

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

砷化銦鎵光崩潰二極體於單光子偵測器之應用

InGaAs Avalanche Photodiode for Single-Photon-Detector



研究生：嚴浩天

指導教授：林聖迪 博士

中華民國九十六年八月

砷化銦鎵光崩潰二極體於單光子偵測器之應用

InGaAs Avalanche Photodiode for Single-Photon-Detector

Application

研究生：嚴浩天

Student : Hao-Tien Yen

指導教授：林聖迪 博士

Advisor : Dr. Sheng-Di Lin



Submitted to Department of Electronics Engineering & Institute of Electronics

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electronics Engineering

August 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年八月

砷化銦鎵光崩潰二極體於單光子偵測器之應用

學生：嚴浩天

指導教授：林聖迪 博士

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

本論文主要目的為建立一套可在 1100nm~1600nm 波段的光纖通訊中使用的單光子偵測系統。首先我們對於操作在 Geiger-Mode 的砷化銦鎵光崩潰二極體的特性做一分析與驗證，且比較單光子偵測器與傳統的光二極體偵測器兩者對於光分析方式的不同之處，然後實際製作與分析了能使 APD 重複偵測的 Quenching 電路。於此之後我們架設了單光子偵測系統並透過改變超額電壓、操作溫度、重複速度、脈衝寬度來分析與尋找單光子偵測系統的最佳偵測環境。實驗中我們使用了 NEC(NR8300)製造的光崩潰二極體，且分析其對 1300nm 波長光源的偵測表現。在 Gated-Mode 操作環境中先透過分析溫度與重複速度之間的關係，來剔除各溫度下 After pulsing 效應對量測結果所造成的錯誤與失真，且在 100KHz 的重複速度下藉著變化脈衝寬度(20ns、40ns、60ns)來計算 Detection efficiency 之間的差異，並經由計算得出在 170K 以及高於 170K 的溫度所得到的 After pulsing probability in 20ns 皆小於 5%，因此在 100KHz 的重複速度下此些溫度的量測結果是正確的。最後藉著增加超額電壓與縮小脈衝寬度的方式得出在 190K 的溫度下的最佳 Detection efficiency 結果為 60%，Dark count probability 為 1% 而 NEP 值則為 $7 \times 10^{-16} \text{ WHz}^{-1/2}$ 。另一方面在 Passive-Quenching 對連續光源的偵測中，我們成功的分辨了 10^{-12} W 、 10^{-13} W 、 10^{-14} W 三種光量。

InGaAs Avalanche Photodiode for Single-Photon-Detector Application

Student: Hao-Tien Yen

Advisor: Dr. Sheng-Di Lin

Institute of Electronics
National Chiao Tung University

Abstract

The goal of this work is to setup a single-photon-detector system for fiber-optics communication in the range of 1100-1600nm. First, we figured out the characteristic of InGaAs Avalanche photodiode (APD) operating in Geiger mode. The difference between single photon detector and traditional photodetector in light detection was compared. After that, the quenching circuit for subsequent detection of APD was built and analyzed in detail. With the knowledge, we setup the measurement system for characterizing the single photon detector and found the best parameters for detection performance, including the excess voltage, the operation temperature, the repetition rate and the gated width. In our experiment, the APD (NEC-NR8300) was analyzed its performance at the source wavelength of 1300nm. In gated mode, we studied the relationship between repetition rate and temperature to minimize the after pulsing effect. By calculating the difference of detection efficiencies in different gated widths at 100KHz repetition rate, the after pulsing probability under 5% was obtained in 20ns gated width at 170K and higher temperatures. Because of that, the detection efficiency results at these temperatures are correct. Finally, by increasing the excess bias and shorting the gated width, the best performance, detection efficiency 60%, dark count

probability 1% and noise-equivalent-power (NEP) $7 \times 10^{-16} \text{ W Hz}^{-1/2}$, was achieved at 190K. On the other hand, by using passive quenching for the detection of continuous-wave (CW) light source, we were successful to distinguish three different power levels, 10^{-12} W 、 10^{-13} W 、 10^{-14} W .



致謝

兩年的研究生涯中，首先要感謝的是我的指導教授-林聖迪教授，感謝您的熱心指導與給予我相當多的資源使我能順利的完成我的研究，另外，在與您討論的過程中，我深切的體會到老師思路的清晰與敏捷，總是能在我思緒混亂的時候指引我一條明路，讓我佩服不已，希望我以後也能達到這個境界。蔡嘉明教授在系統建造的過程中亦給予了我相當多的建議，並且透過豐富的討論刺激了我相當多的思考方向與觀念的釐清，在此我深表感謝。再來要特別感謝的是羅明城學長，在實驗的過程中您幫助我非常多的忙，另外還有凌鴻緒、與林大鈞學長，也感謝你們在經驗上的分享，在此祝學長們早日取得學位。另外旭傑、靜宜、凱竣、昌盛、逸凡、勇智、宏凱、明福能跟你們當同學真的是很好的回憶。旭傑、勇智這兩年有你們的陪伴與幫忙使我獲益良多，在此特別感謝。建宏、聖凱、英哲、柏智、岳民、健中、朝陽、晟宇，實驗室的設備非常的精良，各位的能力也非常足夠，希望各位學弟能順利達成實驗的成果。碩一的學弟妹們，你們的加入使得MBE實驗室的陣容更為茁壯，期望各位之後也能走出自己的一片天。另外我要感謝我的父母，你們辛勤的工作與勤儉持家的生活態度使我可以衣食無虞的過完我的學生生涯，在此致上對你們最高的敬意。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
第一章 前言.....	1
1.1 單光子偵測元件.....	1
1.2 論文內容.....	2
第二章 光崩潰二極體.....	3
2.1 APD 基本光電特性.....	3
2.2 APD 應用於單光子偵測器.....	5
第三章 APD 特性的驗證與 Quenching 電路.....	12
3.1 APD 操作在 Geiger-Mode 的特性驗證.....	12
3.2 Passive-Quenching 電路.....	15
3.2.1 Passive-Quenching 電路概念.....	15
3.2.2 Passive-Quenching 電路中 APD 的四個時期.....	16
3.2.3 Geiger-Mode APD 的等效模型.....	17
3.2.4 Passive-Quenching 內部組件的分析.....	20
3.2.5 實作結果與模擬結果的比較.....	22
3.3 Active Quenching 電路.....	31
3.4 Gated Mode 電路.....	34
第四章 單光子偵測器.....	36
4.1 單光子偵測系統結構.....	36

4. 1. 1	溫度控制系統.....	37
4. 1. 2	Quenching 電路製作與偏壓源取得.....	38
4. 1. 3	波形檢測與處理.....	40
4. 1. 4	光源的定義與取得.....	41
4. 1. 5	光脈衝與探測脈衝的同步.....	42
4. 2	量測流程.....	43
4. 3	單光子偵測器主要參數介紹.....	44
4. 3. 1	Dark Count Probability (rate)	44
4. 3. 2	Detection Efficiency.....	47
4. 3. 3	Noise Equivalent Power (NEP)	48
第五章	量測結果.....	49
5. 1	單光子偵測器操作條件定義與特性分析.....	49
5. 2	Gated Mode.....	51
5. 2. 1	Dark count probability.....	54
5. 2. 2	After pulsing 效應.....	56
5. 2. 3	Detection efficiency.....	63
5. 2. 4	Noise Equivalent Power (NEP)	67
5. 3	Passive Quenching.....	68
5. 3. 1	Dark count rate.....	68
5. 3. 2	Detection efficiency.....	71
第六章	結論.....	73
	參考文獻(Reference)	74

圖目錄

- 圖 2-1 (a)矽崩潰二極體的截面圖 (b)載子的參雜密度 (c)APD 內部的電場分布
- 圖 2-2 (a)以圖形表示離子化效應的過程 (b)當載子發生碰撞激發電子電動對
- 圖 2-3 InGaAs/InP 光崩潰二極體的結構與電場分布圖
- 圖 2-4 APD 操作在各種偏壓時的 DC 輸出曲線
- 圖 2-5 APD 暫態 I-V 特性曲線圖
- 圖 2-6 InGaAs APD 在吸收光之後內部的載子分佈
- 圖 2-7 放大層內的累增效應
- 圖 2-8 (a)傳統 APD 在連續的光源下:利用光子轉電子的效應使光量與輸出電流量作對應
- (b) GAPD 在連續的光源下:分析在一定的積分時間內 GAPD 的重複崩潰次數(counter 數)輸出值的變化並與光量值作對應
- (c)探討 GAPD 在單一次崩潰之下對不同光子數的輸出表現
- 圖 3-1 APD 暫態表現量測系統
- 圖 3-2 APD 兩端點壓降變化示意圖
- 圖 3-3 APD 兩端電壓值變化與實際電流輸出圖
- 圖 3-4 崩潰機率對 Gated Width 與超額電壓大小變化圖
- 圖 3-5 Passive-Quenching 電路示意圖與實際輸出波形
- 圖 3-6 Passive-Quenching 實際量測結果
- 圖 3-7 APD 的 I-V 曲線
- 圖 3-8 Geiger-Mode APD 等效模型
- 圖 3-9 Passive-Quenching 實際量測波形
- 圖 3-10 SPICE 模擬結果
- 圖 3-11 Passive-Quenching 電路兩端的輸出值

- 圖 3-12 Passive-Quenching 的簡化電路
- 圖 3-13 實際的電路圖
- 圖 3-14 R_d 電阻的計算
- 圖 3-15 C_d 電容值
- 圖 3-16 模擬的 Passive-Quenching 電路
- 圖 3-17 在 SPICE 中建造的三個 Passive-Quenching 等效電路
- 圖 3-18 模擬得到的上升電壓波形
- 圖 3-19 實際量測得到的上升電壓波形
- 圖 3-20 Passive-Quenching 模擬峰值輸出結果
- 圖 3-21 Passive-Quenching 實作峰值輸出結果
- 圖 3-22 Active Quenching 電路示意圖
- 圖 3-23 Gated Mode 電壓變化示意圖
- 圖 3-24 量測系統示意圖
- 圖 4-1 單光子偵測器系統架構圖
- 圖 4-2 低溫腔體內部結構示意圖
- 圖 4-3 電路系統示意圖
- 圖 4-4 Gated Mode 電路示意圖
- 圖 4-5 熱雜訊示意圖
- 圖 4-6 熱載子的數量與時間的關係
- 圖 4-7 Trap release 效應
- 圖 4-8 Trap 效應與對時間的關係圖
- 圖 5-1 HP 4145 I-V 特性量測系統
- 圖 5-2 Gated Mode 電壓對時間變化圖
- 圖 5-3 VR 值對 Dark count probability 的影響
- 圖 5-4 Gated width 對 Dark count probability 的影響

- 圖 5-5 Dark count probability 在不同的溫度下對不同的超額電壓所產生的變化
- 圖 5-6 不同的 Gated Width 對 Dark count probability 的影響
- 圖 5-7 不同的溫度下變化重複速度對 Dark count probability 造成的影響
- 圖 5-8 不同的溫度下變化重複速度對 Detection efficiency 造成的影響
- 圖 5-9 電壓對時間變化示意圖
- 圖 5-10 不同 Gated Width 下 Dark count probability 與 Detection efficiency 的變化
- 圖 5-11 不同的溫度與偏壓下 After pulsing probability 的變化
- 圖 5-12 各種 Gated Width 下 Detection efficiency 與 Dark count probability 的表現
- 圖 5-13 APD I-V 特性曲線圖
- 圖 5-14 在各溫度下 Detection efficiency 與 Dark count probability 的表現
- 圖 5-15 操作在 Geiger-Mode APD 的 NEP 值
- 圖 5-16 Dark count rate 在不同的溫度與壓降之下的變化
- 圖 5-17 Dark count rate 對溫度變化圖
- 圖 5-18 在 Passive-Quenching 系統中 APD 的 Dead Time
- 圖 5-19 超額電壓的變化對 Detection efficiency 的影響
- 圖 5-20 Passive-Quenching APD 在對各種 CW 光量的總計數變化

第一章 前言

1.1 單光子偵測元件

單光子偵測器近年來廣泛使用於低光量以及快速光源方面的應用，隨著量子密碼 (Quantum Cryptography)，時間解析的光激光量測 (Time Resolved Photoluminescence) 與天文探測方面的應用需要，近年來對於單光子偵測器的研究有著長足的進步。早期關於單光子偵測器方面的研究，較偏向於光電倍增管 (Photomultiplier Tube) 的部分，但是因為光電倍增管所需的操作電壓相當高 (~1700V Hamamatsu)，且 Detection efficiency 只有 20% 左右，所以近年來較多人開始使用光崩潰二極體 (Avalanche Photodiode, APD) 來偵測單光子。

操作在 Geiger-Mode 的矽 APD [2,3,4] 對於短於 $1.1\mu\text{m}$ 波長的光子，可有高達 70% 的 Detection efficiency，但是在對於 $1.3\mu\text{m}$ 與 $1.55\mu\text{m}$ 等通訊波段的光源探測卻是無能為力，所以必須採用 InGaAs/InP 等材料製成的 APD，由於此波段的光在傳輸時較不易被由矽製成的光纖所吸收或散射，如此對光通訊系統的應用是非常有幫助的。另外 Photo counting CCD 與 Quantum dot 也可用於偵測單光子，但是 Photo counting CCD 在收光之後，電荷從 CCD 中釋放的時間過長 (約 2ms)，使 Photo counting CCD 的重複速度過慢。而 Quantum dot 目前還停留在學術研究的階段，因為 Quantum dot 本身的面積太小而導致探測光的難度增加，使得 Detection efficiency 大約只有 1%，且同樣的因為面積過小的問題大大增加了讀取訊號的困難度。

1.2 論文內容

實驗中採用 InGaAs/InP APD 作為單光子偵測器的核心元件。第二章為光崩潰二極體，文中會介紹 APD 在 Geiger-Mode 的操作特性、單光子探測機制與傳統 APD 之間的比較三個主題。第三章為 APD 特性的驗證與 Quenching 電路，文中透過實作驗證了 APD 在 Geiger-Mode 的操作特性，且介紹 Geiger-Mode APD 在兩種光源環境下所對應關閉 APD 的方式。第四章為單光子偵測器，本章介紹單光子偵測器的儀器架構與操作流程且敘述單光子偵測器的主要參數與成因。第五章為量測結果，本章會介紹單光子偵測器的實驗量測結果。第六章為結論。



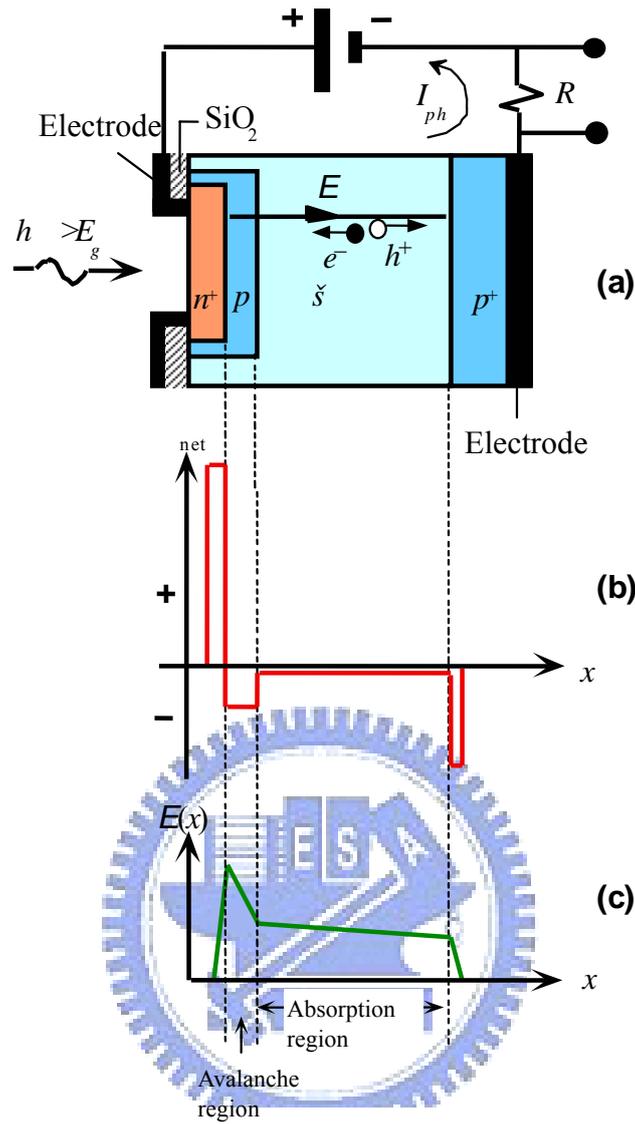
第二章 光崩潰二極體

第一章介紹過單光子偵測器可選用的各種偵測元件與相對應用，接下來要介紹我們所使用的單光子偵測元件 Avalanche photodiode(光崩潰二極體，APD)。首先介紹傳統光電二極體的應用特性與結構，再介紹應用在單光子偵測器的特別操作特性，最終就 Geiger-Mode APD 與傳統 APD 的光偵測特性做一個比較。

2.1 APD 基本光電特性

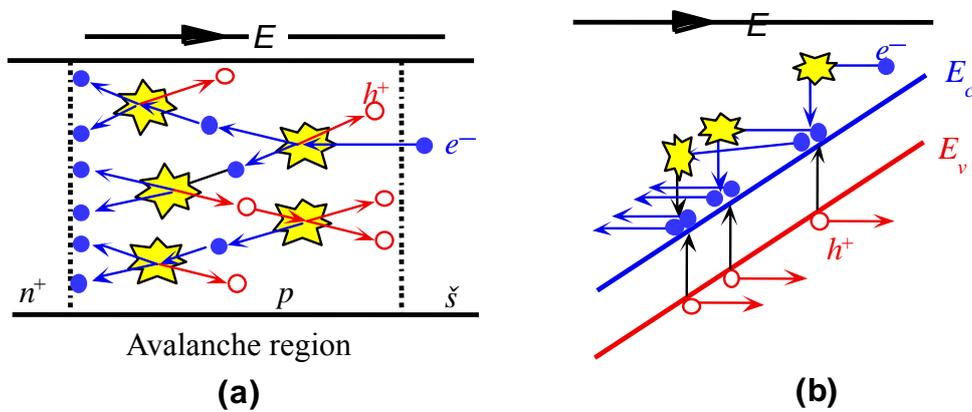
Avalanche photodiode(APD)，光崩潰二極體是被廣泛使用於光通訊上的光接收器，相較於 PIN 光二極體，它能偵測更小的光量變化。圖(2-1)為矽光崩潰二極體剖面圖，APD 的基本結構相較於 PIN 來說多了一層參雜量較吸收層高的 p 層，且因為與 n 層接觸的關係，此層在高電場下會被空乏並同時承受很大的電場，此層即為 APD 特有的累增層(avalanche region)，當光進入 APD 且被吸收層吸收產生光載子，即被內建的電場掃進累增層之中，而累增層中的大電位差會對載子加速且增加載子所具有的能量，當載子能量超過材料的活化能(Kinetic Energy)時，便會藉由碰撞而產生新的電子電洞對，此程序持續的進行下便會形成所謂的累增離子化效應，如圖(2-2)，在此效應下，當一個電子進入 APD 的累增層後會產生倍數的電子輸出，於是可知此層使 APD 具有內部增益存在，所以累增層又叫做放大層[1]。

如圖(2-3)為 InGaAs/InP 的 APD 結構圖，此結構為 SAM(Separate Absorption and Multiplication region)APD。此結構的特性是透過分開放大層與吸收層達到降低 APD 本身雜訊的目的，且由圖中可以發現在 InGaAs/InP APD 中主要是由電洞進入 APD 內部的累增層進行放大。



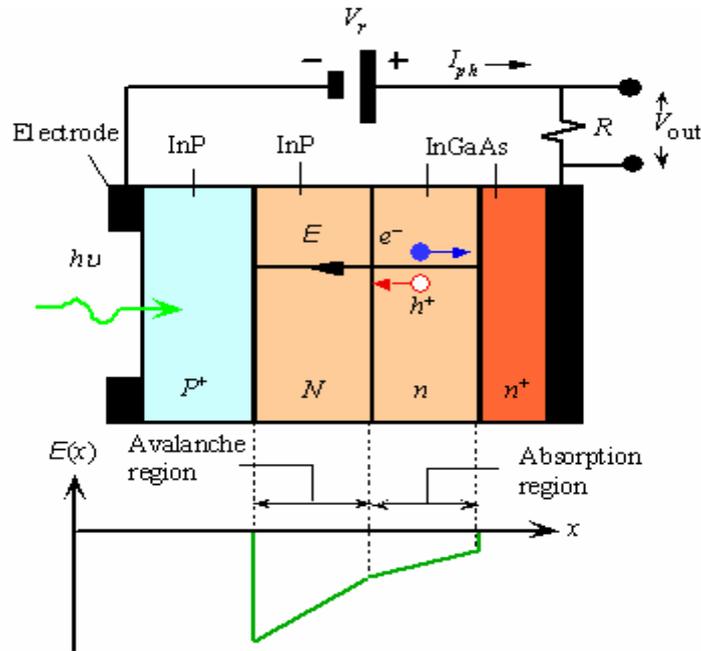
S.O.Kasap, Optoelectronics(Prentice Hall)

圖 2-1 (a)矽崩潰二極體的截面圖 (b)載子的參雜密度 (c)APD 內部的電場分布



S.O.Kasap, Optoelectronics(Prentice Hall)

圖 2-2(a)以圖形表示離子化效應的過程 (b)當載子發生碰撞激發電子電動對



S.O.Kasap, Optoelectronics(Prentice Hall)

圖 2-3 為 InGaAs/InP 光崩潰二極體的結構與電場分布圖

2.2 APD 應用於單光子偵測器

在前面提到 APD 本身因為操作電壓的不同，而有三種不同的操作區如圖(2-4)，分別為 Solar cell 區、Photodiode 區與 Avalanche 區，當 APD 應用在單光子偵測器上時，其電壓是操作在 avalanche 區[5]，也就是超過崩潰電壓之上的區間，所以想把 APD 用於偵測單光子的話，就必須對 APD 在 avalanche 區的操作特性有相當的了解才行。

圖(2-4)為一般我們所熟悉的 APD 在 DC 操作下的崩潰區 I-V 特性曲線，但是對於單光子偵測器來說，在探測光子時 APD 的操作特性是隨時間做改變的，於是在製作單光子偵測器之前我們必須分析 APD 在短時間操作的特性變化與 DC 狀態是否有所不同。

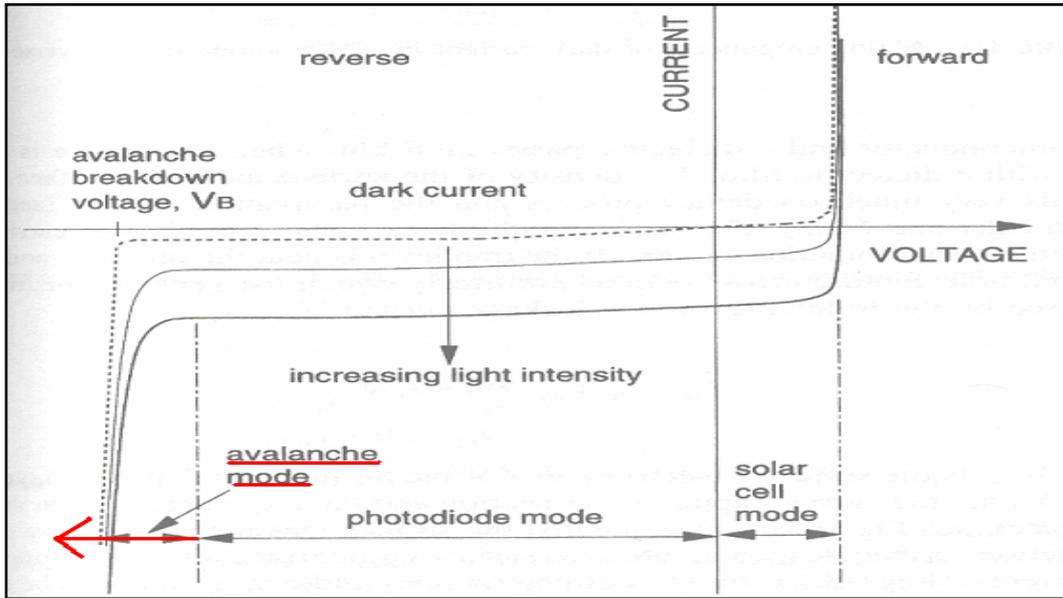


圖 2-4 APD 操作在各種偏壓時的 DC 輸出曲線

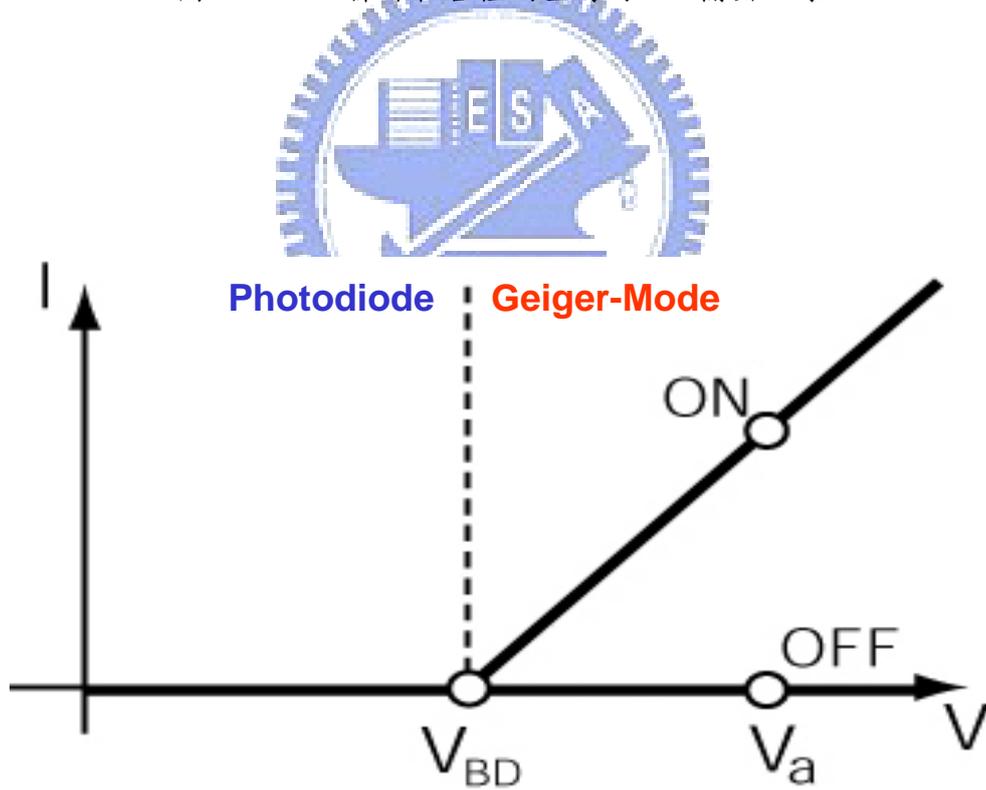


圖 2-5 APD 暫態 I-V 特性曲線圖

當 APD 兩端偏壓超過崩潰電壓時我們稱此電壓操作區間為 Geiger-Mode，以此與大家所熟知的 Photodiode-Mode 做一區別[5]，圖(2-5)為當 APD 操作在 Geiger-Mode 時的兩種暫態 I-V 特性，圖中的 ON 曲線代表著 APD 操作在崩潰電壓之上且有發生崩潰電流，而 OFF 曲線代表著當 APD 操作在崩潰電壓之上，但是並沒有發生崩潰效應所代表的 I-V 特性圖所代表的 I-V 特性，此一特性曲線也是在 DC 的良測結果中不會發現的。分析此 I-V 特性曲線圖中兩條特性曲線的成因與相互關悉對我們了解 APD 應用於單光子偵測器的表現佔有很重要的地位。

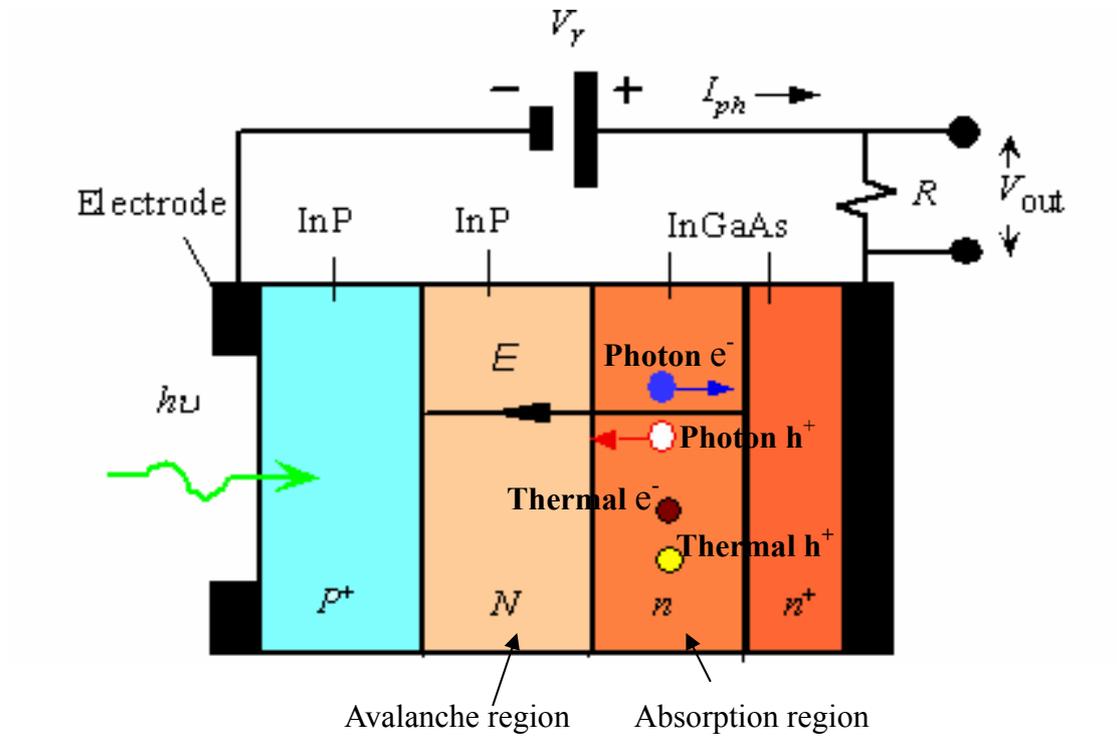


圖 2-6 InGaAs APD 在吸收光之後內部的載子分佈

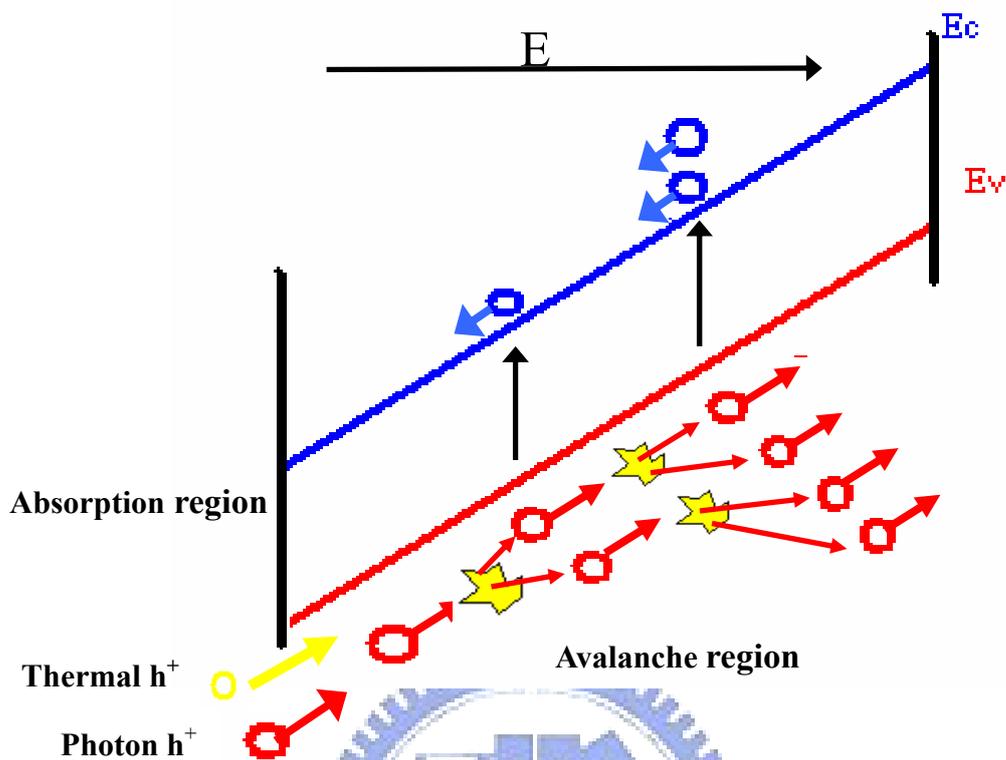


圖 2-7 放大層內的累增效應

在了解 APD Geiger-Mode 的 I-V 特性之後，我們要利用圖(2-5)、(2-6)、(2-7)來講訴 APD 操作在 Photodiode Mode 與 Geiger-Mode 的物理機制與操作特性的相異之處。圖(2-6)為 InGaAs APD 在吸收光之後內部的載子圖，圖(2-7)中表示了 APD 放大層內發生的累增效應，基本上 APD 光偵測過程分為光吸收與累增崩潰效應兩個部分，對 Photodiode-Mode 與 Geiger-Mode 來說，吸收光產生載子的機制並沒有不同，但在累增效應方面的差異性，決定了 APD 的光探測能力是否可用於偵測單光子。由圖(2-5)可以看到兩個區間的分野為崩潰電壓[12]，操作在 Photodiode-Mode 時因為空乏區中單位長度的電場不夠高，所以當載子進入放大層時，需要較長的距離才能得到足夠的能量以產生離子化效應，因此一顆載子造成離子化效應的能力有限，並不能形成極大電流的輸出，但累增效應在 Photodiode-Mode 中依然有著放大載子數量的作用，光量越多光載子數也越多，

而經放大後輸出的電流亦會因為光載子的變化而變化。而操作在 Geiger-Mode 下的 APD，因為其操作電壓超過了崩潰電壓值，所以其內部空乏區中單位長度的電場非常高，而在此情況下只需要有一顆載子進入 APD 的放大層，即可產生非常大的累增崩潰效應，而有極大電流的輸出，此時電流值的大小並不復是由光載子數所決定，而是由 APD 兩端的超額電壓所控制。

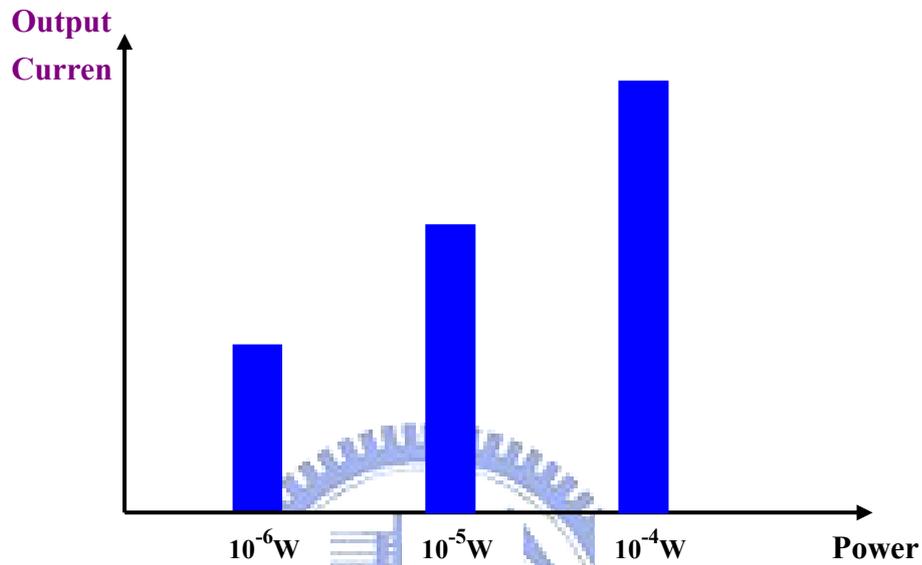
由圖(2-6)中可以知道，當有光時 APD 內部的吸收層會因為光的進入而激發光電子電洞對，相對於無光時 APD 內部只存在著由熱激發的載子，有光時 APD 內部會有兩種不同原因而產生的載子存在，所以操作在 Geiger-Mode 時兩種載子皆會導致崩潰電流產生(APD ON)。經由這個程序我們可以了解到進入放大層的載子，是使 APD 產生崩潰電流輸出的觸發源，而可觸發 APD 崩潰的載子有兩種，熱載子與光載子。

在了解傳統光偵測二極體與單光子偵測二極體的操作特性與光偵測特性的差異之後，我們進而介紹傳統光偵測二極體與單光子偵測二極體在受光輸出訊號方面處理與判定的差異。傳統的光偵測器中，光子的數量決定偵測器相對應輸出的電流量，藉由電流量大小的不同，可以判定光訊號源的大小。但是在單光子偵測二極體中只要有一個光子便可以激發 APD 產生大的電流輸出，也因為操作在 Geiger-Mode 時的 APD 內部增益極大，所以進入累增層的光載子為兩個或多個並不會改變 APD 電流的輸出，這與傳統對光量的判定方式大不相同。

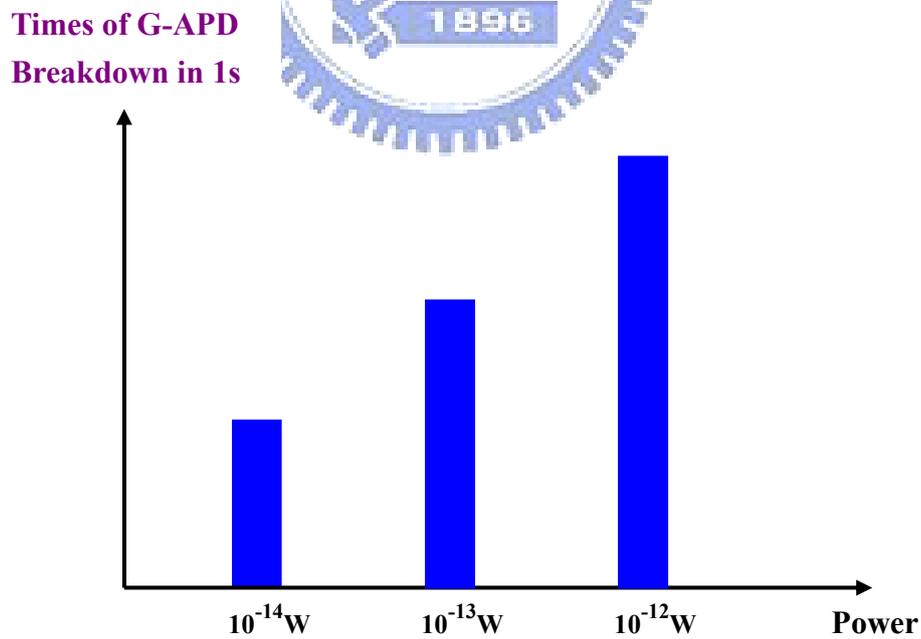
而對於單光子偵測器應用於 DC 光源的量測來說，有一個新的觀念可以被用於解析非常低的光量，前面提到過，光量越大進入累增層中的載子越多，其引發累增崩潰效應的機率就越高，在此觀念下我們透過統計 Geiger-Mode APD 在一定量的時間之下的操作次數，來統計一定量時間光量(光子數)的多寡，當 APD 崩潰的次數越高，代表此積分時間內進入 APD 的光子數越多，亦代表光量越大，以此方式，達到偵測低光量的目的。在 AC 光源的環境下，單光子偵測二極體的輸出並不能向傳統光偵測器的輸出會隨瞬間的光量變化而作電流的調整，而是只

能判別光子的出現與否，而此種偵測特性，可以用於鑑別單光子發射源。

前面比較了傳統的 APD 與操作在 Geiger-Mode 的 APD 兩者對於 CW 光源與脈衝光源光偵測特性的不同處，現在我們便把上面的敘述歸納成圖(2-8)。



(a) APD CW 光源



(b) G-APD CW 光源

**G-APD Breakdown
or not**

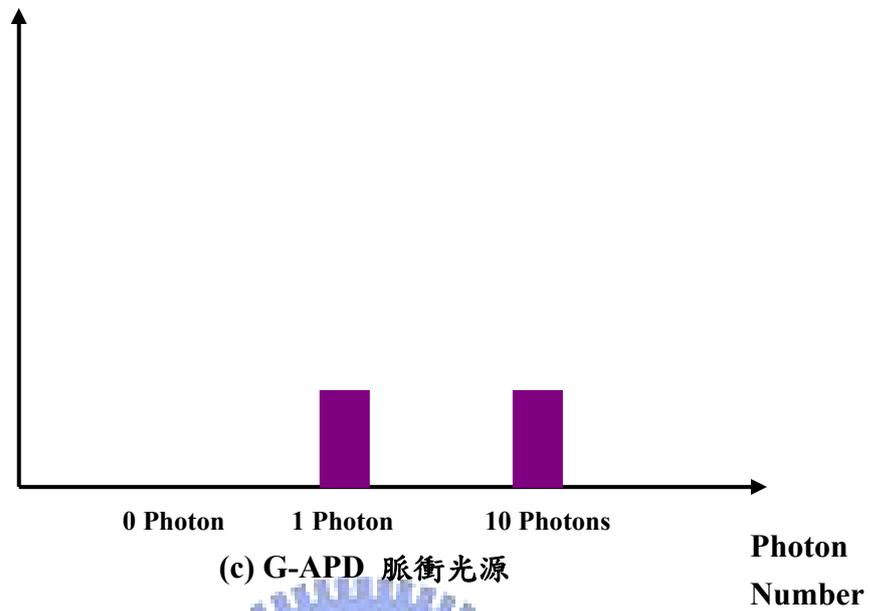


圖 2-8 (a)傳統 APD 在連續的光源下:利用光子轉電子的效應使光量與輸出電流量作對應 (b) G-APD 在連續的光源下:分析在一定的積分時間內 GAPD 的重複崩潰次數(counter 數)輸出值的變化並與光量值作對應 (c) 探討 GAPD 在單一次崩潰之下對不同光子數的輸出表現

第三章 APD 特性的驗證與 Quenching 電路

3.1 APD 操作在 Geiger-Mode 的特性驗證

在第二章中提到了 APD 操作在 Geiger-Mode 的特別特性，而在此我們設計了一個簡單的量測系統，來驗證圖(2-5)中對於 APD 操作在 Geiger-Mode 的特性描述。圖(3-1)為量測系統的構造，且圖中 pulse gen V_g 的電壓波型變化如圖(3-2)所示， V_R 為操作在 APD 陰極的負電壓使 $V_R + V_g > V_B$ ， V_B 為 APD 的崩潰電壓， V_E 為操作在 APD 之上的超額電壓， T_g 為 APD 操作在崩潰電壓的時間長度， T_{rep} 為 APD 電壓操作的重複時間。

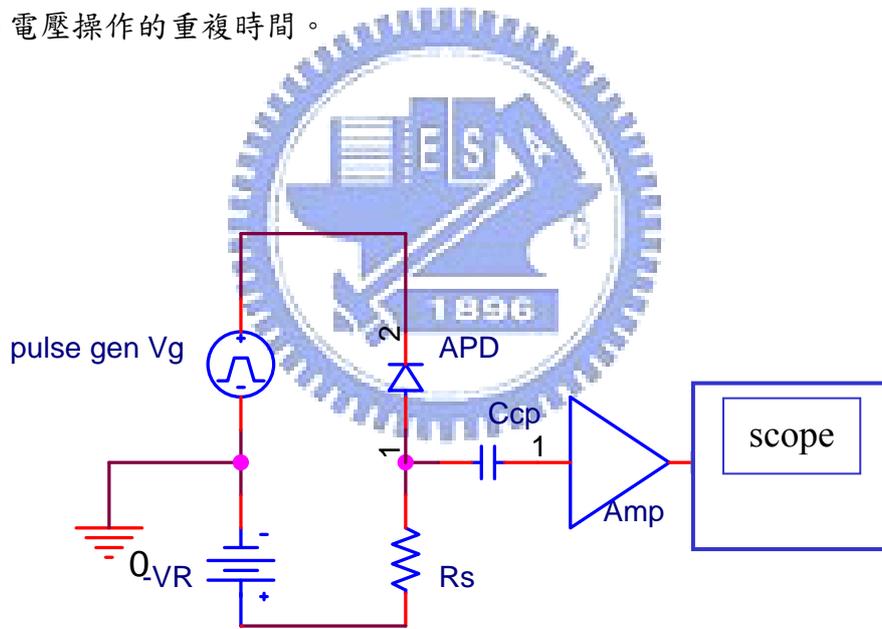


圖 3-1 APD 暫態表現量測系統

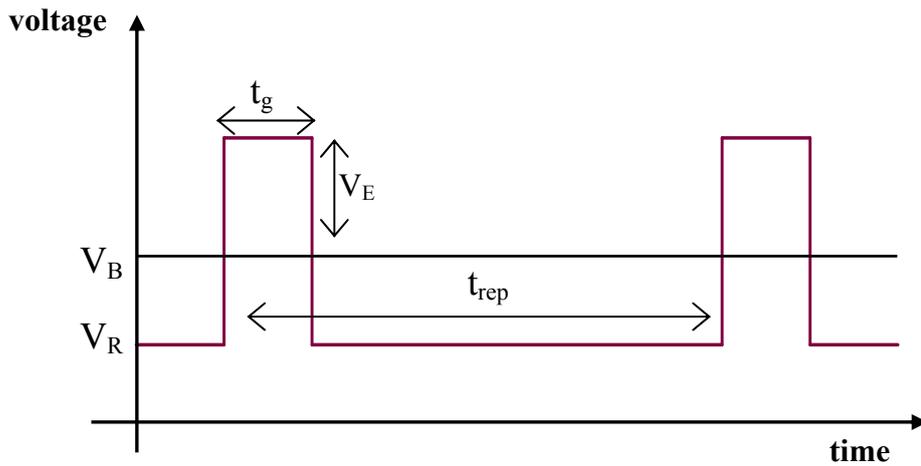


圖 3-2 APD 兩端點壓降變化示意圖

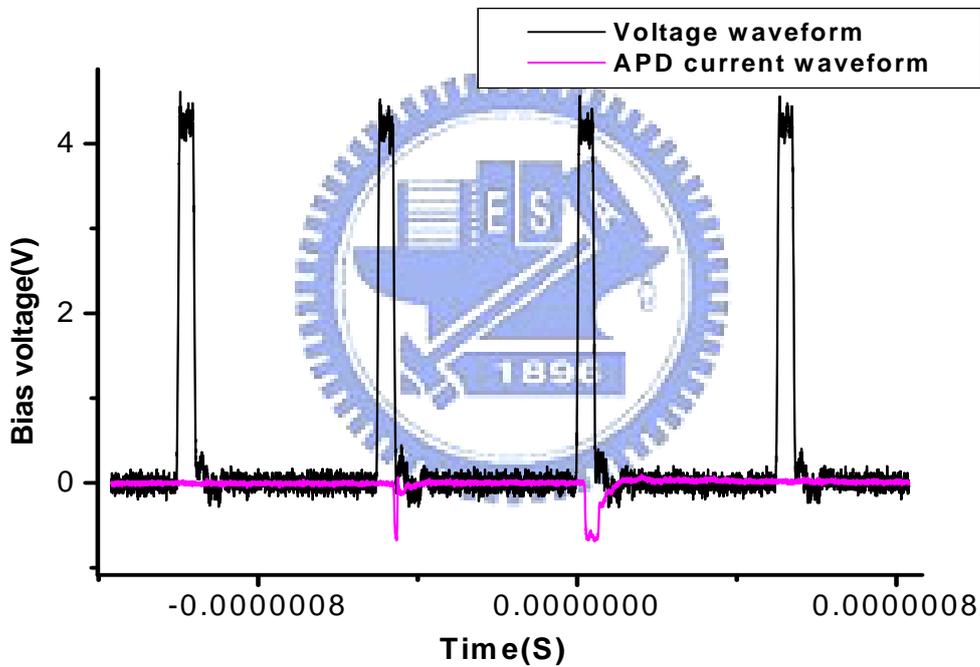


圖 3-3 APD 兩端電壓值變化與實際電流輸出圖

我們使 APD 兩端的電壓隨時間做一個如圖(3-2)中所示的變化，以此種在短時間變化兩端電壓的方式來分析 APD 在暫態偏壓操作下的特性表現是否與 DC 電壓操作有所不同。圖(3-3)為示波器上所取下來的波形，黑線代表 APD 兩端的壓降變化，紫線代表 APD 操作在 Geiger-Mode 時的電流輸出，由圖中可以看到，在不同的時間下，重複操作 APD 於一固定的電壓操作點，卻會有兩種不同的情

況發生。由結果我們發現，APD 操作在崩潰電壓之上時，在短時間的電壓變化下並不一定每次都會產生崩潰電流，也就是說，有些時候電壓操作在崩潰電壓之上時，因為持續的時間不夠長所以 APD 內部並不會有崩潰效應的發生，這是一個很特別的現象，也是一個不同於 DC 操作的特別特性。於此現象下，我們另外做了一個實驗，是關於崩潰效應發生機率相對於操作電壓的時間長短變化的討論。結果如圖(3-4)，由圖中可以看到，當時間越長，APD 崩潰的機率也越高，且超額電壓越高，崩潰的機率也會越高。

由圖(3-3)、(3-4)可以了解到 APD 操作在 Geiger-Mode 時，由崩潰效應所造成的電性表現，的確會因電壓操作的時間長短變化，而有所改變，也證實了圖(2-5)中對於 APD 的 Geiger-Mode 特性的描述是的確存在的。

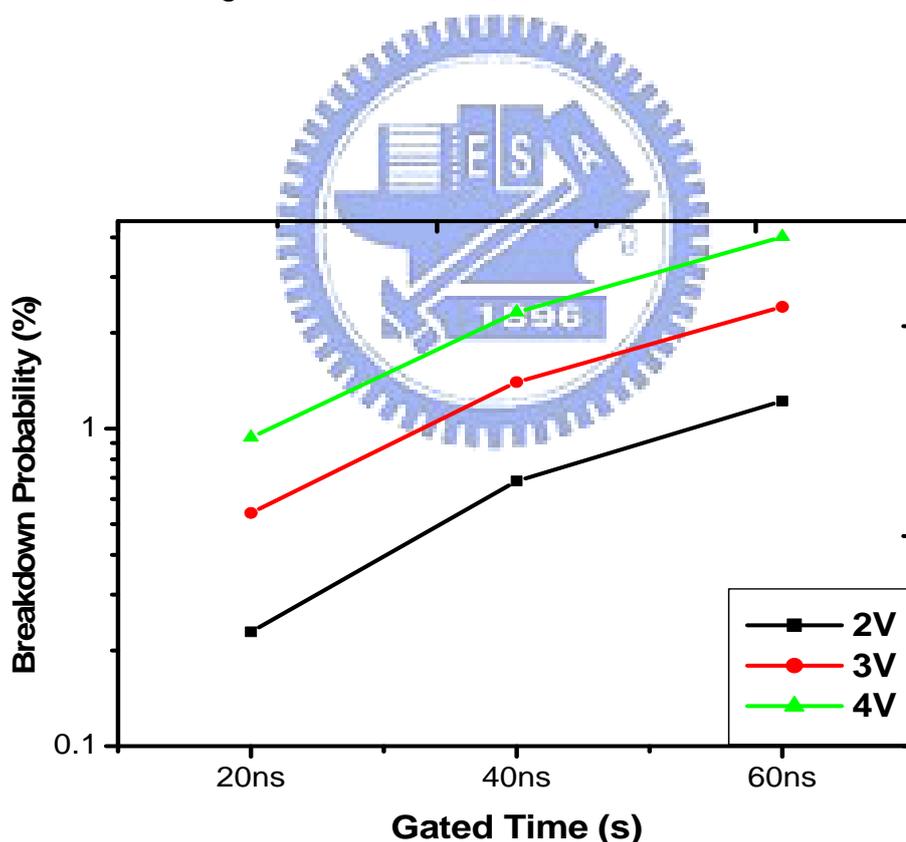


圖 3-4 崩潰機率對 Gated Width 與超額電壓大小變化圖

3.2 Passive-Quenching 電路

第二章提到過，APD 要在 CW 光源下判別單光子等級的光量變化，必須經由 APD 崩潰的機率變化來了解，要使 APD 可以重複的崩潰，我們需要一個特殊的設計，使得 APD 被觸發後可以透過抑制 APD 內部電流的方式來關閉 APD，使 APD 可以重複探測以統計光量的變化，這種設計被稱為 Quenching 電路。

3.2.1 Passive-Quenching 電路概念

Geiger-Mode APD 就其特性而言，是一個電壓主宰輸出電流的電性元件，由圖(3-4)可知，當 APD 的操作電壓高過崩潰電壓越多時，其崩潰的機率也就越高，相反的，當操作的電壓離崩潰電壓越近時，APD 有越高的機會回到傳統光偵測二極體的特性。在此種想法之下，一個被稱之為 Passive-Quenching[4]的簡單電路概念可以用於抑制 APD 的崩潰電流，此電路是利用一個大電阻與 APD 串聯，在 APD 關閉時因為迴路中並沒有電流的存在，所以外加的電壓會直接的跨在 APD 的兩端，但是當 APD 被光子觸發後，迴路中的電流流經而使得大電阻吃掉了原本操作在 APD 上的電壓壓降，使操作在 APD 上的壓降降低到一個有相當程度機率使 APD 自行關閉的電壓準位，這就是 Passive-Quenching 的基本概念。

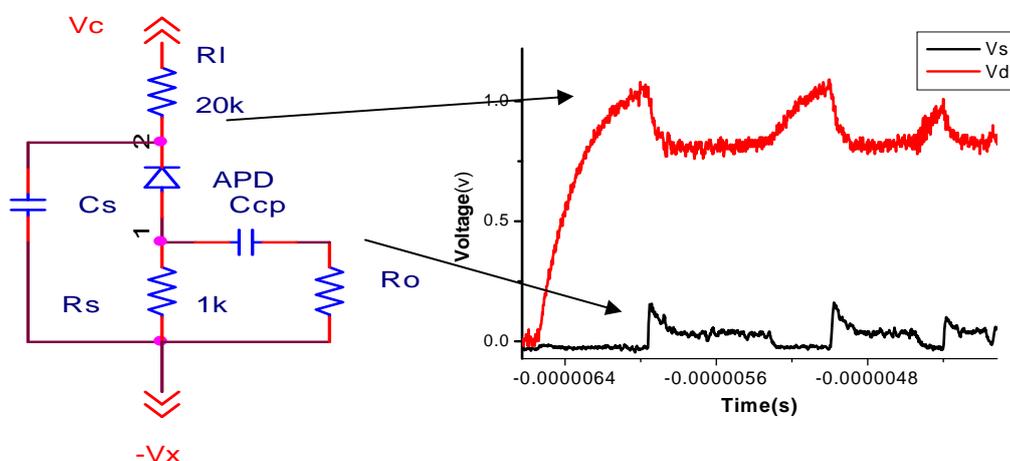


圖 3-5 Passive-Quenching 電路示意圖與實際輸出波形

3.2.2 Passive-Quenching 電路中 APD 的四個時期

由圖(3-5)的結果可以知道在此電路配置之下，APD 在產生崩潰之後，的確可能被關閉，且重複的探測，同時可以發現在 Passive-Quenching 電路中，APD 其實是有多種不同的時期存在，此時期也同時影響著 APD 的輸出電流的表現。

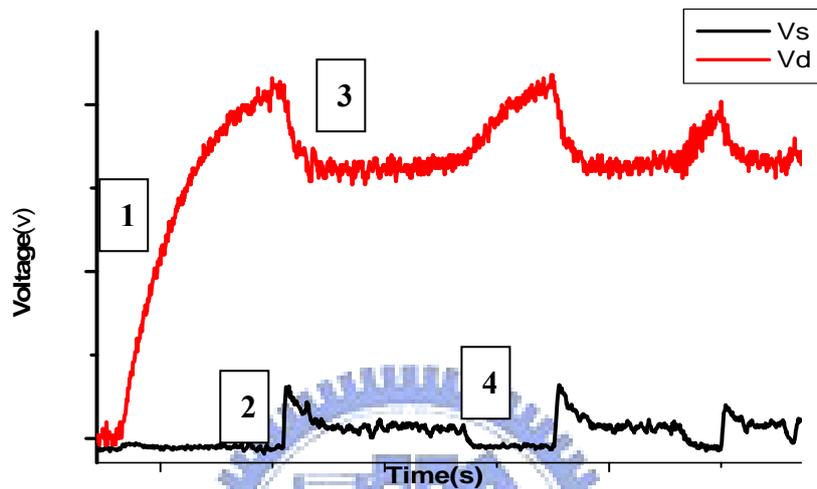


圖 3-6 Passive-Quenching 實際量測結果

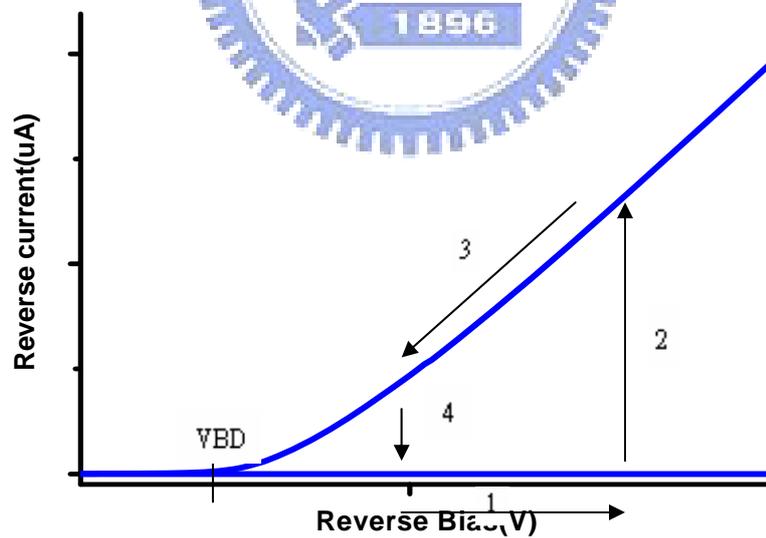


圖 3-7 APD 的 I-V 曲線

圖(3-6)為實際量測出的電壓波形，圖(3-7)為 APD 的 I-V 特性曲線，透過這兩個圖可以發現 APD 操作在 Geiger-Mode 時的特性分成四個時期：第一個時期，

充電時期，當 APD 是關的狀態下，兩端電壓在超過崩潰電壓後依然會持續的充電直到 APD 上的跨壓等於外部的操作電壓(圖(3-5)中 VC)為止。第二個時期，觸發(Trigger)時期，當 APD 壓降在崩潰電壓之上且累增層中有暗載子或著是光載子進入時，即有一定的機率產生崩潰，此時透過對照 I-V 曲線且依照外加在 APD 上的電壓可以得到一個相對應的電流值，且此電流的一部分流經 R_s 後會輸出一個可用於輸出統計的電壓訊號。第三個時期為 Quenching 時期，當 APD 被觸發後，因為電流的上升所以 R_q 上的跨壓開始上升，而使得 APD 兩端所獲得的分壓下降，透過 I-V 曲線的對應關係可以發現 APD 內部的電流亦開始下降。第四個時期為關閉時期。前面講訴過當電壓越接近崩潰電壓時 APD 關閉的機率越大，在這裡我們對此特性作一個定量的描述，當 APD 內部的電流小於 $50\mu A$ 的時候 APD 便會有相當的機率會自行關閉，我們稱呼此電流為 I_{latch} [4]。在此項關閉條件之下可以知道我們必須讓 APD 的跨壓低於一定的值，才有機會關閉 APD，達到截止的目的。而當 APD 自行關閉後，APD 的操作電壓又會自動上升，等待下一次的探測。



3.2.3 Geiger-Mode APD 的等效模型

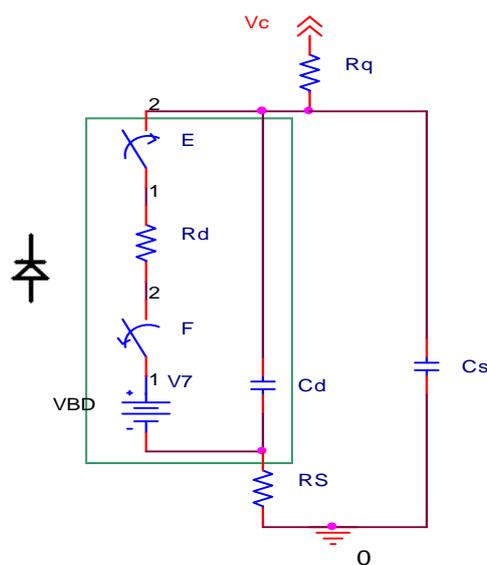


圖 3-8 Geiger-Mode APD 等效模型

如圖(3-8)， R_q (Quenching resistance)是為了要能夠使 APD 能重複探測而存在， R_d 是由 APD 內部的空間電荷阻抗和接面電阻所組成，也就是 APD 的等效阻抗， R_s 為輸出電阻， C_s 為 APD 陽極與地之間的寄生電容， C_d 則是代表 APD 空乏區的等效電容值。這邊必須特別說明的是關於在傳統的電路概念中，傳統光二極體的角色為電流訊號源，但是當 APD 應用於偵測單光子時，如同之前提到的較像一個觸發開關的角色，但是在電路模擬中，我們並沒有屬於 APD 的模型及相關參數存在，所以必須特別製作一個在電性方面與 APD 具有相同表現的等效模型，於是利用了 C_d 電容、 R_d 電阻、 V_{BD} 崩潰電壓以及 E、F 等效開關五個部分來構成 APD 的等效模型。此模型的主要概念為使用 E、F 兩個等效開關來代替 APD 內部自行觸發與關閉的特性，且 APD 操作在崩潰電壓之後的 I-V 曲線趨近為一斜直線，所以利用一個 V_{BD} 的電壓源等效成 APD 內部電場崩潰所需的電壓值，且利用一個等效電阻 R_d 來代替崩潰電壓之後的電流特性，而 C_d 則是用來等效 APD 兩端跨壓變化時所需電荷量。

在此有一個重要觀念我們必須先行釐清，此處 APD 的等效電路模型，只是幫助帶入 Passive-Quenching 電路模擬之中以驗證並分析電路中各個部分對系統電性輸出結果的影響，但是對於 APD 本身的物理性質方面，開關的電性等效並不能完整詮釋。

現在，我們利用 SPICE 來模擬 APD 操作在 Geiger-Mode 時的等效模型，且與實際的 APD Passive-Quenching 電路表現來做一比較。圖(3-9)、(3-10)分別為實際量測與 SPICE 模擬出的 V_d 端， V_s 端的電壓圖形分析圖，透過結果可以發現當在 APD 被觸發之後，在兩圖中的電壓表現均為指數下降，且在 V_s 端皆同時有電流開始流動，於是我們可以確定，在電路模型中利用一個開關來取代 G-APD 操作的主要電性，是可行的。

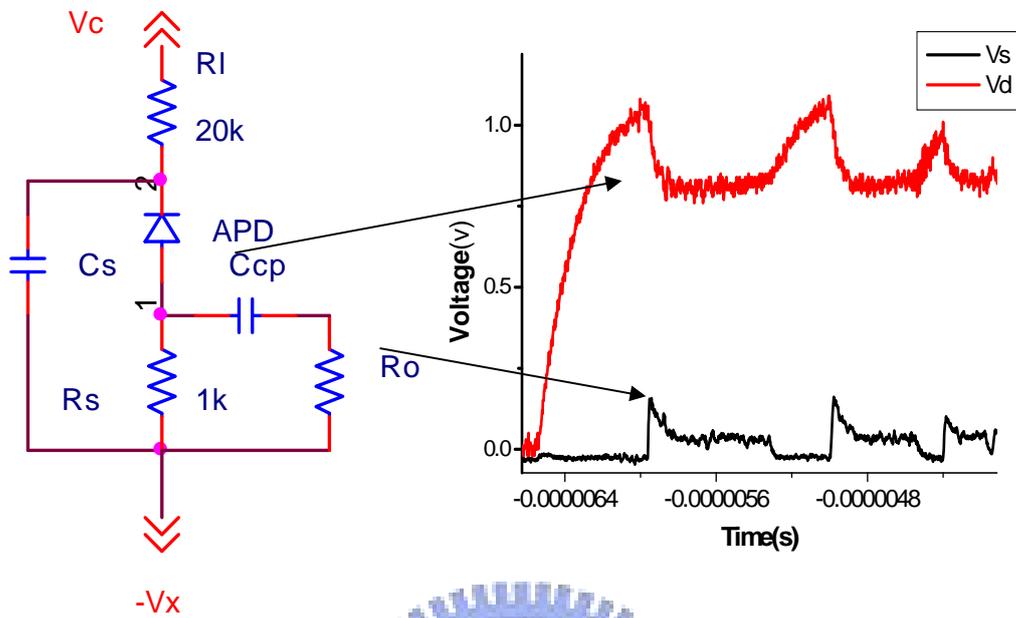


圖 3-9 Passive-Quenching 實際量測波形

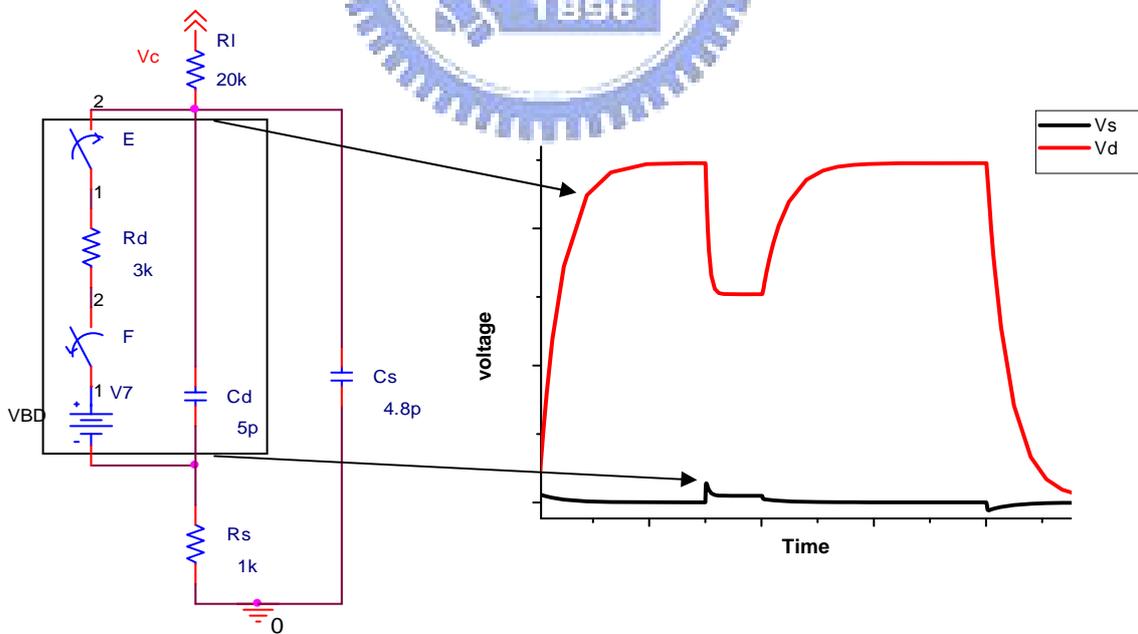


圖 3-10 SPICE 模擬結果

3.2.4 Passive-Quenching 內部組件的分析

此電路的主要目的是要改變 APD 在觸發之後的電壓操作點，以達到關閉 APD 的目的，所以必須透過電阻之間分壓關係來了解 APD 主要操作的兩個暫態電壓值，並進一步探討存在於 Passive-Quenching 電路內的電容對電路輸出所造成的影響。

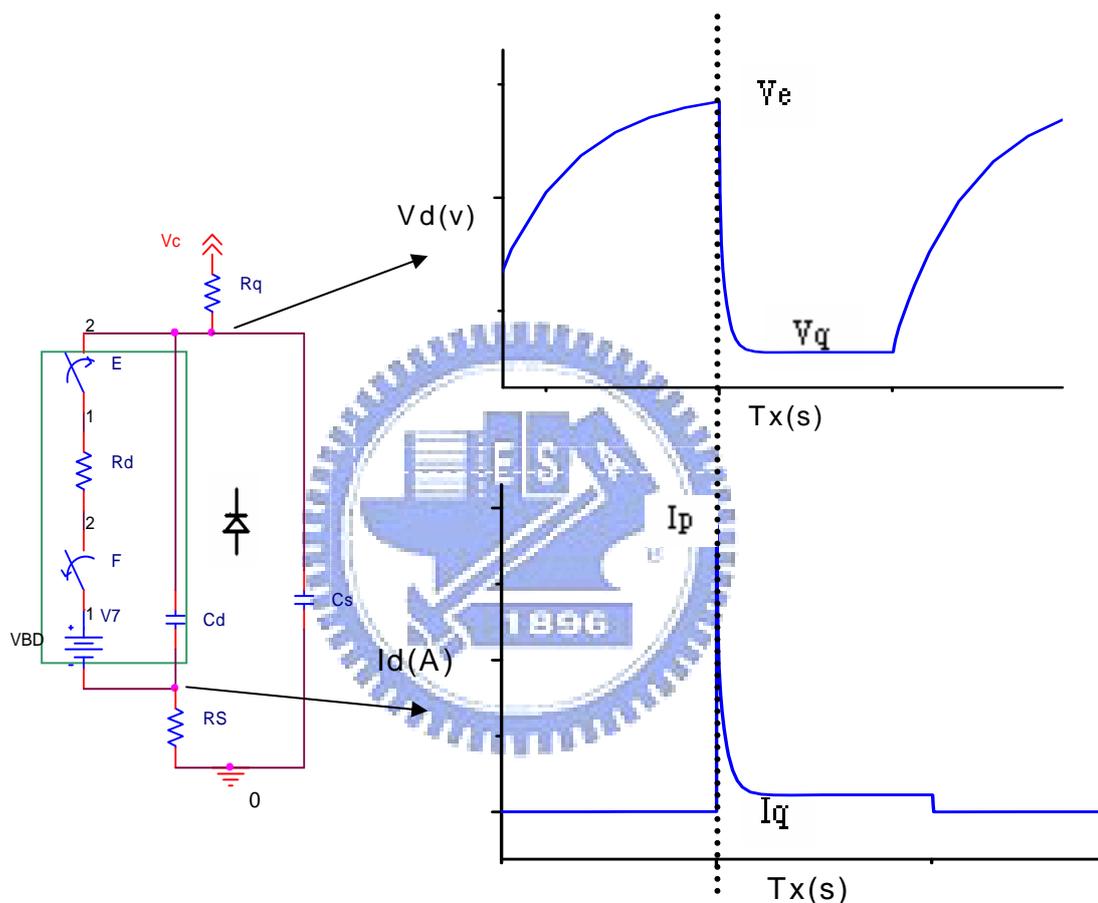


圖 3-11 Passive-Quenching 電路兩端的輸出值

在此電路中，當 APD 重複探測光子時，其操作電壓會在兩個電壓點中不停的轉換，這兩個電壓分別為圖(3-11)中的 V_e 與 V_q

$$V_e = V_c \quad (3.1)$$

$$V_q = V_c * \frac{(R_d + R_s)}{R_l + R_d + R_s} \quad (3.2)$$

且其轉換的過程所需經過的時間，則是由下面兩個時間變化參數所主導

$$(1) \text{當 APD 跨壓上升時，其時間為 Rise time}=2.2Rl3*(Cs3+Cd3) \quad (3.3)$$

$$(2) \text{當 APD 跨壓下降時，其時間為 Fall time}=2.2(Rl3//Rd3)(Cd3+Cs3) \quad (3.4)$$

在輸出電流值方面， I_q 必須小於 Latch[4]電流，才可以使 APD 有關閉的一定機率，而由公式(3.5)可以看出 Rl 主導了 I_q 的值的的大小，也主導了 APD 的關閉與否

$$I_q = \frac{V_c * R_s}{R_l + R_d + R_s} \quad (3.5)$$

另外，關於流經 R_s 上的輸出電流值，一般會很直覺的認為會等於流經 APD 的崩潰電流，但其實不然，因為電容分布的關係，流經 APD 的其中部分電流，會回流至 APD 的等效電容中，於是在 R_s 輸出端所得到的電流並不等於流經 APD 的電流，而流經 R_s 的峰值電流 I_p 則可透過電路計算來估計大約的值與影響其值改變的相關電路組件，其簡化電路與計算如下

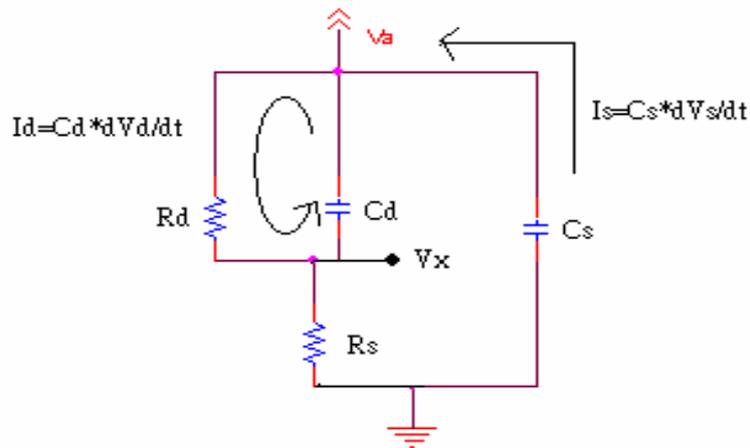


圖 3-12 Passive-Quenching 的簡化電路

由圖(3-12)中可以看到，我們在此模型上做了一些簡化的動作。只有在 APD 受到觸發而 ON 的時候， R_s 才会有電流的存在，而在此情形下電路中的兩個等效的電容皆是處在放電的狀態，而在 Rl 的值必須很大的前提下，APD 陽極的電

壓變化會非常緩慢(相對於電流上升的速度來說)，於是當 R_s 的電流達到峰值時，APD 陽極的電壓變化還很小，所以我們可以知道當 R_s 上的電流達到峰值時，由 R_l 貢獻的電流值是很渺小的，在此想法下我們簡化了 R_l 的存在。另外我們亦假設 C_d C_s 兩個電容在時間趨近於零時，內部電壓對時間的改變量是相同的，在此些條件下可以得到公式(3.6)，詳細的推導如下

$$V_x(t) = V_a \frac{R_s * I_s(t)}{R_d * [I_s(t) + I_d(t)] + R_s * I_s(t)}$$

$$= V_a \frac{R_s * C_s * (dV_s/dt)}{R_d * (C_s * dV_s/dt + C_d * dV_d/dt) + R_s * C_s * (dV_s/dt)}$$

假設 $dV_s/dt = dV_d/dt$ at $t \rightarrow 0$

$$V_s = V_c \frac{R_s}{R_d(1 + C_d / C_s) + R_s} \quad (3.6)$$

由公式(3.6)可發現電容 C_d 與 C_s 之間大小的比例會影響 APD 的電流輸出峰值。

3.2.5 實作結果與模擬結果的比較

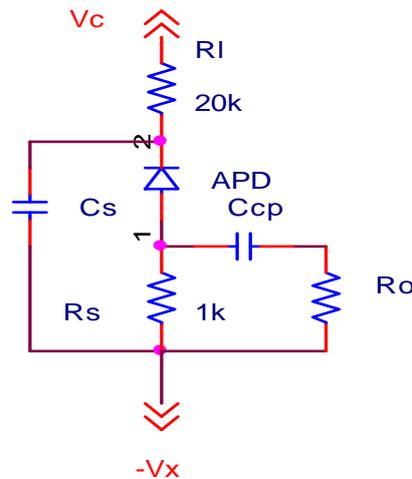
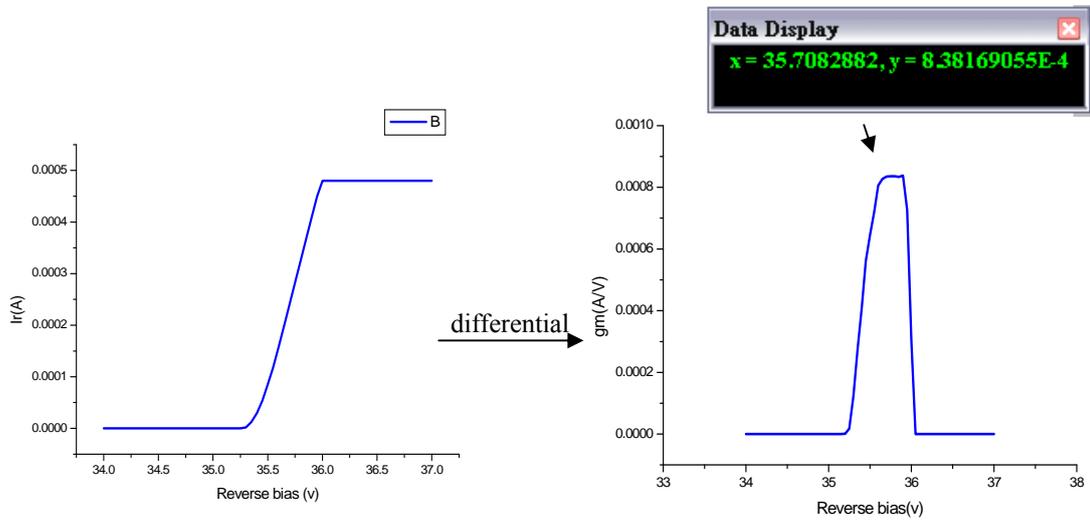


圖 3-13 實際的電路圖

前面已經驗證過 APD 在電性方面與開關具有某部分相同的特性，接下來要透過量測實際電路中 R_d 與 C_d 等效的值，帶進等效電路中模擬，且把模擬結果與實際結果作一比較，證明 APD 等效模型的可靠性。 R_d 電阻是用來代表實際 APD 在導通之後而產生相對應電流輸出的特性，而經由把 I-V 曲線微分且取倒數，可以得到一個相同於電阻特性的參數，我們定義此參數為 APD 本身導通(ON)狀態下的內阻。此處我們所使用的是 Mitsubishi 所生產的 APD，型號為 PD8042，圖(3-14)為我們透過計算後所得到的 R_d 值。經過運算過後我們可以得到在此狀態下的 APD 的等效電阻為 $1.2K\Omega$ ，要特別注意的是，此值在不同溫度時會有些微的改變。

再來則是要估計 APD 的等效電容，在購買此一型號的 APD 時，原廠有量測過 APD 的等效電容約在 $0.6\sim 0.7pF$ 的範圍，但是因為必須把 APD 操作在低溫環境下量測的關係，所以我們把 APD 擺放在一個自行製作的真空腔體內，再利用電線把 APD 的兩端連出來使用，在這些電線連接且與外界隔離的過程中，難免會有寄生電容的存在，所以必須要重新量測 APD 的等效電容值。此處使用三用電表進行簡單的量測，此電表的量測精準度為 $1p$ 。我們從真空腔體的兩點連接進 APD 的兩端進行量測，由圖(3-15)可以看到，量測出來的 $5pF$ 電容值是遠遠大於原廠所量測出來的 APD 電容值，由此可以知道在連接進腔體的過程中，線路增加了相當多的寄生電容(C_g)，而使模擬電路中 APD 的等效電容 C_d 等於 C_{APD} 加 C_g ，所以總共為 $5pF$ 。而除了 C_d 與 C_s 兩個參數之外，為了要使模擬更為確實，另外還量測了一個測量電路波形而必須存在於電路環境中的主動式探棒，探棒本身的原廠數據輸入電容數據是小於 $0.6pF$ 的，但是在為了要連接到電路上，我們使用了一個夾具，經過測定此夾具的電容值大約為 $3pF$ 。



$$R_{d3} = 1/g_{m3} = 1/8.38E-4 = 1.2k\Omega$$

圖 3-14 R_d 電阻的計算



圖 3-15 Cd 電容值

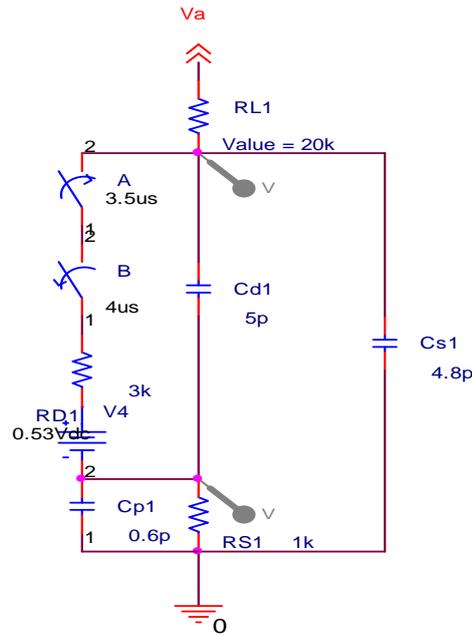


圖 3-16 模擬的 Passive-Quenching 電路

上述是對實際的組件的內部電容值作定義，現在我們由另外一個方向，也就是模擬的角度來講述模擬電路中各個電容是由哪些部分所組成的。Cs1 電容如我們前面所提到，是由 APD 的陽極端點對地之間的寄生電容所組成，但是在實際電路中，因實驗需求而會在 Cs1 接點對地之間加一個外部電容，另外因為量測 Vd 點電壓需要，所以會有主動式探棒與夾具的電容存在。而 Cd1 則是如同前面所提到的是由寄生電容與 APD 的內部電容所組成。在圖(3-16)中有一個前面沒有提到過的電容 Cp1，此電容在設計中，並不具有實質意義，但在實際量測時，必須要接主動式探棒與夾具，使得 APD 的陰極端點對地也有一個電容存在，於是我們也加入模擬之中，但是在實際使用於單光子偵測系統中時此電容不一定會存在。

經過上面各端點與組件的等效電阻與電容值對應之後，可以正式代入模擬電路中進行模擬，並與實際電路所得到的效應作比較。前面定義了一些暫態的電壓操作點，但是因為單光子偵測器有動態操作時期的存在，APD 操作在這些時期中時所花費的時間決定了單光子偵測器的偵測速度，另外前面也經由電路計算得

出一個電流的峰值公式，在此我們也透過電路的模擬與實際的量測來驗證它。

在模擬之中，我們畫了三個相同型態的電路如圖(3-17)，並依照需要來改變其中電容電阻的值。

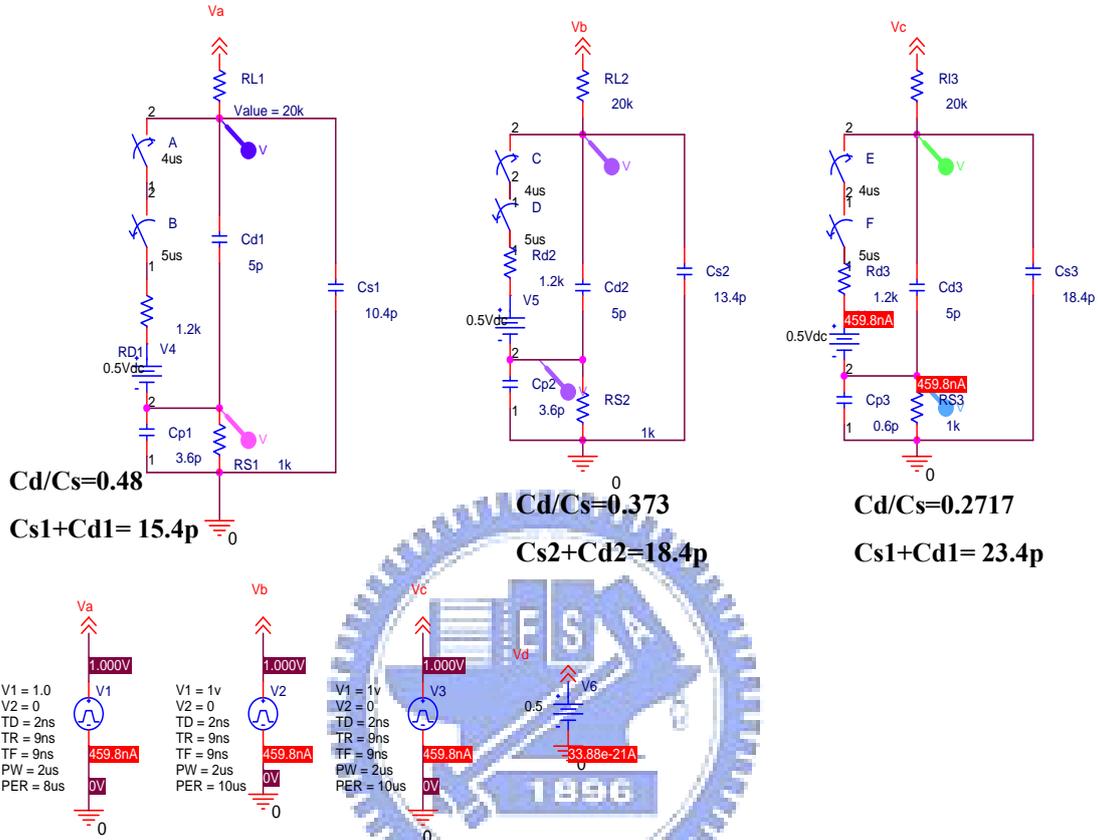


圖 3-17 在 SPICE 中建造的三個 Passive-Quenching 等效電路

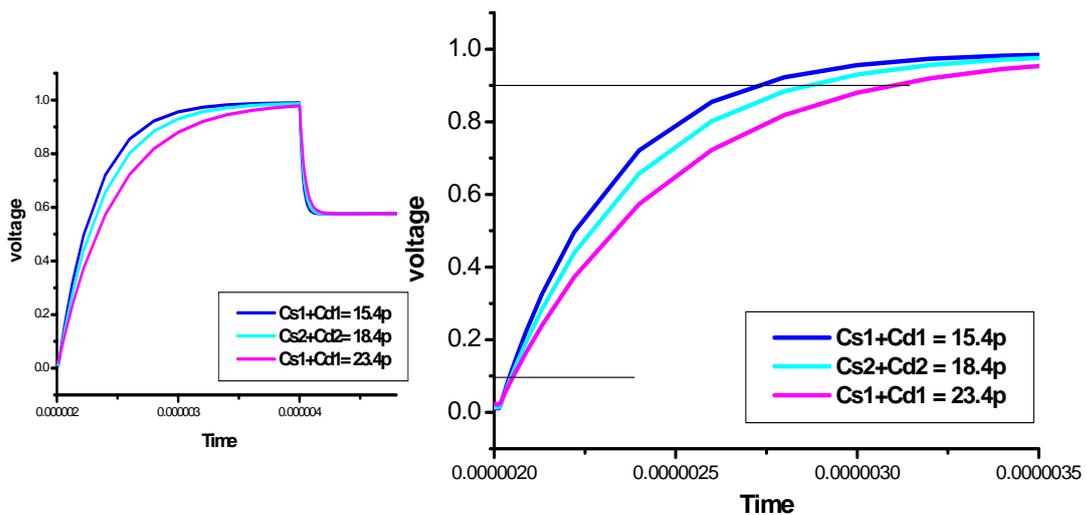
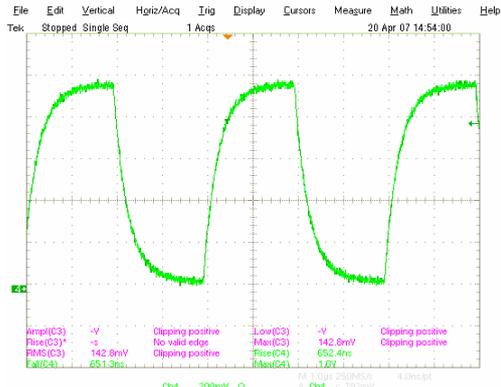
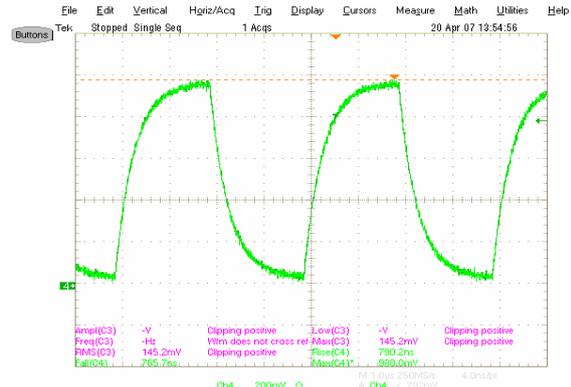


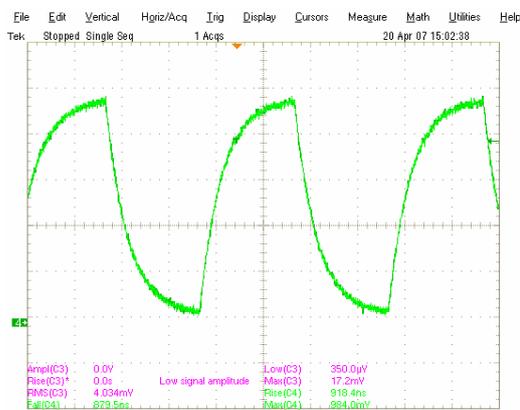
圖 3-18 模擬得到的上升電壓波形



(a)



(b)



(c)



圖3-19 實際量測得到的上升電壓波形

(a) $Cs1+Cd1= 15.4pF$
 (b) $Cs2+Cd2= 18.4pF$
 (c) $Cs1+Cd1= 23.4pF$

Rise time 2.2 RI (Cs+Cd)	Simulation Result (rise time)	Experimental Result (rise time)
$Cs1+Cd1=15.4p$	677ns	652ns
$Cs2+Cd2= 18.4p$	809ns	790ns
$Cs1+Cd1= 23.4p$	1029ns	918ns

表 3-1 模擬與實作上升時間的結果比較

圖(3-18)為模擬得到的上升時間結果，圖(3-19)為實作得到的上升時間結果。模擬與實作的結果列於表(3-1)中，由表中我們可以看到，當 Cd 加 Cs 越大，則操作電壓所需的上升時間就越長，我們先暫時不討論此一現象對電光子偵測器的表現影響好壞與否，此部分我們留待後面 Passive-Quenching 單光子偵測器的結果部分在作討論。

接下來要驗證的是，在前面提到過關於電流輸出的峰值是否真的如公式所推測的表現，於前面的模擬電路中，分別製作了三種不同的 Cd/Cs 電容比例，並與實作電路比較其結果

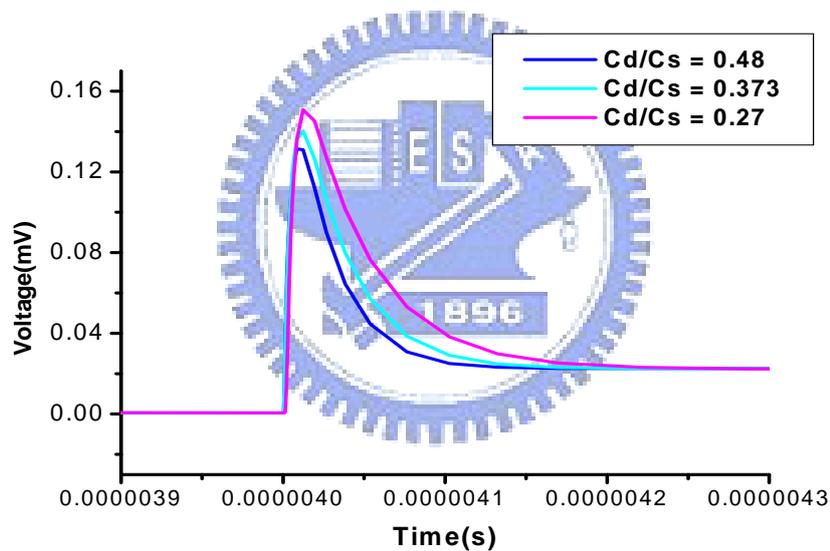
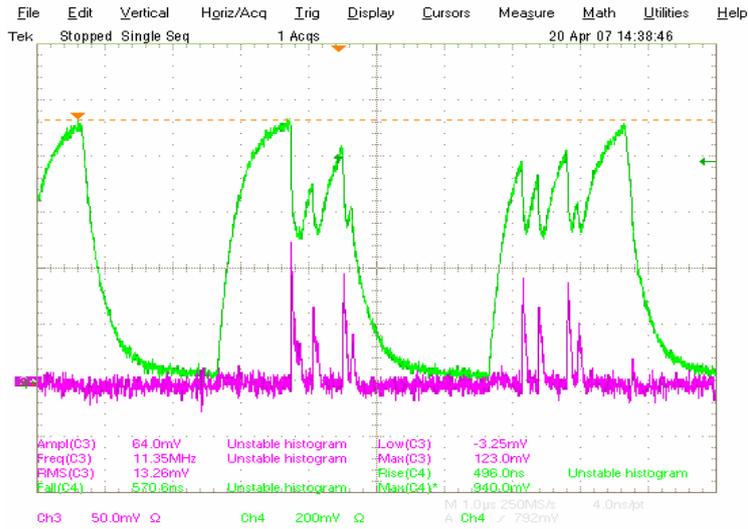
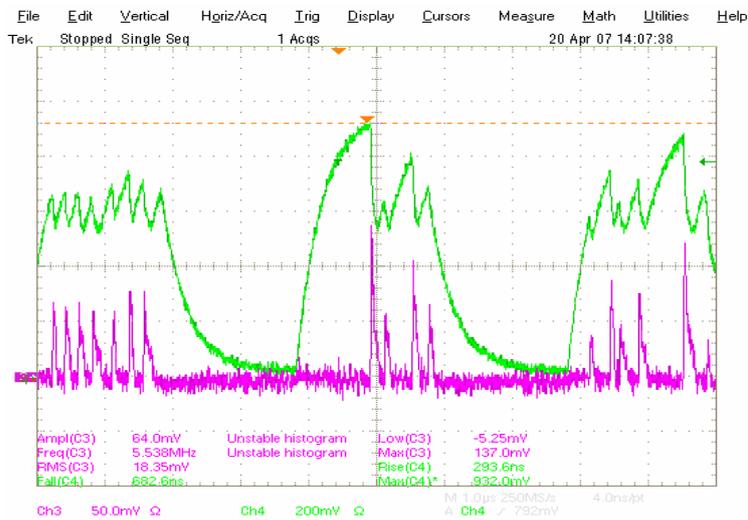


圖 3-20 Passive-Quenching 模擬峰值輸出結果



(a) $Cd/Cs=0.48$

Low(C3) -3.25mV
Max(C3) 123.0mV



(b) $Cd/Cs=0.373$

Low(C3) -5.25mV
Max(C3) 137.0mV



(c) $Cd/Cs=0.27$

Low(C3) -3.25mV
Max(C3) 161.0mV

圖 3-21 Passive-Quenching 實作峰值輸出結果

電容比值	模擬結果 (peak amplitude)	實驗結果 (peak amplitude)
Cd/Cs=0.48	128mV	123mV
Cd/Cs=0.373	140mV	137mv
Cd/Cs=0.27	151mV ↓	161mV ↓

表 3-2 模擬與實作峰值輸出結果比較

圖 (3-20) 為 Passive-Quenching 模擬峰值輸出結果，圖 (3-21) 為 Passive-Quenching 實作峰值輸出結果，把兩者結果合併於表(3-2)中比較可以看到實驗與模擬的結果都支持著我們經由電路所計算出來的公式，如此我們可以確信，在 Passive-Quenching 電路中 Cs 的值不可以太小，否則輸出電壓 Vs 的峰值會太小甚至不能看到有峰值電流的發生，而此推論也在我們電路製作的初期結果，得到了驗證。另外，Vs 的峰值太低的話，其太小會與背景的电壓波動(noise)相同，在如此情況下在就不能經由後級的鑑別器來過濾掉背景的雜訊，而使得單光子偵測器會得到錯誤的結果。

於此我們把得到 Passive Quenching 電路中的各個組件的特性與功能作一個統整

- R1 為 Quenching 電阻，此值必須要夠大才可以有關閉 APD 的作用，但是過大的話，會增加操作電壓的上升時間，減慢單光子偵測器重複操作的速度
- Cd/Cs 比值必須要有夠小，換句話說就是 Cs 要比 Cd 大，如此流經 APD 的電流才会有足夠的部分流經 Rs 電阻，形成夠大的輸出電壓訊號
- Cs 與 Cd 總合必須盡量小，如此可以增加 Passive Quenching 電路的反應時間 (Response Time)

3.3 Active Quenching 電路

由 Passive Quenching 電路解析結果可以明顯發現其主要缺點為上升時間長而減慢了單光子偵測器的偵測速度，於此我們必須透過另外一種方式來關閉 APD。由前面的實驗與討論可以得知，關閉 APD 最直接的想法就是把兩端的跨壓降到崩潰電壓之下，所以另外一種利用主動元件把操作電壓降至低於崩潰電壓的 Active Quenching 電路[3,4,8]，可以被用來關閉 APD 並同時改善 Passive Quenching 的缺點，其電路的組成如圖(3-22)。

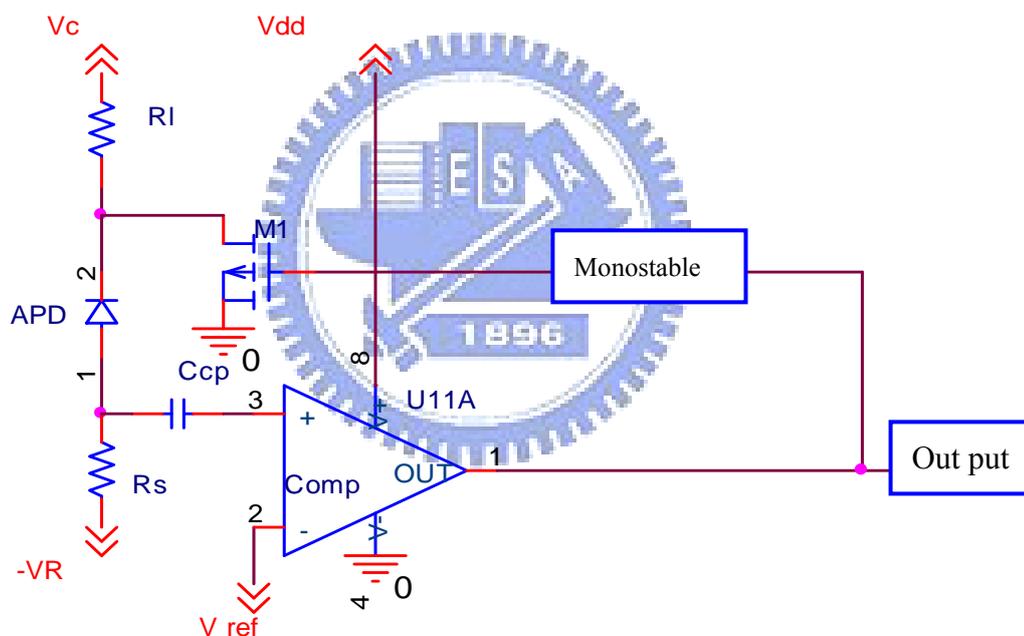


圖 3-22 Active Quenching 電路示意圖

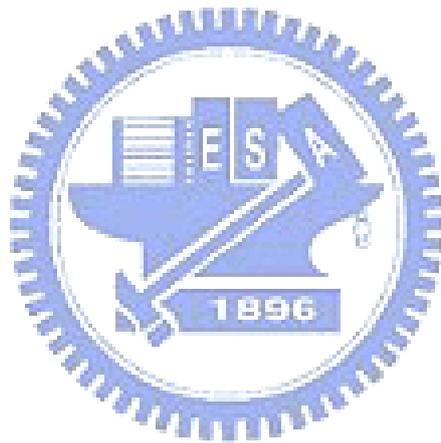
由電路圖中可以注意到，左半部分還是與之前介紹的 Passive-Quenching 相同，但是不同的是此時電路中的 RI 並不在是為了要關閉 APD 而存在，而是透過 M1 開關來把 APD 陽極電壓拉至崩潰電壓之下以關閉 APD，以下說明此電路中的幾個關鍵部分。

此電路的前半部分與 Passive-Quenching 相同，但是訊號經由 R_s 輸出後，需透過比較器來過濾掉背景的雜訊，避免 Quenching 開關因接收到假性的訊號，也就是說 APD 並沒有打開，但是 Quenching 開關卻因為雜訊的影響而打開造成錯誤做動，另一方面亦可以透過此級來放大電壓訊號，有利於後面的訊號處理。前面提到過此電路是利用外部開關來關閉 APD，而控制開關的訊號是由輸出訊號回授至開關的閘極而控制 APD 的打開或關閉，但是在此之前須先經過一個訊號寬度控制 IC，monostable，此 IC 可以控制電壓訊號的寬度以達到控制 APD 關閉且等待一個標準化的時間，亦即 APD 的死亡時間，此機制可以有效的降低 After pulsing 效應。

現在來說明開關是如何 Quenching APD 的，在電路設計中是使用一顆 DMOS 電晶體來當作開關，實際我們使用的電晶體型號為 SST221，選取此一顆 IC 的最主要原因有兩點，其中一點是 DMOS 導通時內阻必須要小，因為當 APD 打開時 V_d 點的電壓值會等於 $R_{mos}/R_{mos}+R_l$ ，而 SST221 的導通內阻為 50Ω ，於是 R_l 只需比 R_{mos} 大上一一定的比例即可(大約 1K)使 APD 的陽極電壓趨近於零，於是 APD 兩端的壓差會小於崩潰電壓而達到關閉 APD 的目的，假設 R_{mos} 本身的內阻過大則 R_l 也必須加大，而充電時間變長就失去了作主動式 Quenching 的意義了。另外一個重點則是電路中的三顆 IC，比較器、monostable、DMOS 開關皆須注意的條件，APD 的結構本非常複雜，其累增崩潰效應包含很多物理特性在其中，當不能透過製程技術改良時就必須透過電路操控技術壓榨 APD 本身的性能，而在 APD 中有幾種特性是我們非常不樂見的，在第四張會介紹的 APD 內部 After pulsing 效應，要抑制它的其中一個方式就是當 APD 崩潰的時候，利用電路的作動來迅速關閉 APD，使 APD 崩潰的時間縮短，減少 trap center 捕捉的可能性，於此思考之下就可以知道當 R_s 一產生崩潰電流之後，必須盡力縮短 DMOS 關閉 APD 的時間，所以我們必須要尋找 IC 本身高低電壓轉換時間與通過延遲的時間都很小的 IC，如此才可以盡量縮短從崩潰到關閉之間的時間差，增進 APD

重複偵測光子的能力。

此一電路目前在備料的階段，我們是利用 ANALOG DEVICE 的 AD96685 當作比較器，其延遲時間皆在 4ns 之內，而前面提到的 DMOS 開關的打開時間則為 1ns，這兩個 IC 都可達到我們的要求，但是目前在 monostable 方面可找到時間最短的為 15ns 左右，其時間差強人意。此電路我們並未實際作出，目前只在此提出電路系統本身的概念、製作條件及原因，而詳細的系統測試，未來製作出後再做分析。



3.4 Gated Mode 電路

這是另外一種不同於前面的電壓偵測機制[6]，此處基本上是用來探討 APD 對脈衝光源的探測能力，此偵測模式中 APD 操作在單光子偵測的區間非常短(小於 50ns，通常為 2ns 左右)[14]，其波形如圖(3-23)內咖啡色線。在探測期間內，利用同步觸發訊號的控制，產生一個半高寬為 25ps 的脈衝雷射光源，如圖(3-23)內紅色曲線，且控制一個脈衝雷射內所含有的光子數為一顆或小於一顆，來對 Geiger-Mode APD 偵測短時間內光子出現與否的能力，作一個定量的分析。圖(3-23)中 V_R 為操作在 APD 陰極的負電壓使 $V_R + V_g > V_B$ ， V_B 為 APD 的崩潰電壓， V_E 為操作在 APD 之上的超額電壓， T_g 為 APD 操作在崩潰電壓的時間長度， T_{rep} 為 APD 電壓操作的重複時間。

Gated Mode 電路與主動式電路一樣，都是利用外部操控電壓變化來達到關閉 APD 的目的。在 Gated mode 電路中，如同圖(3-24)所示的直接利用脈衝產生器與一個 DC 電壓源，達到如圖(3-23)所示的電壓變化。與前面的探測機制較不相同的是此處 APD 不管有沒有被觸發產生電流，在一定的時間之後，APD 的兩端電壓即會被拉下到崩潰電壓之下，等待下一次的探測，脈衝與脈衝之間的時間，即為我們所述的死亡時間，此時間與主動式電路裡的死亡時間作用相同，但 Gated Mode 可以透過儀器來隨時改變 APD 的死亡時間。大家會發現此電路的結構跟之前用來定義 APD 操作在 Geiger-Mode 的暫態特性時所用的結構相同，但是此處我們會希望電壓脈衝的寬度盡量短，以減低雜訊的數量，且此電路配置只能用在可以精準知道光子到達時間的情況之中。

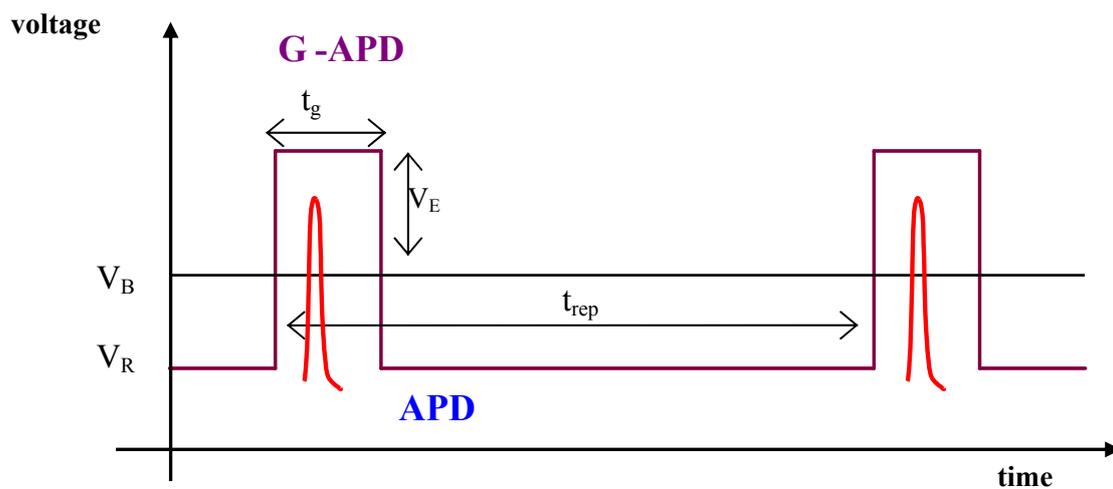


圖 3-23 Gated Mode 電壓變化示意圖

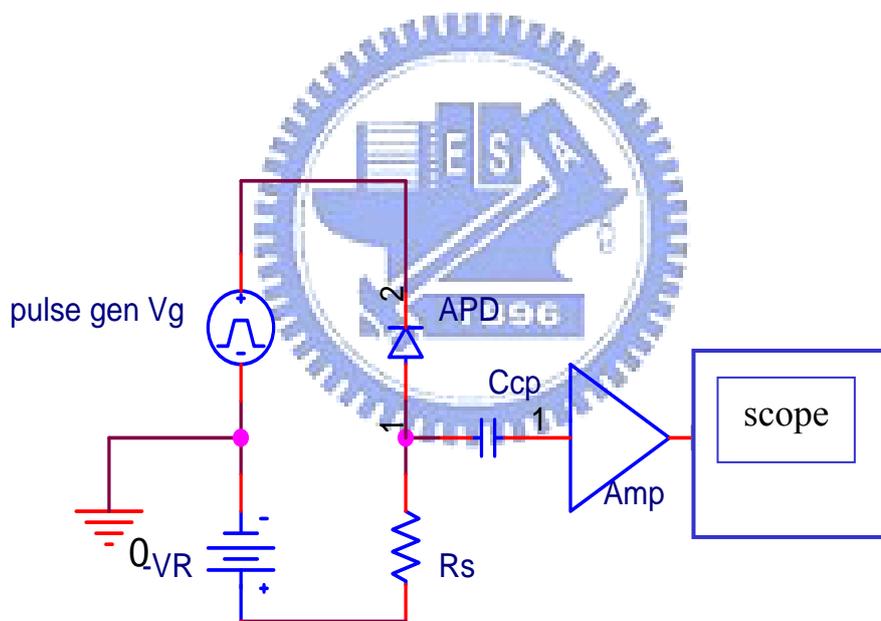


圖 3-24 量測系統示意圖

第四章 單光子偵測器

4.1 單光子偵測系統結構

在了解了 APD 在單光子偵測器中的操作原理與相對應的 Quenching 電路之後，便開始著手製作單光子偵測系統，圖(4-1)為單光子偵測器的系統架構圖，由圖中可以看到 APD 是放置在一個可控制溫度的腔體之內，且與外部的 Quenching 電路做連接。HP8114A 脈衝產生器與 Keithley 230 是用來對 APD Quenching 電路兩端做偏壓，使 APD 可以操作在 Geiger-Mode 且重複偵測，APD 的輸出訊號則會經過放大器與鑑別器的雜訊處理後交由計數器統計結果，同時每一個電訊號的輸出都會連接到示波器上做同步的觀測以了解系統的輸出情形。而光源方面則是透過雷射源與衰減器來得到我們所需要的光量。

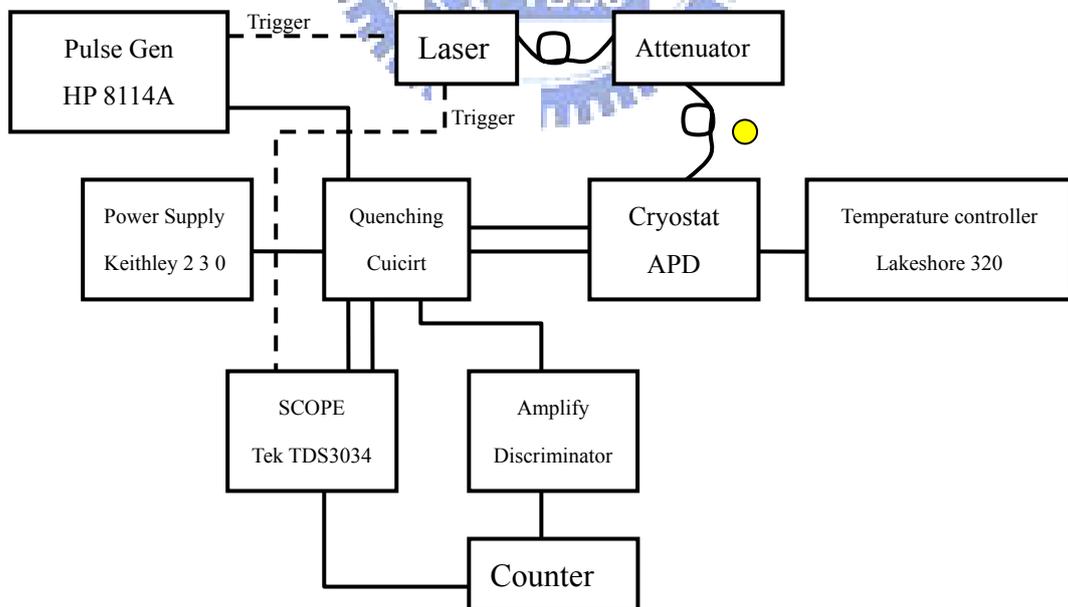


圖 4-1 單光子偵測器系統架構圖

4.1.1 溫度控制系統

溫度的高低會影響 APD 的暗電流值，亦會影響單光子偵測器的表現，所以我們必須對 APD 做一個降溫的動作，以減少單光子偵測器本身的雜訊。圖(3-2)為實驗中的低溫腔體示意圖，由圖中可以看到 APD 是放置於一個真空的腔體之中，此動作是預防在溫度低過零度 C 時 APD 表面會結水氣，且因外接電路進入腔體當中的關係，所以要有電匱入裝置(Electrical Feedthrough)的存在，另外我們也利用光纖的匱入裝置(Fiber Feedthrough)來提供一條光路給光子進入 APD。

此系統是把光子限制在光纖內作傳輸，此項措施可以確保光量的穩定，也可以使實驗的過程不需要在無光的環境中操做，大大的增加了實驗的便利性。此實驗中我們是利用液態氮(Liquid Nitrogen)來做 APD 的降溫，且透過腔體內的加熱器 (Heater)與溫度感測器(Temperature Sensor)，來控制腔體內的溫度值。

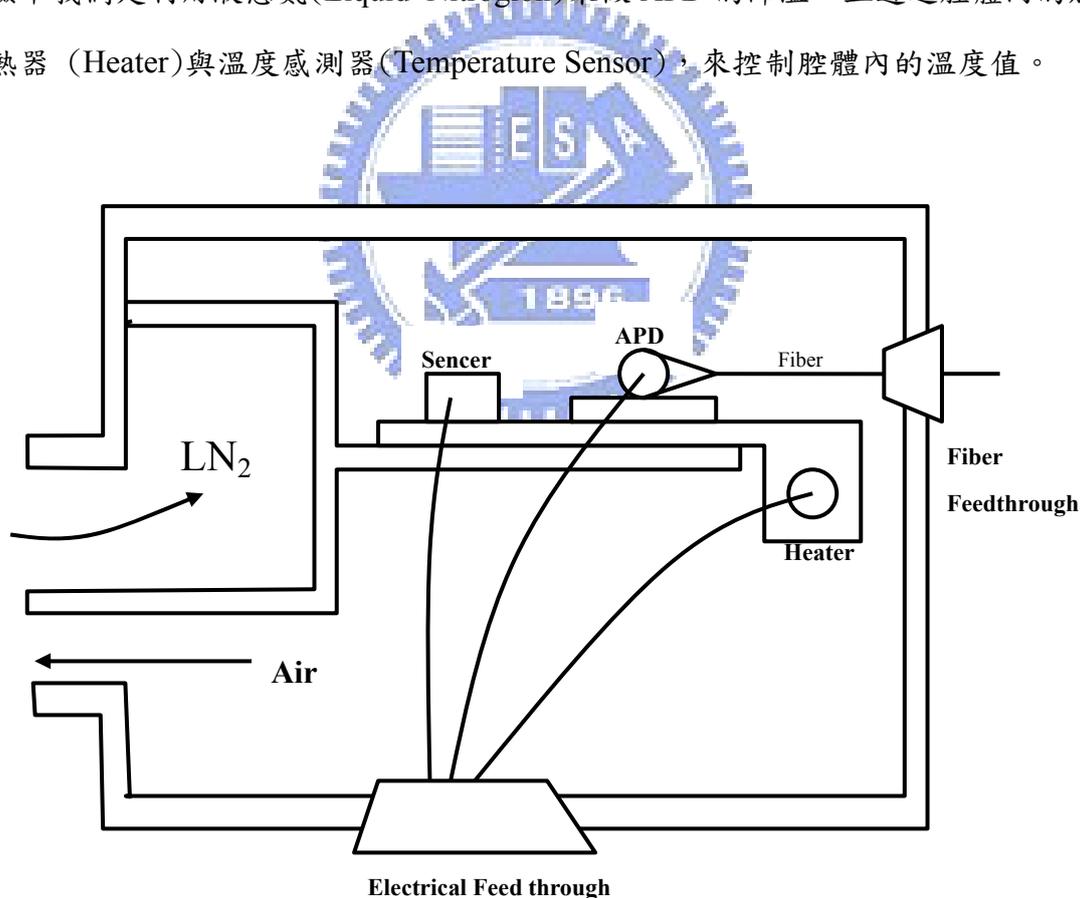


圖 4-2 低溫腔體內部結構示意圖

由圖(4-2)中可以看到 APD、Heater、Sensor 是置於一個與腔體分離的銅座上，而實際的裝置中我們在腔體與銅座之間加入了一層錫箔紙來降低加熱器控制溫度時所需的熱量以能精準的控制 APD 的溫度，如此除了可使溫度更易於穩定之外，也可減少液態氮消耗。在加熱器的電壓供給方面，是利用定電壓的電源供應器使加熱器提供穩定的熱輸出，並透過與液態氮做抗衡來穩定溫度。

4.1.2 Quenching 電路製作與偏壓源取得

APD 在偵測單光子時必須被操作在崩潰電壓之上且重複的偵測，所以接下來要介紹可以在 APD 被觸發後關閉 APD 的 Quenching 電路實際製作方式。

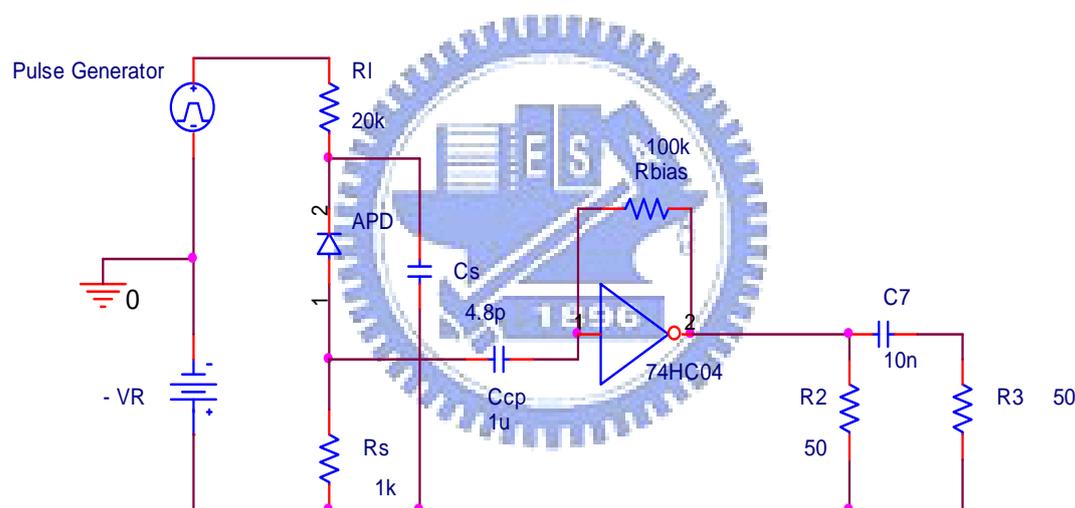


圖 4-3 電路系統示意圖

圖(4-3)為 APD 與 Quenching 電路結合後的電路示意圖，除了 APD 本身之為，此電路在實際製作分為兩塊，左半部即為前面介紹過的 Passive-Quenching 電路而右半部則為反相器電路。由圖(4-3)可以看到，APD 的 Quenching 電路需要一個電源供應器與一個脈衝產生器來當做 APD 的偏壓源。而在此實驗中我們分別使用 Keithley 230 與 HP 8114A 來當作 APD 的偏壓源。電路的製作方面則是使用 SMD 電阻與電容且利用鉚錫固定在電路板上，而電源的匯入是利用 BNC

的接頭來與電路板作一連接，讓電源可以偏壓至 APD 的兩端。

APD 的電流訊號經由 R_s 輸出之後會進入一個型號為 74HC04 的反向器 IC，有此反相器的作用是透過訊號的反轉 R_s 輸出訊號與後極放大器做一連接。且反相器電路中的回授偏壓電阻 R_{bias} ，可使反相器的 DC 輸出壓降回授至反相器的輸入端使反相器可以操作在放大區，如此反相器不僅可以反轉電壓值，亦有放大 APD 輸出訊號的效果。 R_2 是反相器的輸出電阻，此電阻上的壓降是 DC 與 AC 皆存在的，但是後極的反相器只能接受 AC 訊號，所以我們加入電容 C_7 與電阻 R_3 以得到純 AC 訊號的輸出。

在此說明的是，我們利用了兩種方式來 Quenching APD，一種是 CW 操作的 Passive Quenching，另外一種是脈衝寬度極短的 Gated Mode，兩種操作方式的本質不太相同。在 Passive-Quenching 中是靠大電阻的分壓來關閉 APD，所以 R_1 非常的大，但在此我們並不是使用 CW 的電源偏壓，而是使用週期為 100KHz 且 Duty cycle 為 80% 的脈衝來近似 APD 的 CW 操作，但在 Gated Mode 操作中則是利用脈衝產生器的快速電壓變化來關閉 APD，在此情形之下 Gated Mode 的電路配置中不再需要 R_1 電阻的存在，而電路組成如圖(4-4)。

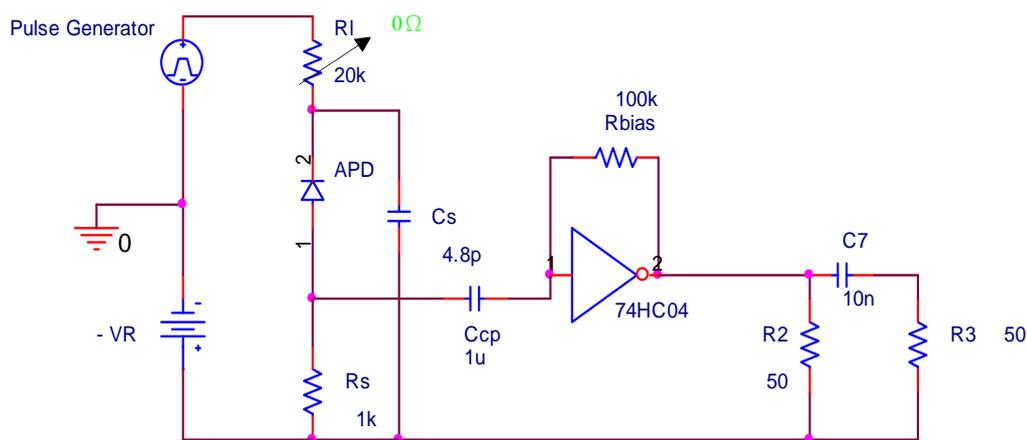


圖 4-4 Gated Mode 電路示意圖

4.1.3 波形檢測與處理

示波器(Oscilloscope)是用來檢測 APD 兩端點的電壓輸出波型與各個儀器的輸出訊號檢測，且在量測 APD 的兩端訊號時，我們使用了一隻主動式探棒配合量測。一般的被動式探棒，因為內部沒有一個緩衝器存在，所以探測時會直接看到示波器內部的電容，使得訊號輸出變慢且容易失真，另外主動式探棒的內部電容為 1pF 以下，遠小於示波器本身 11pF。而就頻寬的部分來說，因為 APD 的電流輸出半高寬大約為 5ns，於是在完整解析此電壓波型的條件下我們需要一個頻寬高於 200MHz 的示波器。同樣的，主動式探棒的頻寬也必須要高於 200MHz。我們使用主動式探針的型號為 P6243，頻寬為 1GHz。

放大器與鑑別器在偵測系統中是扮演著過濾訊號的角色。從 Quenching 電路輸出的訊號中會夾雜的因為電壓波形變化而產生的邊緣雜訊，經由放大器的放大來增加邊緣雜訊與 APD 輸出訊號的差距之後，再利用鑑別器把邊緣雜訊去除，使後端的計數器不會得到錯誤的計數結果。

計數器(Counter)是用來統計 APD 輸出訊號的儀器，可以透過此計數器統計出來的結果變化來對照不同光量的光源輸出，進而達到光量鑑別的目的，我們使用的是 Stanford Research System 的 SR400 Two Channel Gated Photon Counter，此計數器的 200MHz 頻寬為足以勝任我們系統的頻寬需求。

4.1.4 光源的定義與取得

在此要了解光源特性並定義單光子的等效光量，且說明在實際的實驗中要如何得到單一個光子。對於單一光子的概念，其實只是把傳統光強度的計量單位 (Watt) 改變成光子的個數(顆)來做定義，我們透過換算光量的公式(4.1)來定義單一光子的等效光量

$$N_{in} = P_{in} \lambda / ch \quad (4.1)$$

經過公式計算在一秒鐘內只能有一顆 1300nm 波長光子出現的等效光強度值為 $1.5 \times 10^{-19} \text{W}$ ，換句話說要在一秒內得到一顆 1300nm 波長光子的話，我們必須把光源的強度降到 $1.5 \times 10^{-19} \text{W}$ 。此項資訊對於在實驗中實現所謂單一光子的訊號有著很大的助益。

在 Passive-Quenching 與 Gated Mode 的環境中，光量定義與取得並不相同。在 Passive-Quenching 中，我們是利用一個雷射二極體來當作 Passive-Quenching 的光源，且使用脈衝產生器的觸發訊號控制來達到光源與 Gated 訊號的同步，前面提到過 Gated 訊號為的重複速度為 100KHz 且 Duty Cycle 為 80%(8us 的 Gated width)，於是我們可控制在此訊號的時間中光源的強度，並把它換算成光子數，而且因為雷射光的半高寬很寬(8us)的關係，所以並不能確切知道光子在探測區間內的到達時間，所以此光源可以用來模擬 CW 光源的表現。正因為如此，Passive-Quenching 在定義光量時，只能以一秒內到達光子數來計算。假設一秒內的光量為 10^{-13}W 時，透過公式(4.1)可得到在一秒內有 6.67×10^5 顆光子的存在。而在 Gated Mode 中，我們使用的是脈衝雷射光源，此光源的特性為半高寬窄(25ps)且可使用於短 Gated Width 的良測之外，同時具有半高寬窄的特性而使得我們可以知道光子到達的時間只會存在於 25ps 的半高寬之內，透過這個機制可以定性的量測很多 APD 的物理特性，而在 Gated Mode 中我們對光子的計算方式與 Passive-Quenching 相同，但是因為光子進入 APD 的時間可以被某種程度上明確的定義，所以在 Gated Mode 的量測中可以得到每一個光脈衝之內包含了幾個

光子數。在實驗中我們把每個脈衝中的會出現的光子數減少至 0.1 個，以此量測 Geiger-Mode APD 對於單光子的偵測能力。在實驗中之我們是透過光衰減器來降低雷射源所發出的光量而達到我們所需要 10^{-13} W 等級的光量值。

4.1.5 光脈衝與探測脈衝的同步

在實驗之中，不管是 Passive-Quenching 還是 Gated Mode 其實都有脈衝訊號的存在，差別在於 Quenching 機制的不同，使得脈衝的寬度有長短之分，但是對於光源來說都必須要做時間同步的動作。在單光子偵測器的操作系統之中，假設沒有光源的進入但依然會造成訊號的輸出而形成一個雜訊的計數，如此會降低 APD 的光探測效率，於是在量測時會盡量避免 APD 在沒有光進入時進行探測，於此原因下必須使光源與 APD 探測區間作一個匹配。

我們是透過 APD 脈衝偏壓源 HP8114A 來做一個時間的基準，並透過觸發訊號來控制電源觸發雷射的時間點以達到同步的目的，但是 HP8114A 發出觸發訊號觸發雷射訊號且透過光纖的傳輸到達 APD 的時間延遲包跨了雷射本身的上升時間與光纖傳輸的延遲時間，經過觀察總共的延遲時間大約為 100ns 左右，這樣的大小對於 Passive-Quenching 中光訊號寬度與 Gated Width 寬度 8 μ s 來說極為渺小，但是在 Gated Mode 中光源的半高寬為 25ps 且 Gated Width 為 40ns~20ns 之間，所以 10ns 的時間差都會導致 APD 完全偵測不到光的存在，所以在 Gated Mode 中關於光源同步的技術是非常重要的。

4.2 量測流程

首先，要把 Cryostat 抽真空，一段時間後再從液氮孔注入液態氮使 APD 降溫且利用加熱器與溫度感應器控制與調整溫度，在溫度穩定之後使用 HP4145 量測當此溫度之下時 APD 的崩潰電壓，在確認崩潰電壓的值之後調整 Keithley 230 上的 VR 值，且透過調整 HP8114A 輸出的脈衝高度來決定操作在 APD 上的超額電壓值，而 Gated Mode 量測中還需調整相對應的重複速度與 Gated Width，然後透過光強度計與衰減器來得到在各種條件下光子數對應的光量值。再來是打開示波器，反相器，鑑別器，計數器的電源，且檢查各個部分訊號的對應性，前後極訊號的相對性，在系統各部分皆穩定之後，即可以開始進行量測，透過改變溫度、超額電壓值、重複速度、Gated Width 與光源的變化，可以分析出此一 APD 操作在 Geiger-Mode 時的特性表現，也代表著此一單光子偵測器的特性表現。



4.3 單光子偵測器主要參數介紹

介紹完了APD操作在Geiger mode時的特性，且描述了如何製作一個完整的單光子偵測系統架構之後，現在我們要來定義一些代表單光子偵測器能力好壞與否的重要參數。

4.3.1 Dark Count Probability (rate)

在單光子偵測系統中存在著一種非訊號的事件，此事件是由偵測器內部所自行產生，經過計數器累計後形成單光子偵測器的重要參數- Dark count rate。

單光子偵測系統在使用時並不能區分出單一次累增崩潰效應是由光子或暗載子所產生，所以如何減少暗事件的數量是現今致力於增進單光子偵測器能力的一大方向，而暗事件是由下列兩個現象所主導[10,14]:

(1)熱雜訊，(2) Trap release 效應

(1)熱雜訊是由於在高溫時，電子因熱能而從價帶被激發到導帶上形成電流，所以我們可以透過降溫的方式來降低熱雜訊的發生。

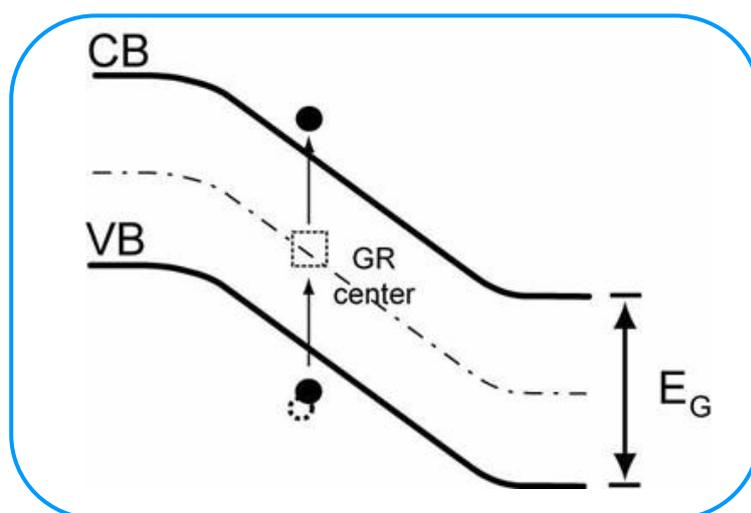


圖 4-5 熱雜訊示意圖

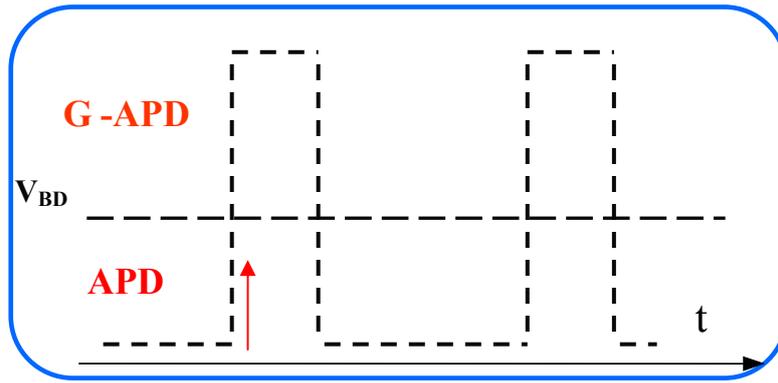


圖4-6 熱載子的數量與時間的關係

在時間對Dark count的影響方面，隨著單光子偵測器的操作電壓高於崩潰電壓時間區間的縮小，暗載子在此區間內流入的數量也會降低，於是影響了Dark count的總數，暗載子數與電壓操作時間關係如下公式(4.2):

$$N_{DARK} = \frac{I_{DM} \tau}{q} \quad (4.2)$$

I_{DM} : Primary dark current of APD τ : Gated width

(2) Trap Release效應又稱為After Pulsing效應。在累增崩潰期間大電流流經元件內部時填滿了元件內部的Trap Center，使APD再度探測時有一定的機率被從Trap Center中被釋放出來的載子觸發而形成重複的計數。

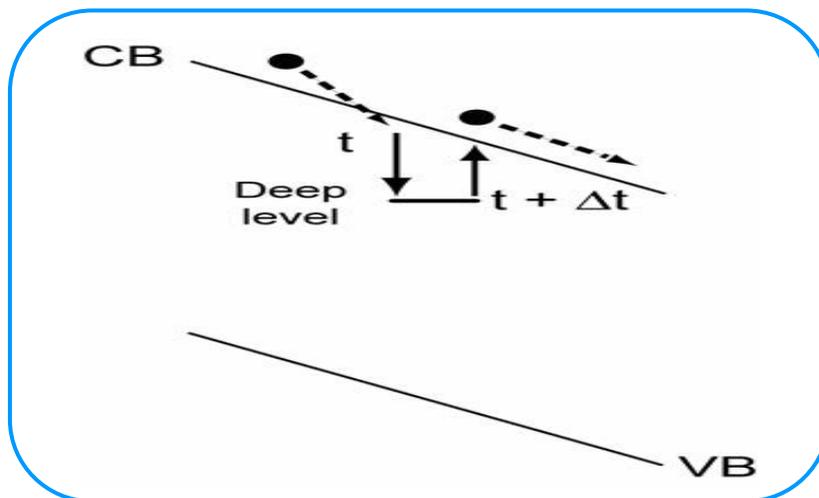


圖4-7 Trap release 效應

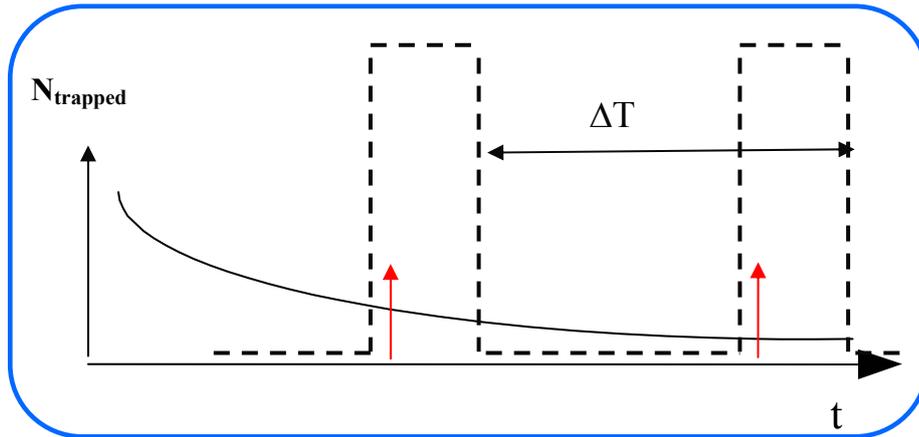


圖4-8 Trap效應與對時間的關係圖

假設被捕捉後釋放的載子數量($N_{trapped}$)與捕捉生命時間(τ_d)的關係依循指數函數的分布特性，則我們可以得到下面的公式(4.3)[11]，此公式代表著當APD的重複速度為 ΔT 時，在電壓脈衝時間 τ 內，捕捉載子被釋放的平均數量。

$$\begin{aligned}
 N_{release} &= P_d N_{trapped-0} \sum_n \left[\exp\left(\frac{n\Delta T - \tau}{\tau_d}\right) - \exp\left(\frac{n\Delta T}{\tau_d}\right) \right] \\
 &= P_d N_{trapped-0} \frac{\exp\left(\frac{\tau}{\tau_d}\right) - 1}{\exp\left(\frac{\Delta T}{\tau_d}\right) - 1} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

$N_{trapped-0}$ 為單一次崩潰平均會被捕捉的載子數量、 P_d 為Dark count rate

對After Pulsing效應來說溫度與時間所造成的影響是有相互關連性在的，所以必須一起討論。APD內部的捕捉釋放生命時間(τ_d)的長短是由溫度的高低所控制的，溫度高時捕捉釋放生命時間會較短。在固定溫度也就是固定 τ_d 的環境下，由公式(4.3)可以看到要降低After Pulsing效應的方式有下面兩種：

- (1) $\tau \ll \tau_d$
- (2) $\Delta T \gg \tau_d$

Trap center的數量是跟材料本身的缺陷數量有關，而矽材料本身的缺陷數是較少的，所以Si APD本身受到捕捉釋放的影响較少，但是對於III-V族材料來說，天生的磊晶均勻度相對於矽來說是較差的，所以缺陷的數量也較多。且在InGaAs / InP APD中還有著陡變接面的存在，而在晶格不匹配的情況下勢必會有更多的缺陷存在，種種的因素都說明InGaAs/InP APD 會受到較多的Trap Release效應的影響。

4.3.2 Detection Efficiency

Detection efficiency 是單光子偵測器的光偵測能力的指標型參數。一個光子進入APD產生電流輸出，基本上是由兩個主要的內部物理機制所造成的

第一個機制 Quantum Efficiency - 主要代表著一個光子有多少的機會被APD的吸收層所吸收且形成一個光產生的電洞然後被電場掃進累增層。

第二個機制 Trigger Probability - 主要是代表著光所產生的電洞在進入高電場的累增層之後有多少的機率可以產生可自我維持的累增崩潰機制，此兩項機率的乘積即為Detection efficiency[15]。

在統計方面來說，Detection Efficiency 的定義則簡單明瞭的為一個光子有多少機率可以形成一個計數[12]，等同於下面的公式(4.4)

$$DE = \frac{\text{Count}_{\text{signal}}}{P_{\text{incident}}} \frac{h\nu}{\lambda} \times 100\% \quad (4.4)$$

經過公式(4.4)就可以把得到的計數結果做一處理，得到此APD對光子探測的能力指標。

4.3.3 Noise Equivalent Power (NEP)

在光偵測器中NEP是一個判定偵測器好壞的關鍵參數，我們可藉由比較偵測器的NEP值來分辨兩者之間的好壞，其定義為需要多少的光量才可以使APD的SNR值等於一。

單光子偵測器的輸出計數值的分佈是遵照Poisson distribution的理論，所以對於單光子偵測器來說必須透過分析Poisson distribution的平均值與標準差來計算SNR與NEP。Poisson distribution的輸出平均值為一個輸出計數值M，而Poisson distribution標準差為 \sqrt{M} ，在了解Poisson distribution的平均輸出值與輸出標準差之後，即可帶入討論單光子偵測器的SNR與NEP[13]。

下面為單光子偵測器的SNR與NEP公式的推導：

有光的環境下1秒鐘積分時間內的訊號總合=光計數+暗計數

$$S_{S+D} = (N_S + N_D) \pm [(N_S + N_D)]^{1/2}$$

無光環境下1秒鐘積分時間內訊號總合=暗計數

$$S_D = (N_D) \pm [(N_D)]^{1/2}$$

把兩樣相減可得由光訊號造成的計數值 $S_S = (N_S) \pm [(N_S + 2N_D)]^{1/2}$

則 $SNR = S_S / \Delta S_S = [N_S / (N_S + 2N_D)]$

而NEP的定義為要多少輸入訊號的能量才可以使SNR值為一

$$\text{且 } N_S = \frac{P_{in}}{h\nu} DE$$

$$NEP = \frac{h\nu}{DE} \sqrt{N_S + 2N_D}$$

$$N_D \gg N_S \text{ 所以 } NEP = \frac{h\nu}{DE} \sqrt{2N_D} \quad (4.5)$$

DE是Detection efficiency， N_D 是Dark count rate， h 是浦郎克常數， ν 是光的頻率

第五章 量測結果

5.1 單光子偵測器操作條件定義與特性分析

第四章提到過單光子偵測器的相關參數，與可影響它的外在變因(溫度，電壓，速度..等)，現在就要利用實驗來分析上述變因對單光子偵測器的影響。此一實驗中使用的Avalanche Photodiode為日商NEC(NR8300)所製造的。而在實驗前我們必須對APD的一些基本參數作一個定義，在後續的量測中才可使用此數據來定義所需的變因。

由第二章對操作在Geiger-Mode APD特性的表述可以知道，崩潰電壓是對於此APD操作在不同狀態的分界點。而在低溫時，因為APD內部的載子擾動的能力降低，使得載子在累增層中可被加速較長的距離才會發生碰撞，於是在低溫狀態下APD內部的崩潰電壓會降低，所以在做變溫實驗前需要對不同溫度下的崩潰電壓值作精確的定義。使用圖(5-1)圖中的系統即可得到如圖(2-5)的特性曲線，以決定在特定溫度下的崩潰電壓值。而在此要特別講述一個在量測APD時，接線方面的注意事項，HP 4145的輸出接頭是Triax 的，其剖面圖如圖(5-1)，由圖中可以看到Triax除了中間的訊號線外還有所謂的Guard與Shelding兩層包附在訊號線外面，而接到APD的中間則會經過一個Triax轉BNC的接頭，此時Shelding的包覆會被中斷而只剩下Guard與訊號線兩個部分，而兩條訊號線分別接到APD的正負極，但是兩條Guard必須處在開路的狀態才不會得到錯誤的I-V特性曲線，關於Guard的原理，Keithley出的Low level measurement一書裡面有詳細解釋。

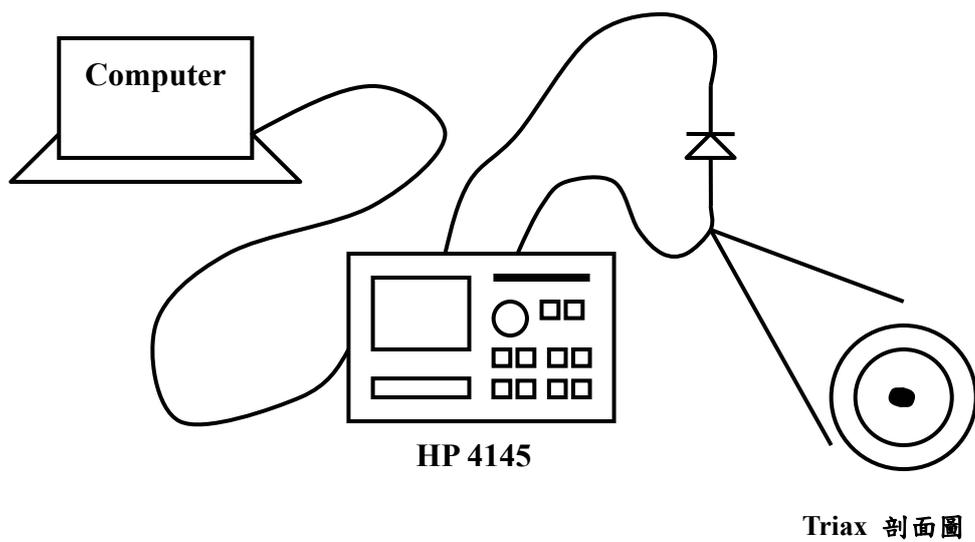


圖5-1 HP 4145 I-V特性量測系統



5.2 Gated Mode

第二章提到過此一量測結構可用來定義APD對於單光子脈衝光源的探測能力，且由於Gated Mode對於電壓操作變化的時間有很好的控制，可以用來探討APD在各種不同的偵測寬度與重複速度下對APD偵測光子的影響，所以在此我們優先講述Gated Mode後面再講述APD在CW光偵測方面的表現。圖(5-2)為Gated Mode 電壓對時間示意圖， V_R 為操作在APD陰極的負電壓使 $V_R + V_g > V_B$ ， V_B 為APD的崩潰電壓， V_E 為操作在APD之上的超額電壓， t_g 為APD操作在崩潰電壓的時間長度， t_{rep} 為APD電壓操作的重複時間，且光子只會在Gated Width的時間內發出，脈衝雷射的半高寬為25ps。

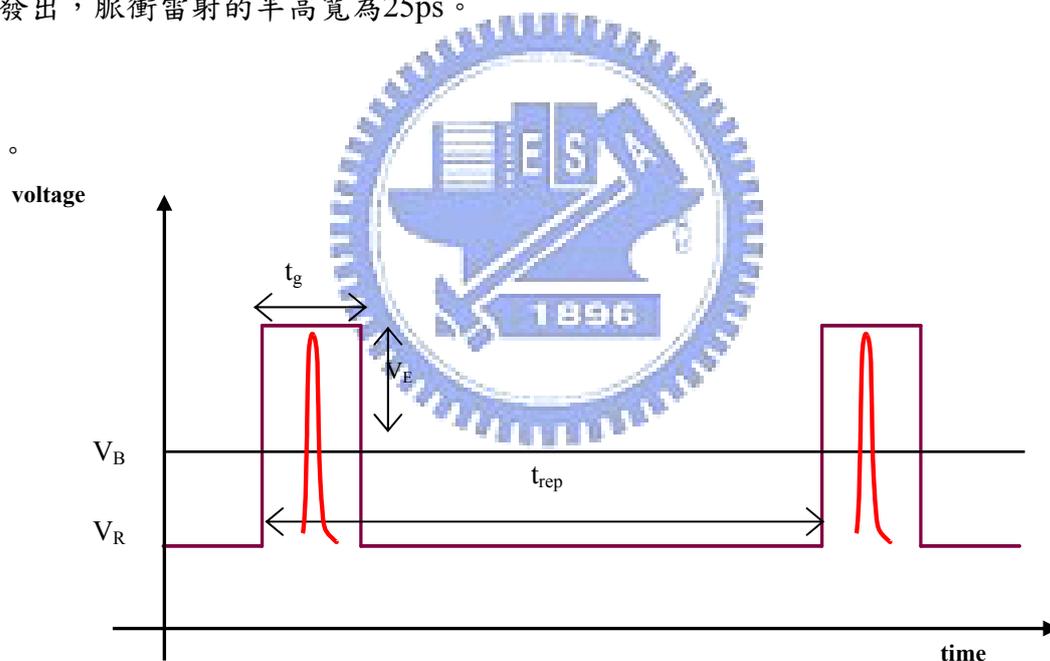


圖5-2 Gated Mode電壓對時間變化圖

Gated Mode 可用來統計APD在單光子重複出現的環境之下，能順利探測單光子的機率，也就是 APD在短暫操作時間下探測單光子的能力。因為Poisson Distribution可以知道當我們定義一個雷射脈衝內的光子數量為一時，仍然還是有相當高的機會在一個雷射脈衝內同時出現兩個光子，如此會造成我們對APD偵測單光子能力的低估，於是經由Poisson Distribution的結果，我們採用了一個脈衝內只有0.1顆光子存在的等效光量，如此便可以大大降低兩顆光子同時出現在一個雷射脈衝內的機率[5]。

圖(5-2)中我們定義了相當多與電壓波形相關的參數，而在進行量測前我們必須先行對其中幾個參數的變化做分析，並再後續的實驗之中固定其值，使後續的量測結果不會受到這些參數的影響。圖(5-3)為VR值對Dark Count probability的影響，在溫度為150K的定溫量測中我們固定了 $V_B=54.7V$ 、 $V_E=3V$ 、 $t_g=40ns$ 三個參數，並在 $1/t_{rep}$ 為100KHz與500KHz兩種重複速度的環境下討論不同的VR值對Dark count Probability的影響。圖(5-4)為 t_g 值對Dark Count probability的影響，在溫度為150K的定溫量測中我們固定了 $V_B=54.7V$ 、 $V_E=3V$ 、 $V_R=V_B-2V$ 三個參數，並在 $1/t_{rep}$ 為100KHz與500KHz兩種重複速度的環境下討論不同的 t_g 值對Dark count Probability的影響。

由圖(5-3)、(5-4)可以得到VR越低，Dark count Probability越低，Gated Width越短Dark count Probability 越低兩項重要資訊，於是在考慮系統準確度與能力之後，我們選取 $V_R = V_B-2V$ 與40ns的Gated width為我們後續量測的基本參數。

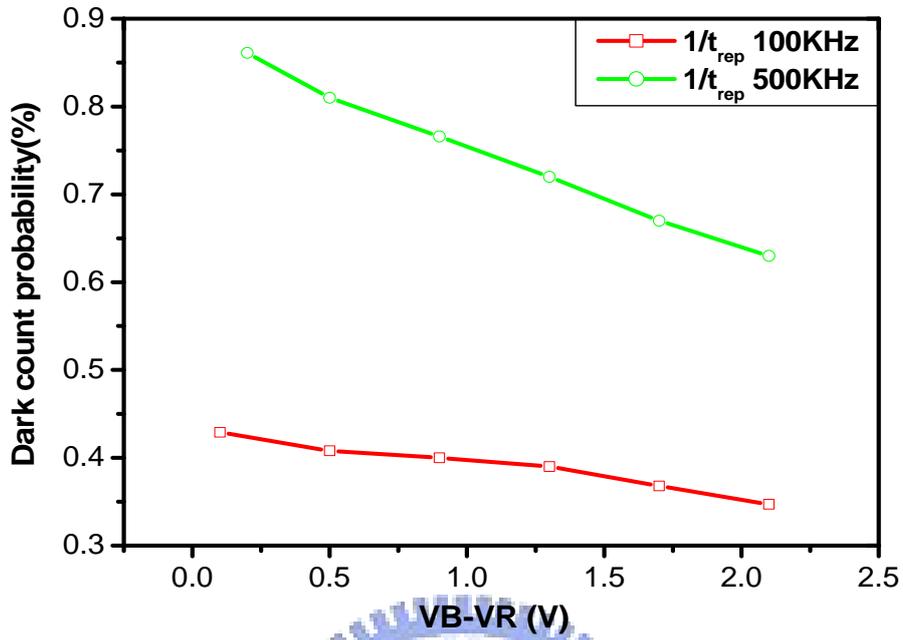


圖5-3 VR值對Dark count probability的影響

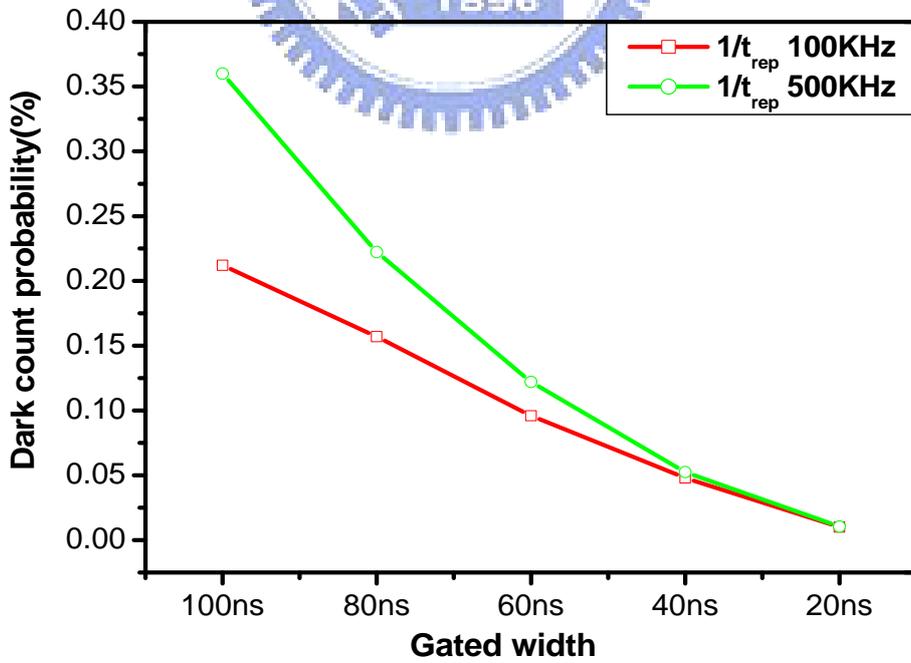


圖5-4 Gated width對Dark count probability的影響

5.2.1 Dark count probability

第四章提到過Dark count的其中一個成因是由APD內部的暗電流所造成的，所以利用降低溫度而降低APD內部的暗電流[11]，可以有效的降低單光子偵測器的Dark count probability，圖(5-5)為我們實際量測出Dark count probability在不同的溫度下對不同的超額電壓所產生的變化。而由圖中可以看到，Dark count probability與溫度的關係的確是隨溫度下降而降低，於是我們可以知道Dark count probability是暗電流的數位化分析結果。而Dark count probability與超額電壓之間的影响是因為超額電壓的上升也同時增加了APD累增層內的單位電場，所以使得APD偵測過程中的Trigger Probability增高，使得暗載子進入累增層後有更高的機會觸發APD產生累增崩潰效應而增加了Dark count probability。另外在公式(4.2)中提到，暗載子數會因為偵測時間縮短而減少了觸發累增崩潰的機率，由結果圖(5-6)可以看到，當縮小gated width時的確可以有效的降低Dark count probability。

我們透過了變化APD的操作溫度、超額電壓、與偵測寬度三方面來了解其對Dark count probability的影響，其中操作溫度與偵測寬度的變化皆可降低暗載子數且而有效的降低Dark count probability，而超額電壓的變化不會改變暗載子的數量，而是透過變化APD內部累增層內部的Trigger probability的來影響Dark count probability的結果。

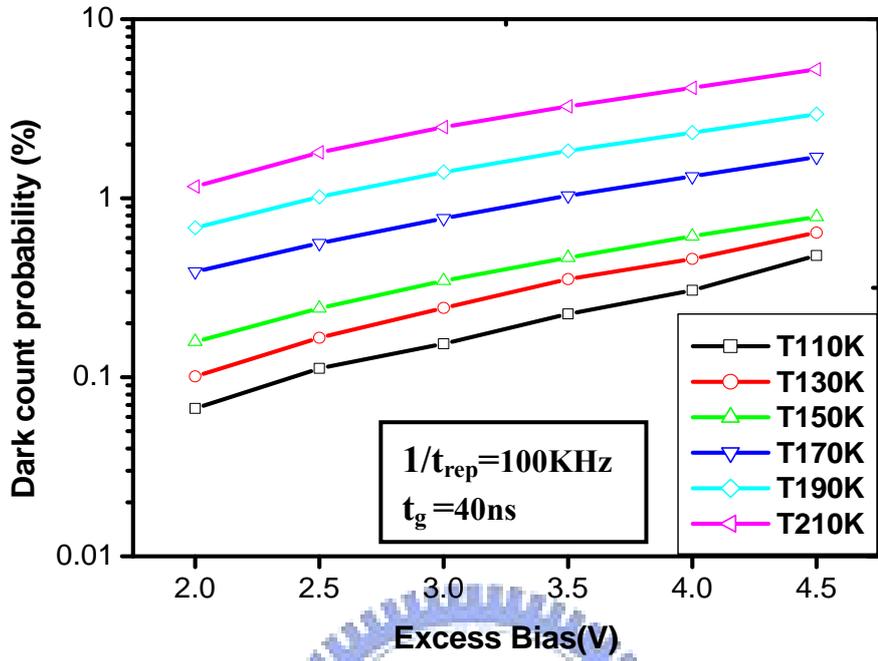


圖5-5 Dark count probability在不同的溫度下對不同的超額電壓所產生的變化

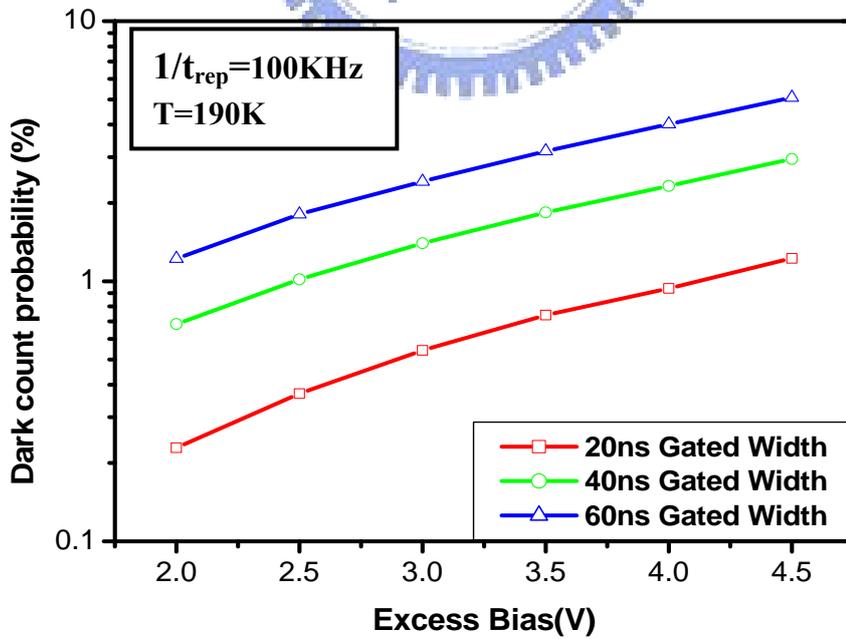


圖5-6 不同的Gated Width對Dark count probability的影響

5.2.2 After pulsing 效應

除了暗載子的數量會影響Dark count probability之外，在InGaAs/InP APD中非常嚴重的After pulsing效應也會影響Dark count probability。在第四章我們已經討論過溫度與重複速度的相互關係[6]為影響此效應嚴重與否的關鍵因素，而由圖(5-7)中的實驗結果可以看到當在100KHz時，各個溫度的Dark count probability是隨著溫度上升而增加，但是在1MHz時110K、130K、150K的結果卻不依循著溫度上升而Dark count probability增加的規律。如此的結果是因為在低溫時，被捕捉的載子需要較長的時間才可以得到足夠跳出捕捉中心的能量，所以要在低溫時避免After pulsing效應的影響則必須使兩次偵測之間相隔足夠長的時間，也就是重複速度必須要夠低才可以避免After pulsing的影響。而圖(5-7)中，110K、130K、150K三種溫度下的Dark count probability會隨著重複速度變化而改變，就是因為在此重複速度下，被捕捉的載子已經不能夠被完全的釋放，而導致在下一次的偵測中重複的觸發了APD使其重複偵測，而我們亦會得到Dark count probability增加的最終結果。

而對於Detection efficiency來說，因為光載子與暗載子觸發累增崩潰的過程完全相同，且在Gated Mode操作下光載子觸發的次數遠大於暗載子，所以在量測Detection efficiency時，After pulsing效應所造成的影響更大。由圖(5-8)中可以看到110K、130K、150K三種溫度其Detection efficiency會隨著重複速度的變化而有著劇烈的增加，此結果與圖(5-7)的結果相同。

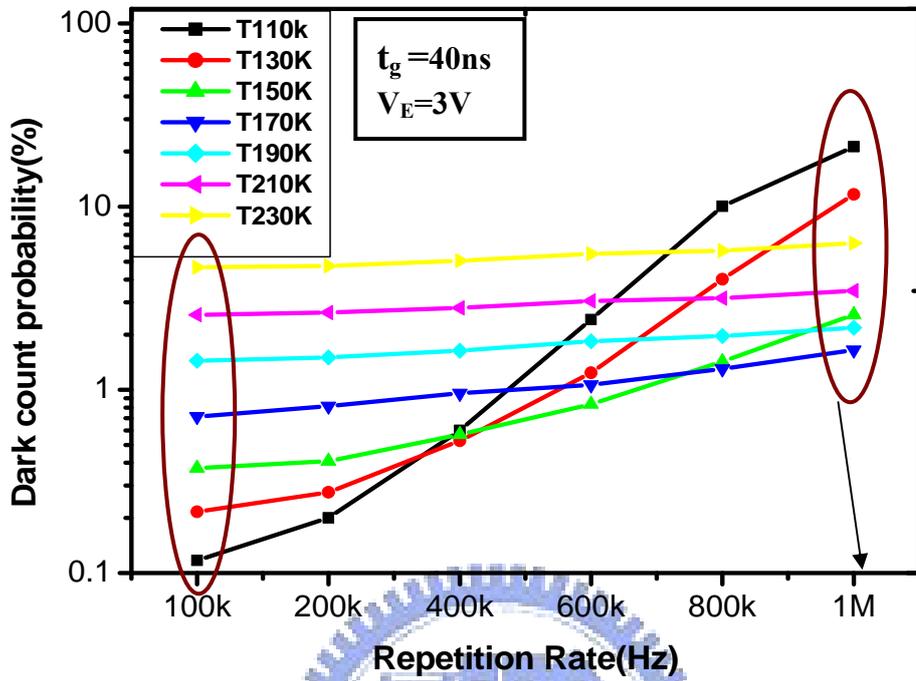


圖5-7 不同的溫度下變化重複速度對Dark count probability造成的影響

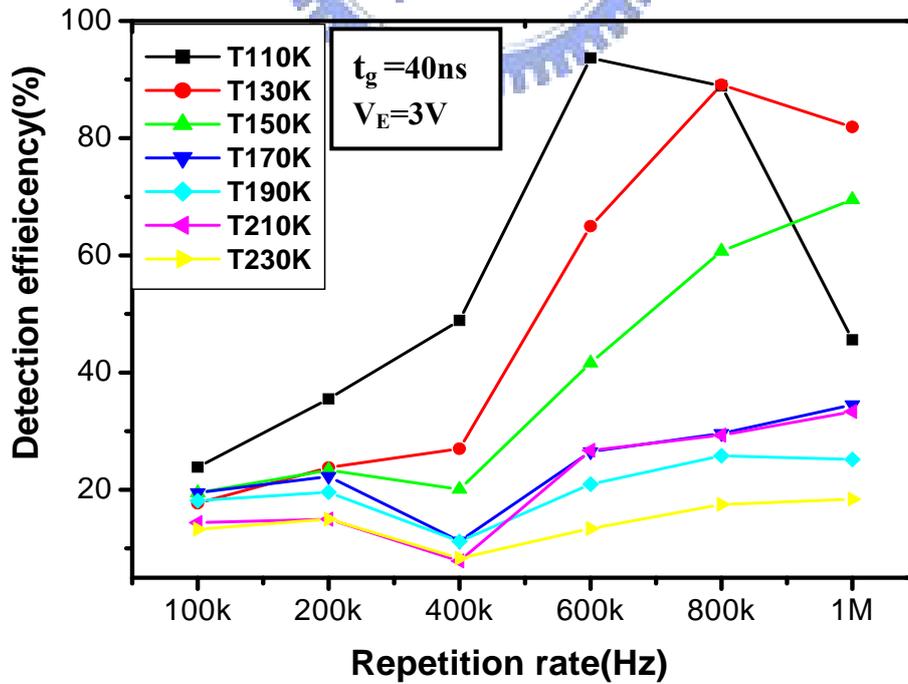


圖5-8 不同的溫度下變化重複速度對Detection efficiency造成的影響

由圖(5-7)、圖(5-8)的結果可以了解到，當APD操作在較高的重複速度時，110K、130K、150K三個溫度的After pulsing效應都主導著單光子偵測器的Dark count probability與Detection efficiency兩項參數，使我們得到一個劣質且錯誤的結果，而在170K以後的溫度，After pulsing效應的影響則較小。但為了能夠分析各個溫度對Dark count probability與Detection efficiency造成的確切影響，後續的量測與討論中，我們皆固定單光子偵測器的重複速度為100KHz，以希望能盡量降低After pulsing效應的影響。

由(4.3)式可以知道在一固定的重複速度與Gated width下，我們可以得出一個相對應的After pulsing probability[6]，而當Gated width增加時After pulsing probability也會增加，我們利用計算不同的Gated width下After pulsing probability的差異來對100KHz的重複速度下各溫度的After pulsing效應的大小做更深入的探討。

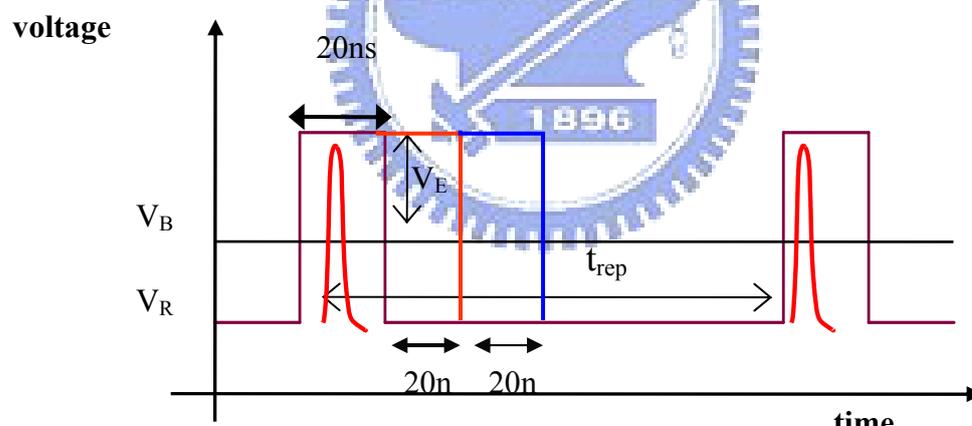


圖5-9 電壓對時間變化示意圖

圖(5-9)為電壓對時間的示意圖，在此量測中APD的電壓操作重複速度為100KHz，搭配20ns、40ns、60ns三種Gated width，此量測設計很重要的一點是在改變不同的Gated width時，光進入APD的時間點不能改變，所以可以確定後兩次加入的電壓時間寬度裡面並沒有光子的進入。而對APD來說在同樣的操作溫度

與超額電壓下不同的Gated width並不會影響APD的Detection efficiency，但增加Gated width卻會增加Dark count probability與Afterpulsing probability兩項參數，而Afterpulsing效應對Dark count probability的影響在Detection efficiency的計算過程中會被去除，於是我們即可利用分析不同Gated width下的Detection efficiency的量測結果，來了解在100KHz重複速度下各溫度Afterpulsing probability的差異。在假設After pulsing的影響很小的預設情況下，增加Gated width應該不會增加Afterpulsing probability亦不會增加所量測出的Detection efficiency結果。

接下來講述為何增加的Afterpulsing probability會表現在量測出的Detection efficiency結果上面。基本上經由量測得出的由輸入訊號所產生的計數值包跨了由光子所產生的計數值與由after pulsing效應所造成的計數值，而由after pulsing效應所造成的計數值則是由光子所產生的計數值乘上Afterpulsing probability的積值所得出，經由上面的概念在配合公式(4.4)的計算即可得出公式(5.1)、(5.2)

$$DE_{20ns} = \frac{C_{signal} \times (1 + APP_{20ns})}{incident\ photon\ number} \quad (5.1)$$

$$DE_{40ns} = \frac{C_{signal} \times (1 + APP_{40ns})}{incident\ photon\ number} \quad (5.2)$$

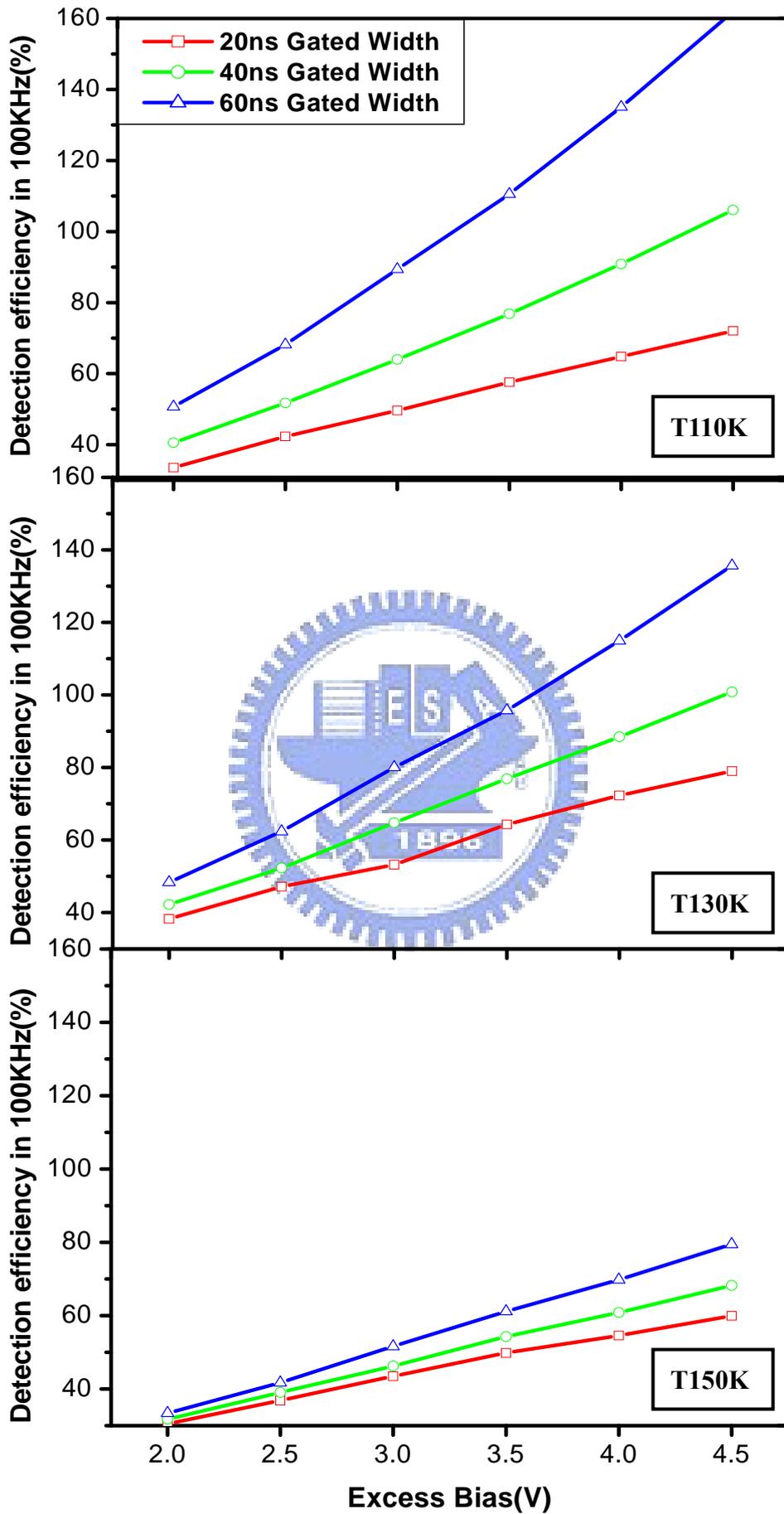
APP_{20ns} : Afterpulsing probability in 20ns gated width

DE_{20ns} : Detection efficiency in 20ns gated width

C_{signal} : Signal count

且
$$DE_{40ns} - DE_{20ns} = \frac{C_{signal} \times APP_{increase\ 20ns}}{incident\ photon\ number}$$

由等式可知多增加的20ns Gated Width的After pulsing probability與40ns與20ns兩個Detection efficiency成正比，當40ns與20ns兩者的Detection efficiency差距越小，則多增加的20ns Gated Width造成的After pulsing probability也越趨近於零。



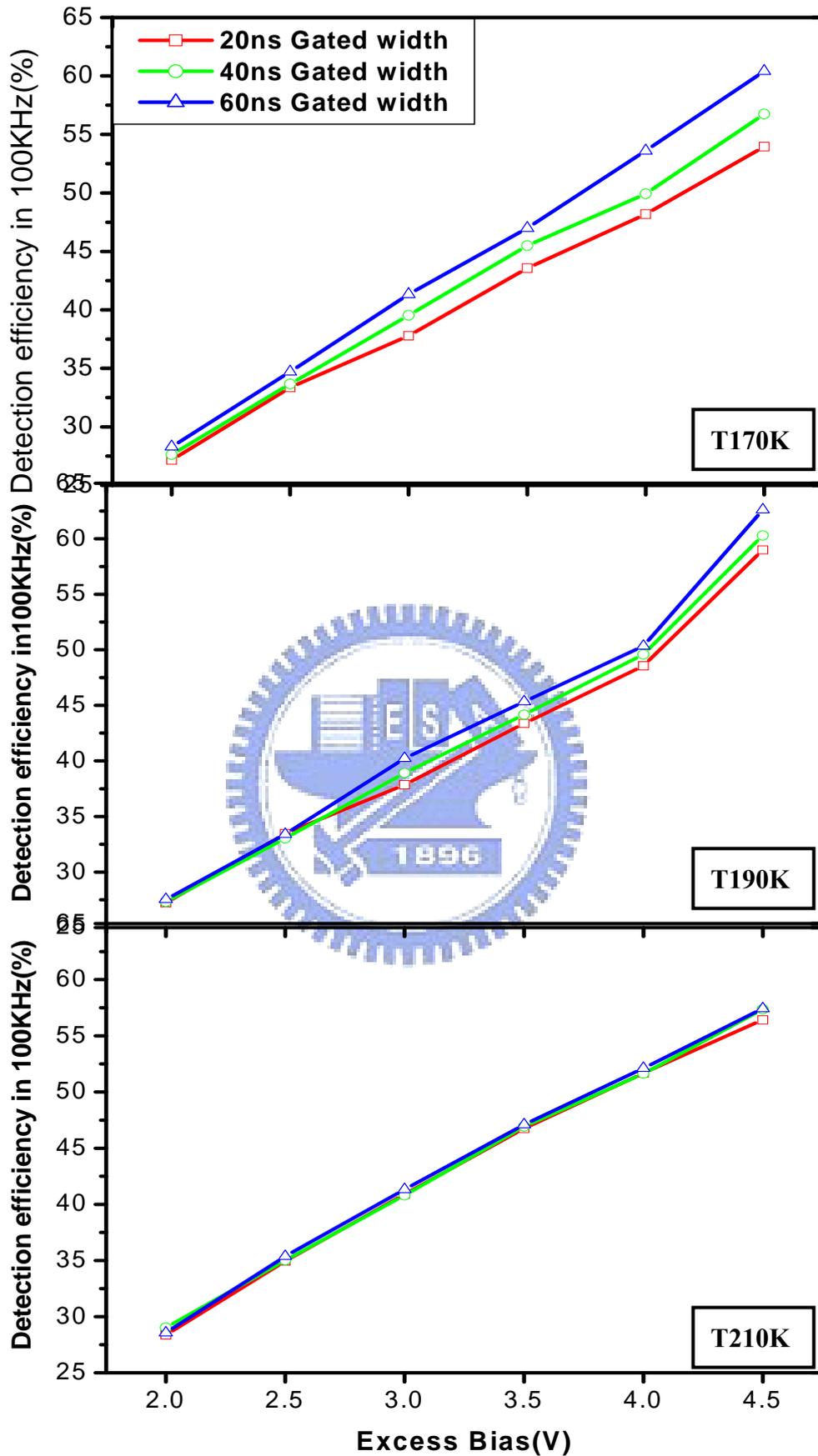


圖5-10 在不同Gated Width下 Dark count probability與Detection efficiency的變化

由圖(5-10)可以清楚的看到，三種Gated width在低溫時所計算出來的Detection efficiency差距依然很大，這代表儘管在100KHz操作速度下，APD在低溫時依然有程度不同的After pulsing效應存在，直到170K之後After pulsing的影響才降低。

前面提到過，在延長的Gated width中，並沒有光子的進入，且在Detection efficiency的計算中，暗載子的效應會被去除，所以可以知道在延長的20ns中所增加的detection efficiency完全是由After pulsing所造成的假性結果，於是我們提出一個誤差公式(5.1)來簡單估計在各溫度下多增的20ns Gated width內的After pulsing效應的百分比為多少

$$\text{After pulsing probability in 20ns} = \frac{(40\text{nsDE} - 20\text{nsDE}) \times \text{光子數}}{20\text{ns Signal Count}} \times 100\% \quad (5.3)$$

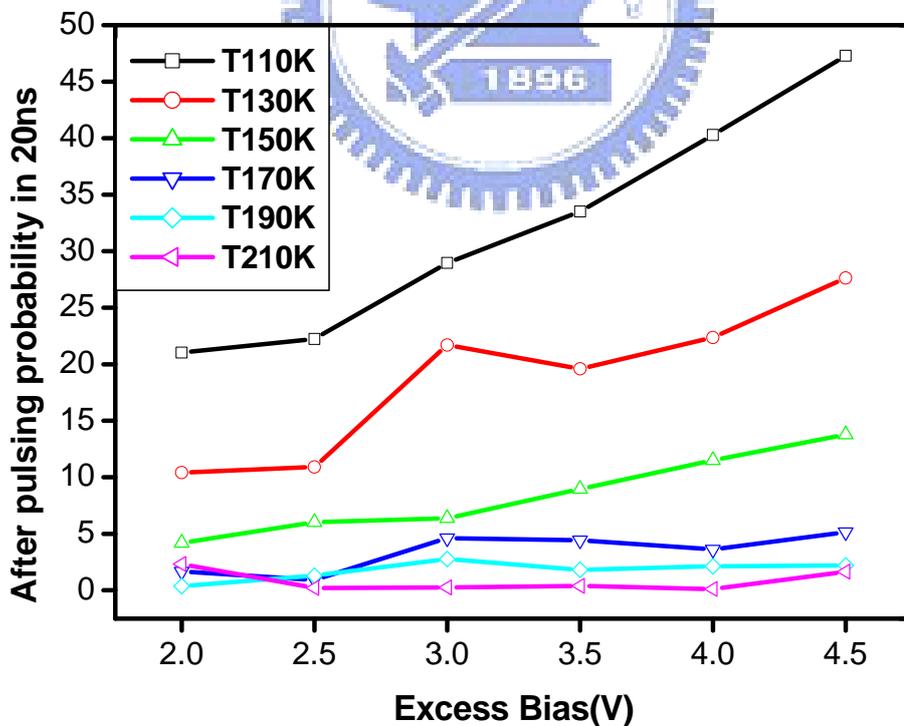


圖5-11 不同的溫度與偏壓下After pulsing After pulsing probability的變化

由量測結果帶入計算可以得到圖(5-11) ，由圖中可以看到當溫度在110K時，高達20%以上的計數是由After pulsing效應造成的，而當溫度在170K到210K之間時，其After pulsing的機率是小於5%的。由實驗結果證明了縮短Gated width可以有效的降低After pulsing發生的機率，而光源的半高寬為25ps，遠小於Gated width的20ns，因此可以再藉著縮短gated width來持續降低After pulsing發生的機率，我們因為儀器設備的限制所以並沒有做此實驗。

5.2.3 Detection efficiency

前面討論完After pulsing效應在各溫度對Detection efficiency的影響之後，在此我們對各溫度的在重複速度為100KHz時的Detection efficiency做一個結論。

由圖(5-11)的結果可以知道在110K、130K、150K時Detection efficiency的量測結果因為受到After pulsing效應的主導而導致錯誤的分析結果，而170K、190K、210K的溫度下After pulsing效應的影響並不明顯，所以這三種溫度所量測出的Detection efficiency結果是可以被信任的。

在得到了前面的結論之後，我們便要往致力於增加Detection efficiency做努力。前面驗證過，當Gated width 越窄Dark count會越低，且超額電壓的上升亦會同時增加Dark count與Detection efficiency，在此兩項機制之下便可以聯想出增加超額電壓以增加Detection efficiency且同時減低gated width的寬度以控制Dark count數量的方式來達到增加Detection efficiency的目的。圖(5-12)為190K的環境中 20ns、40ns、60ns三種脈衝寬度的變化下，Detection efficiency與Dark count probability之間的關係，由圖中的虛線可以看到，當在Gated Width為40ns且超額電壓為2V時所得的Dark count probability與Gated Width為20ns且超額電壓為3.5V時相同，但20ns的Detection efficiency(~45%)較40ns的Detection efficiency(~27%)高出許多，所以我們的確可以透過增加超額電壓同時縮短Gated Width以達到維持相同的Detection efficiency且同時減少Dark count probability的目的。

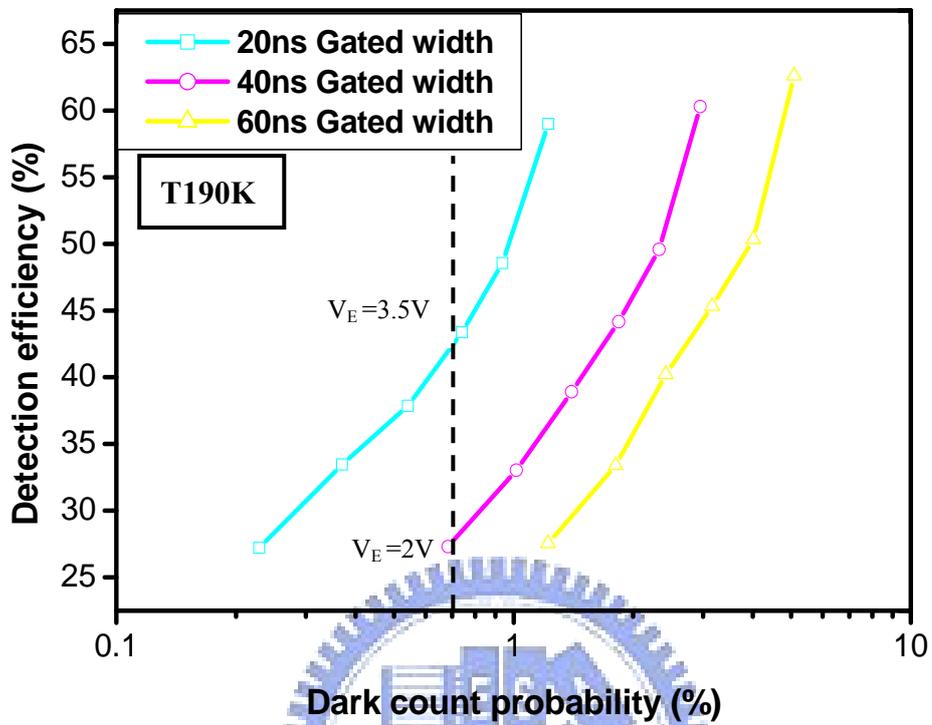


圖5-12 在各種Gated Width下Detection efficiency與Dark count probability的表現

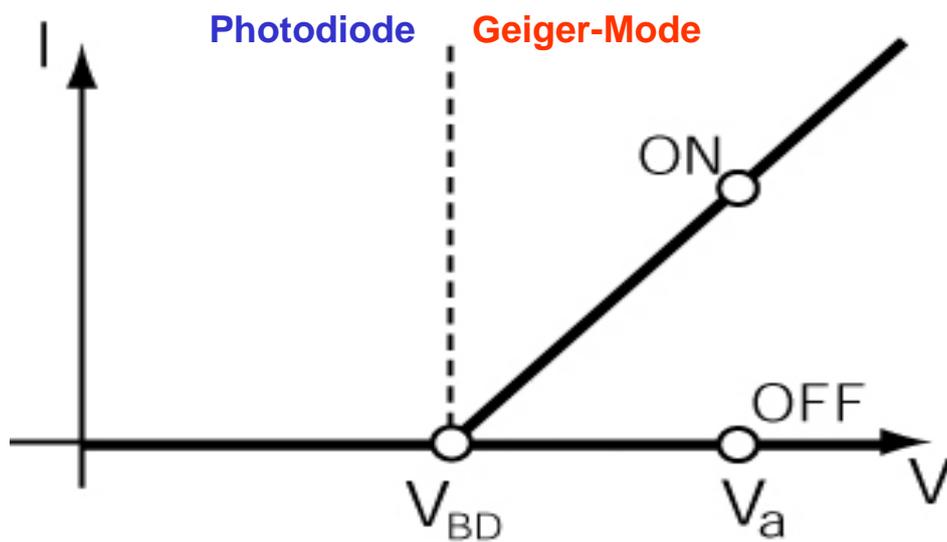


圖5-13 APD I-V特性曲線圖

在此講述一個概念使大家能夠了解此些參數在界定單光子偵測器的好壞時所代表的意義，圖(5-13)是我們之前就介紹過的Geiger Mode APD的ON-OFF特性。在此Gated Mode的系統中重複速度為100KHz，也就是說我們重複了此偵測的動作十萬次，且這十萬次隨著溫度的變化、超額電壓的變化、光量的變化而分布在ON與OFF兩個操作點上。且在單光子偵測過程中會使APD ON的原因有光載子與暗載子兩種，圖(5-14)中的Dark count probability即代表在這十萬次的偵測中，有多少百分比的ON是由暗載子所觸發，也就是單光子偵測器偵測到錯誤事件的機率。而Detection Efficiency即代表在十萬次的偵測當中，由光子觸發的次數與入射光子總數的比值乘以百分之百，也就是說，有多少百分比的光子數被偵測到，此數值為單光子偵測器對於偵測單光子出現與否的能力指標。

圖(5-14)中包含了三種已經證明了其結果較為可靠的溫度，且操作在100KHz的重複速度與20ns的Gated Width環境下，所能得出在我們系統中最佳的Dark count probability與Detection Efficiency。在這些溫度與重複速度下After pulsing效應的影響很小，所以Dark count probability會隨溫度上升而增加，而由Detection Efficiency的結果來看三種溫度都可以達到相當高的偵測能力，溫度選取取決於對Dark count probability的要求程度，否則在降溫的角度來說210K以上的操作溫度是可以利用TE-Cooler來達成的，此種降溫方式比利用液態氮降溫更為方便且穩定。

由圖中可以看到Geiger Mode APD在溫度為190K的狀態下可以偵測到57%的單光子，但是由暗載子造成的錯誤機率亦高達1%，這在量子通訊中是不能接受的。會這麼高的原因是由於實驗中的Gated Width相較於別的系統(2ns~)依然過寬，但是因為脈衝產生器與電路配置的限制，我們目前只能達到20ns左右的Gated Width。

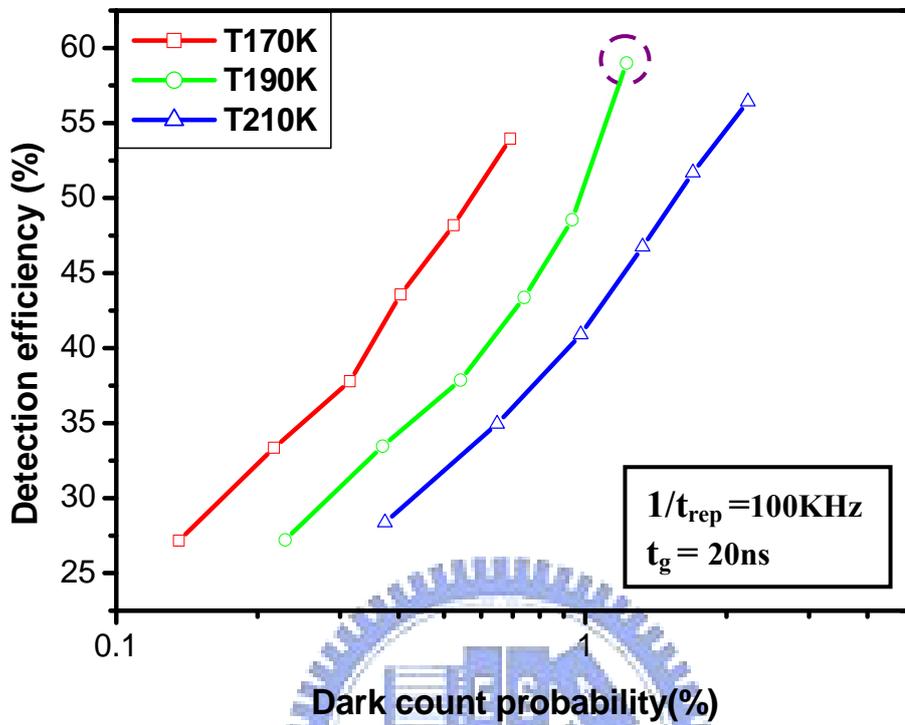


圖5-14 在各溫度下Detection efficiency與Dark count probability的表現

5.2.4 Noise equivalent power (NEP)

圖(5-14)的結果帶入公式(4.5)中即可求得在此一操作條件下的相對NEP值，但是在Gated Mode中要注意的一點是關於公式中Dark count rate的計算。公式(4.5)是在一秒鐘的積分時間下所換算出的結果，但是在Gated Mode中有所謂的死亡時間存在，而在此一時期中單光子偵測器是沒有在運作的，所以在此操作下我們只有得到在(Gated width · 重複速度)如此時間下的dark count而已，所以實際一秒內的dark count值為(Gated Mode dark count) · 1/(Gated width · 重複速度)。[5]

而由圖(5-15)的結果可以看到NEP會隨溫度上升而升高，最主要是因為溫度上升而Dark count上升，使得最終的NEP有所差別，但是其值大約都在 6×10^{-16} $\text{WHz}^{-1/2} \sim 9 \times 10^{-16}$ $\text{WHz}^{-1/2}$ 之間。

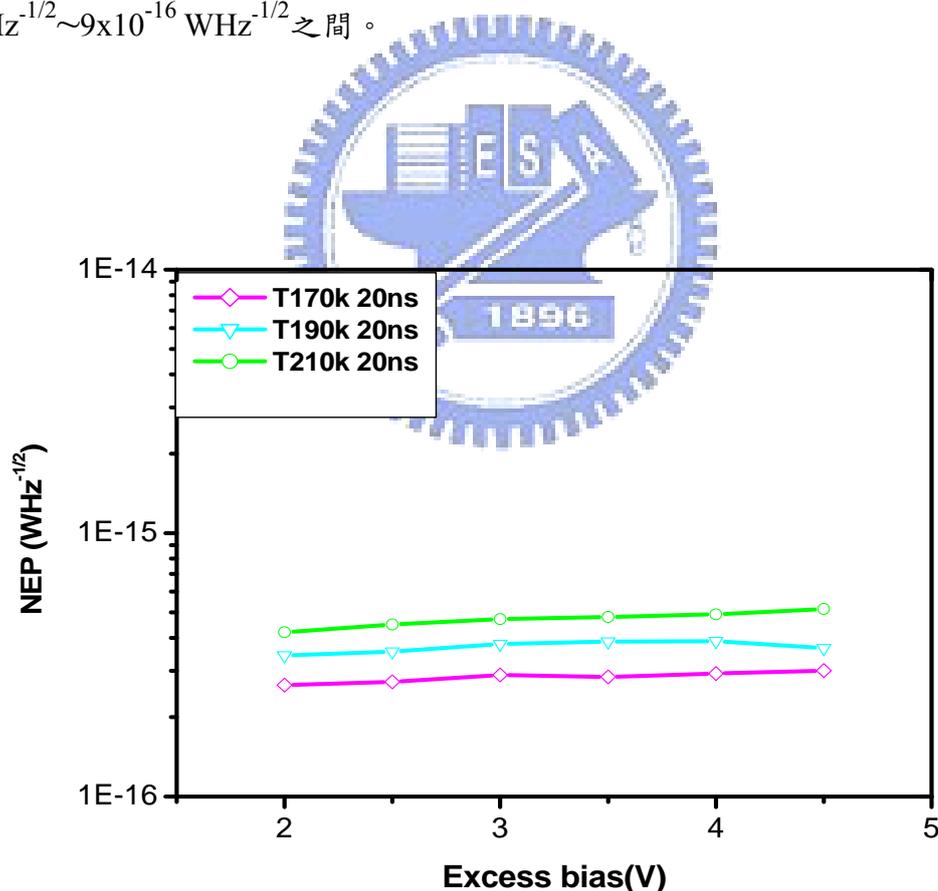


圖5-15 操作在Geiger-Mode APD的NEP值

5.3 Passive Quenching

透過了Gated Mode的分析我們對APD的各種外部變因所造成的影響做了一個完整的闡訴，但是在偵測上Gated Mode只可應用在能精確控制光到達時間的先環境下，所以對於CW光源的環境就必須要有另外一種APD的偵測方式，也就是自由探測的Passive-Quenching電路[12,15,16]。此系統中，利用CW雷射二極體來當作光源，在此我們無法知道光子明確的到達時間，只能總括的計算在一秒內總共的光子個數，此量測的光源的強度為 10^{-13} W 相當於每秒有 6.67×10^5 個光子數

5.3.1 Dark count rate

圖(5-16)為在不同的溫度與壓降之下Dark count rate的量測結果，由圖中可以看到當我們加高操作的超額電壓時，在任何溫度dark count rate值皆會上升。於第二章所提到過的機制可用於解釋我們所觀察到的現象，APD觸發的兩項重要過程之一，Trigger probability，在超額電壓上升時會使載子進入累增層放大區進而使觸發崩潰電流的機率提高，也因此使得Dark count rate的總數上升。且經由圖中曲線的斜率變化可以發現，越低溫時dark count rate 隨超額電壓上升的速度就越快，越接近高溫其斜率越緩，於是我們由圖中取一個固定(0.7V)的超額電壓來單純討論不同的溫度對dark count rate的影響利響。

由圖(5-17)中可以發現從130K之後，其Dark count rate的數量是慢慢的減少且在190K時達到最低，而當溫度在210K時又開始上升。在Gated Mode的結果我們知道當重複速度過高的情況下，低溫時APD內部的After pulsing效應會相當嚴重，那在Passive-Quenching中APD偵測的重複速度為多少呢？我們透過圖(5-18)的結果來說明。

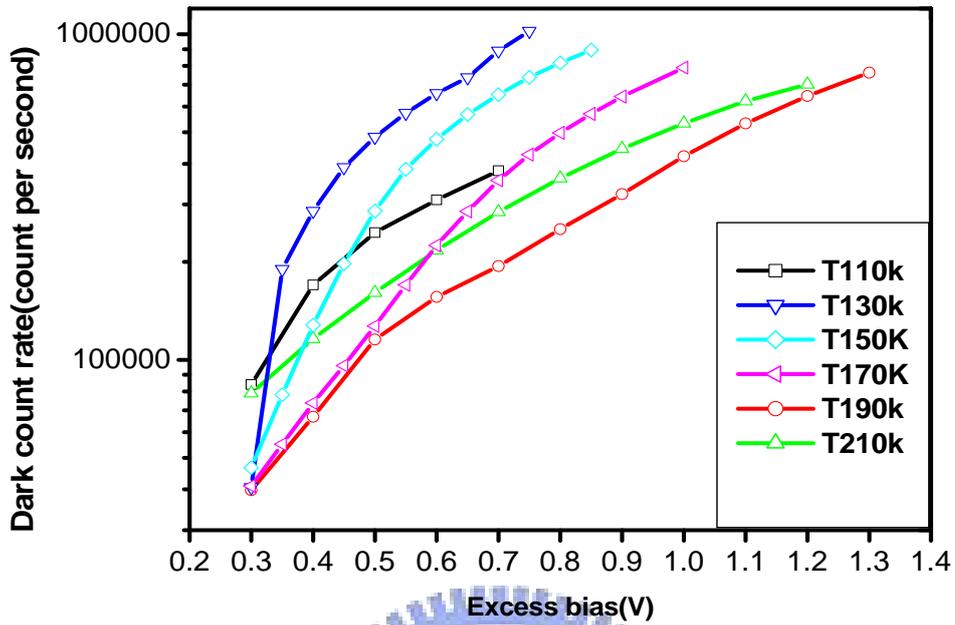


圖5-16 Dark count rate 在不同的溫度與壓降之下的變化

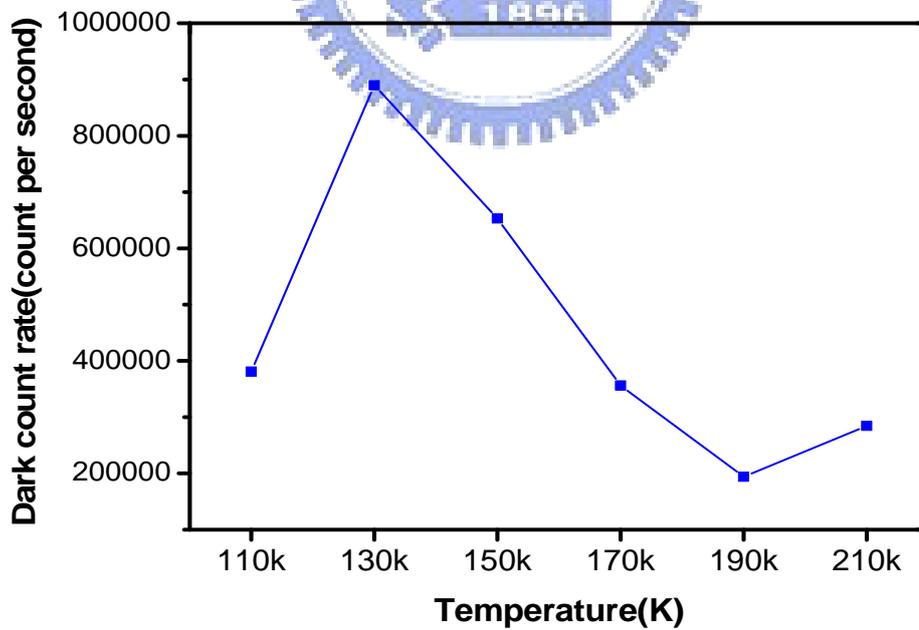


圖5-17 Dark count rate 對溫度變化圖

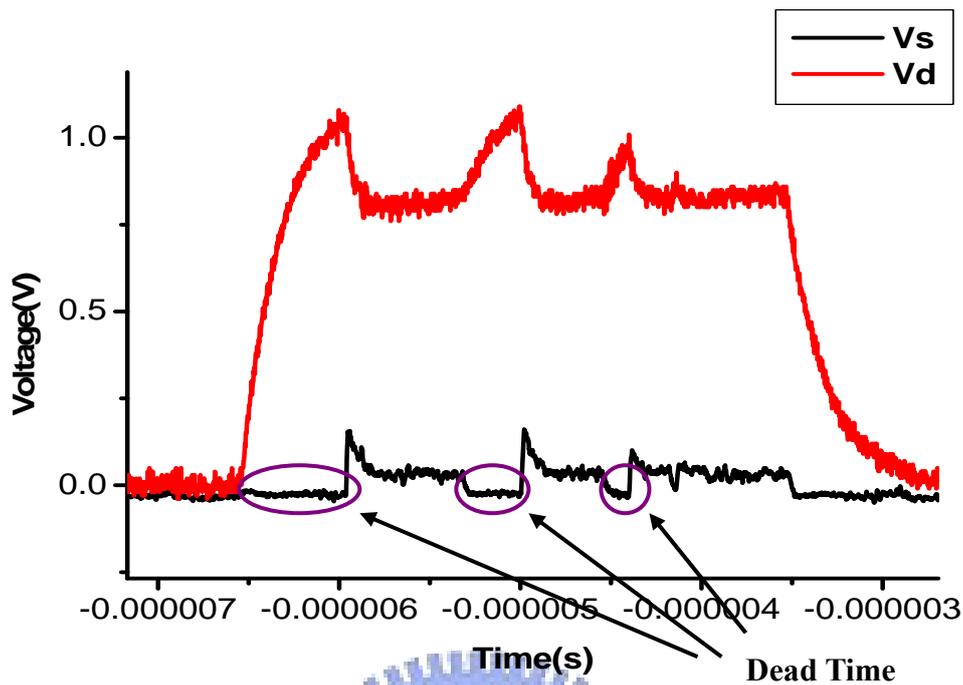


圖5-18 在Passive-Quenching系統中APD的Dead Time

圖(5-18)中的圈圈處即為每次偵測與下次偵測之間的時間間隔，此數值的倒數即為重複速度。由圖可以看出在Passive-Quenching中，每次偵測的時間間隔大小為一個不穩定的值，但是透過計算電壓的上升時間可以做一預估。在此電路中上升時間大約等於 $1.1\mu\text{s}$ ，也就是說重複速度大約在910KHz左右，而由Gated Mode的結果我們可以知道在910KHz的重複速度且溫度低的情況之下，After pulsing的效應是非常嚴重的，這邊解釋了為何在溫度190K之前其Dark count rate與溫度成反向減少的原因，而在190K之後因為After pulsing效應的降低，而Dark count rate由暗載子所主導。另外我們要特別解釋110K的Dark count rate比130K還少的原因。經由我們量測的觀察，在passive-quenching電路架構中，每一次觸發後APD兩端跨壓需要相當長度的時間再度充電，而在110K時After pulsing效應過大，使得APD兩端跨壓在還未上升到一定的值之前就被觸發，而在此一情況下，APD兩端跨壓不足以產生夠大的對應電流，使得這些訊號不能與背景雜訊區分

開，於是全數被鑑別器所濾除，使得110K的Dark count rate反而較130K少。

5.3.2 Detection efficiency

接下來便要來量測APD對於光源存在時的解析能力，光源的能量為 10^{-13}W ，相當於每秒有 6.67×10^5 個光子進入發出，量測結果在經過前面所介紹過的detection efficiency的公式換算後，結果如圖(5-19)。由圖中可以看到在110K、130K、150K、170K等溫度中的Detection efficiency都較高，對此我們研判是因為After pulsing所造成的假性結果，於是190K之後溫度的結果較為可信，而13%的Detection efficiency也與他人研究的結果相近。

圖(5-20)為利用Passive-Quenching來探測在不同的CW光量下所輸出的總計數，此偵測的溫度為190K，由圖(5-20)內的結果可以看到在不同光量下($10^{-12}\text{W} \sim 10^{-14}\text{W}$)，光子計數器會輸出相對應的計數總值，如此便可應用於分析偵測極弱小的光量變化。



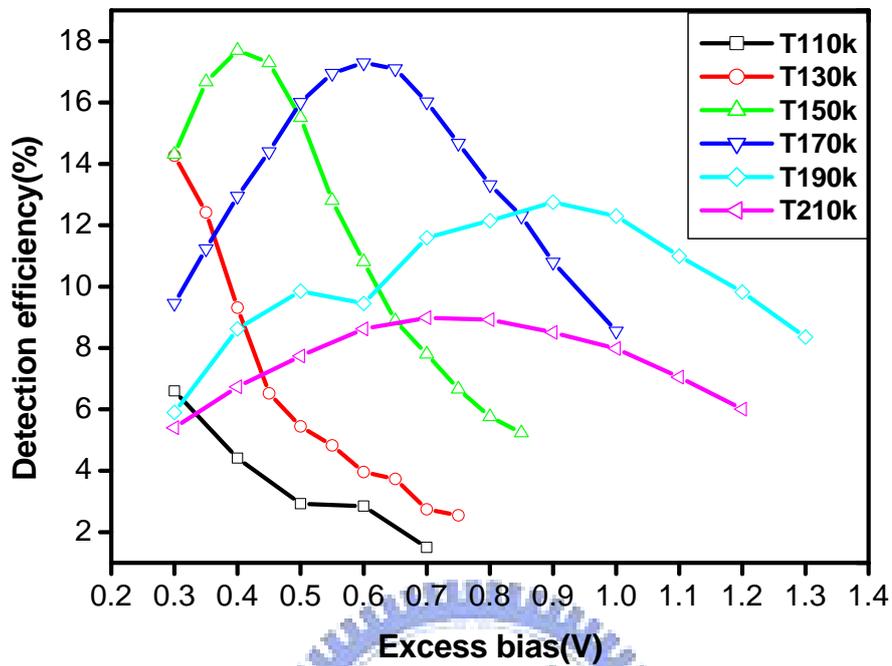


圖5-19 超額電壓的變化對Detection efficiency的影響

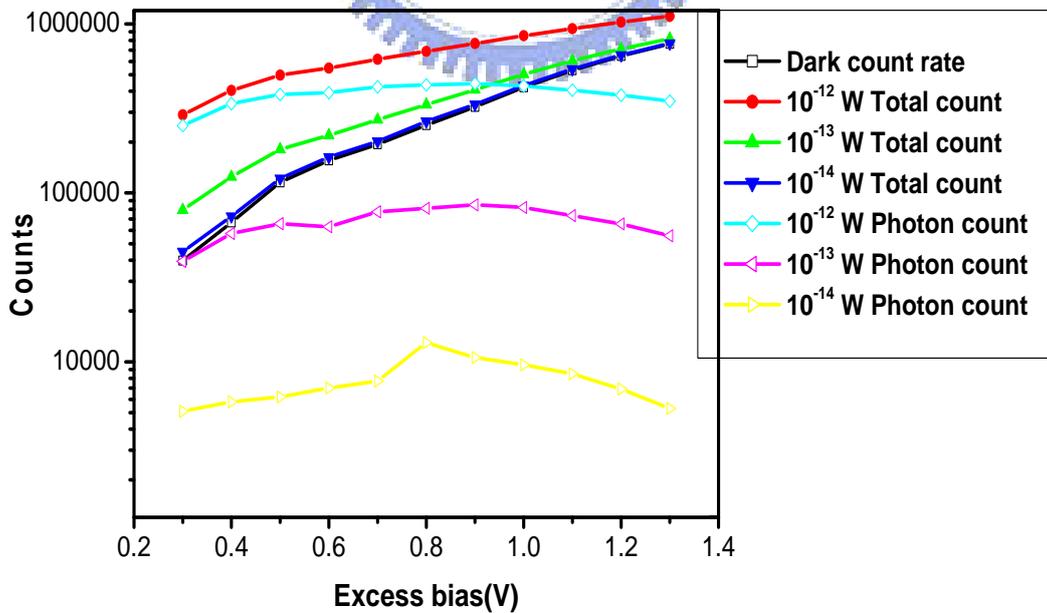


圖5-20 Passive-Quenching APD在對各種CW光量的總計數變化

第六章 結論

在實驗中，我們完整製作了一套單光子偵測系統，且對於不同特性的光源，設計不同的偵測模式，並在不同的外部環境下對 InGaAs APD 應用於單光子偵測器時的光偵測能力作分析與比較。

首先我們透過變化單光子偵測器的重複速度(100KHz~1MHz)來了解各溫度下 After pulsing 效應的影響，由結果可以看到 After pulsing 效應會使 Dark count probability 與 Detection efficiency 的量測結果產生極大的誤差與錯誤，而我們選取了在所有的重複速度下 After pulsing 效應影響最小的 100KHz，希望能完全的剔除各溫度量測結果中 After pulsing 效應的影響。在此條件下，我們進一步利用變化 Gated Width(20ns、40ns、60ns)的方法來分析各溫度 After pulsing 效應的影響，在過程中透過計算與分析我們定義了一個誤差參數 After pulsing probability in 20ns，由各溫度的結果可知在 100KHz 的重複速度之下 110K、130K、150K 所得的 After pulsing probability in 20ns 皆高於 5% 以上，所以不可用於偵測單光子。而 170K、190K、210K 三種溫度所得的 After pulsing probability in 20ns 則小於 5%，是可以被用於偵測單光子的，且在此三種溫度操作下我們所量測出的 Dark count probability 與 Detection efficiency 結果是正確的。

在 Gated Mode 操作時，在 100KHz 重複速度與 20ns Gated Width 的條件下，190K 的溫度所得到的最佳 Detection efficiency 結果為 60% 且 Dark count probability 為 1% 而 NEP 值則為 $7 \times 10^{-16} \text{ WHz}^{-1/2}$ 。且由 Passive-Quenching 實驗的結果可以看到在 190K 的溫度環境下我們成功的分辨了 10^{-12} W 、 10^{-13} W 、 10^{-14} W 三種光量。

參考文獻

- [1] S.O. Kasap, *Optoelectronics and photonics: principles and practices*, Prentice Hall, 2001
- [2] R.G. Brown, K. D. Ridley, and J. G. Rarity, “Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements. 1: Passive quenching,” *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 4122–4126, 1986.
- [3] R.G. Brown, R. Jones, J.G. Rarity, and K.D. Ridley, “Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements. 2: Active quenching,” *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 2383–2389, 1987
- [4] F. Zappa, M. Ghioni, S. Cova, C. Samori, and A. C. Giudice, “An integrated active-quenching circuit for single-photon avalanche diodes,” *IEEE Trans. Instrum. Measurements*, vol. 49, pp. 1167–1175, Dec. 2000.
- [5] GREGOIRE RIBORDY, NICOLAS GISIN, OLIVIER GUINNARD, DAMIEN STUCKI, MARK WEGMULLER and HUGO ZBINDEN “Photon counting at telecom wavelengths with commercial InGaAs/InP avalanche photodiodes: current performance,” *Journal of modern optics*, Vol. 51, No. 9–10, pp.1381–1398, 2004
- [6] A. Lacaita, P. A. Francese, F. Zappa, and S. Cova, “Single photon detection beyond 1 micron: Performance of commercially available germanium photodiodes,” *Appl. Opt.*, vol. 33, pp. 6902–6918, 1994.
- [7] S.Mze, *Physics of Semiconductor*, Central Book Co, 1985
- [8] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori, and F. Zappa, “Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection,” *Appl Opt*, Vol. 35, No.12, pp.1956-1976, 1996
- [9] M. Ghioni, S. Cova, F. Zappa, and C. Samori, “Compact active quenching circuit

for fast photon-counting with avalanche photodiodes," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 67, pp. 3440–3448, 1996.

- [10] P. Hiskett, G. Buller, A. Loudon, J. Smith, I. Gontijo, A. Walker, P. Townsend, and M. Robertson, "Performance and design of InGaAs/InP photodiodes for single-photon counting at 1.55 μm ," *Appl Opt*, Vol. 39, No. 36, pp. 6818–6829, 2000
- [11] Y. Kang, H. X. Lu, and Y.-H. Lo, D. S. Bethune and W. P. Risk, "Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection" *Appl. Phys. Lett.*, Vol 83, No 14, pp. 2955–2957, 2003
- [12] P. C. M. Owens, J. G. Rarity, P. R. Tapster, D. Knight, and P. D. Townsend, "Photon counting with passively quenched germanium avalanche photodiodes," *Appl. Opt.* 33, 6895–6901, 1994
- [13] A. Lacaita, F. Zappa, S. Cova, and P. Lovati, "Single-photon detection beyond 1 μm : performance of commercially available InGaAs/InP detectors," *Appl. Opt.* 35, 2986–2996, 1996
- [14] G. Ribordy, J. D. Gautier, H. Zbinden, and N. Gisin, "Performance of InGaAs/InP avalanche photodiodes as gated-mode photon counters," *Appl. Opt.* 37, pp. 2272–2277, 1998
- [15] John G. Rarity, Thomas E. Wall, Kevin D. Ridley, Philippa C. Owens, and Paul R. Tapster, "Single-photon counting for the 1300–1600-nm range by use of Peltier-cooled and passively quenched InGaAs avalanche photodiodes," *Appl. Optics*, Vol. 39, No. 36, pp. 6746–6753, 2000
- [16] Tomoyuki Maruyama, Fumio Nurusawa, Makoto Kudo, Mitsuyoshi Tanaka, Yasunori Saito, Akio Nomura, "Development of a near-infrared photon-counting system using an InGaAs avalanche photodiode," *Optical Engineering*, Vol. 41 No. 2, 2002

簡歷(Vita)

姓名：嚴浩天

性別：男

出生年月日：民國72年9月23日

籍貫：台灣省台北市

學歷：

元智大學電機工程系學士 (2001.9 - 2005.6)

國立交通大學電子工程系碩士 (2005.9 - 2007.6)

碩士論文題目：

砷化銦鎵光崩潰二極體與單光子偵測器之應用

InGaAs Avalanche Photodiode for Single-Photon-Detector Application