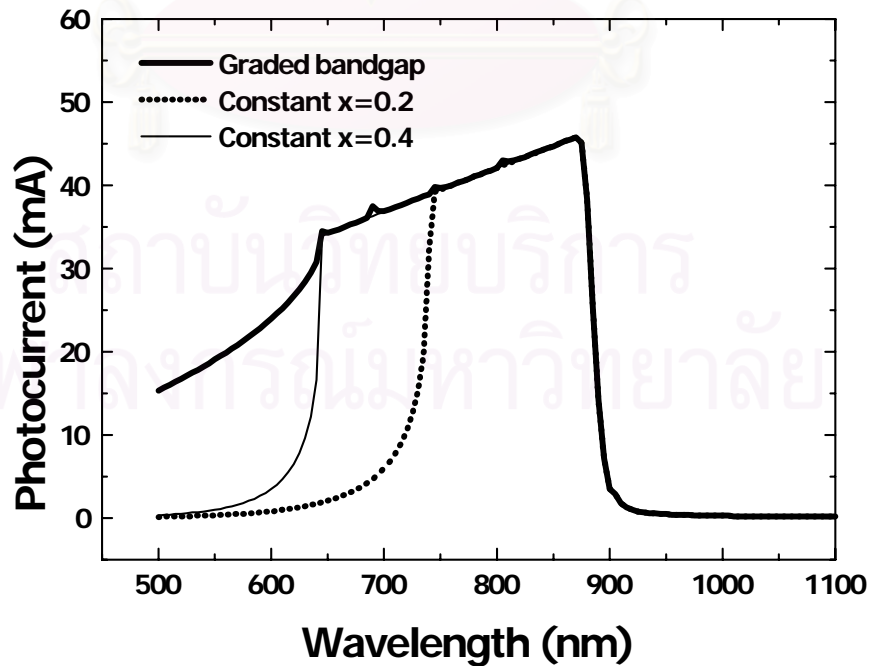


Fig. 3.20 A comparison of the calculated results of three structures of interest

CHAPTER 4

FABRICATION OF GaAlAs/GaAs PHOTODIODE

In chapter 3, the energy band diagram constructions and the structures of heterojunction photodiode are discussed. In this chapter, the fabrication processes of the heterojunction photodiode including the epitaxial growth technique are presented.

4.1 Epitaxial Growth

Epitaxial growth refers to the formation of new layers of crystalline solid material on a well-oriented single crystal in such a manner that the new, or epitaxial layer perpetuates the crystalline structure of the original structure. This epitaxial growth process is termed *Epitaxy*.

Epitaxy can be broadly classified into two categories:

- 1) Homoepitaxy or isoeptitaxy or autoepitaxy: the composition of the layer is essentially the same as that of the underlying substrate, for example, Si/Si and GaAs/GaAs.
- 2) Heteroepitaxy: the composition of the layer differs from that of the substrate, for example, Si/GaAs, InP/InGaAsP.

Semiconducting film may be epitaxial grown in many techniques. The most common ones are: (a) Vapor Phase Epitaxy (VPE) ; (b) Liquid Phase Epitaxy (LPE) ; (c) Molecular Beam Epitaxy (MBE). Of these, the LPE technique is the simplest for a wide variety of III-V compounds and has been most explored. Basically, LPE involves the precipitation of material from a cooling solution onto an underlying substrate. The solution and the substrate are kept apart in the growth apparatus and the solution is saturated with the material to be grown until the desired growth temperature is reached. The solution is then brought in to contact with the substrate surface and allow to cool at a rate and during a time interval which are appropriate for the generation of the desired layer. When the substrate is single crystalline and the lattice constant of the

precipitating material is the same or nearly the same as that of the substrate, the precipitating material forms an epitaxial layer on the substrate surface.

The advantages of LPE technique over other epitaxial techniques are:

- simplicity of equipment;
- generally higher deposition rate;
- elimination of hazards due to use of reactive gases and their reactive products;
- larger selection of dopants that can be readily incorporated into the epitaxy; and
- the nonrequirement of vacuum equipment

Anyway, the limitations of LPE technique are an inability to produce ultrathin layer whose thickness is less than $0.1 \mu\text{m}$ and the difficulty to control the layer homogeneity in the direction of growth.

III-V compounds for optoelectronic or microwave device applications often require that more than one layer be grown, by using a multibin boat, a number of solutions come sequentially into contact with the substrate. Therefore, it is possible to obtain several semiconductor layers doped with different impurities during one growth cycle, which is used for device fabrication. Figure 4.1 and Figure 4.2 show, respectively, a horizontal LPE system and multibin graphite boat used in this research.

The horizontal LPE apparatus principally consists of

1. Programmable Temperature Controller : The accuracy of temperature stabilization is within $\pm 0.05^\circ\text{C}$
2. Resistance Furnace : The length of the uniform-temperature region is about 200 mm. The furnace is movable over the quartz tube
3. Quartz Tube : 2400mm long with inner diameter about 74 mm
4. Gas System with Hydrogen Purifier
5. Hygrometer : with a resolution of 0.1 ppm

6. Nitrogen Hood : to protect the substrates against the effect of the environment and the forming of oxides layer on the surface during the preparation processes
7. Thermocouple and Temperature Recorder : for temperature checking
8. Graphite Boat : allows sequential deposition of nine semiconductor layers during one growth cycle as shown in Fig. 4.2.
9. Quartz Rod : use to slide the substrate sequentially into the bottom of the reservoirs containing the different melting solution of Ga+Al+As

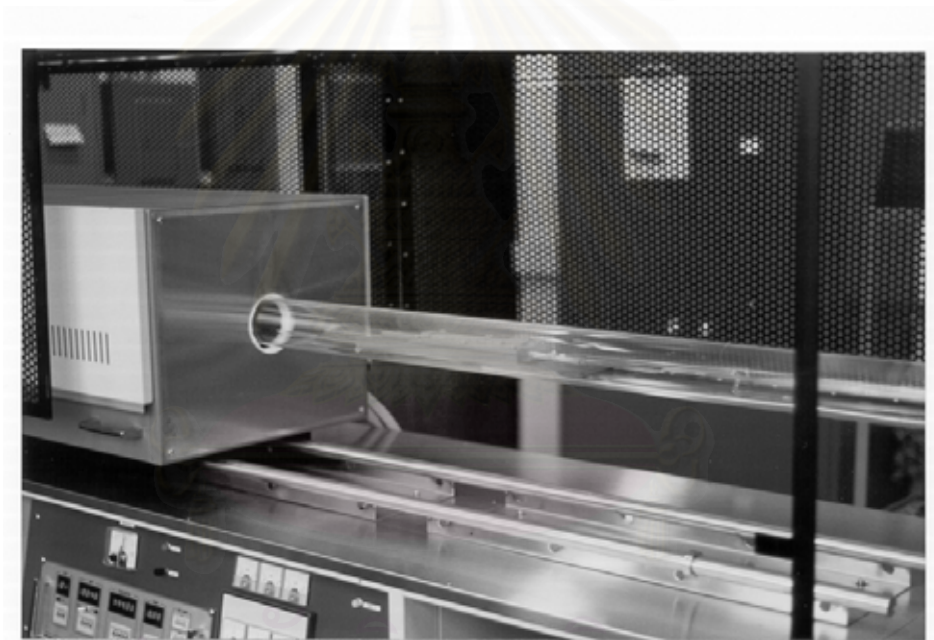


Fig. 4.1 Photograph of Horizontal LPE System at Semiconductor Device Research Laboratory, Chulalongkorn University

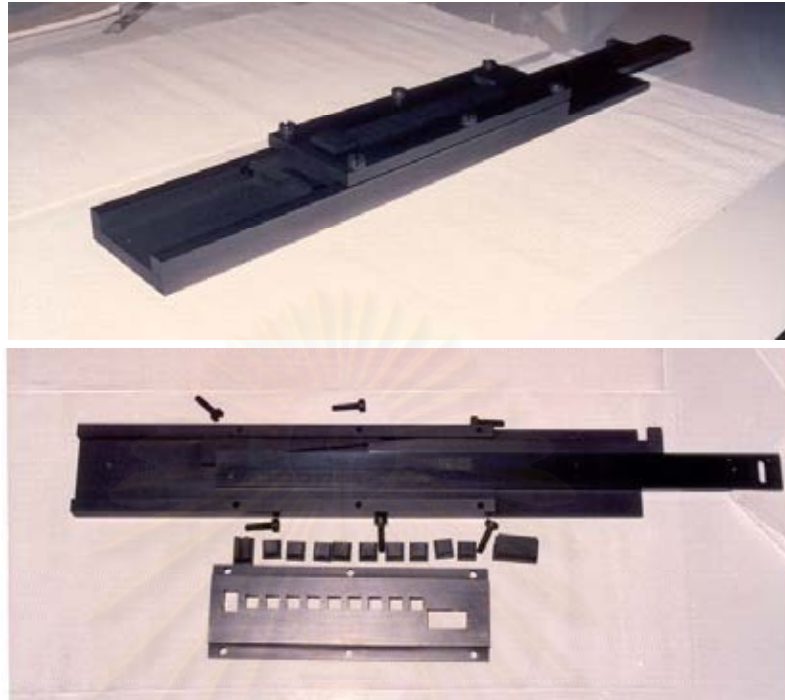


Fig. 4.2 A multibin graphite boat for the sequential deposition of several layers during one growth cycle

4.2 Fabrication Technology

4.2.1 Preparation of Substrate and Materials

The first fabrication step of heterojunction photodiode is to prepare GaAs substrate wafer and the materials to be grown.

Wafer : For different objectives, the different sizes of the different types of wafer are needed. We can classify them as:

- a. $11 \times 11 \text{ mm}^2$ - size wafers: used as the underlying substrates for epitaxial growth. In this research, we used an n-type GaAs wafer doped with Si to a level of $3\text{-}5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. In one growth cycle, two substrates can be used.

- b. $6 \times 11 \text{ mm}^2$ - size wafers: used for compensating the solution in each bin of the graphite boat. According to this purpose, one $6 \times 11 \text{ mm}^2$ - size undoped GaAs wafer is needed for each layer grown.

To remove all foreign matters from the surfaces of the wafers prior to growth processing, the wafers are prepared by the processes as follows:

- Clean in boiled Trichloroethylene for 5 minutes
- Clean in boiled Acetone for 5 minutes
- Rinse in deionized water (DI-water)
- Blow dry with N_2 gas

To remove oxides from the surface, the substrates are etched successively by $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (4:1:1) at 75°C for about 20 seconds and diluted HCl ($\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} = 1:1$) for about 5 minutes, each etching state being followed by DI water rinsing and N_2 gas drying.

Materials : In LPE, it is necessary that the material to be grown dissolves in a solvent. For the growth of GaAs and GaAlAs layers Ga is most commonly used as the solvent for As and Al. In order to dope the epitaxial layers, the dopants are also prepared as the solutes. The common n-type dopants are Sn or Te, and the common p-type dopants are Ge or Zn. All of the materials are prepared as the solid. The specific amount of materials for each designed layer can be obtained by mass conservation relation.

$$X_{Ga} + X_{As} + X_{Al} + X_{im} = 1 \quad (4.1)$$

where X is the mole fraction of one of the constituents containing in that compound. In proportion to the weight of Ga (W_{Ga}), the weight of As (W_{As}) can be written as

$$W_{As} = (X_{As} / X_{Ga})(M_{As} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga} \quad (4.2)$$

where M is the atomic weight of each element.

And the weight of Al (W_{Al}) is given by

$$W_{Al} = (X_{Al} / X_{Ga})(M_{Al} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga} \quad (4.3)$$

The weight of the impurity (dopant) (W_{im}) is given by

$$W_{im} = (X_{im} / X_{Ga})(M_{im} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga} \quad (4.4)$$

Arsenic has to be prepared as GaAs, therefore the weight of GaAs (W_{GaAs}) is

$$W_{GaAs} = (X_{GaAs} / X_{Ga})(M_{GaAs} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga} \quad (4.5)$$

where

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}	=	$M_{Ga} + M_{As}$		=	144.64

The atom fraction of the solutes are given by the reference data curves in Figs. 4.3, 4.4, 4.5, and 4.6. [9]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

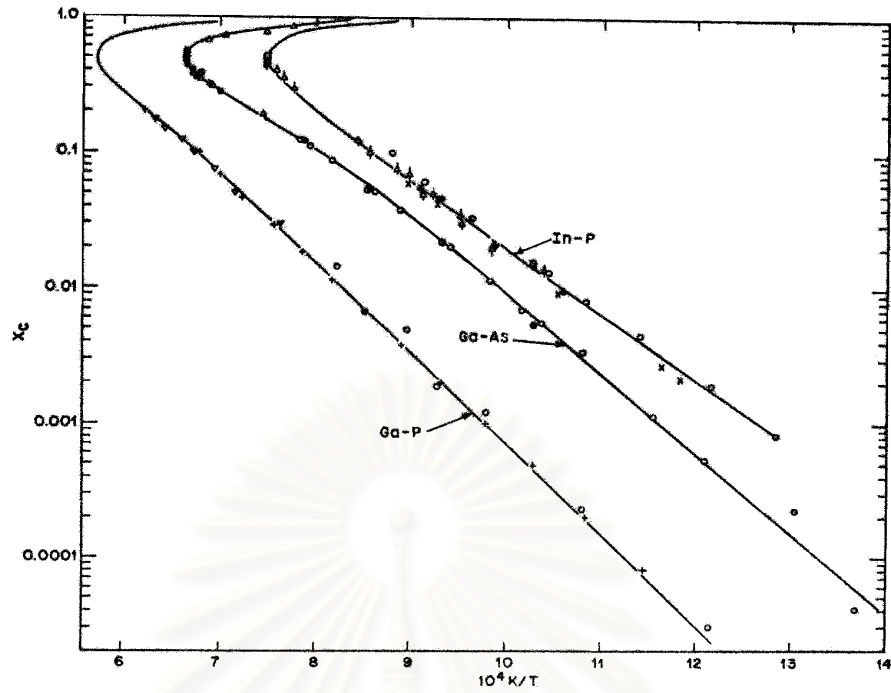


Fig. 4.3 Liquidus composition versus reciprocal temperature for Ga-As, Ga-P and In-P

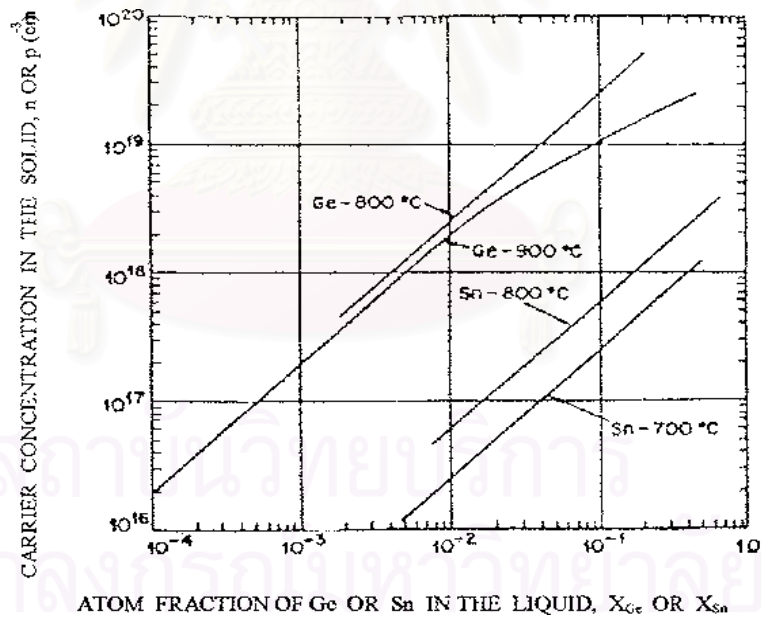


Fig. 4.4 The upper curves are the room-temperature hole concentration in GaAs versus the atom fraction of Ge in the liquid along the 800°C and 900°C and the lower curves are the room-temperature electron concentration in GaAs versus the atom fraction of Sn in the liquid along the 700°C and 800°C.

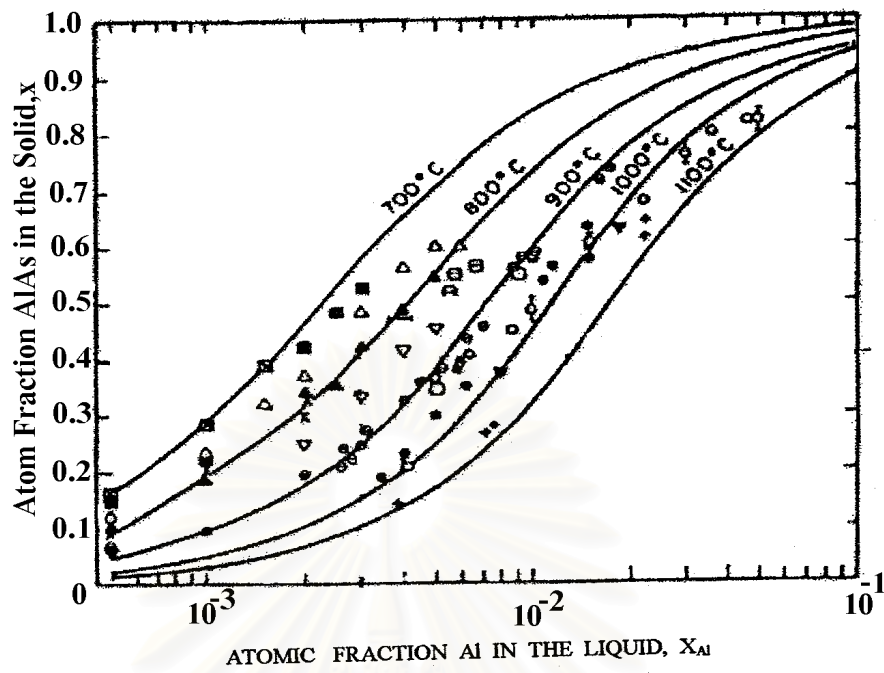


Fig. 4.5 Solidus compositions in $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ as a function of liquidus composition

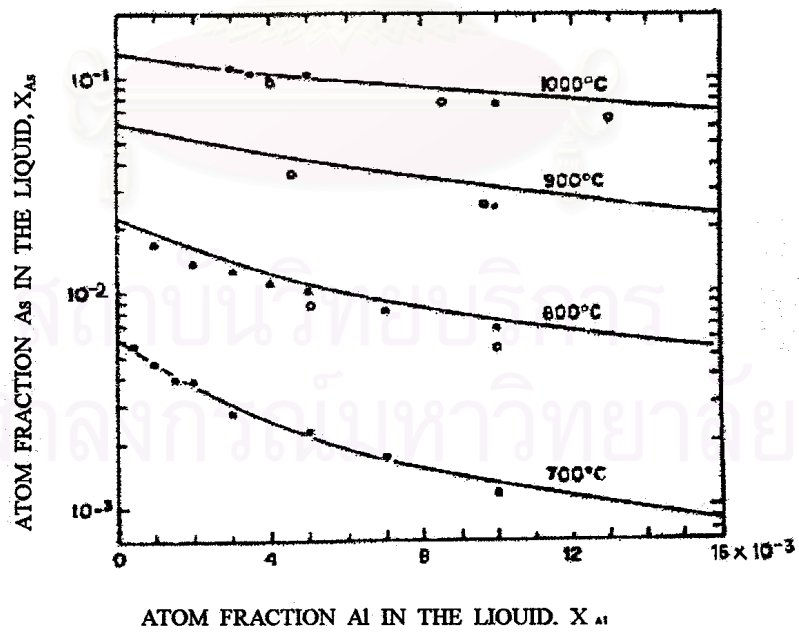


Fig. 4.6 Liquidus isotherms in the Al-Ga-As system

4.2.2 Calculation Method of Material Weight

The calculation of the weight of the materials to be grown in the specific layers of all structures are shown as follows:

Structure I

P⁺ layer : Ga_{0.8}Al_{0.2}As 10¹⁹ cm⁻³ (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.2 at 800 °C we have

$$X_{Al} = 0.0011$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.0011$ at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.018$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10¹⁹ cm⁻³ at 800 °C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

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

For $W_{Ga} = 1$ g , we will have $W_{Al} = 0.4524$ mg

$$W_{GaAs} = 39.688$$
 mg

$$W_{Ge} = 44.2625$$
 mg

N⁻ layer : GaAs

From Fig. 4.3, referred to GaAs curve at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.022$$

Therefore we have $X_{Ga} = 1 - X_{As} = 0.978$

For $W_{Ga} = 1$ g , we will have $W_{GaAs} = 46.67$ mg

Structure II

P⁺ layer : Ga_{0.6}Al_{0.4}As 10¹⁹ cm⁻³ (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.4 at 800 °C we have

$$X_{Al} = 0.003$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.003$ at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.015$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10^{19} cm^{-3} at 800°C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

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

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{Al} = 1.2324 \text{ mg}$

$$W_{GaAs} = 33.034 \text{ mg}$$

$$W_{Ge} = 44.21 \text{ mg}$$

N⁻ layer : GaAs

From Fig. 4.3, referred to GaAs curve at 800°C we have

$$X_{As} = 0.022$$

Therefore we have $X_{Ga} = 1 - X_{As} = 0.978$

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{GaAs} = 46.67 \text{ mg}$

Structure III

P⁺ layer : Ga_{0.6}Al_{0.4}As 10^{19} cm^{-3} (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.4 at 800°C we have

$$X_{Al} = 0.003$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.003$ at 800°C we have

$$X_{As} = 0.015$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10^{19} cm^{-3} at 800°C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

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

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{Al} = 1.2324 \text{ mg}$

$$W_{GaAs} = 33.034 \text{ mg}$$

$$W_{Ge} = 44.21 \text{ mg}$$

P⁺ layer : Ga_{0.7}Al_{0.3}As 10^{19} cm^{-3} (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.4 at 800 °C we have

$$X_{Al} = 0.0019$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.0019$ at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.017$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10^{19} cm^{-3} at 800 °C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

Therefore, $X_{Ga} = 1 - X_{As} - X_{Al} - X_{Ge} = 0.9411$

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{Al} = 0.781 \text{ mg}$

$$W_{GaAs} = 37.473 \text{ mg}$$

$$W_{Ge} = 44.253 \text{ mg}$$

P⁺ layer : Ga_{0.8}Al_{0.2}As 10^{19} cm^{-3} (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.2 at 800 °C we have

$$X_{Al} = 0.0011$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.0011$ at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.018$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10^{19} cm^{-3} at 800 °C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

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

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{Al} = 0.4524 \text{ mg}$

$$W_{GaAs} = 39.688 \text{ mg}$$

$$W_{Ge} = 44.2625 \text{ mg}$$

P⁺ layer : Ga_{0.9}Al_{0.1}As 10^{19} cm^{-3} (Ge- doped)

Referred to Fig. 4.5, with atom Fraction of AlAs in the Solid = 0.1 at 800 °C we have

$$X_{Al} = 0.00025$$

From Fig. 4.6, with $X_{Al} = 0.003$ at 800 °C we have

$$X_{As} = 0.02$$

From Fig. 4.4, at Ge-doped level of 10^{19} cm^{-3} at 800°C we have

$$X_{Ge} = 0.04$$

Therefore, $X_{Ga} = 1 - X_{As} - X_{Al} - X_{Ge} = 0.93975$

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{Al} = .1667 \text{ mg}$

$$W_{GaAs} = 44.153 \text{ mg}$$

$$W_{Ge} = 44.316 \text{ mg}$$

N⁻ layer : GaAs

From Fig. 4.3, referred to GaAs curve at 800°C we have

$$X_{As} = 0.022$$

Therefore we have $X_{Ga} = 1 - X_{As} = 0.978$

For $W_{Ga} = 1 \text{ g}$, we will have $W_{GaAs} = 46.67 \text{ mg}$

4.2.3 Growth Processes

A layer thickness (or growth rate) for a system depends upon the mode of creating and relieving supersaturation, which in turn depends on the temperature program used during growth and the time at which the substrate contacts the growth solution during this program.

Of the various modes available, supercooling, ramp cooling, steady state, and transient mode LPE are the most often employed. In this research, epitaxial growth is performed in supercooling mode. Initially, the solutions are saturated at an initial temperature of 800°C for about 4 hours. In situ cleaning can be achieved by raising the temperature to 804°C and place the substrate below a solution. This causes the substrate surface layer to dissolve into the solution. Then, the solutions are supercooled by driving the furnace temperature down to a temperature below that at which the substrate and solutions are in equilibrium at cooling rate of $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$. After $\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$ of supercooling, growth commences when the substrate and solution contact each other

while the temperature program continuously decreases the temperature throughout the growth period.

The total layer thickness is a function of time given by [10]

$$d = K \left(\Delta T t^{1/2} + \frac{2}{3} \alpha t^{3/2} \right) \quad (4.6)$$

where K is the constant which is a function of concentration of As in the liquid

ΔT is the temperature change producing supersaturation condition, or super cooled temperature interval

α is the cooling rate.

For this experiment, $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ and α is about $0.167^\circ\text{C}/\text{min}$. By checking the thickness of the grown layers by Scanning Electron Microscope (SEM), we can adjust growing time duration for designed layer thickness. Figure 4.7 shows the diagram of the furnace temperature versus the growing time duration for one growth cycle.

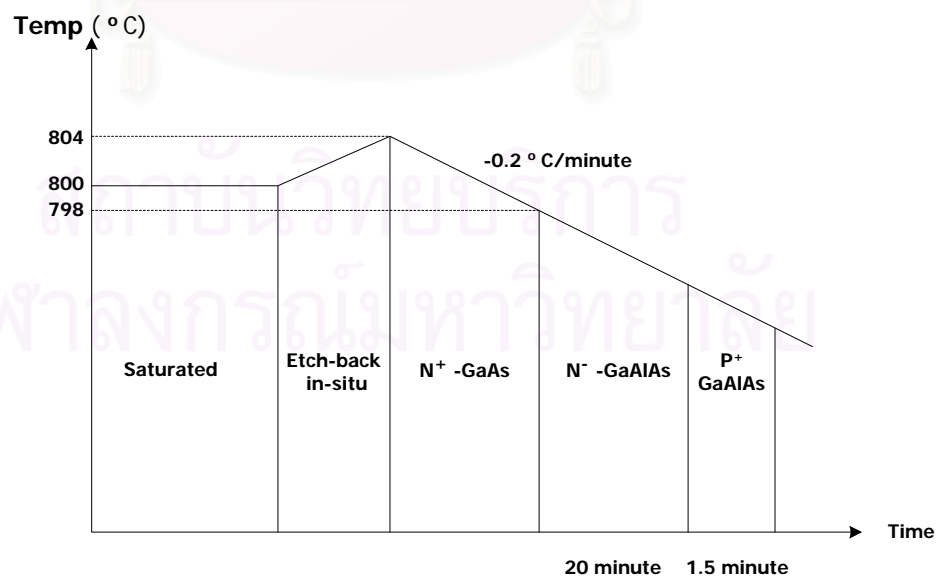


Fig. 4.7 The diagram of the furnace temperature versus the growing time duration

Before growth, the graphite boat is prebaked at 900°C for about 4 hours in a hydrogen atmosphere to get rid of moisture and contaminants. After growth, the grown layers are checked by using the Scanning Electron Microscope (SEM). If the desired layers are achieved, ultrasonic cleaning the sample in $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}$ (1:1) is done to remove the oxide layer and the left Ga from the surface, and then the sample is thoroughly washed and dried with N_2 gas.

4.2.4 Formation of Ohmic Contact

Thin conducting films are deposited on the both side of the sample to form the contacts by the processes as follows:

1. N^+ surface is deposited with AuGe and Ni of the thickness of 2500 \AA and 500 \AA , respectively.
2. P^+ surface is deposited with AuZn of the thickness of 2500 \AA .
3. Then, on the P^+ side, the photolithography procedure as follows are performed:
 - 1) To prepare the surface of the wafer for photoresist application, the wafer is pre-baked at 90°C for 3 minutes to evaporate moisture from the surface.
 - 2) The photoresist is spread on the substrate surface by spin-coating process and soft baked at 90°C for 7 minutes.
 - 3) The substrate is exposed to UV light using a mask of a desired configuration (Fig.4.8a) for 30 seconds.
 - 4) Photoresist is then developed by washing it in a positive developer + DI water (1:1) for 30 seconds.
 - 5) Thoroughly rinsing the substrate in DI water and then baking at 90°C for 30 minutes.
 - 6) Coating the back sides of substrates with wax and waiting until it is dry.

- 7) Etching AuZn in KI+I₂ and rinsing in DI water
 - 8) Removing wax and positive resist by washing in Trichloethylene and Acetone, respectively
 - 9) Finally, rinsing in DI water
4. Annealing at 450-500°C for 2 minutes in a forming gas 10% H₂+90%N₂ atmosphere.

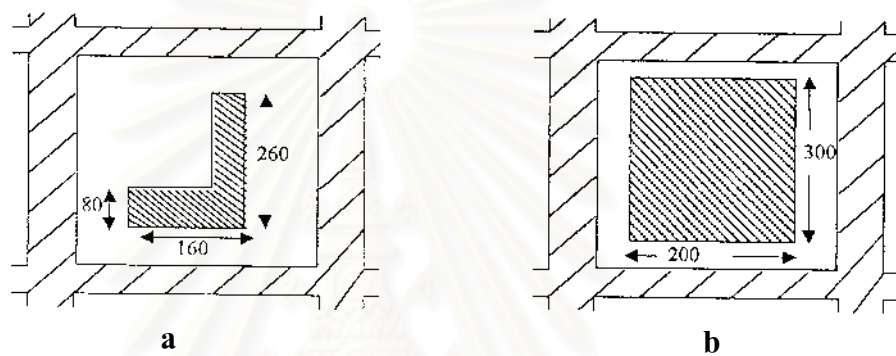


Fig. 4.8 Masks used in fabrication process (a) contact P⁺ (b) mesa structure

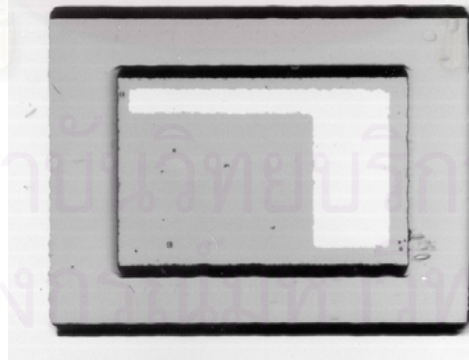


Fig. 4.9 A realized photodiode

4.2.5 Mesa Structure

The desired mesa structure is obtained by repeating the photolithography processes in step 3 of section 4.2.4 by using a mask shown in Fig.4.8b and then etching in $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}_2$ at 35-40°C for 3 minutes.

4.2.6 Bonding

The realized photodiodes as shown in Fig. 4.9 are separated by cleaving and soldered to the device mounts to provide contact to the back side. Then, the Al wire is bonded to the P^+ top contact.



CHAPTER 5

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

In the previous chapter, the fabrication processes of the heterojunction photodiode have been described. In this chapter, the measurement systems are discussed and followed by the experimental results, including the current-voltage characteristics and spectral response of the photodiodes.

5.1 Current-Voltage Characteristic

After finish all of fabrication processes, the basic parameters of the photodiode are determined from their current-voltage characteristics. The purpose of this measurement is not only to select the photodiodes for further spectral response measurement but also to provide their suitable operating points. Figure 5.1 shows the curve tracer and the probe station used for measuring the current-voltage characteristics of photodiodes.

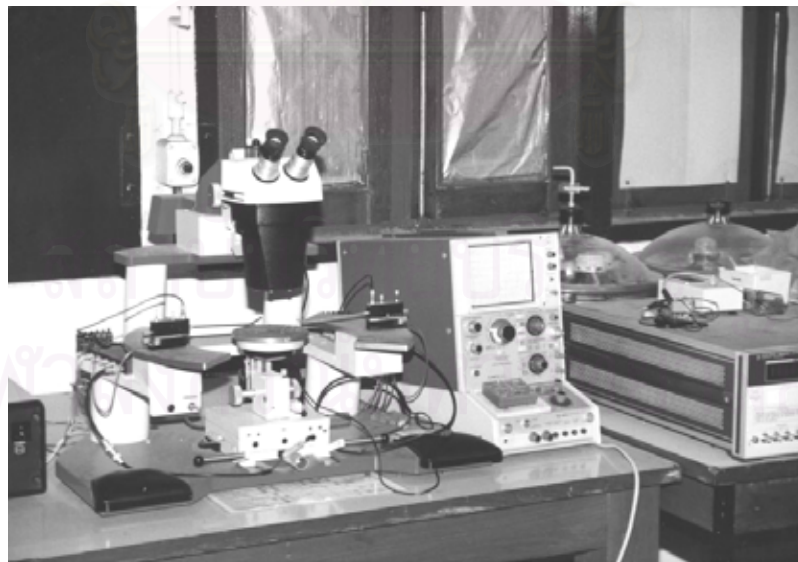
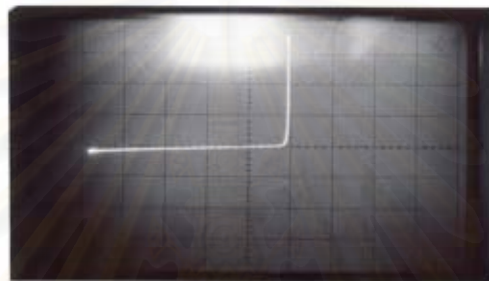


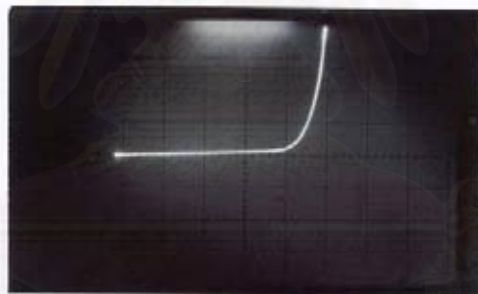
Fig. 5.1 The curve tracer and the probe station used in current-voltage characteristics measurement

Figure 5.2 shows the example of the I-V characteristics of the fabricated photodiodes. From the experiment, the cut-in voltage of Structure I is about 1-1.2 volts while those of Structure II and Structure III are both about 1.6-1.8 volts in proportional to the energy band gap of the $p^+-Ga_{1-x}Al_xAs/n^-GaAs$ heterojunction. The slope of the characteristics curve under forward bias condition (when the bias voltage is higher than cut-in voltage) of Structure I is more steep than that of Structure III. These results are probably due to a better ohmic contact in the former one since the resistance of the contact with $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ is lower than that of the contact with $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$.



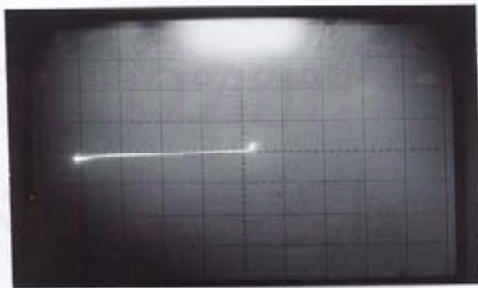
Horizontal scale : 1 V/Div

Vertical scale : 0.1 mA/Div



Horizontal scale : 2V/Div

Vertical scale : 20 μ A/Div



Horizontal scale : 10 V/Div

Vertical scale : 0.2 mA/Div

Fig. 5.2 Current-voltage characteristics of (a) Structure I (b) Structure III and (c) Structure III under reverse bias range

In the reverse bias region, the breakdown voltage of the structure III is about 40 volts as shown in Fig. 5.2c. Anyway, the breakdown voltages of the photodiodes are usually in a range of 15-20 volts depending on the doping concentration and the thickness of the n^- - GaAs layer.

5.2 The Spectral Response

For particular applications, the desired wavelength ranges to which the photodiodes respond are also different. Therefore, the spectral response is one of the most important characteristics that we are interested in. In this research, the measurement is performed in a simple way to study the spectral response of the fabricated photodiodes. A typical spectral response measurement system consists of:

- 1) Tungsten Lamp and Lamp Housing: used as light source
- 2) Lens: to focus and align the light to incident onto a photodiode
- 3) Monochromator: to transform the tungsten light into the monochromatic light at a desired wavelength
- 4) Sample Holder with Bias Circuit: for setting and biasing the sample
- 5) Autoranging Picoammeter: for collecting the photocurrent data
- 6) Power Supply: for biasing the measured sample and used as power supply of Tungsten lamp
- 7) Computer and Program: for controlling the measurement system and collecting the measured data
- 8) Optical Power meter: for measuring the power of the Tungsten lamp in the measured wavelength range

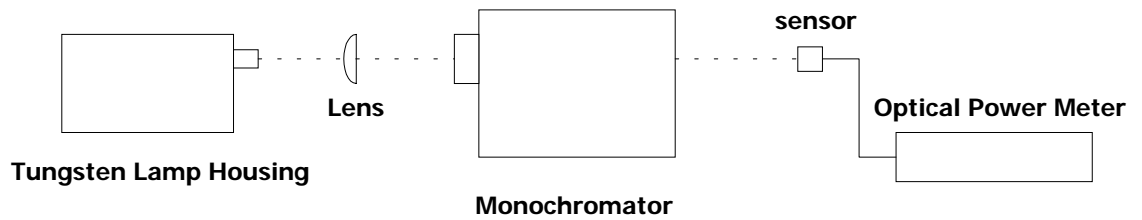


Fig. 5.3 A schematic of the lamp power measurement

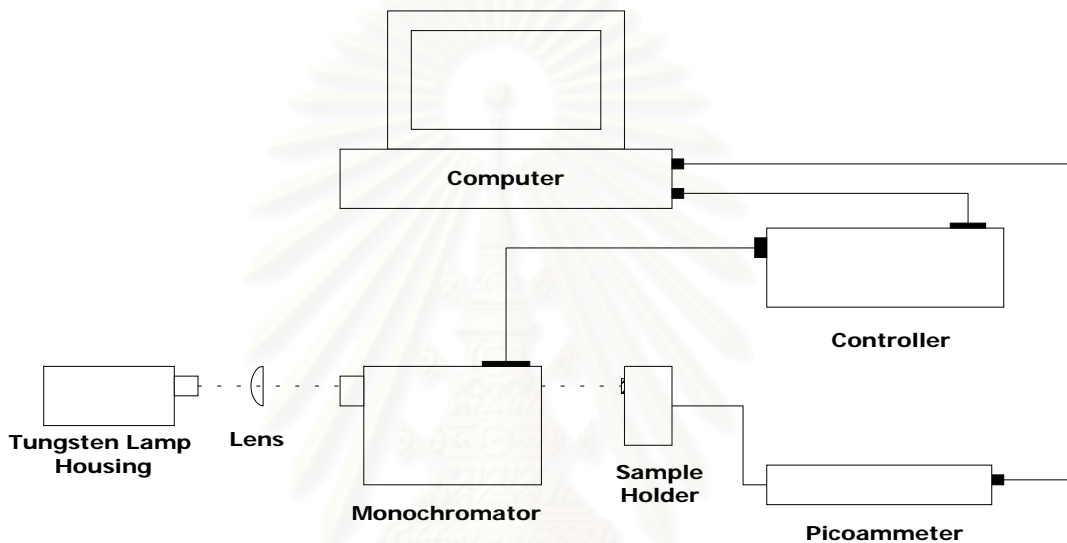


Fig. 5.4 A schematic of the spectral response measurement system.

During the spectral response studies, the tungsten lamp light was incident on the photodiode and the reverse bias voltage was kept constant at the optimum value. The measuring steps can be concluded as follows:

- 1) Prepare the selected photodiode for the spectral response measurement by cutting and soldering it into the device mount.
- 2) Check the breakdown voltage of the photodiode by using the curve tracer.
- 3) Set the lamp power measurement system as schematically shown in Fig. 5.3.
- 4) Measure the Tungsten lamp power in the wavelength range of 500-1100nm by using the optical power meter.

- 5) Set the measurement system as shown in Fig. 5.4 to perform the spectral response measurement.
- 6) Measure the spectral response of the photodiode by using the computer program to control the operation of the monochromator and collect the photocurrent data from the autoranging picoammeter. The measured wavelength range is from 500 nm to 900 nm.
- 7) Replace the measured photodiode with the other ones and repeat measuring step 6).
- 8) After finish measuring all of the fabricated photodiodes, do the measurement again for the commercial photodiode. This result will be used as the reference data.
- 9) Proceed the measured data by using software Microcal Origin.

In the data processing step, the measured photocurrent data is normalized by the power of Tungsten lamp at the corresponding wavelength. This is because the power of Tungsten lamp at each wavelength is different. Therefore, we will consider the sensitivity curves instead of the photocurrent curves. To assure the reliability of this measurement system, the measured result of the commercial photodiode is compared to the data in the data book. The similarity of these results will confirm us of the reliability of this measurement.

The spectral response of the photodiodes is measured when the bias voltage was kept constant at 1 V. The discernible photocurrent of the photodiodes is observed in the range of 400-875 nm. The sensitivity curves of each structure are shown in Fig. 5.5.

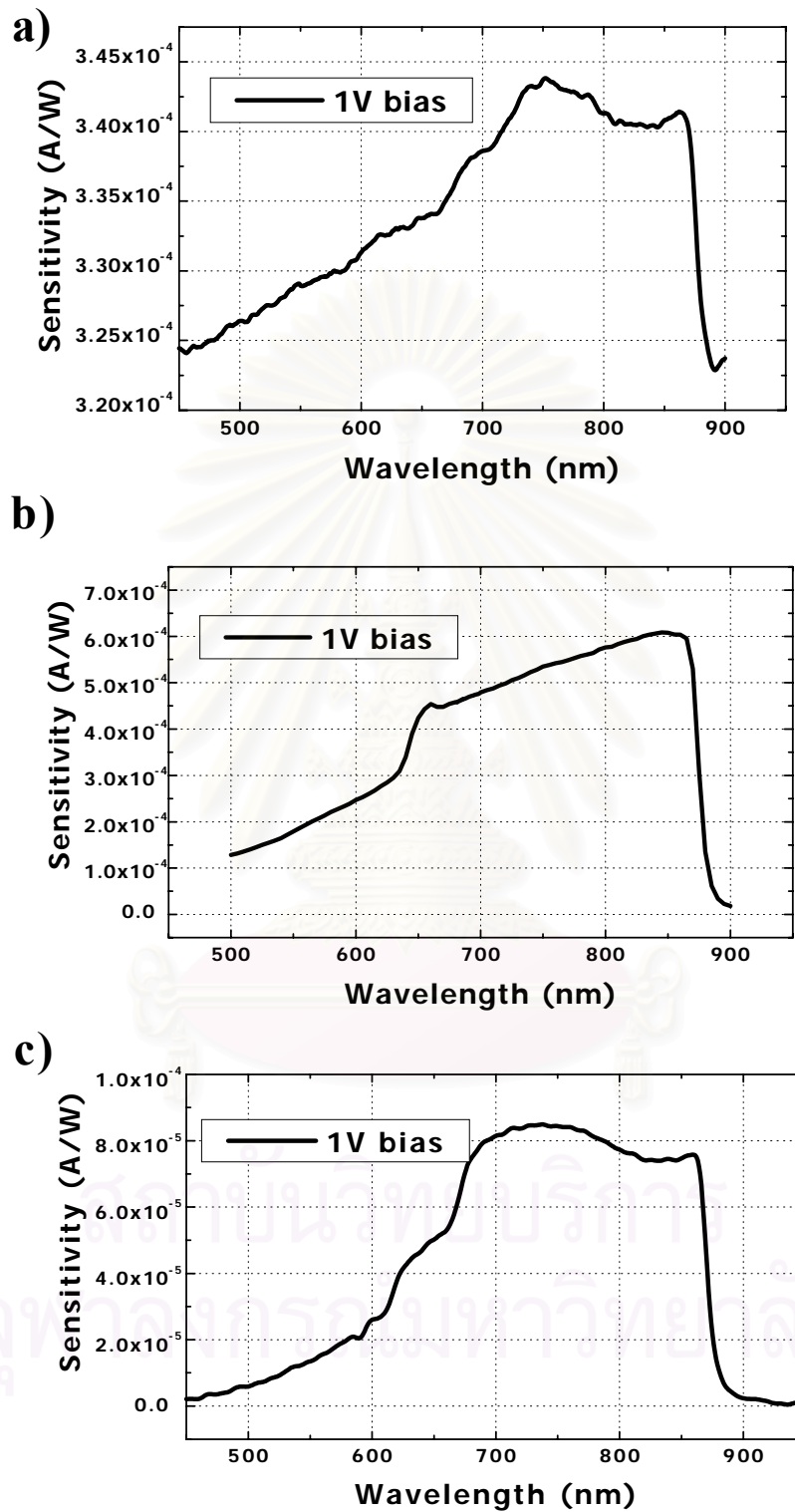


Fig. 5.5 The measured spectral response of (a) Structure I (b) Structure II and (c) Structure III

5.3 Discussions

Structure I $P^+Ga_{0.8}Al_{0.2}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode

As considered in the preceding chapters, the energy bandgap of the P^+ GaAlAs top layer and n- GaAs active layer define the absorption of the incident photons in the photodiode structure. Therefore, the wavelengths in which the changes of the photoresponse take place should be the wavelengths corresponding to the bandgap energy of these layers.

From Eq. (2.18) Bandgap Energy of $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ is 1.674 eV
corresponding wavelength is 743 nm

From Eq. (2.18) Bandgap Energy of $n^- GaAs$ is 1.425 eV
corresponding wavelength is 875 nm

But, as can be seen from Fig. 5.5a, the observed spectral response is low with the wavelengths less than ~ 725 nm. The photoresponse is increasing and almost constant in the wavelength range of ~ 725 nm to ~ 875 nm. But at the wavelengths more than ~ 875 nm, the spectral response drops considerably.

The wavelengths of 725 and 875 nm are corresponding to the bandgap energy 1.71 eV of $Ga_{0.77}Al_{0.23}As$ and 1.42 eV of GaAs, respectively. The deviation of Al content of 0.03 (0.23-0.2) could be occurred during the growth process.

Figure 5.6 shows power incident on the photodiode Structure I. According to the characteristics of the spectral response curve, the spectral response will be discussed in three wavelength ranges.

For wavelengths less than 725 nm (photon energy greater than 1.71 eV)

In this wavelength range, the photon energy is greater than the bandgap energy of the whole structure including the $P^+ Ga_{0.77}Al_{0.23}As$ top layer. Therefore, the incident power at the junction is considerably attenuated by the $P^+ Ga_{0.77}Al_{0.23}As$ layer. However, as shown in Fig. 5.6, some photons arrive at the active region and generate

the carriers that contribute to the measured current. Thus, the response is observed in this wavelength range.

For the wavelength range of ~ 725 nm to ~ 875 nm (photon energy between 1.71 eV and 1.42 eV)

The incident photons in this wavelength range can pass through the P^+ top layer without being attenuated, resulting in the high incident power at the junction (as shown in Fig. 5.6). The electron-hole pairs are generated and then contribute to drift current. Therefore, the higher response is observed in this range.

For the wavelengths longer than ~ 875 nm (photon energy less than 1.42 eV)

With the wavelengths longer than 875 nm, the incident photons will have energy less than the band gap energy of GaAs. Thus, there is no carriers generated in a whole structure leading to no spectral response observed in this range.

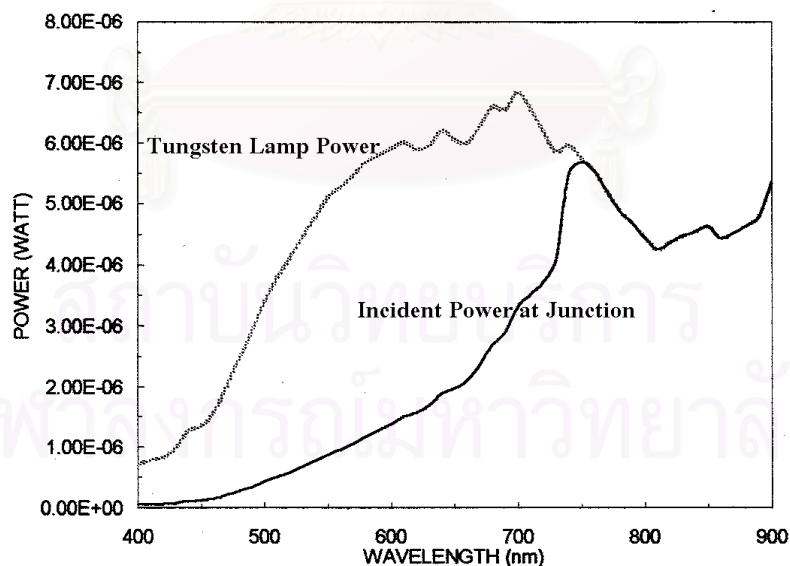


Fig. 5.6 The incident power at the junction of the structure I versus wavelength

Structure II $P^+Ga_{0.6}Al_{0.4}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode

Fig. 5.5b shows the sensitivity curve of the photodiode Structure II. The observed spectral response of this structure is very low with the wavelengths less than ~ 655 nm and in the range of ~ 655 nm to ~ 875 nm the photoresponse is high and linearly increasing. But, at wavelengths more than ~ 875 nm, the response drops drastically.

From Eq. (2.18) Bandgap Energy of $P^+Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ is 1.923 eV
 corresponding wavelength is 645 nm

From the observed results, we found that the cutoff wavelengths of the spectral response are 655 nm and 875 nm instead of 645 nm and 875 nm. The wavelength of 655 nm is corresponding to the band gap energy of $Ga_{0.62}Al_{0.38}As$. Therefore, the Al content deviation is equal to 0.02 (0.4-0.38) which is probably occurred during the growth process.

The spectral response of this structure is also explained in the same manner as that of the Structure I, as follows:

For wavelengths less than 655 nm (photon energy greater than 1.89 eV)

In this wavelength range, a large fraction of the incident power is attenuated in the P^+ layer due to absorption as shown in Fig. 5.7. Therefore, a few photons arrive the active n^-GaAs , resulting that a low response is observed in this range.

For the wavelength range of ~ 655 nm to ~ 875 nm (photon energy between 1.89 eV and 1.42 eV)

The incident power in this wavelength range can be transmitted to the junction without being attenuated as shown in Fig. 5.7. This causes a large amount of the electron-hole pairs to be generated and then collected as the photocurrent. Therefore, the high photocurrent is observed.

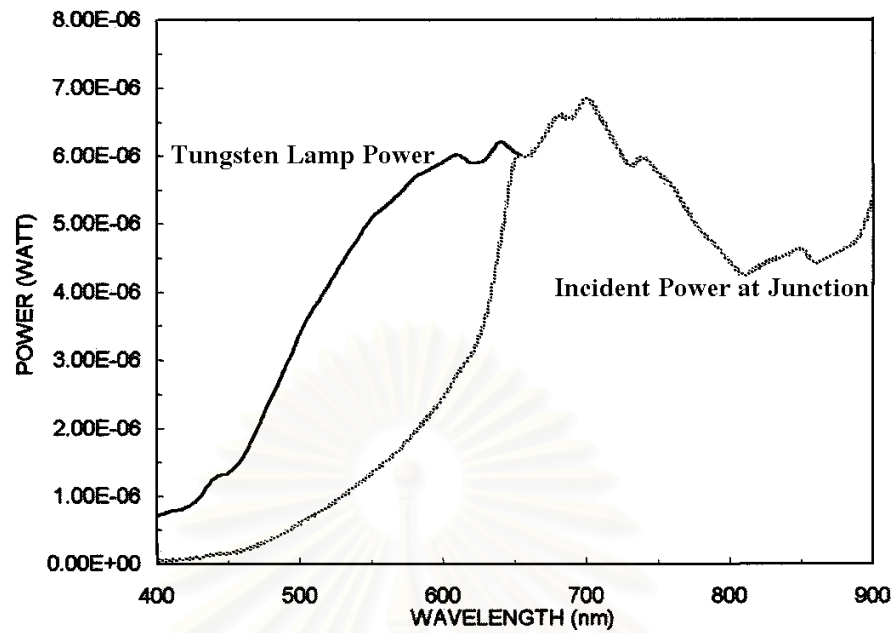


Fig. 5.7 The incident power at the junction of the structure II versus wavelength

For the wavelengths longer than ~ 875 nm (photon energy less than 1.42 eV)

We cannot observe the spectral response in this range because of no photogeneration in a whole structure

Structure III $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As/P^+-Ga_{0.7}Al_{0.3}As/P^+-Ga_{0.8}Al_{0.2}As/P^+-Ga_{0.9}Al_{0.1}As/n^-GaAs/n^+GaAs$ heterojunction photodiode

The measured spectral response of Structure III as shown in Fig. 5.5c is observed in a range of ~ 650 nm to ~ 875 nm, which is almost the same as that of Structure II. This observation is confirmed by the theoretical calculation result in section 3.3. The discussion of this spectral response can be done as follows:

For wavelengths less than 650 nm (photon energy greater than 1.9 eV)

In this range, the energy of the incident photons is higher than the band gap energy of the $P^+-Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ layer. Therefore, a great amount of light is absorbed in this layer and generates the electron-hole pairs. However, only the carriers generated in the half lower part of this layer can be drifted by the internal electric field (shown in Fig. 3.12)

resulting in drift current in the P^+ -Ga_{0.6}Al_{0.4}As in Fig. 3.19. However, some in the half upper part would recombine before contributing to photocurrent.

For the wavelength range of ~650 nm to ~689 nm (photon energy between 1.9 eV and 1.8 eV)

The incident light in this wavelength range would be absorbed in the P^+ -Ga_{0.7}Al_{0.3}As layer, resulting in the drift current shown in Fig. 3.19.

For the wavelength range of ~689 nm to ~743 nm (photon energy between 1.8 eV and 1.67 eV)

The incident light in this wavelength range would be absorbed in the P^+ -Ga_{0.8}Al_{0.2}As layer, resulting in the drift current shown in Fig. 3.19.

For the wavelength range of ~743 nm to ~800 nm (photon energy between 1.67 eV and 1.55 eV)

The incident light in this wavelength range would be absorbed in the P^+ -Ga_{0.9}Al_{0.1}As layer, resulting in the drift current shown in Fig. 3.19.

As discussed in the case of Structures I and II, 1 μm of four P^+ -GaAlAs layers cannot absorb all photons of energy more than 1.55 eV. Therefore, some photons arrive at the junction and generate the electron-hole pairs, conforming to the calculated results of Fig. 3.18.

For the wavelength range of ~800 nm to ~875 nm (photon energy between 1.55 eV and 1.42 eV)

In this wavelength range of the incident light, photons would be absorbed in the n^- -GaAs active layer. The photogenerated carriers are drifted by the electric field, resulting in the drift current in n^- -GaAs layer, conforming also to the early calculation of Fig. 3.18.

For the wavelengths longer than ~875 nm (photon energy less than 1.42 eV)

In this range, the incident photon energy is less than the band gap energy of the whole structure. Thus, there is no photoresponse in this range.

CHAPTER 6

CONCLUSIONS

In this work, a study on the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes has been done. Three different structures of heterojunction photodiodes are fabricated by Liquid Phase Epitaxy (LPE) 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 grown as the top layers of the photodiodes. The experimental results and the calculated results are found in reasonable agreement. All of the results can be concluded as follows.

1. The wavelength range of the spectral response of the constant bandgap top layer photodiode (Structures I and II) is determined by the bandgap difference of the heterojunction materials.
2. The spectral response of the $\text{P}^+\text{-Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{P}^+\text{-Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}/\text{n}^-\text{-GaAs}/\text{n}^+\text{-GaAs}$ heterojunction photodiode (Structure III) is observed in the range between ~ 650 nm and ~ 875 nm, similar to that of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ top layer photodiodes (Structure II). This result can be explained by considering the built-in electric field in the P^+ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ multilayers. Unless there is the built-in electric field in the P^+ layer, the observed spectral response of this structure should be similar to that of the $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ top layer photodiode. This is because, in principle, the short wavelength cutoff of the spectral response is established by the narrowest bandgap of the GaAlAs top layer.
3. The P^+ top layer of a photodiode plays two important roles. The first one is to restrict the short wavelength cutoff of the spectral response in the case of constant bandgap top layer photodiode whereas the

second one is to increase the sensitivity of a photodiode in a short wavelengths range in the case of graded bandgap top layer photodiode.

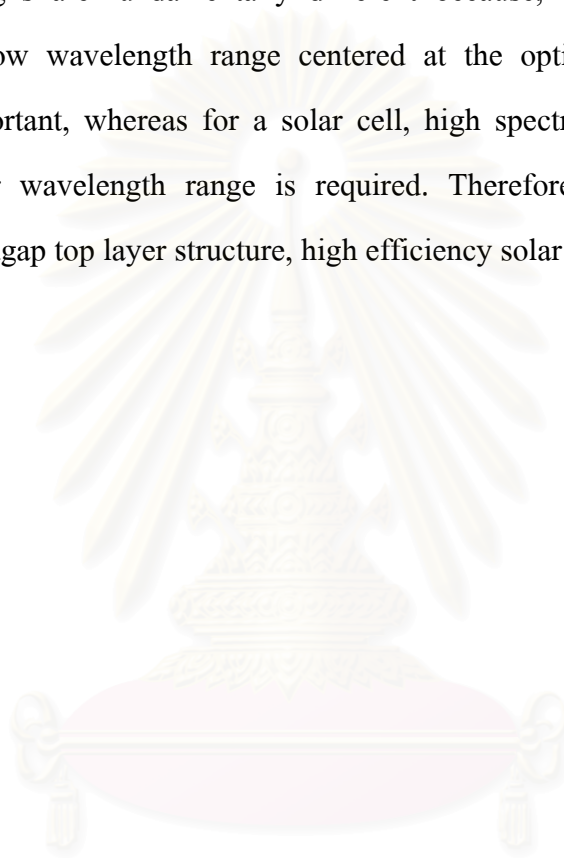
4. The sensitivity of a photodiode can be increased not only by improving the quality of the active layer but also by producing the graded bandgap P^+ top layer.

From the conclusions of this work, some suggestions for further work are given.

1. In this work, a study on the spectral response of GaAlAs/GaAs heterojunction photodiodes has been done. Anyway, the results from this study can be applied in a heterojunction photodiode that is fabricated from different semiconductor compounds.
2. With a suitable architectural design of window layer, high sensitivity narrow bandwidth spectral response photodetectors can be realized, for example, the inverse staircase emitter layer phototransistors.
3. In fact, in LPE, graded bandgap $Ga_{1-x}Al_xAs$ layers can be grown by using isothermal LPE techniques together with undersaturated solutions [11,12]. But, it was found very difficult to do in practice. Therefore, in this work we grow the multilayer of $Ga_{1-x}Al_xAs$ in which the Al content is gradually decreased layer by layer. Since the strength of the built-in electric field is determined by the thickness of these layers, it is desirable to grow these P^+ layers with the thickness as small as possible. Unfortunately, as mentioned in chapter 4, the drawback of LPE technique is an inability to grow the layer of thickness less than $0.1 \mu m$. This is why the thickness of each layer of $Ga_{1-x}Al_xAs$ layers is fixed at $0.25 \mu m$. Anyway, the growth techniques such as Molecular Beam Epitaxy (MBE) and Metal-Organic Chemical vapor Deposition (MOCVD) allow epitaxial layers to be grown one monolayer at a time. Therefore, by these techniques, we can grow the graded bandgap $Ga_{1-x}Al_xAs P^+$ layers with great precision and the strength

of the built-in electric field will be higher, leading to improved sensitivity of a photodiode.

4. This study is very useful not only for photodiodes, but also for solar cell work because the theory used here for heterojunction photodiode could easily be extended to heterojunction solar cells. Anyway, the device designs are fundamentally different because, for a photodiode, only a narrow wavelength range centered at the optical signal wavelength is important, whereas for a solar cell, high spectral response over a broad solar wavelength range is required. Therefore, by the use of graded bandgap top layer structure, high efficiency solar cells can be fabricated.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REFERENCES

- [1] Bhattacharya, P. Semiconductor Optoelectronic Devices, second edition. Prentice-Hall International, (1997): 358-364.
- [2] Adachi, S. J. Appl. Phys. 58 (1985) : R1.
- [3] Sugimoto, K., Nakajima, K., and Mizushima, Y. Band-Edge Emphasizing Photodetector Response. IEEE Transactions on Electron Devices 37(11) (1990): 2298-2302.
- [4] Milnes, A.G., and Feucht, D.L. Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions, Academic Press, (1972):1-114.
- [5] Grubin, H.L. High Field Transport and the Gunn Effect in AlGaAs/GaAs Structure. Properties of Aluminium Gallium Arsenide, Sadao Adachi (ed.), EMIS Datareview Series, The Institution of Electrical Engineers, UK (1993): 198
- [6] Dobaczewski, L., Langer, J.M., Lee, D., Pavese, L., Peaker, A.R., Saleemi, F. Carrier concentrations in AlGaAs. Properties of Aluminium Gallium Arsenide, Sadao Adachi (ed.), EMIS Datareview Series, The Institution of Electrical Engineers, UK (1993): 289-291.
- [7] Ahrenkiel, R.K., Grubin, H.L., Gupta, R., Hess, K., Patil, M.B., Ravaioli, U., Sakaki, H., Walukiewicz, W. Minority-carrier lifetime and diffusion length in AlGaAs. Properties of Aluminium Gallium Arsenide, Sadao Adachi (ed.), EMIS Datareview Series, The Institution of Electrical Engineers, UK (1993): 221-223.
- [8] Chavanapranee, T. P-I-N Photodiode, Senior Project, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Thailand, (1997)
- [9] Deesirapipat, Y. Fabrication and Study on the DC Characteristic of Zinc Doped Planar GaAlAs/GaAs Double Heterojunction BiPolar Transistor, Master

Thesis, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Thailand, (2000)

- [10] Pamplin, B.R. CrystalGrowth. second edition. Pergomon Press. (1980): 421-459.
- [11] Kodos, P., Powell, R.A., Spicer, W.E., and Pearson, G.L. Growth and Properties of graded band-gap $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers. Appl. Phys. Lett. 34(6) (1979): 366-368.
- [12] Kodos, P., and Pearson, G.L. Isothermal LPE growth of thin graded band-gap $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers. J. Appl. Phys. 50 (11) (1979): 6902-6906.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Appendix

This research has been submitted to Proceeding of the 24th Conference of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, November, 21-23 2001. The submitted paper is presented as follows.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs Spectral Response of GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiodes

ทศพร ชวนะปราณี ศุภโชค ไทยน้อย สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และชุมพล อันตรเสน
ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทร. (02) 218-6524 โทรสาร (02) 218-6524 E-mail : feecat@kankrow.eng.chula.ac.th.

บทคัดย่อ

โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs จำนวน 3 โครงสร้างได้ถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซีในสถานะของเหลว ด้วยชั้นรับแสงที่มีช่องว่างแถบพลังงานคงที่ที่ 1.674 eV และที่ 1.924 eV และมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงเชิงเส้นจาก 1.924 eV ถึง 1.55 eV ปรากฏว่าโฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานคงที่ มีผลตอบสนองทางแสงอยู่ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นทำงาน เนื่องจากมี Window Effect ส่งผลให้ค่ากระแสโฟโตที่สอดคล้องกันเกิดขึ้นในช่วง ~725 nm ถึง ~875 nm และในช่วง ~655 nm ถึง ~875 nm ในกรณีของชั้นรับแสง $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ และ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ตามลำดับ ในขณะที่โฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงนั้น ถึงจะมีการดูดกลืนแสงในบริเวณชั้นรับแสง ในช่วง 1.924 ถึง 1.55 eV แต่ก็ยังมีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วง 650-875 nm ซึ่งใกล้เคียงกับผลของโฟโตไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ แต่ความไวต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี พบว่าผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในชั้นรับแสงที่ช่วยพัดพาพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นรับแสงให้เคลื่อนที่ข้ามหัวต่อ

Abstract

Three different structures of GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiodes have been fabricated by Liquid Phase Epitaxy (LPE) Technology with the constant band gap absorbing layer of 1.674 eV and 1.924 eV and linear graded band gap of 1.924 to 1.55 eV. The constant band gap structures apparently response to the incident photon whose energy is in between of the surface layer and the active layer owing to window effect. As a result, the corresponding photocurrent occur in the range between ~725 nm and ~875 nm and between ~655 nm and ~875 nm in $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ and $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ top layer photodiodes, 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 ~650 nm to ~875 nm, similar to

that of $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ top layer photodiode but its sensitivity is lower. By comparison with the theoretical calculation, this result can be explained by considering that the photoexcited carriers in absorbing layers are drifted through the junction by the built-in electric field

Keywords: GaAlAs/GaAs heterojunction, photodiode, Liquid Phase Epitaxy, spectral response, graded band gap

1. บทนำ

โฟโตไดโอดชนิดหัวต่อพี-เอ็นที่มาจากสารกึ่งตัวนำตระกูล GaAs, InP หรือ HgCdTe อยู่ในความสนใจในการประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารทางแสงในปัจจุบัน ซึ่งสมรรถนะของโฟโตไดโอดชนิดนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของชั้นรับแสงเป็นอย่างมาก โครงสร้างหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดก็คือโครงสร้างหัวต่อต่างชนิด(Heterojunction) เนื่องจากชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่าชั้นทำงาน ทำให้มีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงของช่องว่างแถบพลังงานทั้งสอง เนื่องจาก Window Effect ทำให้ความไว (Sensitivity) ของผลตอบสนองทางแสงเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือสิ่งประดิษฐ์จะไม่มีผลตอบสนองต่อแสงที่มีค่าพลังงานสูง เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสง ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากที่ชั้นผิว ซึ่งจะรวมตัวกลับเนื่องจากมีความเร็วในการรวมตัวสูงมากที่ผิว ในการที่จะเพิ่มความไวของสิ่งประดิษฐ์ทางด้านแสงพลังงานสูงให้มากขึ้นนั้นสามารถกระทำได้โดยใส่สนามไฟฟ้าในชั้นผิวเพื่อขับเคลื่อนคู่อิเล็กตรอน-โฮลออกจากชั้นผิวเข้าสู่ชั้นทำงานให้ได้ไว้วกว่าความเร็วในการรวมตัว ซึ่งการใส่สนามไฟฟ้าลดคร่อมชั้นผิวหรือชั้นหน้าดังนั้นสามารถกระทำได้โดยอาศัยกระบวนการปลูกผลึกชั้นผิวให้มีช่องว่างแถบพลังงานแปรเปลี่ยนตามระยะทาง โดยค่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงจากชั้นผิวสู่ด้านล่าง จะสามารถช่วยขับเคลื่อนพาหะออกจากกันและช่วยลดโอกาสในการรวมตัวกลับของพาหะในชั้นหน้าต่างได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือการศึกษาผลตอบสนอง

ทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs ชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างพลังงานคงที่และชนิดที่มีช่องว่างพลังงานแบบลาดเอียงที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีการปลูกผลึกแบบเอพิแทกซีในสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy) เพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด



ในสภาวะมืด เมื่อโฟโตไดโอดถูกไบแอสกลับทางนั้น กระแสที่ไหลจะมีเพียงกระแสที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลบริเวณหัวต่อที่เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อน ซึ่งมีค่าน้อยมากและไม่ขึ้นกับขนาดแรงดันที่ไบแอส แต่ทั้งนี้อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเพิ่มขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือโฟตอน ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวต่อจะเป็นปฏิภาคกับความเข้มแสง โดยแสงจะต้องมีพลังงานของโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นชั้นทำงานของโฟโตไดโอด เมื่อทำการไบแอสสิ่งประคิษฐ์ แรงดันที่ใส่เข้าไปเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมย่านทำงาน ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ถูกพัดพา (Drift) โดยสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อม ส่วนพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นในย่านเป็นกลางภายในระยะแพร่ซึม (Diffusion Length) จะอาศัยการแพร่ซึม (Diffusion) ของพาหะมายังบริเวณหัวต่อ จากนั้นจึงถูกสนามไฟฟ้าในย่านปลอดพาหะพัดพาไปยังอีกด้านหนึ่ง ผลของการเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางย้อนกลับของไดโอด (ออกทางขั้ว p⁺) และเมื่อรวมกระแสมืด (Dark Current) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

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

- เมื่อ I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Saturation Current)
- q คือประจุอิเล็กตรอน
- V คือแรงดันที่บริเวณหัวต่อ
- n คือ Ideality Factor ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 กับ 2
- k คือค่าคงที่ของ Boltzmann
- T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
- I_p คือ Photocurrent ที่ถูกกระตุ้นจากแสง

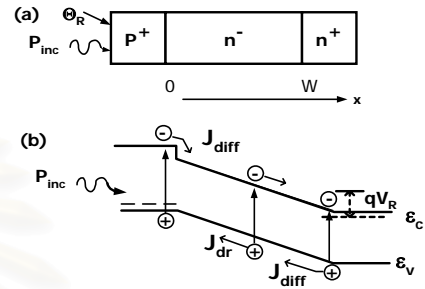
เมื่อทำการไบแอสกลับทางด้วยแรงดันที่มีค่ามากพอที่จะทำ

ให้ $\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \ll 1$ จึงทำให้กระแสรวมของโฟโตไดโอด มีค่า

เท่ากับ

$$I = -(I_0 + I_p) \tag{2}$$

นั่นคือกระแสรวมที่ได้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มแสง เราจึงสามารถใช้โฟโตไดโอดในการตรวจจับแสง โดยอาศัยการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 1 การดูดกลืนแสงและการเกิดพาหะในโฟโตไดโอด

เนื่องจากพาหะที่เกิดขึ้นจากแสงจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการพัดพาและการแพร่ซึมดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสภายใต้การไบแอสกลับทาง จะประกอบด้วยความหนาแน่นกระแสส่วนพัสดุรวมกับความหนาแน่นกระแสส่วนแพร่ซึม โดยจะละผลของ Thermal Generation ในส่วนของย่านแปรเปลี่ยนและการดูดกลืนในชั้น P⁺ ที่อยู่บนสุดเนื่องจากมี Window Effect ค่ากระแสพัสดุ (J_{dr}) เมื่อ W คือความกว้างของชั้น n⁻ จะเขียนได้ดังนี้ [1]

$$J_{dr} = -q\phi_0 (1 - e^{-\alpha W}) \tag{3}$$

โดย ϕ_0 คือ Incident Photon Flux (photon/(sec·cm²))
 α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

ในส่วนของกระแสแพร่ซึม เราสนใจเฉพาะการแพร่ซึมของโฮลที่เกิดขึ้นในชั้น n⁺ ดังนั้นจากการแก้สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) ของโฮล (p) ที่สภาวะอยู่ตัวซึ่งรวมการเกิด (Generation) และการรวมตัว (Recombination) จะได้ว่า [1]

$$p_n = p_{n0} - (p_{n0} + C e^{-\alpha W}) e^{-(W-x)/L_h} + C e^{-\alpha x} \tag{4}$$

โดยที่ $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$ (5)

$$C = \frac{\phi_0 \alpha L_h^2}{D_h (1 - \alpha^2 L_h^2)} \tag{6}$$

กระแสแพร่ซึม (J_{diff}) หาได้จาก

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

$$= -q\phi_0 \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} e^{-\alpha W} - qp_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (7)$$

รวมสมการ (3) และ (7) เข้าด้วยกันจะได้กระแสรวมสุทธิ (J) เป็น

$$J = -q\phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_h} \right) - qp_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (8)$$

ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานปกติ พจน์ที่ 2 ในสมการ (8) จะมีค่าน้อยมากพอๆ กับค่า p_{n0} ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ค่ากระแสรวมสุทธิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแสงที่ตกกระทบ ซึ่งเป็นผลตามที่คาดไว้

2.2 สมรรถนะการทำงานของโฟโตไดโอด

ความกว้างของเขตปลอดพาหะนั้นจะมีผลอย่างมากต่อความเร็วในการตอบสนองและความไวของโฟโตไดโอด กล่าวคือเพื่อให้ความเร็วในการตอบสนองของสิ่งประดิษฐ์สูง ความกว้างของเขตปลอดพาหะควรมีค่าน้อยที่สุดเพื่อเป็นการลดเวลาขนถ่าย (Transit Time) ของพาหะเพราะความเร็วในการตอบสนองขึ้นกับเวลาที่อิเล็กตรอนและโฮลใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และ p^+ ตามลำดับ ในด้านความไวในการตอบสนองนั้นพบว่า เมื่อแสงตกกระทบบนผิวของชั้น p^+ ค่า Optical Generation Rate ที่ระยะทาง x ที่แสงจะลึกเข้าไปในเนื้อสารจะลดลงเนื่องจากการดูดกลืน เป็นผลให้ความไวลดลง โฟโตไดโอดที่ดีจะถูกออกแบบให้แสงส่วนใหญ่ตกลงบนบริเวณเขตปลอดพาหะ ซึ่งทำได้โดยชั้น p^+ จะต้องบาง มากๆ และผนวก Window Effect เข้าช่วย กล่าวคือทำการสร้างหัวต่อ p^+n แบบหัวต่อต่างชนิดโดยให้ชั้น p^+ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มี Bandgap Energy สูงกว่า Bandgap energy ของบริเวณเขตปลอดพาหะ ทำให้แสงส่วนที่มีพลังงานน้อยกว่า Bandgap Energy ของชั้น p^+ สามารถทะลุผ่านชั้น p^+ โดยไม่ถูกดูดกลืน

2.3 ช่องว่างแถบพลังงานของ $Ga_{1-x}Al_xAs$ และ Window Effect

ปรากฏการณ์ Window Effect ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด จะอาศัยหลักการผลิตโฟโตไดโอดจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยสารที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่าทำหน้าที่เป็นชั้นรับแสงส่งผ่านพลังงานแสงไปยังชั้นทำงานได้โดยตรง ทำให้การดูดกลืนแสงทั้งหมดเกิดในชั้นทำงาน โฟโตไดโอดหัวต่อต่าง

ชนิดของ $GaAlAs/GaAs$ ซึ่งมีชั้น p^+ ของ $Ga_{1-x}Al_xAs$ เป็น Window Layer สำหรับส่งผ่านพลังงานแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของ $Ga_{1-x}Al_xAs$ ไปชั้นทำงาน (n GaAs) ได้โดยไม่เกิดการลดทอนกำลังงาน $Ga_{1-x}Al_xAs$ เป็นสาร ประกอบ 3 ธาตุ (Ternary Alloy) ที่มีค่าช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) เมื่อ $x < 0.45$ ตามสมการ [2]

$$E_g = 1.425 + 1.247x \quad (9)$$

เมื่อ x คือ เศษส่วนอะตอมของ Al ใน $GaAlAs$ ในทางปฏิบัติกำลังงานแสงที่ตกกระทบ (P_{inc}) ชั้นปลอดพาหะจะถูกดูดกลืนโดยชั้นรับแสง ($p^+ Ga_{1-x}Al_xAs$) ก่อนตามสมการ $P_{inc} = P_0 e^{-\alpha d}$ เมื่อ P_0 คือกำลังของแหล่งกำเนิดแสง (watt) α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1}) และ d คือ ความหนาของชั้นผิวบน (cm)

2.4 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ GaAs และ GaAlAs

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient; α) ของ GaAs และ GaAlAs จะเปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานโฟตอนตามสมการดังนี้ [3]

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

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

E_g คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs หรือ GaAlAs

E_a คือ $E_g + 0.005$ eV

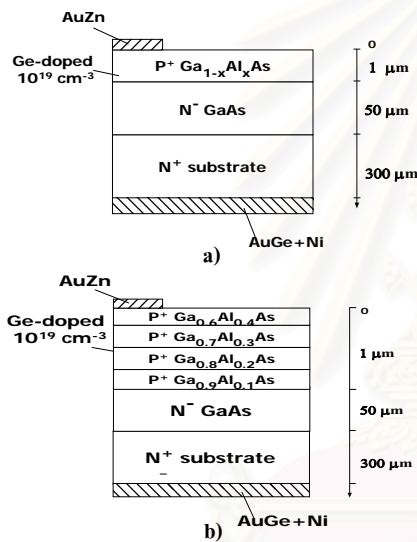
E_b คือ $E_g - 0.0526$ eV

3. วิธีการผลิต

โครงสร้างที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็น Depletion Layer Photodiode คือมีชั้น Nondoped (n) อยู่ระหว่างชั้น p^+ และ n^+ โดยอาศัยวิธีการปลูกผลึกแบบ LPE ซึ่งเป็นการปลูกชั้นผลึกภายใต้จุดสมดุลอุณหภูมิ (Thermal Equilibrium) โดยโครงสร้างที่ 1 และ 2 จะมีลักษณะเป็นโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ $GaAlAs/GaAs$ ชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างพลังงานคงที่ โครงสร้างจะประกอบด้วยชั้นรับแสงของ p^+ - $GaAlAs$ ($Ge: 1 \times 10^{19} cm^{-3}$) หนา $1 \mu m$ โดยมีสัดส่วนอลูมิเนียม x เป็น 0.2 และ 0.4 ในโครงสร้างที่ 1 และ 2 ตาม

ลำดับ ชั้นถัดมาจะเป็นย่านปลอดพาหะของ n⁻ GaAs หนา 50 μm ส่วนของชั้นสุดท้ายจะเป็นชั้นของแวนดัลิก n⁺-GaAs (Si: 5×10¹⁸ cm⁻³) หนาประมาณ 300 ไมโครเมตร ผิวสัมผัสไอโหม่มิกของชั้น P⁺ จะฉาบด้วย AuZn ส่วนของชั้น n⁺ จะฉาบด้วย AuGe+Ni ดังแสดงในรูปที่ 2a)

โครงสร้างที่ 3 จะออกแบบให้มีลักษณะเช่นเดียวกับทั้งสองโครงสร้างแรกแต่ในส่วนของชั้นรับแสง P⁺ - Ga_{1-x}Al_xAs จะมีลักษณะเป็น multilayer คือประกอบด้วย 4 ชั้นของ Ga_{0.6}Al_{0.4}As Ga_{0.7}Al_{0.3}As Ga_{0.8}Al_{0.2}As และ Ga_{0.9}Al_{0.1}As ตามลำดับ โดยแต่ละชั้นมีความหนา 0.25 μm และมีปริมาณสารเจือของ Ge 10¹⁹ cm⁻³ เท่ากันหมด โดยโครงสร้างนี้จะมีลักษณะคล้ายกับ Graded Band Gap ของ Ga_{1-x}Al_xAs ที่ x แปรจาก 0.4 ไปยัง 0.1 เราจึงเรียกโฟโตไดโอดชนิดนี้ว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างพลังงานลาดเอียง (Graded Band Gap) ภาพสเก็ทของโครงสร้างที่ 3 แสดงไว้ในรูปที่ 2b)

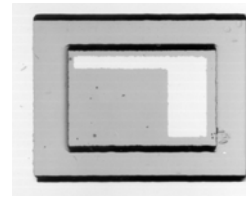


รูปที่ 2 โครงสร้างโฟโตไดโอดที่ทำการผลิต (a) โครงสร้างที่ 1 (x=0.2) และ โครงสร้างที่ 2 (x=0.4) (b) โครงสร้างที่ 3

โฟโตไดโอดที่ได้จากการผลิตจะถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน เพื่อทราบจุดทำงานที่เหมาะสม จากนั้นคัดเลือกสิ่งประดิษฐ์ที่จะนำไป Packaging เพื่อวัดผลตอบสนองทางแสงด้วยชุด Monochromator and autoranging picoammeter ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป รูปที่ 3 แสดงภาพด้านหน้าของโฟโตไดโอดที่ผลิตได้ เมื่อถ่ายด้วย Optical Microscope โดยมีพื้นที่ทำงาน 200×300 μm²

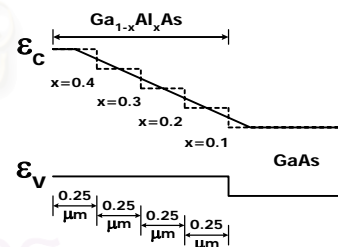
4. การคำนวณผลตอบสนองทางแสง

การคำนวณผลตอบสนองทางแสงทำให้สามารถทำการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ได้อย่างเหมาะสมและสามารถนำผลที่คำนวณ



รูปที่ 3 ภาพด้านหน้าของโฟโตไดโอดที่ผลิตได้

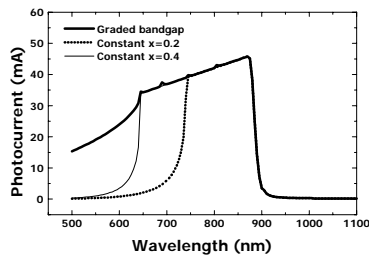
ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายหลัง ในการคำนวณขีดถี่ทฤษฎีพื้นฐานในหัวข้อ 2.1 เป็นหลัก โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณโฟโตไดโอดทุกโครงสร้างจะกำหนดให้กำลังแสงตกกระทบบริเวณหน้ามีค่าคงที่ที่ 3.5×10⁻⁵ วัตต์ ทุกค่าความยาวคลื่นเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบผลตอบสนอง จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง GaAlAs และชั้นทำงาน GaAs ทำให้สามารถคำนวณค่ากำลังแสงที่สามารถกระทบบริเวณชั้นทำงาน (Active Layer) ของโฟโตไดโอดได้จากนั้นคำนวณค่ากระแสพัลพาและกระแสแอมป์ซิมที่เกิดขึ้นในชั้นทำงานและชั้น GaAs (n⁺) ล่างสุด สำหรับกรณีของโฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap อิเล็กตรอนส่วนที่ถูกกระตุ้นด้วยกำลังแสงส่วนที่ถูกดูดกลืนในชั้นรับแสง จะถูกพัดพาข้ามหัวต่อด้วยสนามไฟฟ้าของชั้นฉนวนไดโอด โนโลมค่าสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้ผลตอบสนองทางแสงมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นสั้น รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณของโฟโตไดโอด 3 โครงสร้าง



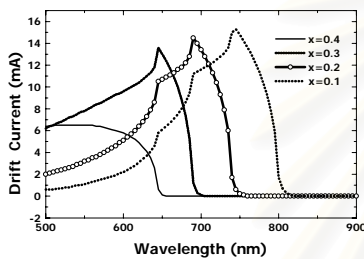
รูปที่ 4 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นฉนวน

จากผลการคำนวณ จะเห็นว่าโฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap GaAlAs ในโครงสร้างที่ 3 เมื่อคิดผลของสนามไฟฟ้าภายในของชั้นฉนวนพบว่าผลตอบสนองทางแสงมีลักษณะผลตอบสนองใกล้เคียงกับผลตอบสนองของโครงสร้างที่ 2 แต่จะมีผลตอบสนองในช่วงแสงพลังงานสูงสูงกว่า เนื่องจากมีส่วนของกระแสพัลพาที่เกิดขึ้นรับแสงมาเสริม รูปที่ 6 แสดงผลการคำนวณค่ากระแสพัลพาในแต่ละชั้นรับแสง GaAlAs ในโครงสร้างที่ 3 แต่ถ้าไม่พิจารณาผลของสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแล้ว ผลตอบสนองของโฟโตไดโอดโครงสร้างนี้จะมีลักษณะเหมือนโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดของ Ga_{0.9}Al_{0.1}As (P⁺)/GaAs (n⁻)

เนื่องจากชั้นรับแสงที่มีช่องว่างพลังงานแคบที่สุดจะเป็นตัวกำหนดค่าพลังงานสูงสุดที่สามารถทะลุถึงหัวต่อได้



รูปที่ 5 กราฟผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดทั้ง 3 โครงสร้าง

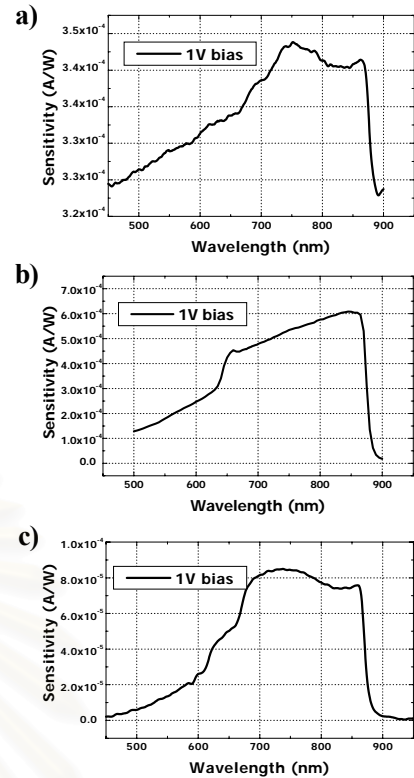


รูปที่ 6 ผลการคำนวณกระแสพัลส์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นรับแสง GaAlAs ในโฟโตไดโอดชนิด Graded Band Gap GaAlAs

5. การอภิปรายผลการทดลอง

จากการวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการผลิต พบว่ามีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400-875 nm ดังแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 a) ซึ่งแสดงผลตอบสนองของโครงสร้างที่ 1 (เศษส่วนอะตอมของ Al; $x = 0.2$) พบว่ามีค่าความไวในการตอบสนองค่อนข้างต่ำที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 725 nm และมีผลตอบสนองสูงในช่วง 725-875 nm จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นมากกว่า 875 nm เมื่อพิจารณาค่า Bandgap Energy ของชั้น $P^+ Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ และชั้น $n^- GaAs$ มีค่าเท่ากับ 1.674 eV และ 1.425 eV หรือสอดคล้องกับความยาวคลื่น 743 nm และ 875 nm ตามลำดับ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นที่แบ่งช่วงผลตอบสนอง 2 ช่วงแรกน่าจะมีค่า 743 nm เพื่อให้สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As (P^+)$ แต่จากการทดลองพบว่าอยู่ที่ค่าความยาวคลื่น 725 nm ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน 1.71 eV ของชั้นหน้าต่าง $Ga_{0.77}Al_{0.23}As (P^+)$ ซึ่งค่าความต่างของปริมาณ Al = 0.03 (0.23-0.2) อยู่ในวิสัยที่จะเกิดขึ้นได้จากการปลูกผลึก



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางแสงที่วัดได้ใน a) โครงสร้างที่ 1 b) โครงสร้างที่ 2 c) โครงสร้างที่ 3

จากผลตอบสนองที่วัดได้เราสามารถอธิบายผลตอบสนองที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ ในช่วงความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 725 nm (พลังงานโฟตอนมากกว่า 1.71 eV) แสงในช่วงนี้จะมีค่าพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสง P^+ ทำให้เกิดการลดทอนกำลังงานขึ้นจึงมีเพียงโฟตอนที่มีค่าพลังงานต่ำกว่า 1.71 eV เท่านั้นที่สามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าในชั้นทำงาน แต่ยังคงมีส่วนของกระแสแพร่ซึมเล็กน้อยที่ได้จากพาหะข้างน้อยซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงในชั้นรับแสง GaAlAs บริเวณใกล้รอยต่อที่ไม่ไกลกว่าความยาวแพร่ซึมของพาหะ ค่ากระแสขาออกในช่วงความยาวคลื่นแสงระหว่าง 725-875 nm จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากชั้น $P^+ Ga_{0.77}Al_{0.23}As$ จะทำหน้าที่เป็นเพียง Window Layer ส่งผ่านแสงโดยไม่ถูกลดทอนหรือดูดกลืน ทำให้โฟตอนทั้งหมดถูกดูดกลืนในชั้นทำงานตามที่ออกแบบ เกิดการกระตุ้นพาหะอิสระจำนวนมากซึ่งถูกสนามไฟฟ้าพัลส์พาหะนำหัวต่อได้เป็นกระแสขาออก (Photocurrent) ค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นแสง > 875 nm โฟโตไดโอดจะไม่ดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นนี้ เนื่องจากแสงมีค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs (1.425 eV) ดังนั้นจะไม่เกิดการกระตุ้นพาหะนำไฟฟ้าใดๆ

ผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2 (เศษส่วนอะตอมของ Al; $x = 0.4$) ดังแสดงในรูป 7 b) มีลักษณะผลตอบที่คล้ายกับของโครงสร้างที่ 1 คือ มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างต่ำที่ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 655 nm จากนั้นจะมีค่าสูงระหว่าง

ความยาวคลื่น 655-875 nm และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นแสงมากกว่า 875 nm ซึ่งสามารถอธิบายได้ เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 1 แต่มีข้อแตกต่าง ตรงความยาวคลื่นที่แบ่งช่วงผลตอบสนอง 2 ช่วงแรกเคลื่อนที่ไปที่ความยาวคลื่น 655 nm ซึ่งสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงานของ $\text{Ga}_{0.62}\text{Al}_{0.38}\text{As}$ (P^+) แทนที่จะเป็น 645 nm ซึ่งสอดคล้องกับแถบพลังงานของ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (P^+) ความคลาดเคลื่อนของปริมาณอลูมิเนียม $\cong 0.02$ (0.4-0.38) อยู่ในวิสัยที่จะเกิดขึ้น ได้จากการปลูกผลึกเช่นเดียวกับกรณีของโครงสร้างแรก

จากรูปที่ 7 c) พบว่าโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 3 จะมีลักษณะผลตอบสนองทางแสงคล้ายกับของโครงสร้างที่ 2 กล่าวคือมีช่วงกว้าง (Bandwidth) ของผลตอบสนองอยู่ระหว่าง 650-875 nm สอดคล้องกับผลการคำนวณที่ได้ โดยสามารถแบ่งช่วงของผลตอบสนองทางแสงออกเป็นช่วงๆ คือ เมื่อความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 650 nm หรือพลังงานโฟตอนมากกว่า 1.924 eV แสงจะมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของ $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (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 ส่วนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงระหว่าง 650-689 nm, 689-743 nm และ 743-800 nm จะถูกดูดกลืนโดยชั้น $\text{P}^+ \text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, ชั้น $\text{P}^+ \text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ และชั้น $\text{P}^+ \text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ ตามลำดับ ซึ่งแสงที่ถูกดูดกลืนในแต่ละชั้นจะกระตุ้นให้เกิดพาหะซึ่งจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาเช่นกัน ส่วนความยาวคลื่นแสงระหว่าง 800-875 nm หรือพลังงานโฟตอนช่วง 1.55-1.42 eV จะถูกดูดกลืนโดยชั้นทำงาน GaAs (n) และถูกพัดพาโดยสนามไฟฟ้าในชั้นทำงาน ส่วนแสงในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 875 nm จะไม่เกิดการดูดกลืนแสงขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของ GaAs แต่อย่างไรก็ตามผลตอบสนองของ โครงสร้างนี้มีความไวในการตอบสนองที่ต่ำกว่าโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานครั้งที่ 1.924 eV ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจริงในชั้นรับแสงไม่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น [2] ทำให้พาหะที่เกิดขึ้นในชั้นรับแสงบางส่วนไม่ได้ถูกพัดพาด้วยสนามไฟฟ้ามายังชั้นทำงาน แต่เกิดการรวมตัวขึ้นที่บริเวณชั้นรับแสง ทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างนี้ต่ำกว่าของโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ 2

6. ข้อสรุป

โฟโตไดโอดชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานครั้งที่ 1 จะมีผลตอบสนองทางแสงอยู่ในช่วงของช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงกับช่องว่างแถบพลังงานของชั้นทำงาน ดังผลการทดลองของโครงสร้างที่ 1 และ 2 แต่โฟโตไดโอดชนิดที่ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานแบบลาดเอียงจาก 1.924 eV ที่ผิวถึง 1.55 eV ที่บริเวณหัวต่อจะมีช่วงผลตอบสนองทางแสงใกล้เคียงกันกับโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงาน

ครั้งที่ 1.924 eV ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าในชั้นรับแสงมีส่วนร่วมในการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดนี้ด้วย ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่มีบทบาทใดๆ โฟโตไดโอดชนิดนี้จะมีผลตอบสนองทางแสงใกล้เคียงกับโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานครั้งที่ 1.55 eV ($\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ (P^+)/GaAs (n) Heterojunction photodiode) เนื่องจาก Multilayer ของชั้นรับแสงมีชั้น $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ เป็นชั้นล่างสุดและมีช่องว่างพลังงานแถบที่ต่ำสุด ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการคำนวณ จึงยืนยันแนวความคิดการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานลาดเอียงได้เป็นอย่างดี แต่พบว่าผลตอบสนองในโฟโตไดโอดโครงสร้างนี้มีความไวในการตอบสนองที่ต่ำกว่าโฟโตไดโอดชนิดช่องว่างแถบพลังงานครั้งที่ 1.924 eV อาจเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจริงบริเวณชั้นรับแสงไม่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และเกิดการรวมตัวของพาหะบางส่วนในบริเวณชั้นรับแสง อย่างไรก็ตาม ทำให้เกิดแนวคิดใหม่ในการพัฒนาโฟโตไดโอดที่มีผลตอบสนองทางแสงกว้าง (Wide) หรือแคบ (Narrow) ตามลักษณะการใช้งานได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง “ไดโอดรับแสงชนิด Graded Band Gap GaAlAs/GaAs” ทุนวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการะเงิน 2542

เอกสารอ้างอิง

- [1] "Semiconductor Optoelectronic Devices", Pallab Bhattacharya, second edition, Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [2] "Fabrication and Study on Spectrum Response of GaAlAs/GaAs Heterojunction Photodiodes", Tosaporn Chavanapranee, Master Thesis, Chulalongkorn University, 2001
- [3] "Band-Edge Emphasizing Photodetector Response", Ken-ichi Sugimoto, Kazutoshi Nakajima, and Yoshihiko Mizushima, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 37, No. 11, November 1990.

Biography

Miss Tosaporn Chavanapranee was born in Bangkok, Thailand, on November 1, 1977. She received the Bachelor Degree in electrical engineering (2nd class honours) from Chulalongkorn University in March 1997. She entered the Graduated School of Chulalongkorn University in June 1997 as a student of the Semiconductor Device Research Laboratory. In October 1999, she got the Monbusho scholarship from the Japanese government and studied at Waseda University in Tokyo as a research student for one and a half year. Her current interests are in the field of III-V compound semiconductors, heterojunction structure and optoelectronic devices.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย