

國立交通大學

電子工程學系

電子研究所碩士班

碩士論文

量子點紅外線偵測器之研究

The Studies of Quantum Dot Infrared

Photodetectors

研究生：黃博聲

指導教授：李建平 博士

中華民國九十三年六月

量子點紅外線偵測器之研究

The Studies of Quantum Dot Infrared Photodetectors

研究生：黃博聲

Student: Po-sheng Huang

指導教授：李建平 博士

Advisor: Dr. Chien-Ping Lee

國立交通大學
電子工程學系 電子研究所
碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Electronics Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the degree of

Master of Philosophy

in

Electronics Engineering

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

量子點紅外線偵測器之研究

學生：黃博聲

指導教授：李建平 博士

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

本論文主要針對由量子點紅外線偵測器(QDIP)量測結果，利用在量子井紅外線偵測器(QWIP)所發展出來的模型，將其應用在我們的 QDIP 元件。首先我們將重點放在電子在 QDIP 傳輸和頻率的相依性，因為我們發現了 QDIP 在光響應大小上會隨著頻率增加而減少，而同樣的情況也出現在暗電流的傳輸機制中。根據其他研究團體所提出的解釋，我們可將光響應電流分成快速傳輸和緩慢傳輸兩種機制。快速傳輸是由從量子井中激發出來的電子所產生。而慢速傳輸是鑿因於量子井中的電子藉由熱或光子的激發離開量子井，使得量子井帶正電，造成歐姆接面的電場增強，誘使更多的載子從歐姆接面流入量子井。我們將此模型應用於 QDIP 上，發現雖然和實驗結果有些出入，但在傳輸的機制上和 QWIP 相差無幾。

第二部分主要討論 QDIP 和溫度的相依性，以及撞擊游離效應在 QDIP 中造成的影響。我們針對不同的溫度和偏壓下，引進另外一種模型，利用量測到的雜訊增益來計算存在於量子點中載子增加的數量，發現電子數量會隨著偏壓及溫度上升而增加，並由量子點捕捉電子的能力來討論溫度和電子數量對捕捉機率的影響。為了求出真正的光響應增益和量子效率，我們假設電子能量在大於活化能時會產生撞擊游離效應。利用量測到的雜訊增益且對計算得到的量子效率做修正，由此可得到乘積因子。藉由以上的分析，我們對 QDIP 的傳輸機制會有更清楚的認識。

Studies of Quantum Dot Infrared Photodetectors

Student: Po-sheng Huang

Advisor: Dr. Chien-Ping Lee

Department of Electronics Engineering and Institute of electronics
National Chiao Tung University

Abstract

In order to explain the phenomenon showed in QDIP, the QWIP model is utilize to explain the behavior in QDIP. From the experiment result, the photo response of QDIP is decrease as the frequency increase. It is interesting that this phenomenon also showed in dark current noise. According to the QWIP model which proposed by other groups, the current contains two component of current, which are fast transient and slow transient. The fast transient comes from the photocarriers generated from the QW. The photocarriers from the QWs induce the local positive charge and thus the slow current component which is injected from the contact to compensate the positive charge in the QWs. Although there still have some inaccuracies to apply this model in QDIP, the trend between them is quite similar.

Second, the temperature dependent and impact ionization in QDIP are discussed. We calculated the number of excess carriers in QDs, and observed the number of excess carrier was increase with temperature and bias. In order to have the photocurrent gain and quantum efficiency, the impact ionization is considered. The quantum efficiency could be obtained by calibrating the ratio of the responsivity and noise gain, and then the multiplication factor could be calculated. According to the above analysis, we can realize the mechanism of QDIP more clearly.

誌謝

在這兩年的研究生涯中，首先要感謝的是李建平博士。從大學專題研究到碩士畢業，老師的一言一行都燃起我對研究的熱情。還記得大二第一次上近代物理，老師活潑生動的上課方式引領我進入物理的世界，讓我開始想更進一步的研究。在研究態度和專業培養上，老師嚴謹的態度清楚的思維，更是我這些日子來的最大收穫。

感謝王祥宇博士這兩年來的悉心教導。你對研究的熱誠和堅持，讓我省視並重新找回研究該有的態度。畢業前這段時間，從你身上所學到的一切專業和生活上的態度，對我來說才是最大的收穫的，我會當作人生至寶般的珍惜。

還要感謝林決仁學長，這二年我始終以你為目標，希望自己的研究成果能夠像你的一樣好。你適時的鼓勵，讓我確信自己能夠完成研究，希望你未來的日子能夠一帆風順。

感謝實驗室的伙伴。感謝李秉奇和羅明城（我還是不習慣叫你小羅）為了長 QDIP 的試片，在畢業前犧牲自己的睡眠時間，如果沒有你們我也無法順利的畢業。感謝林志昌學長在實驗上給我的指導和幫忙，讓我能順利完成我的量測。感謝王興燁和廖志豪學長在實驗上的協助，在緊急的時刻提供協助，讓實驗能夠順利完成。

李秉奇和林志昌學長，在這 2 年的朝夕相處，我感覺不到和你們年紀上的隔閡，輕鬆而好相處，即使和你們開玩笑，但你們也總能一笑置之，你們的成熟穩重相信會是所有女孩的理想情人。

羅明城，雖然我們在一起總是嬉笑怒罵的為多，但是不論在課業或是研究上，我都能感覺到彼此的互相進步，相信你在博士生涯中一定會收穫良多，祝福你博士班能夠順利畢業。

小黑、小揚，我們一同走過了碩士這二年，研究的日子雖然苦悶，但在彼此低潮時，總是能在關鍵的時刻互相鼓勵，最後才能和你們一起順利畢業，真的很榮幸這二年能和你們共事。

卡緒，楊仁盛，阿福，大雄，你們是我最好的球友，在球場上進步的不只是球技，更是彼此的情誼。你們的加入為實驗室注入了一股新的活力，在各自的研究上也開始漸入佳境，相信你們在接下來的一年會有更進一步的突破。

佩玲，謝謝你在這幾年的陪伴，因為你無私的付出，讓我能夠順利完成學業，也才能走過相處的瓶頸。我會記得對你的承諾，並且盡我的全力來實現。

最後要感謝我的父母，你們對我的全力支持，讓我毫無後顧之憂的投入研究。你們尊重我的決定，讓我選擇我想走的路，我才能一路走到這。我知道我要走的路是崎嶇不平，也不符合你們的期望，可是我所能做的就是堅持下去不放棄，希望這一切不會讓你們失望。

謝謝我的室友，同學，以及各位師長朋友們，謝謝你們。

Contents

Abstract (Chinese)-----	i
Abstract (English)-----	ii
Contents-----	iv
Figure Captions-----	vi
Chapter1 Introduction-----	1
Chapter2 Principle-----	3
2.1 Infrared radiation -----	3
2.2 The classification of infrared photodetectors -----	5
2.2.1 Intrinsic and extrinsic infrared photodetectors -----	6
2.2.2 Quantum-Well Infrared Detectors: QWIPs-----	7
2.3 Growth and characteristics about quantum dots -----	10
2.3.1 Self Assembled QDs-----	10
2.3.2 Phonon Bottleneck Effect-----	10
2.4 Photoconductor -----	11
2.4.1 Noise and signal-----	12
2.4.2 Optical signal of a photoconductor-----	13
2.4.3 Dark current-----	14
2.4.4 Noise-----	16
2.4.5 Detectivity and BLIP condition-----	17
2.4.6 Focal plane Array-----	18
Chapter3 Process	
3.1 The growth of device -----	19
3.1.1 Epitaxy-----	19
3.1.2 Straski-Krastanow growth mode-----	19
3.2 process -----	20
Chapter4 Measurement Principle and Instrument Setup-----	27
4.1 Photoluminescence (PL) -----	27
4.2 Atomic force microscope -----	27
4.3 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) -----	28
4.4 Responsivity -----	28
4.5 Dark current and Background photocurrent -----	30

4.6 Noise analysis -----	30
4.7 Detectvity -----	32
Chapter5 Results and Discussion -----	37
5.1 Frequency Photo-Response -----	37
5.1.1 Analytical model of transient photoresponse-----	38
5.1.2 Fitting in QDIP-----	40
5.2 The temperature dependent of QDIP -----	41
5.2.1 Carrier number in QDs-----	42
5.2.2 Impact ionization-----	43
5.3 Conclusion -----	45
Reference -----	61



Figure Captions

Fig 2-1 Spectral density of blackbody

Fig 2-2 The transmission spectrum of atmosphere

Fig 2-3 (a) intrinsic infrared photodetectors

(b) extrinsic infrared photodetectors

Fig 2-4 Intersubband transition

Fig 2-5 (a) Bound-to bound

(b) bound-to-continuum

(c) bound-to quasi-bound QWIPs

Fig 2-6 The schematic of photoconductor

Fig 2-7 (a) n-i-n diode effect

(b) thermionic emission

(c) thermal assisted tunneling

(d) directly tunneling

Fig 3-1 Structure of QDIP

Fig 3-2 (a) The shape of mesa and window

(b) The shape of mesa and window

Fig 3-3 (a) Frank-van der Merwe(FM) mode

(b) Volmer-Weber(VM) mode

(c) Stranski-Krastanow(SK) mode

Fig 3-4 S-K mode

Fig 3-5 (a) Define the mesa region with P.R.

(b) Etching to bottom contact layer(H_2O_2 : H_2SO_4 : H_2O = 1: 8: 40)

(c) Define metallization region with P.R.

(d) Evaporate contact layer by E-gun(Ni/ Ge/ Au= 300/700/2000Å)

(e) Lift-off P.R. and RTA

(f) Wire bonding for cryogenic measurement

Fig 4-1 Schematic of PL system

Fig 4-2 The setup of FTIR

Fig 4-3 photo-current measurement set-up

Fig 4-4 Dark current measurement set-up

Fig 4-5 Noise measurement Set-up

Fig 5-1 The schematic of sample A

Fig 5-2 The schematic of sample B

Fig 5-3 Frequency response at 1V

Fig 5-4(a) Frequency response at 40K

(b) Frequency response at 50K

Fig 5-5 (a) Noise current at 1.4V

(b) Noise current at 77V

Fig 5-6 The band diagram of QDIP

Fig 5-7 The schematic of a (a) fast (b) slow current transient

Fig 5-8 Noise gain for different temperature

Fig 5-9 60K frequency response at different bias

Fig 5-10 The response fitting under 60K, 1V

Fig 5-11 The noise fitting at 60K

Fig 5-12(a) τ_o fitting at 60K

(b) τ_o fitting after calibration

Fig 5-13 The peak responsivity of sample B

Fig 5-14 Dark currents for different temperature

Fig 5-15 The noise gain g_n for different temperature

Fig 5-16 Noise current at 77K

Fig 5-17 Noise current at 2.3V

Fig 5-18 The ratio of responsivity to the noise gain

Fig 5-19(a) Capture probability when $N_k=0.3$

(b) Capture probability

Fig 5-20 N_k for difference bias and temperature of sample B

Fig 5-21 Capture probability ($1/g$) for different bias

Fig 5-22 Activation energy and kinetic Energy

Fig 5-23 Quantum efficiency

Fig 5-24 photo response gain g_{ph}

Fig 5-25 Multiplication factor

