

國立臺灣大學電機資訊學院光電工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Photonics and optoelectronics
College of Electrical engineering and Computer Science
National Taiwan University
Master Thesis

雪崩光偵測器結構設計

Structure design of Avalanche photodiode

游朝政

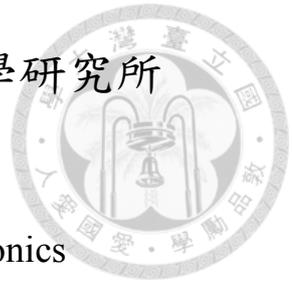
Chiao-Cheng Yu

指導教授:林浩雄 博士

Advisor: Hao-Hsiung Lin, Ph.D.

中華民國 107 年 8 月

August,11



誌謝



研究所的生涯中，碰到了許多難題，也受到了許多人的幫助，首先要感謝父母，有您們的支持和各種幫忙，兒才能沒有後顧之憂與經濟壓力，專心於研究與課業上。特別感謝父親從兒一開始寫論文時就幫忙校對、排版、檢查錯誤，一直到論文的完成，挑出了許多不易發現的錯誤，真的非常感謝您的幫助。並且要感謝指導教授林浩雄教授，您總是在茫無頭緒的困境中指示出康莊大道的方向，並且有耐心的跟學生討論許多問題。

感謝學長們在這段時間給予晚學各種幫助；感謝冠勛學長有耐心的詳細教導晚學製程儀器的使用，並研究元件的物理，教導晚學應對進退上要注意的地方；感謝建鴻學長教晚學使用 TCAD 套裝軟體，並留下程式碼和許多重要的資料，讓晚學減少摸索；感謝周結學長在生活上的照顧，與課業上和研究方向上的建議和指導，以及關鍵時刻的決策諮詢，和對晚學各種幫助；感謝哲維學長對晚學的研究上的建議，和給晚學一些有用的參考資料；感謝嚴徵學長對生涯規劃和未來工作訊息上給予的資訊，您們的幫助使晚學在生活與課業、研究上減少許多障礙，祝您們未來都有好的發展，一切皆順利。

也感謝彥成，總是提供各種研究上與待人處世上務實且圓融的建議，並且告知許多重要的訊息，與教導我課業；感謝皓凱教我使用量測儀器和告知許多重要訊息，有你們的陪伴使我能少走許多冤枉路，祝你們未來一切順心如意。

也感謝頂立提供我 TCAD 的經驗和說明書，讓我在碰到難關時有方向；感謝英倫總是能提出我未曾注意到的地方，並且有很好的建議，而且告訴我投影片和作圖上的許多要注意的地方，又在我的研究上提供許多幫助；感謝定倫、心祐、曹瑋、志騰、旻翰、孝慈在實驗室許多生活事項上的幫忙，使我不用再研究之餘還需勞心於許多生活事物，祝你們研究、課業一切順利。

最後，感謝所有幫助過我的人，感謝你們使我獲益良多，幫助我度過這段充實的日子。



中文摘要

本論文研究雪崩光偵測器(Avalanche photodiode, APD)的結構參數和邊緣區與中心區最大電場比值的關係，研究結構參數對崩潰電壓的影響，得出倍增層與吸收層參雜濃度 N_D 與倍增層厚度變化不劇烈影響崩潰電壓的範圍，倍增層空間電荷量 Q_c 介於 $3.8 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ 與 $4.8 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ 且 N_D 低於 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$ ，並且得出曲率半徑最小值越大，越能降低邊緣區與中心區最大電場比值的結果。以Sentaurus TCAD製程模擬軟體模擬鋅在磷化銦中擴散不同時間的濃度分布，並研究其PN接面的曲率半徑計算方式。規劃設計符合特定崩潰電壓與擊穿電壓的結構參數的步驟，並實地設計出一組符合特定規格要求的APD結構參數。量測一APD樣品並分析，列出需要改善的地方。

關鍵詞：雪崩光偵測器;崩潰電壓;擊穿電壓;參雜濃度與厚度設計;Sentaurus TCAD模擬

Abstract

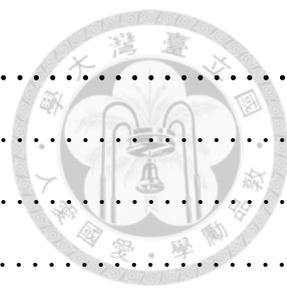
This research studies the relation between the structure parameters of Avalanche photodiode(APD) and the ratio of maximum electric field in the edge and central region. In addition, the effects of variation of structure parameters on breakdown voltage are studied and get the range where the variation of doping concentration of absorption layer and multiplication layer and thickness of multiplication layer doesn't drastically change the breakdown voltage: doping concentration of absorption layer and multiplication layer N_D lower than $1 \times 10^{14}(\text{1/cm}^3)$ and space charge of charge layer ranging from $3.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ to $4.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$. This research also concludes that the larger the minimum of radius of curvature is, the smaller the ratio of maximum electric field in the edge and central region is. Zinc diffusion in InP is simulated using Sentaurus TCAD and the doping profile has been gotten. The method to calculate the radius of curvature of the PN junction of the doping profile has been studied. The steps of designing doping and thickness of every layer of an APD are summarized and are demonstrated in an example. The APD sample of the department is measured and analyzed. Disadvantages of the sample have been proposed.

Keywords: Avalanche photodiode(APD);breakdown voltage;punchthrough voltage;doping and thickness design;Sentaurus TCAD simulation

目 錄



誌 謝.....	I
中文摘要.....	II
英文摘要.....	III
目 錄.....	IV
圖 目 錄.....	VI
表 目 錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景.....	1
第二節 研究動機.....	2
第三節 研究目的.....	2
第四節 論文架構.....	2
第二章 文獻探討.....	3
第一節 名詞解釋.....	3
第二節 光偵測器理論背景.....	5
第三章 光偵測器結構參數與最大電場和崩潰電壓之關係.....	18
第一節 結構參數與邊緣區及中心區最大電場之關係.....	18
第二節 d 、 Q_c 和 N_D 的變化對 V_{bd} 與 V_{pt} 之影響.....	22
第四章 以 TCAD 模擬鋅在磷化銦中的擴散.....	37
第一節 曲率半徑最小值 r_0 對電場比值的影響.....	37
第二節 使用軟體 Sentaurus TCAD.....	38
第三節 軟體使用物理模型.....	38
第四節 曲率半徑最小值 r_0 的計算方法.....	40
第五章 光偵測器的設計.....	45
第一節 光偵測器的設計步驟.....	45
第二節 光偵測器的設計實例.....	47
第三節 T C A D 模擬結果.....	48



第六章 樣品量測結果與分析.....	53
第一節 樣品簡介.....	53
第二節 量測儀器.....	54
第三節 順偏壓與反偏壓量測結果.....	56
第四節 電容電壓特性.....	58
第七章 結論.....	60
參考文獻.....	61

圖 目 錄



圖 1	電子的衝擊游離示意圖.....	5
圖 2	電流進入空乏區示意圖.....	6
圖 3	中心區與邊緣區示意圖.....	6
圖 4	三角形近似所需穿越的能障示意圖.....	7
圖 5	電子穿隧位能差示意圖.....	10
圖 6	r_j 與 r 示意圖.....	10
圖 7	球型區與柱型區示意圖.....	11
圖 8	基本 APD 結構示意圖.....	12
圖 9	(a)APD 參雜濃度分布圖(b)電場分布圖(c)運作示意圖	13
圖 10	APD 加大反偏壓的電場變化圖.....	14
圖 11	光偵測器(APD)電流電壓特性圖.....	14
圖 12	(a) $\frac{1}{c^2}-V$ 曲線圖 (b) N 參雜區參雜濃度分布圖.....	16
圖 13	P^+N 接面的邊緣區示意圖.....	19
圖 14	(a)簡化的雪崩光偵測器示意圖(b)光偵測器運作偏壓時的電場分布示意圖.	21
圖 15	d 、 Q_c 和 N_D 與 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 關係圖.....	22
圖 16	(a)崩潰時的電場隨位置分布圖 (b)各組成項在崩潰電壓時的位置分布圖.....	24
圖 17	崩潰電壓、倍增層厚度 d 與倍增層參雜濃度 N_D 關係圖.....	24
圖 18	(a) $d=400\text{nm}$ 時崩潰電壓的電場分布圖(b) $d=500\text{nm}$ 時崩潰電壓的電場分布圖.....	25
圖 19	d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖.....	26
圖 20	(a) 崩潰電壓時 $d=500\text{nm}$ 的電場分布圖 (b)崩潰電壓時 $d=600\text{nm}$ 的電場分布圖....	27
圖 21	(a)改變 Q_c 的崩潰電壓與 N_D 的關係圖 (b) N_D 小於 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ 時各 Q_c 對應的最大與最小崩潰電壓位置圖 (c) N_D 小於 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ 時的最大與最小崩潰電壓與 Q_c 的關係圖.....	29
圖 22	固定 N_D 為 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ ，改變 Q_c 的崩潰電壓與 Q_c 的關係圖.....	30
圖 23	(a)固定 $Q_c = 2 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ， d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖 (b) $d=500\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖(c) $d=600\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖.....	31
圖 24	(a)固定 $Q_c = 4.72 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ， d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係	



圖

(b)d=500nm 崩潰時的電場分布圖(c)d=600nm 崩潰時的電場分布圖..... 33

圖 25 (a)固定 $Q_c = 6 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ ，d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖
(b)d=500nm 崩潰時的電場分布圖(c)d=600nm 崩潰時的電場分布圖..... 35

圖 26 (a) d=500nm， $Q_c = 4 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ ，崩潰時的電場分布圖
(b)d=500nm， $Q_c = 4.8 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ ，崩潰時的電場分布圖..... 36

圖 27 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{ord}}$ 與 $\frac{W_{ord}}{r_0}$ 之關係圖..... 37

圖 28 費米模型的 TCAD 模擬結果與[15]中以間隙型(Interstitial)鋅離子帶電量 m 為
0、1、2 來計算的擴散結果和[15]中實際擴散結果以 SIM 量測結果的比較圖 ... 39

圖 29 取出的點在以 TCAD 原始計算結果所繪製的圖形上的位置示意圖..... 41

圖 30 (a) 從 TCAD 所得出的資料點與擬合後的擬合線表示圖
(b)資料點的位置與曲率半徑關係圖..... 43

圖 31 在 500°C，矽參雜濃度 $1 \times 10^{15} (cm^{-3})$ 的條件下，曲率半徑最小值 r_0 與橫向
擴散長度和縱向擴散深度對擴散時間關係圖..... 44

圖 32 光偵測器結構和其參數示意圖..... 45

圖 33 N_D 為 $1 \times 10^{15} (cm^{-3})$ 的 $V_{bd}-Q_c$ 圖..... 46

圖 34 $V_{bd} -Q_c$ 圖在要求的 $V_{bd}=40V$ 時所對應的 Q_c 示意圖..... 47

圖 35 本研究的設計結構在崩潰電壓時的電場分布圖..... 48

圖 36 T C A D 算出的本研究之設計的暗電流特性圖..... 49

圖 37 (a)邊緣區 PN 接面處的曲率半徑隨位置關係圖(b) 崩潰時邊緣區的電場分布圖... 51

圖 38 (a)被電荷層限制的邊緣區電場切面位置示意圖(b)崩潰電壓時的中心區與被電荷層限制的邊緣區之電場分布圖..... 52

圖 39 樣品外觀示意圖..... 53

圖 40 樣品結構圖..... 54

圖 41 (a) 樣品電流電壓特性圖(b)樣品電壓與增益關圖..... 57

圖 42 樣品電容電壓特性圖..... 58

圖 43 樣品 $\frac{1}{C^2}-V$ 關係圖..... 59

圖 44 樣品 $N(W)-W$ 關係圖..... 59

表 目 錄



表 1	推導所使用的電場與空乏區長度代號表.....	18
表 2	推導所簡化的元件結構圖中符號解釋表	21
表 3	光偵測器結構參數說明表	45
表 4	(a)設計出的結構參數表(b)放到 TCAD 的結構參數表	49
表 5	電壓監視單元規格表	55
表 6	脈波產生器單元電壓設定範圍與解析度表	55
表 7	脈波產生器單元週期、波幅、與延遲時間設定範圍表	55
表 8	脈波產生器單元的脈波上升緣與下降緣暫態時間設定範圍表	56

第一章 緒論

第一節 研究背景



隨著光偵測技術的日新月異，舊有的PIN光偵測器的靈敏度已逐漸不能負荷最新的靈敏度需求，因此，有人發明了靈敏度更高的雪崩光偵測器(Avalanche photodiode ; APD)。此種偵測器可用於極微弱光源的偵測，應用於雷射測距接收端與光纖通訊接收端，並可發展成為雷射雷達。以雷射作為發射源，藉由APD的高靈敏度，即使雷射發射低功率也可探測。由於大功率雷射通常都需要複雜的設備，因此APD可以減低雷射發射源的複雜度。而APD是操作在負偏壓接近崩潰電壓的偏壓點，若在正常崩潰電壓以前就提前發生邊緣崩潰，則APD將會無法運作。因此，如何改善邊緣崩潰就成為重要的議題。

而有許多研究已經提出各種結構設計來避免邊緣崩潰，例如斜邊結構(Beveled edge)、平台結構、保衛環結構、漂浮保衛環結構、雙重擴散保衛環結構、橫向擴散保衛環結構...等等，這些結構各自有其優點和限制，而應用在不同的APD上時，也必須對結構參數進行調整，以達到規格要求。

在平面結構的APD中，保衛環結構適合作為避免邊緣崩潰的結構設計。因為能配合平面結構的製程，已經有許多研究平面結構的APD的保衛環結構設計，但由於保衛環結構在製造上一一定的困難度，若能設計出不使用保衛環即可避免邊緣崩潰的結構，可簡化製程的複雜度。而要設計此種結構，就必須得出結構參數與光偵測器邊緣區及中心區最大電場的關係，和結構參數與崩潰電壓的關係。所以本論文將研究結構參數與光偵測器邊緣區及中心區最大電場的關係，和結構參數與崩潰電壓的關係，並研究不使用保衛環結構，直接調整結構參數的設計來避免邊緣崩潰的設計方法。



第二節 研究動機

由於雪崩光偵測器有許多結構參數，例如倍增層N型參雜濃度與厚度、電荷層N型參雜濃度與厚度、PN接面參雜濃度的變化梯度、鋅擴散深度、吸收層N型參雜濃度與厚度……等等。這些參數若是一一調整然後實作出元件，量測後再探討最佳結構，則恐曠日費時，因此必須研究結構參數與光偵測器邊緣區及中心區最大電場的關係，和結構參數與崩潰電壓的關係，然後設法依據這些關係得出能避免邊緣崩潰的設計方法。由於保衛環結構在製造上有一定的困難度與複雜度，所以本研究將不使用保衛環結構，探討直接調整結構參數來避免邊緣崩潰的設計。

第三節 研究目的

研究結構參數與光偵測器邊緣區及中心區最大電場的關係，和結構參數與崩潰電壓的關係，然後依據這些關係研究避免邊緣崩潰且符合特定擊穿電壓與潰電壓的設計方法。

第四節 論文架構

本論文第一章為緒論包含研究動機與目的，第二章為文獻探討包含名詞解釋與理論基礎，第三章為推導APD的結構參數與邊緣區及中心區最大電場的關係，探討如何調整結構參數避免邊緣崩潰，說明本研究所使用的崩潰電壓計算方式，並研究結構參數對崩潰電壓的影響，與其物理機制的探討。第四章探討PN接面的曲率半徑對崩潰電壓的影響，並概述所使用的製程模擬軟體，以製程模擬軟體模擬鋅在磷化銦中擴散不同時間的濃度分布，與其PN接面的曲率半徑計算方式。第五章為規劃設計符合特定崩潰電壓與擊穿電壓的結構參數之步驟，並實地設計出一組符合特定規格要求的APD結構參數，然後以TCAD計算此結構的電場分布。第六章是APD樣品的量測結果與分析，並與商用產品比較，列出需要改善的地方。第七章為結論。

第二章 文獻探討



第一節 名詞解釋

一. 能帶(Energy band)：

晶體中電子所具有的能量，並不是無限連續的，而是只能處於某些能量級，這些能量級的分佈在某些能量範圍內會呈現幾乎連續的現象，形成帶狀，稱為能帶(Energy band) [9]。

二. 價帶(Valance band)、導帶(Conduction band)、能隙(Band gap)：

固體材料的能帶結構由多條能帶組成，電子先占據低能量的能帶，逐步占據高能量的能帶[8]。根據電子填充的情況，能帶分為傳導帶（簡稱導帶，少量電子填充）和價帶（簡稱價帶，大量電子填充）。導帶和價帶間的空隙稱為禁帶（電子無法填充），大小即為能隙。

三. 雪崩產生(Avalanche generation)：

為一種高電場作用下，電子電洞受電場激發，加速激發出其他電子電洞的機制。

四. 雪崩光偵測器(Avalanche photodiode ; APD)：

利用雪崩的產生機制來達到高靈敏度的光偵測器。

五. 間接產生-復合(SRH Generation recombination)：

電子藉由能帶中的陷阱(Trap)而躍遷至導帶，即為間接產生，電子藉由能帶中的陷阱(Trap)而降至價帶，即為間接復合，合此二者為間接產生-復合機制。

六. 暗電流(Dark current)與光電流(Photo current)：

暗電流為光偵測器沒照光時加偏壓所量得光偵測器之電流，光電流為光偵測器照光時加偏壓所量得光偵測器之電流。

七. 空乏區(Depletion region)：

PN接面處有電荷累積的區域，此區域中才有電場分布。



八. 網格(Mesh):

要模擬一個元件特性，不可能以此元件所有的原子為單位，來作為求解物理參數的點，因為如此數量太龐大，必須建構有限數量的點，這些點在元件各個位置有適當的分布，然後在每一點解出其各種物理參數，點與點之間就以內差的方式得出其物理參數，如此來計算元件特性，這些點就稱為網格。

九. 漂移-擴散模型(Drife-diffusion model) :

由4個方程式來描述半導體物理特性的模型[7] :

1. Poisson's equation : 描述電位分布與電荷分布之關係;
2. 連續方程式(Continuity equation)描述每一點流進與流出的電荷數量與該點的電荷量的關係;
3. 載子密度方程式描述每點所帶電荷量與該點費米級和導帶最低能量與價帶最高能量之關係;
4. 漂移-擴散電流方程式描述每一點電流與該點電場與所帶電子電洞數量之關係。

十. 保衛環(Guard ring):

一種設計於PN接面邊緣的結構，目的是防止PN接面邊緣的電場高於PN接面中心處的電場。

十一. 崩潰倍增(Avalanche multiplication) :

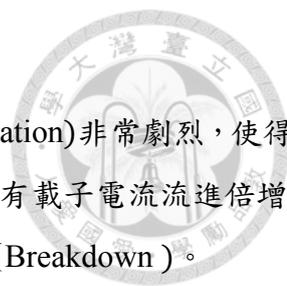
載子在空乏區當中受電場作用，電場增大到某特一定程度時，載子移動一段距離後將得到足夠能量並激發出其他電子電洞對，此過程稱為崩潰倍增(Avalanche multiplication 或 Avalanche generation)，或稱衝擊游離(Impact ionization)。

十二. 電子衝擊游離比率(Impact ionization rate) α_n :

α_n 為電子移動一段距離後激發出的電子電洞對與移動距離之比。

十三. 電洞衝擊游離比率(Impact ionization rate) α_p :

α_p 為電洞移動一段距離後激發出的電子電洞對與移動距離之比。



十四.崩潰(Breakdown)：

當 PN 接面電場增大到某程度時，雪崩產生(Avalanche generation)非常劇烈，使得崩潰倍增增益(Avalanche multiplication gain)趨近無窮大，此時只要有載子電流流進倍增(Multiplication)層便會造成極大的電流可被量測到，此稱為崩潰(Breakdown)。

十五.能帶隧穿(Band-to-band tunneling)：

當載子在高電場作用時，載子獲得能量，將從價能帶穿隧過能帶隙(Band gap)而到達傳導能帶，稱為能帶隧穿。

十六.邊緣效應(Edge effect)：

在平面結構的光偵測器的PN接面邊緣處，因為擴散的關係使得邊緣處呈現彎曲形狀，在此彎曲的PN接面電場會高於中心PN接面的電場，此即是邊緣效應(Edge effect)。

第二節 光偵測器理論背景

一. 衝擊游離：

如圖 1 所示是在高電場作用下，電子經過一段距離後激發出電子電洞對，又經過一段距離就會再激發出更多的電子電洞對，而電洞在高電場作用下也有相同現象，此現象稱為衝擊游離(Impact ionization) [1]。

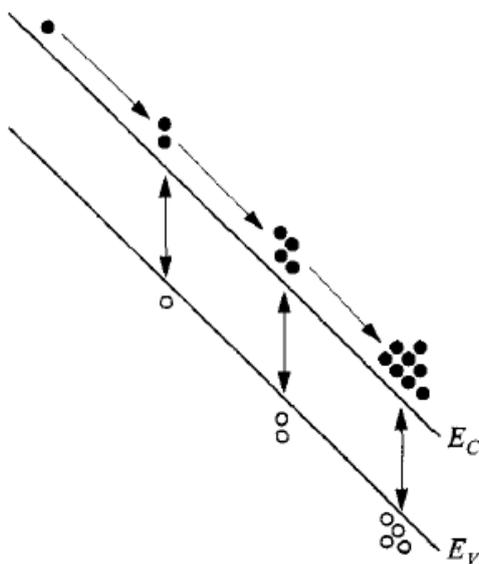


圖 1 電子的衝擊游離示意圖

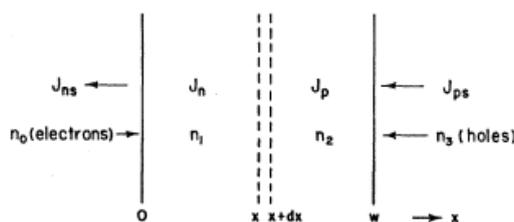


圖 2 電流進入空乏區示意圖

如圖 2 所示，量測到的總電流為 $J = J_n + J_p$ ，一開始進入空乏區的電子電流為 J_{ns} ，電洞電流為 J_{ps} 。一開始進入空乏區純粹由電子電流所引發的增益(Multiplication gain) $M_n = \frac{J_n + J_p}{J_{ns}}$

一開始進入空乏區純粹由電洞電流所引發的增益(Multiplication gain) $M_p = \frac{J_n + J_p}{J_{ps}}$

則[2]:

$$1 - \frac{1}{M_p} = \int_0^{W_{Dm}} \alpha_p \exp\left[-\int_0^x (\alpha_p - \alpha_n) dx'\right] dx \quad \dots\dots\dots(1)$$

W_{Dm} 為空乏區寬度， α_n 為電子的衝擊游離係數， α_p 為電洞的衝擊游離係數。

$$1 - \frac{1}{M_n} = \int_0^{W_{Dm}} \alpha_n \exp\left[-\int_x^{W_{Dm}} (\alpha_n - \alpha_p) dx'\right] dx \quad \dots\dots\dots(2)$$

二. 光偵測器的崩潰(Breakdown) :

光偵測器的崩潰(Breakdown)可能發生在平面結構中 PN 接面的中心區，或者邊緣區，發生在中心區的稱為主體崩潰(Bulk breakdown)，發生在邊緣區的稱為邊緣崩潰(Edge breakdown)。如圖 3 所示，因為平面結構的 APD 其 PN 接面邊緣的電場因邊緣效應(Edge effect)的緣故而使電場大於中心區[6]，故易發生邊緣崩潰。邊緣崩潰會使光偵測器(APD)在設計於主體崩潰的偏壓之前就先崩潰，而光偵測器(APD)是運作在本體崩潰之前的偏壓，若在正常運作偏壓時發生邊緣崩潰會使光偵測器(APD)無法運作，故邊緣崩潰為必須避免的現象。

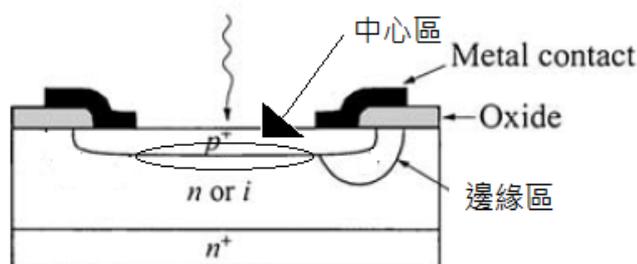




圖 3 中心區與邊緣區示意圖，修改自[1]

當純粹是電子電流而所引發的 Multiplication gain M_n 或

純粹是電動洞電流而所引發的 Multiplication gain M_p 趨近於無限大時，就會發生崩潰，因此可由式(1)與式(2)得出崩潰條件符合式(3)或式(4)[2]。

$$\int_0^{W_{Dm}} \alpha_n \exp\left[-\int_x^{W_{Dm}} (\alpha_n - \alpha_p) dx'\right] dx = 1 \dots\dots\dots(3)$$

或

$$\int_0^{W_{Dm}} \alpha_p \exp\left[-\int_0^x (\alpha_p - \alpha_n) dx'\right] dx = 1 \dots\dots\dots(4)$$

式(3)與式(4)的左式又稱為離子積分(Ionization Integral)。

三. 光偵測器的能帶隧穿(Band-to-band tunneling)：

載子要穿隧過能帶隙(Band gap)的穿隧機率 T_{WKB} 可用所需穿越的近似三角形能障來表示，如圖 4 及式(5)所示，再以 WKB 近似得出[1]、 [3]：

$$T_{WKB} \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}E_g^{3/2}}{3qh\xi}\right) \dots\dots\dots(5)$$

其中 m^* 為載子的有效質量， E_g 為能隙， h 為約化普朗克常數 ξ 為電場

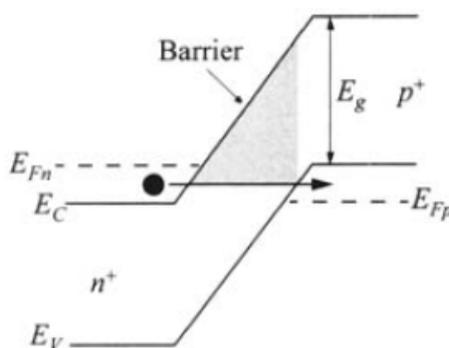


圖 4 三角形近似所需穿越的能障示意圖[1]

由式(5)可知當電場越大或能帶隙(Band gap)越小時，越容易發生能帶隧穿。所以在光偵



測器(APD)的設計上要使用能帶隙較小的 InGaAsP 和 InGaAs 層。在光偵測器(APD)運作時，最大電場不超過 180kV/cm 以使能帶隧穿電流不對暗電流造成顯著影響[4]。

而能帶隧穿(Band-to-band tunneling)的電流如式(6)所示[1],

$$I_t = C \int_{E_{Cn}}^{E_{Vp}} [F_C(E) - F_V(E)] T_t N_c(E) N_v(E) dE \dots\dots\dots(6)$$

其中

C 為常數，

E_{Vp} 為半導體 P 型區價帶最高能量， E_{Cn} 為半導體 N 型區導帶最低能量， $F_C(E)$ 為導帶中能量 E 的電子軌域的佔據機率，即為費米狄拉克分布函數在能量為 E 時的值， $F_V(E)$ 為價帶中能量 E 的電子軌域的佔據機率，即為費米狄拉克分布函數在能量為 E 時的值， T_t 為穿隧機率， $N_C(E)$ 為導帶中能量 E 的電子軌域態密度， N_V 為價帶中能量 E 的電子軌域態密度。

四. 光偵測器的暗電流(Dark current)：

反偏壓下，光偵測器中暗電流主要有 3 個來源[4][5]：

1. 擴散電流(Diffusion current)：成因為中性區的熱生(Minority carrier)擴散進入空乏區，然後被空乏區中的電場掃離出發的中性區到另一 type 的中性區，而造成暗電流，如式(7)與式(8)所示。其所造成暗電流可表示為[4][5]：

$$i_d = i_s \left(e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right) \dots\dots\dots(7)$$

$$i_s = qn_i^2 A \left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{1}{N_a}} + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{1}{N_d}} \right) \dots\dots\dots(8)$$

其中 V 為所加偏壓，

q 為基本電荷，k 為波資曼常數，T 為絕對溫度， n_i 為本質載子濃度，A 為元件面積， D_n 、 D_p 為次要載子。

2. 復合-產生電流(Generation-recombination current)：如式(9)所示。成因為空乏區中會發



生間接產生-複合效應而造成載子產生或複合，而形成電流，其所造成暗電流可表示為 [4][5]:

$$i_{gr} = \frac{qn_iAW}{\tau_{eff}} \left(e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} - 1 \right) \dots\dots\dots(9)$$

其中 τ_{eff} 為有效次要載子擴散生命時間(lifetime)， W 為空乏區長度

3. 能帶隧穿(Band-to-band tunneling): 在高電場區，電子可能穿隧過能帶造成的能障，從傳導能帶穿隧到價能帶而產生電流。同樣的，電洞可能穿隧過能帶造成的能障，從價能帶穿隧到傳導能帶而產生電流，此即為能帶隧穿造成的暗電流，可表示為式 (11)[3]:

$$J_t = \frac{q^2 \mathcal{E}}{36 \pi \hbar^2} \sqrt{\frac{2m^*}{E_g}} D \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{3/2}}{3q\hbar \mathcal{E}}\right) \dots\dots\dots(10)$$

$$D \equiv \int [F_C(E) - F_V(E)] \left[1 - \exp\left(-\frac{2E_S}{\bar{E}}\right) \right] dl \dots\dots\dots(11)$$

$$\bar{E} \equiv \frac{\sqrt{2}q\hbar \mathcal{E}}{\pi\sqrt{m^*} E_b} \dots\dots\dots(12)$$

其中， \mathcal{E} 為空乏區中平均電場。

定義發生穿隧的電子與該電子所處位置之導帶最低點位能差 E_1 ，與要穿隧到目標位置之電洞與該電洞所處位置之價帶最高點位能差 E_2 。 E_S 為 E_1 和 E_2 兩者中的較小者。

能帶隧穿隨著電場增大而增大，故在接近崩潰電壓時，若電場在某些區域超過特定值，能帶隧穿將造成顯著暗電流。

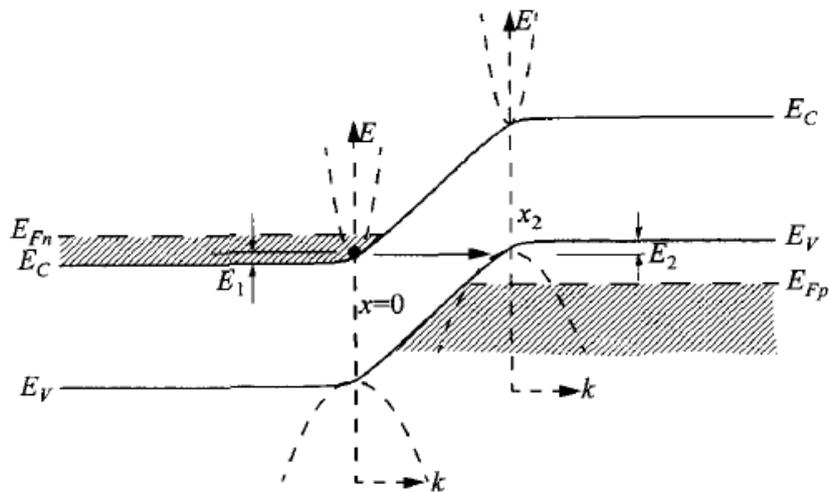


圖 5 電子穿隧位能差示意圖[1]

五. 光偵測器的邊緣效應(Edge effect):

假設橫向與縱向擴散深度相同，則在彎曲處的參雜濃度分布可以近似為只與曲率半徑 r (r 為擴散開口邊界與所考慮的 PN 接面彎曲處上的點之間之距離，如圖 6 所示) 有關，而以柱座標近似[6]，解 Poisson 方程式得出電場與曲率半徑 r 的關係[1]如式(13):

$$\frac{1}{r^n} \frac{d}{dr} [r^n \mathcal{E}(r)] = \frac{\rho(r)}{\epsilon_s} \dots\dots\dots(13)$$

其中， $\mathcal{E}(r)$ 為在 r 處的電場， $\rho(r)$ 為在 r 處的淨電荷，而解得

$$\mathcal{E}(r) = \frac{1}{\epsilon_s r^n} \int_{r_j}^r r^n \rho(r) dr + \frac{C_1}{r^n} \dots\dots\dots(14)$$

其中， r_j 為高參雜濃度空乏區邊界與擴散開口邊緣距離如圖 6 所示。

n 在柱型區為 1，在球型區為 2，球型區與柱型區如圖 7 所示， C_1 為常數，此常數須使電場對位置積分等於內建電位。

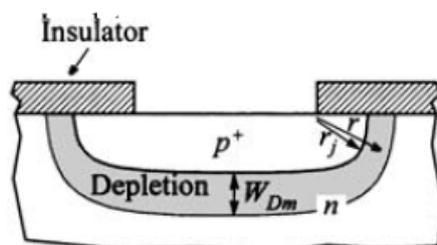


圖 6 r_j 與 r 示意圖[1]

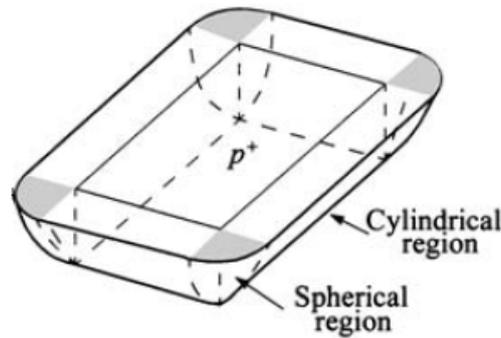


圖 7 球型區與柱型區示意圖

如圖 7 所示，球型區與柱型區示意圖，此圖是三維的 PN 接面圖，其角落處為球型區，角落之間長條型區域為柱型區[1]

由式(14)知 r 越小則 PN 接面處電場越大，若以柱座標近似電荷分布，則 PN 接面中心處由於所得 r 趨近無窮大，故在同樣參雜條件下電場必小於邊緣區。

六. 雪崩光偵測器(Avalanche photodiode ; APD)基本運作原理:

如圖 8 所示，光偵測器(APD)有各種結構，其中最重要的五層結構如下：

1. 受光層(Window layer)：此層為雪崩光偵測器光照射的區域，因能隙比入射光能量大故光直接穿透此層，而不會在此層產生電子電洞對，正極連接此層。
2. 吸收層(Absorption layer)：此層能隙比入射光能量小，故入射光在此層被吸收，產生電子電洞對。
3. 電荷層(Charge layer)：此層參雜濃度高於相鄰的吸收層和倍增層，如圖 9(a)所示，功能為使偏壓在運作條件時，電場在此層有劇烈變化，如圖 9(b)所示，以使吸收層的電場低於引發能帶穿隧的電場，以其避免由能帶穿隧所造成的暗電流，但電場在此層的變化有其上限，必須使吸收層的電場足夠大到可以把光產生的電子電洞可以在未發生間接復合前被掃離吸收層。
4. 倍增層(Multi[plication layer)：此層為偏壓在運作條件時發生崩潰倍增的區域，目的為使吸收層光產生的電洞流入此層而引發崩潰倍增而放大入射所產生的電流。
5. 基板層(Substrate)：此層為光偵測器的基板區域，連接負極。



運作在反偏壓下，運作時的電場分布如圖 9(b)所示，在倍增層有高電場，而電荷層的高參雜濃度使得吸收層的電場遠小於倍增層。光從受光層進入，穿過受光層到吸收層後激發出電子電洞對，如圖 9(c)所示，而電子受電場作用往基板層的正極移動，電洞往受光層的負極移動，電子進入倍增層受到倍增層的高電場作用加速形成雪崩倍增而產生出許多電子電洞對，這些次生電子電洞對又會各自往正極和負極移動，其中若受到電場加速使得能量足夠時，又會再激發出另外的電子電洞對，如此原本只有少量電子流入倍增層而可造成大量電子電洞流出，此即是光偵測器(APD)可以接收微弱光信號得到高靈敏度的來由。

此種結構是以電子進入倍增層引發崩潰倍增的結構，亦有由電洞引發崩潰倍增的結構，即是把各層的參雜改成相反種類，如 p+改為 n+，其餘以此類推，即成為電洞引發崩潰倍增的結構。此種五層結構為基本結構，真正的光偵測器(APD)還有其他層來輔助或改善某些問題，但通常都還是有這五層結構，運作原理也相近。

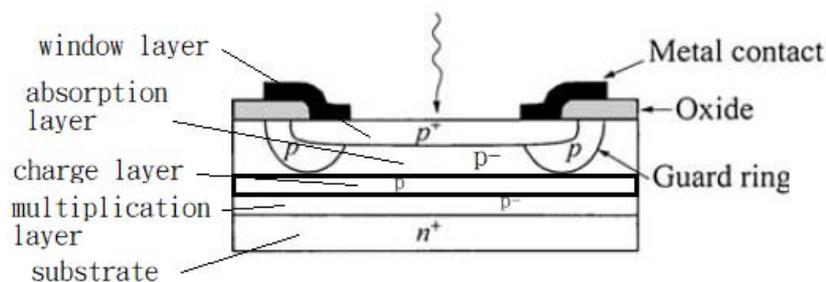


圖 8 基本 APD 結構示意圖，修改自[1]

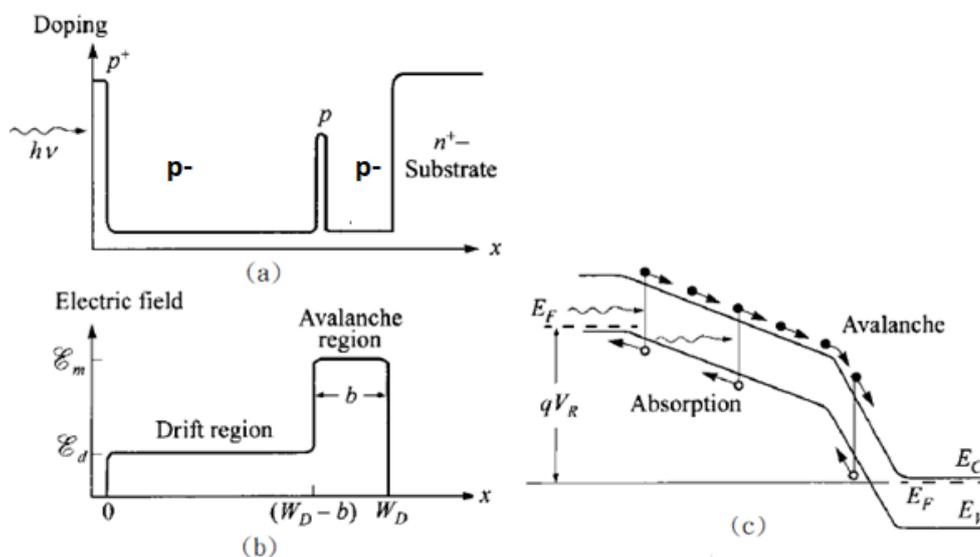


圖 9 (a)APD 參雜濃度分布圖(b) 電場分布圖(c)運作示意圖[1]



七. 光偵測器的擊穿電壓(Punch-through Voltage) :

如圖 10 所示，光偵測器(APD)在沒施加偏壓時的空乏區，分布於倍增層與部分電荷層。當反偏壓加大時，空乏區會逐漸往吸收層延伸，接觸到吸收層時，此時的反偏壓即是擊穿電壓。反偏壓到達擊穿電壓以前，吸收層吸收光產生的電子電洞因為沒有電場作用，只能靠擴散到正極與負極，但因吸收層通常選用能帶隙小的材料，而電荷層與受光層則是能帶隙大的材料，這三層組合在一起的價能帶與導能帶會形成井狀結構使得電子電洞往正負極移動時會遇到位能障礙，而在吸收層中被間接復合掉，所以在反偏壓到達擊穿電壓以前，光電流跟暗電流幾乎一樣，如圖 11 所示。反偏壓大過擊穿電壓以後，吸收層吸收光產生的電子電洞開始受到電場作用，各被掃往正極與負極，且因反偏壓作用使電荷層造成的位能障礙降低，使得大部分的光產生的電子電洞可以順利到達正極與負極，所以光電流明顯高於暗電流，如圖 11 所示。而在反偏壓大過擊穿電壓以後，因為空乏區延伸到低參雜濃度的吸收層後，只要加一點偏壓即會造成空乏區迅速延伸，故電容值隨偏壓而急遽下降，如圖 11 所示。

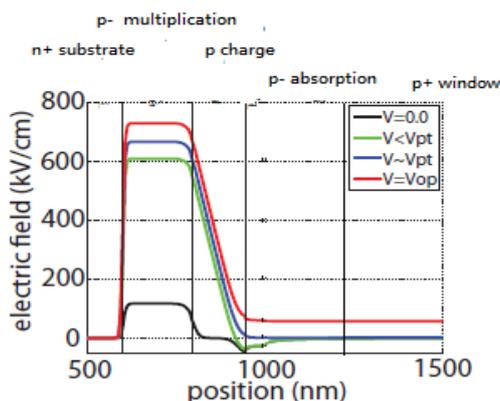


圖 10 APD 加大反偏壓的電場變化圖，修改自[4]

典型的光偵測器(APD)電流電壓特性如圖 11 所示，在不同偏壓下所量得的光電流 i 可表示為式(15)所示[4]:

$$i = M(i_{dm} + i_p) + i_{du} \dots\dots\dots(15)$$

其中 M 為增益， i_{dm} 為被倍增的暗電流部分， i_{du} 為沒被倍增的暗電流部分， i_p 為光產生載子所形成的電流。其中

V_{pt} : 擊穿電壓(Punch-through voltage)，為光電流對偏壓微分最大值的偏壓點;

V_{m1} : 增益 1 電壓(Unity gain voltage)，光電流對偏壓二次微分為 0 的偏壓點，此點

的電流為光產生載子所形成的電流 i_p ;



V_{bd} ：為發生崩潰的偏壓點，量測上以暗電流達到某個數量級時的偏壓點為 V_{bd} 。而在某偏壓點的增益以該點光電流與 V_{m1} 時的光電流之比得出；

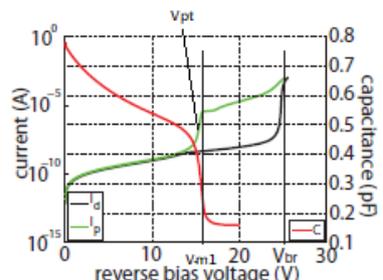


圖 11 光偵測器(APD)電流電壓特性圖

如圖 11 所示，圖中 I_d 代表暗電流， I_p 代表光電流，修改自[4]

八. 光偵測器順偏壓電流特性：

光偵測器(APD)在順偏壓時，電流特性可以用 PN 接面順偏壓時的理想擴散電流與產生-復合電流模型描述，即是在偏壓為 0.1-0.3V 時，電流為擴散電流與產生-復合電流兩種電流機制的綜合表現，PN 接面順偏壓為 0.1-0.3V 時的理想擴散電流與產生-復合電流綜合模型如式(16)所示可以表示為[1]：

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \dots\dots\dots(16)$$

其中

- J_F ：順偏壓電流；
- η ：理想因子，介於 1 與 2 之間，若接近 1 則代表此電流以擴散電流為主，接近 2 則代表為產生-復合電流為主；
- I_s ：飽和電流。

九. 光偵測器中的電容電壓關係：

對於 P^+N 接面，N 參雜區具有不規則參雜濃度，設 W 為 N 參雜區之空乏區寬度， $N(W)$ 為 N 參雜區之空乏區邊緣參雜濃度，其與電壓和電容密度 C 有如下關係：

$$N(W) = -\frac{2}{q\epsilon_s} \frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV} \dots\dots\dots(17)$$

隨著偏壓加大， W 也增加，而因 N 參雜區具有不規則參雜濃度，故此時的 $N(W)$ 也隨之



改變，成為該偏壓下的 N 參雜區之空乏區邊緣參雜濃度，故可藉由電容電壓曲線得出 $\frac{1}{C^2}-V$ 曲線如圖 12(a)所示，而算出 N 參雜區參雜濃度分布如圖(b) 所示。

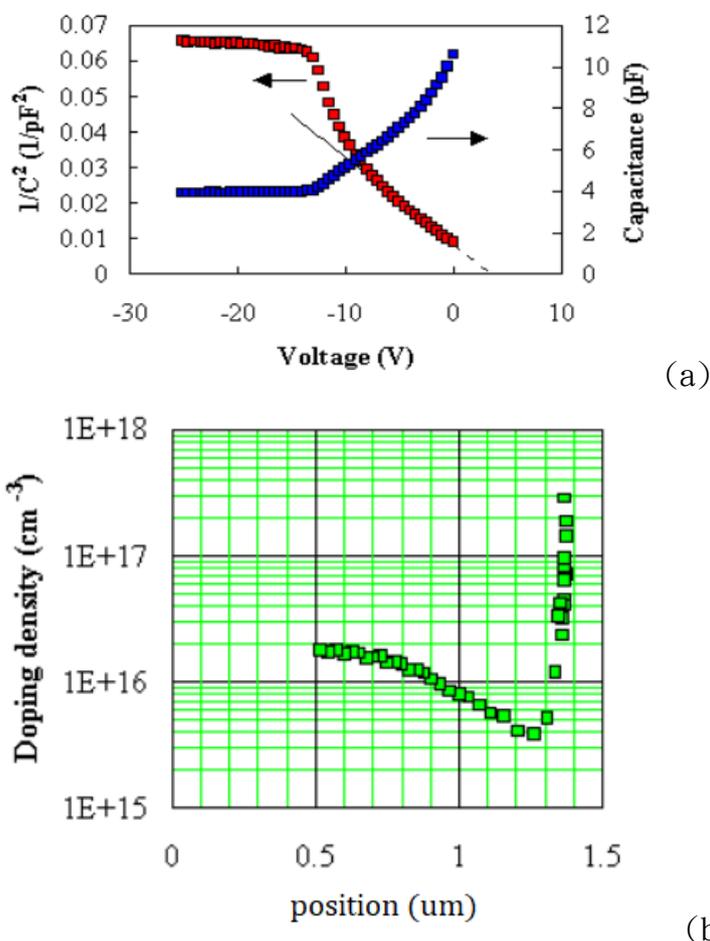


圖 12 (a) $\frac{1}{C^2}-V$ 曲線圖 (b) N 參雜區參雜濃度分布圖

十. 鋅(Zn)在磷化銦(InP)中的擴散(Diffusion)機制：

鋅在磷化銦中的擴散機制可用踢出機制(Kick-out mechanism)來描述[17]，一個在半導體間隙中的間隙型原子(Interstitial atom)將位於晶格位置的取代型(Substitutional)的參雜物質(鋅)從取代型位置踢到間隙型位置，此原子取而代之佔據原本鋅佔據的取代型位置，成為一般的晶格位置中的原子，而原本取代型的鋅則移到半導體的間隙中成為間隙型的鋅，而間隙型的鋅在半導體內可以自由移動，移動一段距離後又會將晶格位置中的原子踢出，取而代之佔據原本原子佔據的位置，成為取代型的鋅，而被踢出的原子成為間隙型的原子，因此造成鋅擴散的現象。



十一. 量子效率(Quantum efficiency)[14]

量子效率為入射到光敏元件光子數與產生的電子數之比[8]，可分為外部量子效率(External quantum efficiency, EQE) 與內部量子效率(Internal quantum Efficiency, IQE)。外部量子效率為入射到光敏元件光子數與光敏元件所量測到的電子數之比，如式(18a)所示：

$$EQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{photons/sec}} = \frac{\text{current}/(\text{charge of one electron})}{(\text{total power of photons})/(\text{energy of one photon})} \dots\dots\dots(18a)$$

而內部量子效率為入射並被光敏元件吸收的光子數與光敏元件所量測到的電子數之比，如式(18b)所示：

$$IQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{absorbed photons/sec}} = \frac{EQE}{1-\text{Reflection}} \dots\dots\dots(18b)$$

內部量子效率必大於等於外部量子效率，以雪崩光偵測器而言，其外部量子效率 η_0 如式(18c)所示:[21]

$$\eta_0 = (1 - r)(1 - e^{-\alpha_0 W}) \dots\dots\dots(18c)$$

其中 α_0 為吸收層材料對入射光波長的吸收係數，W 為吸收層長度，r 為反射掉的入射光功率。由式(18c)可知，吸收層長度越長則外部量子效率越高。

第三章 光偵測器結構參數與最大電場和崩潰電壓之關係



第一節 結構參數與邊緣區及中心區最大電場之關係[23]

要設計出能防止邊緣崩潰的雪崩光偵測器，必須先研究雪崩光偵測器在崩潰電壓時中心區最大電場與邊緣區最大電場的關係，本節將列出理論推導，以得出邊緣區與中心區最大電場比值與各種結構參數的關係，以決定如何設計方可使崩潰電壓時中心區最大電場大於邊緣區最大電場，以防止邊緣崩潰。

本研究先推導在某偏壓 V 時邊緣區的最大電場，再推導簡化的雪崩光偵測器結構的中心區最大電場，然後可得邊緣區最大電場及中心區最大電場的比值，以觀察其比值與結構參數的關係，來研究如何設計可以降低邊緣區與中心區最大電場比值。

以下推導所使用的電場與空乏區長度代號如表 1 所示：

表 1 推導所使用的電場與空乏區長度代號表

case	在偏壓為 V 時的最大電場	在偏壓為 V 時的空乏區長度
APD的中心區	E_{max}^{cen}	W^{cen}
APD的邊緣區(cylindrical edge)	E_{max}^{edge}	W^{edge}

考慮一個 P^+N 接面的邊緣區如圖 13 所示，設在某偏壓 V 下之空乏區寬度為 W^{edge} ，其電場與參雜濃度的關係可由柱座標近似邊緣區的空乏區內的電荷分布而得，在邊緣區的空乏區內的電荷分布只隨 r_0 變化，而與柱座標中的 θ 、 z 無關，故電場與參雜濃度的關係如式(19)所示[18]：

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rE) = -\frac{Q(r)}{\epsilon} = -\frac{qN_D}{\epsilon} \dots\dots\dots(19)$$

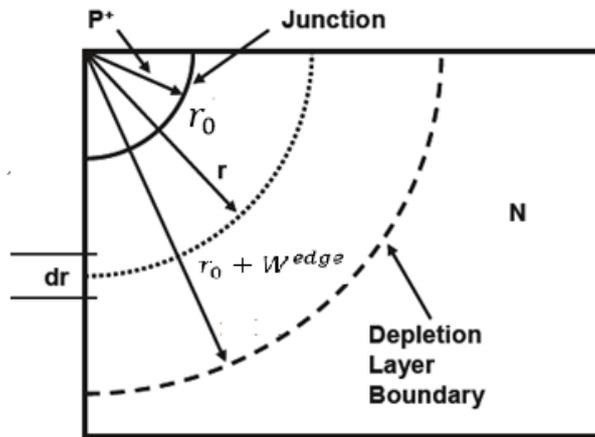


圖 13 P^+N 接面的邊緣區示意圖[18]

積分此公式並代入邊界條件:電場於空乏區邊界($r_0 + W^{edge}$)為 0, 得出

$$E(r) = \frac{qN_D W^{edge}{}^2}{2\varepsilon} \left[r - \frac{(r_0 + W^{edge})^2}{r} \right] \dots\dots\dots (20)$$

$$E_{max}^{edge} = E(r_0) = \frac{qN_D W^{edge}{}^2}{2\varepsilon} \left[r_0 - \frac{(r_0 + W^{edge})^2}{r_0} \right] \dots\dots\dots (21)$$

$$V_{bi} - V = - \int_0^{W^{edge}} E(r) dr = \frac{-qN_D}{2\varepsilon} \left[\frac{(r)^2}{2} - (r_0 + W^{edge})^2 \ln r \right] \Big|_{r_0}^{r_0 + W^{edge}} \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{令 } x = \frac{W^{edge}}{r_0}, \text{ 式(31)} = \frac{-qN_D r_0^2}{2\varepsilon} \left[\frac{(1+x)^2}{2} - \frac{1}{2} - (1+x)^2 \ln(1+x) \right] \dots\dots\dots (23)$$

整理可得

$$- \frac{2\varepsilon(V_{bi}-V)r_0^2}{qN_D} = (1+x)^2 \left[\frac{1}{2} - \ln(1+x) \right] - \frac{1}{2} \dots\dots\dots (24)$$

整理可得

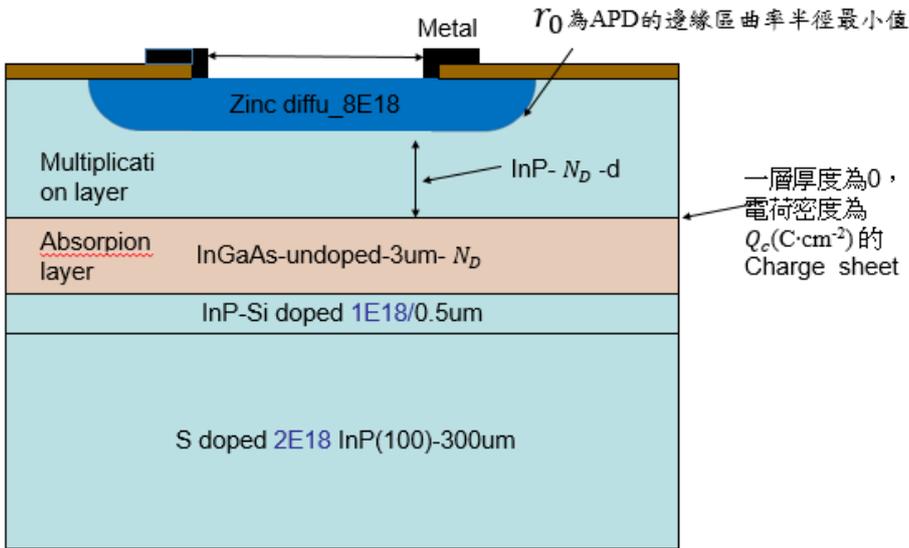
$$1 - \frac{2\varepsilon(V_{bi}-V)}{qN_D r_0^2} = (1+x)^2 [1 - 2 \ln(1+x)] \dots\dots\dots (25)$$

此式為邊緣區空乏區長度與偏壓的關係。

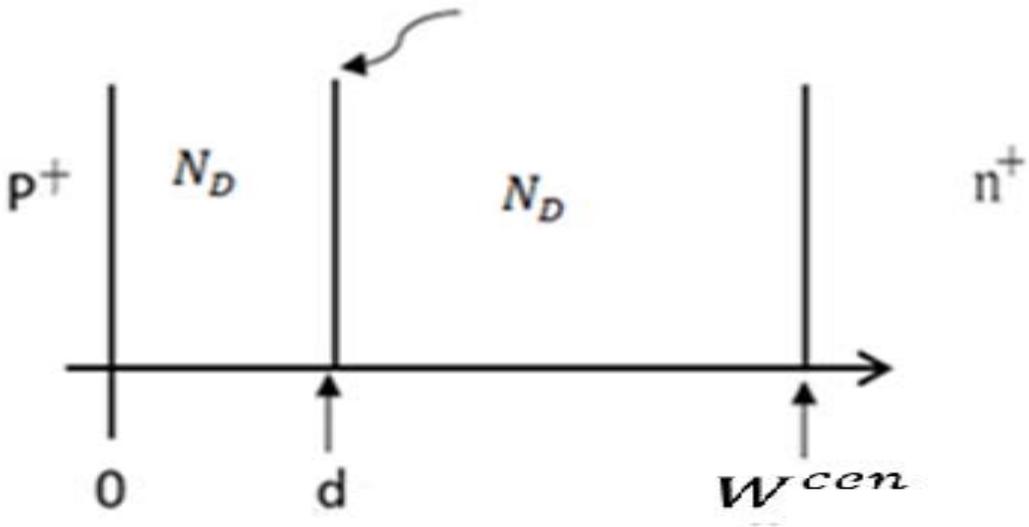
考慮一個簡化的雪崩光偵測器如圖 14(a)所示, 其中符號如表 2 所示, 此處先設電荷層可近似為一厚度為 0, 帶電量為 Q_c 的一層薄膜, 設計出 Q_c 後可由 $Q_c = q N_{ch} W_{ch}$ 決定電荷層參雜濃度與厚度。另外, 定吸收層與倍增層參雜濃度皆為 N_D

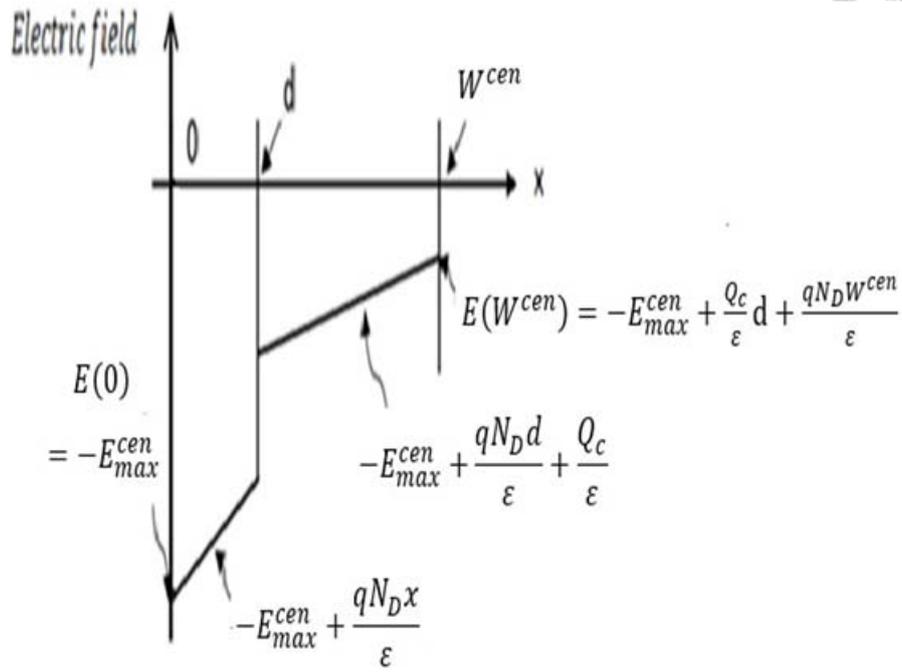


則在雪崩光偵測器運作偏壓時的電場分布圖如圖 14(b)所示，設在某運作偏壓 V 下之空乏區寬度(即為吸收層和倍增層厚度相加)為 W^{cen} ，其偏壓 V 與參雜濃度的關係如式(26)所示：



(a)





(b)

圖 14 (a)簡化的雪崩光偵測器示意圖(b)光偵測器運作偏壓時的電場分布示意圖

表 2 推導所簡化的元件結構圖中符號解釋表

層	doping	thickness
倍增層 (multiplication layer)	N_D	d
電荷層 (charge layer)	N_{ch}	W_{ch}
吸收層 (absorption layer)	N_D	$3\mu m$

$$V_{bi} - V = \frac{qN_D W^{cen2}}{2\epsilon} + \frac{Q_c}{\epsilon} d + |E(W^{cen})| \times W^{cen} \dots\dots\dots(26)$$

$$|E(W^{cen})| = -\left(E_{max}^{cen} + \frac{Q_c}{\epsilon} d + \frac{qN_D W^{cen}}{2\epsilon}\right) \dots\dots\dots(27)$$

$$E_{max}^{cen} = -\left(\frac{V_{bi} - V}{W^{cen}} + \frac{Q_c}{\epsilon} \left(1 - \frac{d}{W^{cen}}\right) + \frac{qN_D W^{cen}}{\epsilon}\right) \dots\dots\dots(28)$$

由公式(21)、(28)可得



$$\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} = \frac{\left(W_{edge} + \frac{W_{edge}^2}{2r_0} \right)}{\frac{1}{2} \left(\frac{2\varepsilon(V_{bi}-V)}{qN_D W_{cen}} + W_{cen} \right) + \frac{Q_c \left(1 - \frac{d}{W_{cen}} \right)}{qN_D}} \quad (29)$$

為邊緣區與中心區最大電場比值。

而中心區擊穿電壓 V_{pt} :

$$V_{pt} = \frac{qN_D d^2}{2\varepsilon} + \frac{Q_c}{\varepsilon} d \quad (30)$$

為了瞭解 d 、 Q_c 和 N_D 的設計範圍內之 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 的變化，本研究作出 d 、 Q_c 和 N_D 與 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 關係圖如圖 15 所示，從圖中可知， d 介於 400-700nm， Q_c 高於 $1.6 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 且 N_D 低於 $3 \times 10^{15} (1/\text{cm}^3)$ 時， $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} < 1$ 。故應設計在此範圍之內以使 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} < 1$ 。

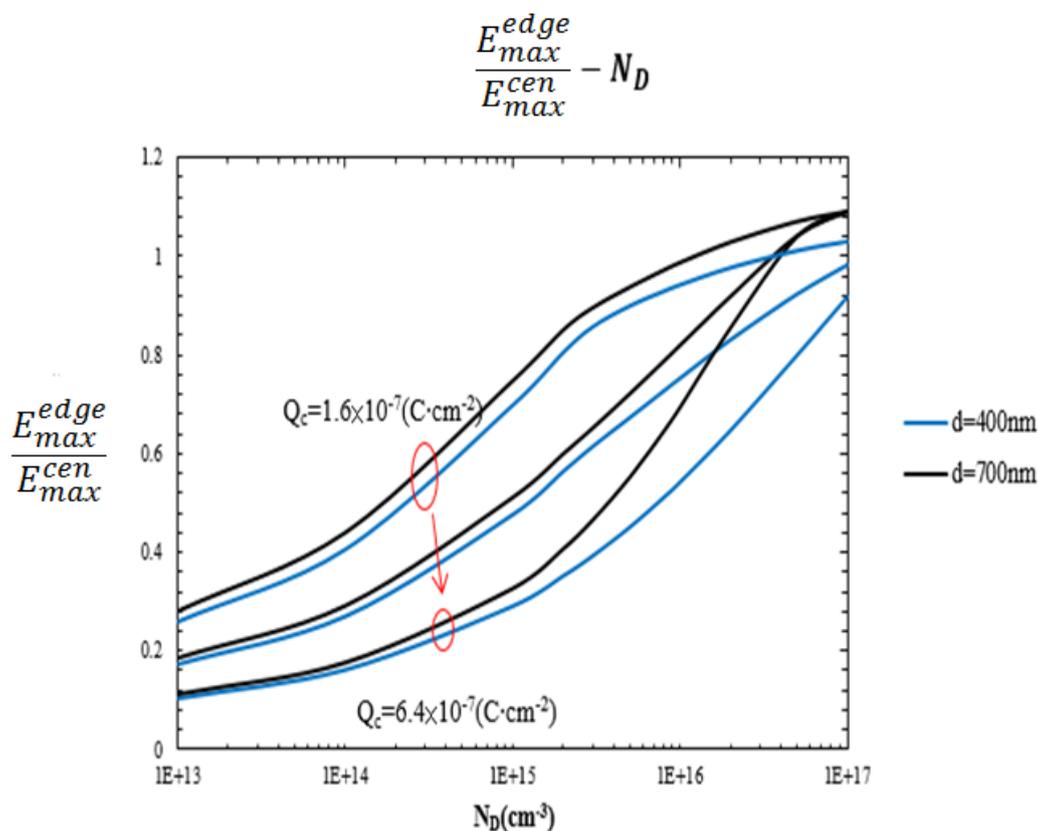


圖 15 d 、 Q_c 和 N_D 與 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 關係圖

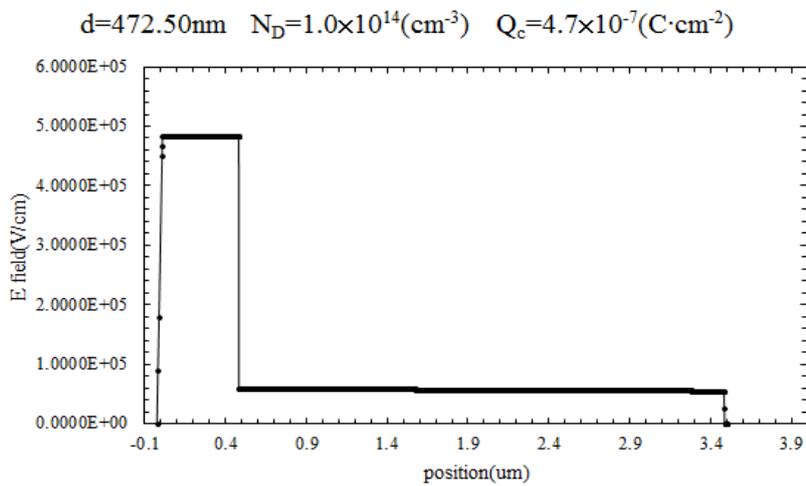
第二節 d 、 Q_c 和 N_D 的變化對 V_{bd} 與 V_{pt} 之影響

接下來將探討 d 、 Q_c 和 N_D 的變化對 V_{bd} 與 V_{pt} 之影響，首先說明本研究所使用的崩潰電壓計算方式，是將離子積分公式(4)化成數值形式，如公式(31)所示，

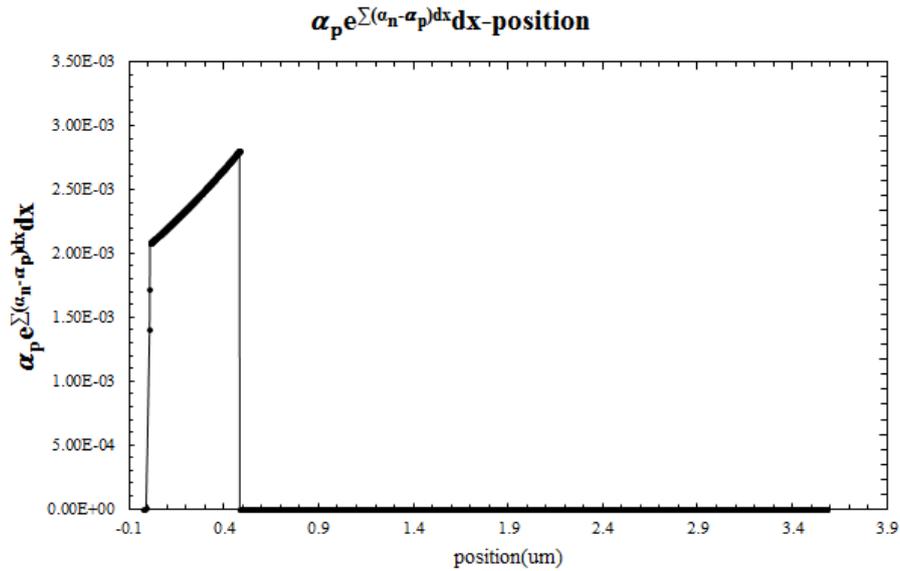
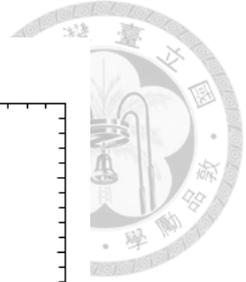


$$\sum_{i=0}^n \alpha_p(x_{n+1}) e^{\sum_{i=0}^n (\alpha_e(x_{i+1}) - \alpha_p(x_{i+1}))(x_{i+1} - x_i)} \dots \dots \dots (31)$$

數值形式的離子積分各組成項，在崩潰電壓時的位置分布，如圖 16(a)所示。圖 16(a) 為 $d=472.50\text{nm}$ ， $N_D=1.0 \times 10^{14}(\text{cm}^{-3})$ ， $Q_c=4.7 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 崩潰時的電場位置分布，由圖 16(a) 之倍增層電場大約是吸收層電場的 8 倍。如圖 16(b) 所示為數值形式的離子積分各組成項在崩潰電壓時的位置分布，由圖 16(b) 可以得知，倍增層的離子積分組成項，大約是吸收層的離子積分組成項的 100000000 倍，故離子積分絕大部分是由倍增層的離子積分組成項決定，故倍增層的结构參數會對崩潰電壓有巨大影響。



(a)



(b)

圖 16(a)崩潰時的電場位置分布圖 (b)各組成項在崩潰電壓時的位置分布圖

為了研究倍增層的結構參數對崩潰電壓的影響，本研究先固定 $Q_c = 4.72 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，改變倍增層厚度 d 與倍增層及吸收層參雜濃度 N_D ，來計算不同參數時的崩潰電壓，結果如圖 17 所示。

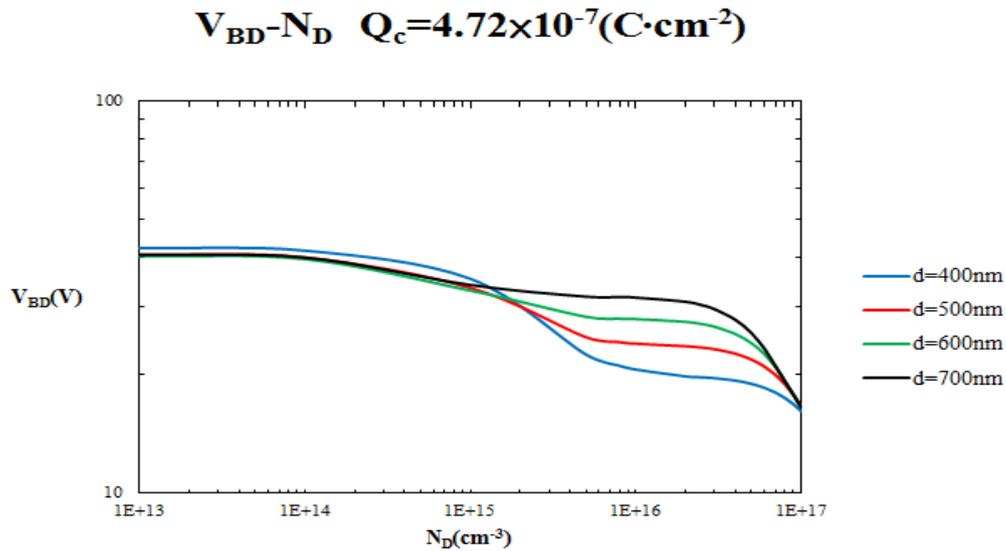
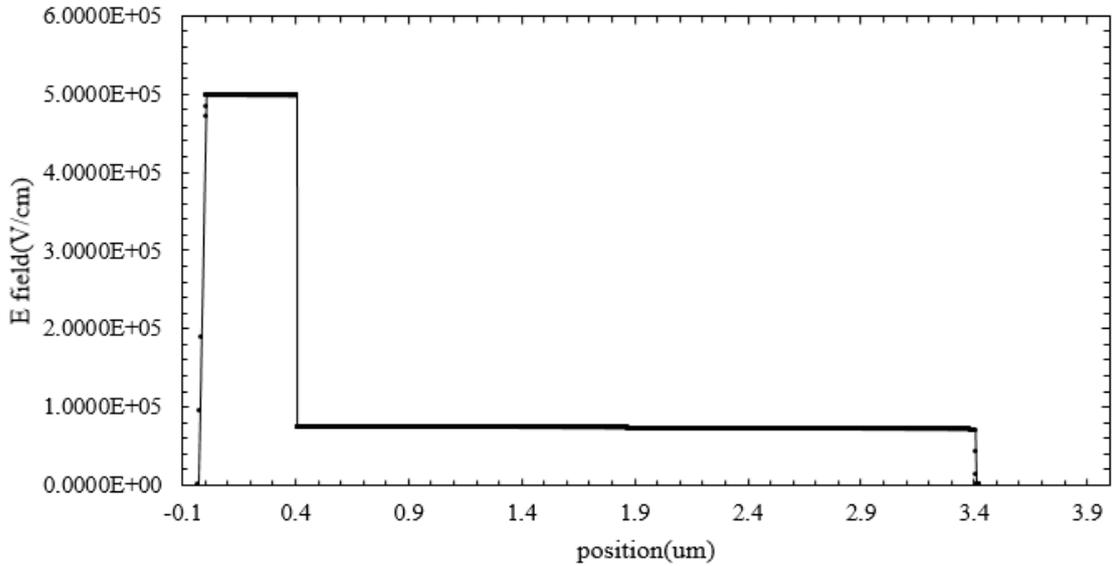


圖 17 崩潰電壓、倍增層厚度 d 與倍增層參雜濃度 N_D 關係圖

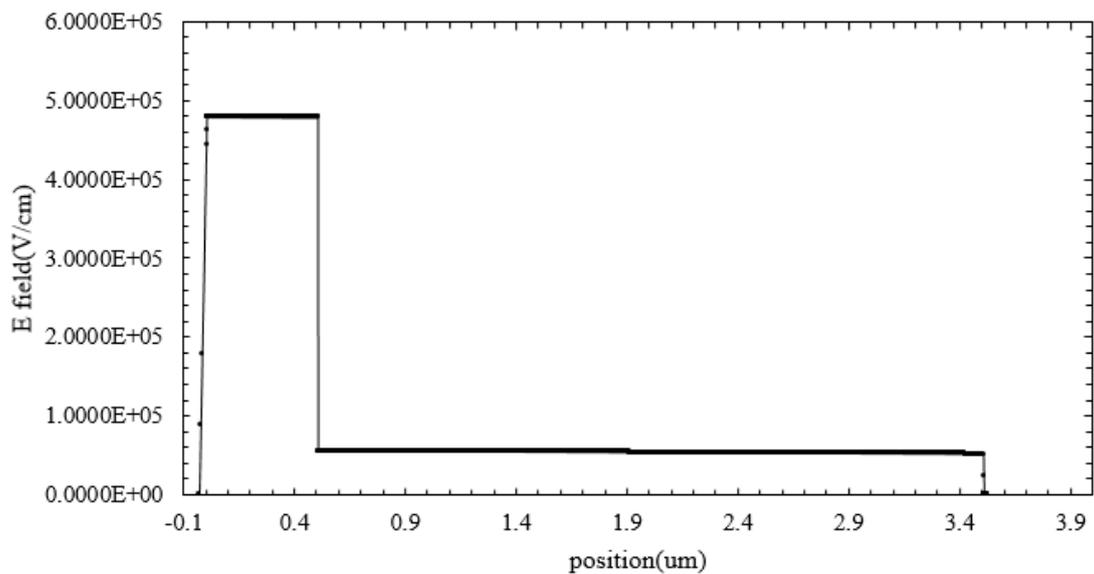
由圖 17 可知，在 N_D 低於 $1 \times 10^{15} (1/cm^3)$ 時，隨著 d 上升，崩潰電壓呈現先顯著下降後趨近於一定值的現象。要研究此現象的原因，必須先探討 d 上升對崩潰電壓時的電場分布的影響，因此本研究做出 $d=400nm$ 與 $500nm$ 的崩潰電壓時電場分布圖如圖 18(a)(b) 所示。

$$d=400.00nm \quad N_D=1.0 \times 10^{14} (cm^{-3}) \quad Q_c=4.72 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$$



(a)

$$d=500.00nm \quad N_D=1.0 \times 10^{14} (cm^{-3}) \quad Q_c=4.72 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$$



(b)

圖 18(a) $d=400nm$ 時崩潰電壓的電場分布圖 (b) $d=500nm$ 時崩潰電壓的電場分布圖，固定 N_D 為 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$

由圖 18(a)(b)知，當 d 上升時，崩潰電壓時最大電場 E_{max} (圖 18 中 X 座標 $0 \mu m$ 處) 會下降，因為若 E_{max} 不變，離子積分 ($\int \beta * \exp(\int (\alpha - \beta) dx) dx$) 會大於 1，超過發生崩潰的離子積分，表示已超過崩潰電壓， E_{max} 下降一些時的電場分布就可使離子積分等於 1，發生崩潰，故當 d 上升時，崩潰電壓時 E_{max} 會下降。而 E_{max} 下降造成的影響，是吸收層與倍增層各個位置的電場皆下降，倍增層因為 d 上升，故倍增層的電壓降 (即倍增層電場對位置積分) 會增加，而吸收層因為長度固定，而電場減少，故電壓降減少，兩種效應總合起來造成總電壓降減少，也就是崩潰電壓減少， d 上升時倍增層與吸收層在崩潰電壓時的電壓降變化如圖 19 所示，

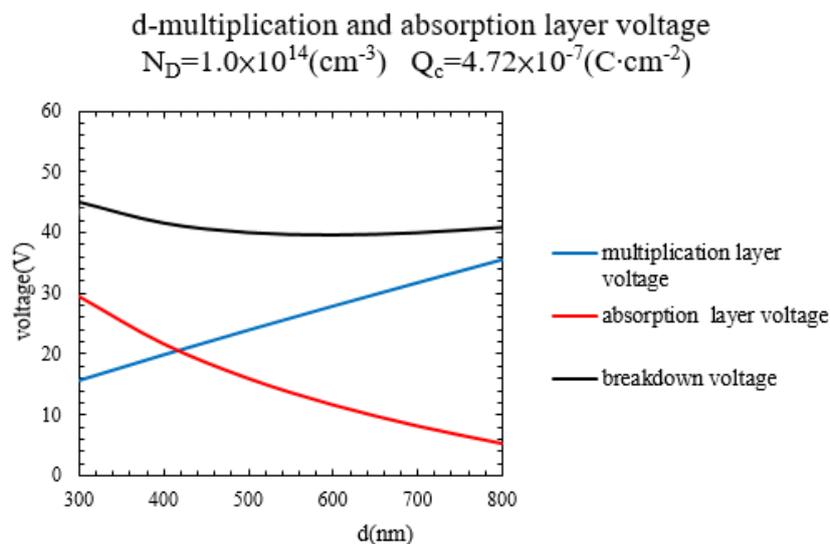


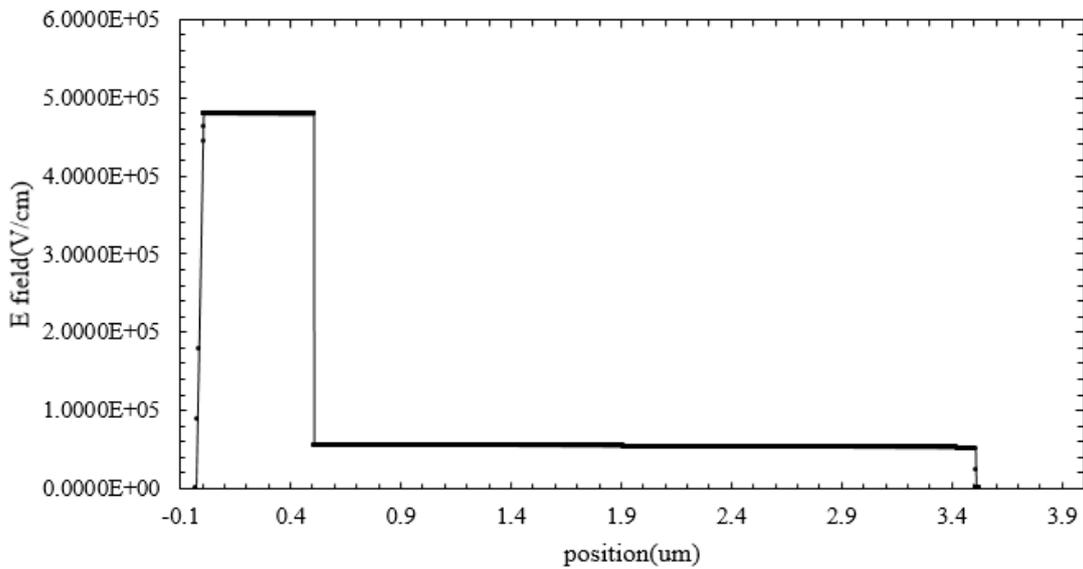
圖 19 d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖，倍增層參雜濃度為 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$

由圖 19 可看出，隨著 d 從 400nm 上升到 500nm，崩潰電壓時的倍增層電壓降上升，而崩潰電壓時的吸收層電壓降下降，且下降得比倍增層電壓降上升的多，故造成崩潰電壓下降。

為探討崩潰電壓隨著 d 上升而趨近於一定值的現象，本研究做出 $d=500nm$ 與 $600nm$ 的崩潰電壓時電場分布圖如圖 20(a)(b) 所示。隨著 d 從 500nm 上升到 600nm， d 上升造成崩潰電壓時的 E_{max} 下降所導致的倍增層電壓降增加與吸收層電壓降減少的量相當，兩種效應總合起來造成總電壓降沒有劇烈變化，崩潰電壓時的倍增層電壓降上升量與吸收層電壓降下降量相當，造成崩潰電壓並無顯著下降，相對於 d 小於 500nm 時 d 上升造成崩潰電壓的變化，此變化不明顯。崩潰電壓隨著 d 上升而趨近於一定值的現象是由於 d 超過 500nm 以後，隨著 d 上升造成崩潰電壓時的 E_{max} 下降所導致的倍增層電壓降增加與吸收層電壓降減少的量相當，兩

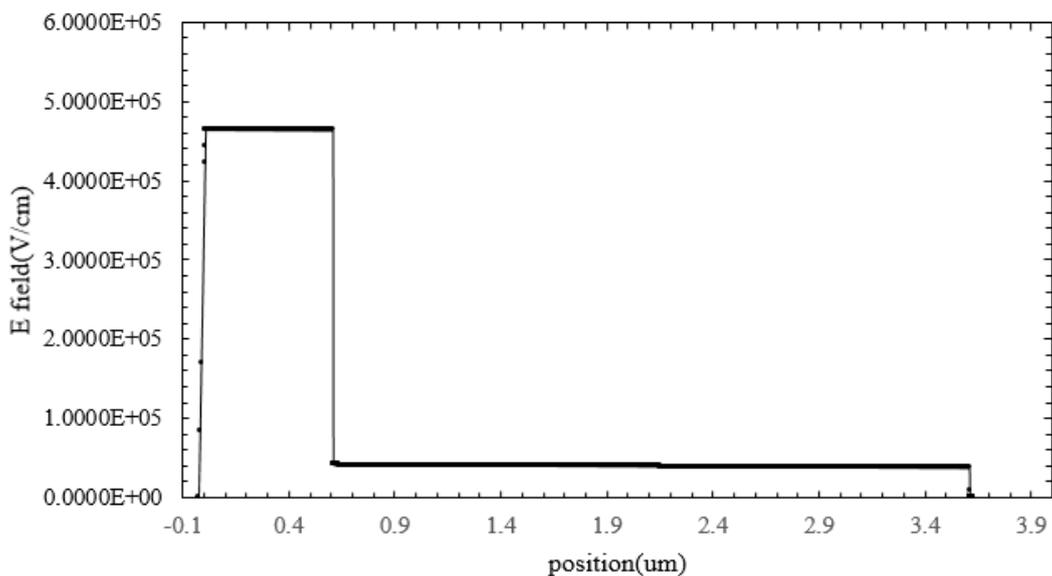
種效應總合起來造成總電壓降沒有劇烈變化，所以就導致崩潰電壓趨近於一定值。

$$d=500.00\text{nm} \quad N_D=1.0\times 10^{14}(\text{cm}^{-3}) \quad Q_c=4.72\times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$$



(a)

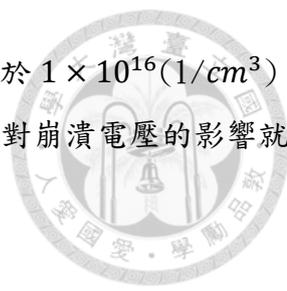
$$d=600.00\text{nm} \quad N_D=1.0\times 10^{14}(\text{cm}^{-3}) \quad Q_c=4.72\times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$$



(b)

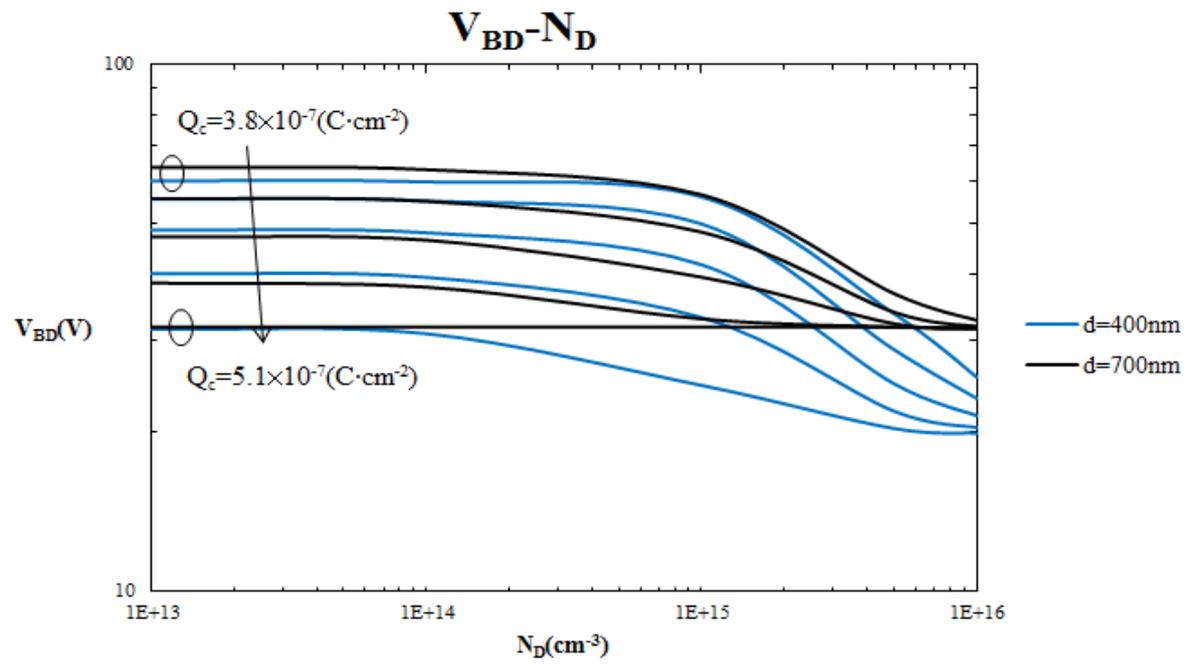
圖 20(a) 崩潰電壓時 $d=500\text{nm}$ 的電場分布圖 (b) 崩潰電壓時 $d=600\text{nm}$ 的電場分布圖， N_D 為 $1 \times 10^{14}(\text{cm}^{-3})$

由以上的探討可知， N_D 低於 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 會使 d 變化對崩潰電壓的影響較 N_D 高於 $1 \times 10^{16}(\text{cm}^{-3})$ 緩和，故是比較理想的參雜濃度，因為在此參雜濃度範圍時，可以容

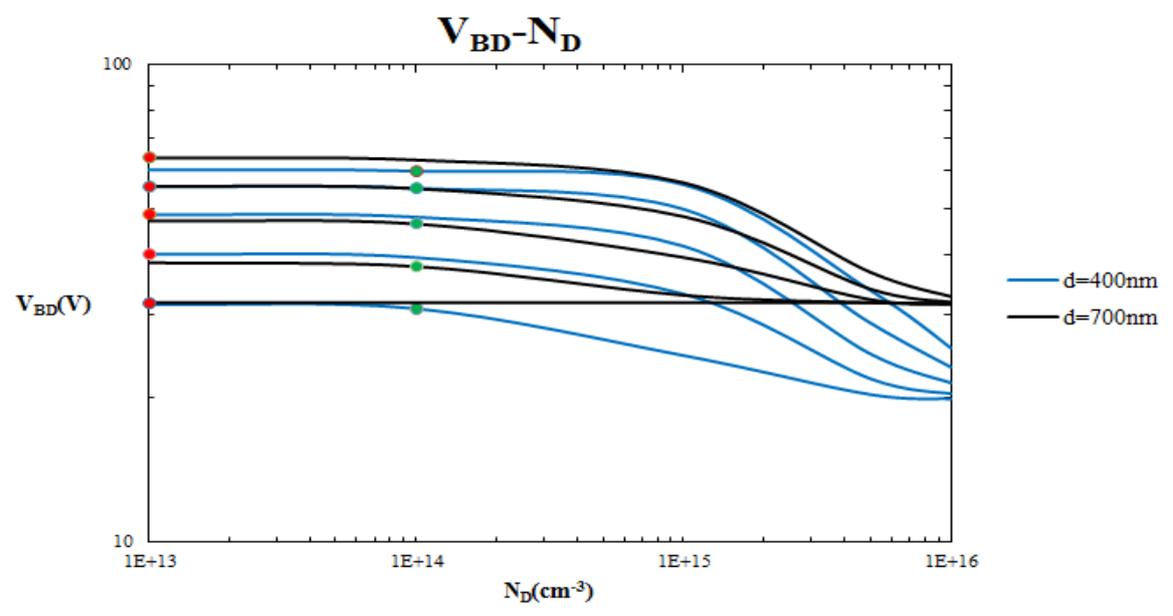


許製程後的 d 誤差範圍較大，而不會顯著影響崩潰電壓特性，而 N_D 高於 $1 \times 10^{16} (1/cm^3)$ 的參雜濃度範圍，容許製程後的 d 誤差範圍較小，因為只要一點 d 變化對崩潰電壓的影響就很大，故 N_D 低於 $1 \times 10^{15} (1/cm^3)$ 是比較理想的參雜濃度。

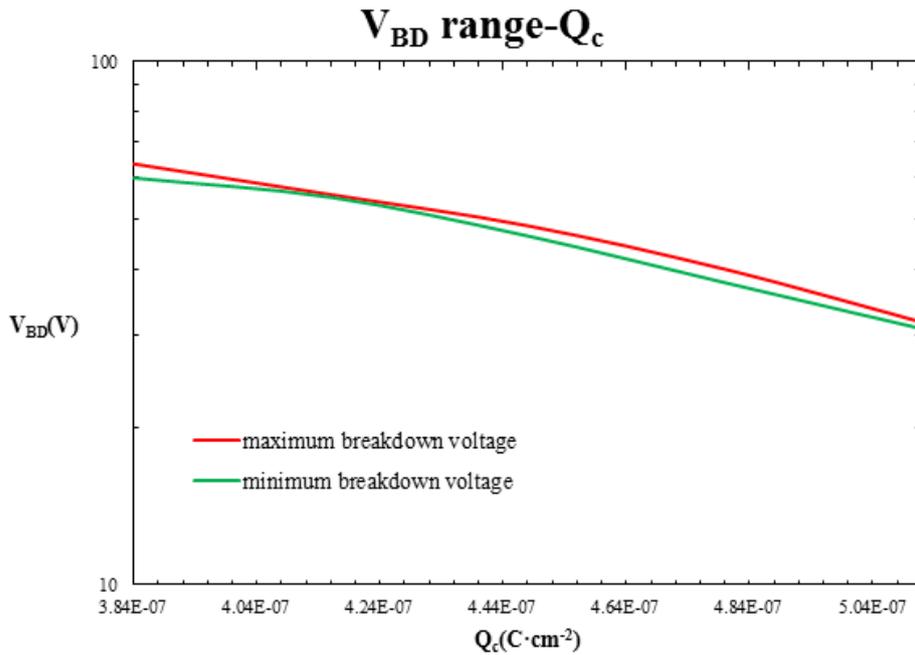
上述分析是固定 Q_c 的狀況，但 Q_c 會影響崩潰電壓，故接著作出改變 Q_c 的崩潰電壓與 N_D 的關係圖如圖 21(a)所示：



(a)



(b)



(c)

圖 21 (a)改變 Q_c 的崩潰電壓與 N_D 的關係圖

(b) N_D 小於 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ 時各 Q_c 對應的最大與最小崩潰電壓位置圖，圖中綠點為最小崩潰電壓，紅點為最大崩潰電壓

(c) N_D 小於 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ 時的最大與最小崩潰電壓與 Q_c 的關係圖

從圖 21(a)中可以觀察到，

Q_c 在高於 $3.8 \times 10^{-7}(C \cdot cm^{-2})$ 並低於 $5.1 \times 10^{-7}(C \cdot cm^{-2})$ 且 N_D 低於 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ 時， d 與 N_D 的變化幾乎不影響崩潰電壓，在該範圍中不同 Q_c 對應的最大與最小崩潰電壓位置如圖 21(b)所示，圖 21(b)的最大與最小崩潰電壓與 Q_c 的關係圖如圖 21(c)所示，可見該範圍內改變 d 與 N_D 所造成的崩潰電壓變化不大，代表在該範圍中的可以容許製程後的 d 與 N_D 的誤差範圍較大，而不會顯著影響崩潰電壓特性，而 N_D 高於 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ 的參雜濃度範圍，容許製程後的 d 與 N_D 的誤差範圍較小，因為只要一點 d 與 N_D 變化對崩潰電壓的影響就很大，故 Q_c 在一定範圍內(高於 $3.8 \times 10^{-7}(C \cdot cm^{-2})$)且 N_D 低於 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ 是較理想的設計區域。

為了更進一步研究崩潰電壓不隨 d 變化的 Q_c 範圍，本研究接著探討固定 N_D 改變 Q_c 對崩潰電壓的影響，如圖 22 所示，為固定 N_D 為 $1 \times 10^{14}(1/cm^3)$ ，改變 Q_c 的崩潰電壓與 Q_c 的關係圖，可發現隨著 Q_c 的增加，不同 d 的崩潰電壓曲線從 $Q_c = 8 \times 10^{-8}(C \cdot cm^{-2})$ 時明顯分叉，到

$Q_c = 3.8 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 時幾乎重合成同一條線，又在 $Q_c = 4.8 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 時明顯分叉。

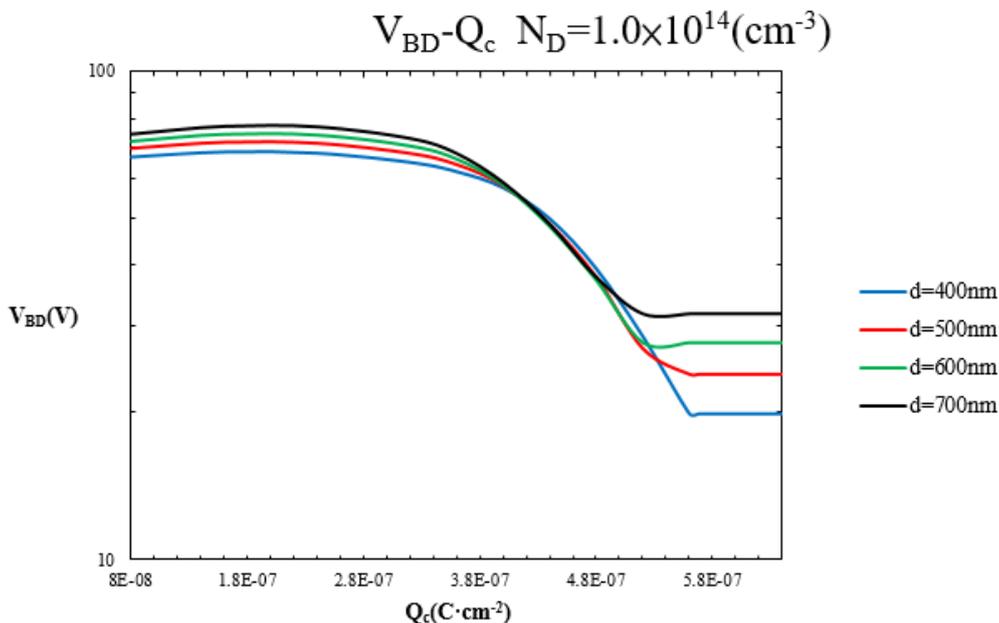
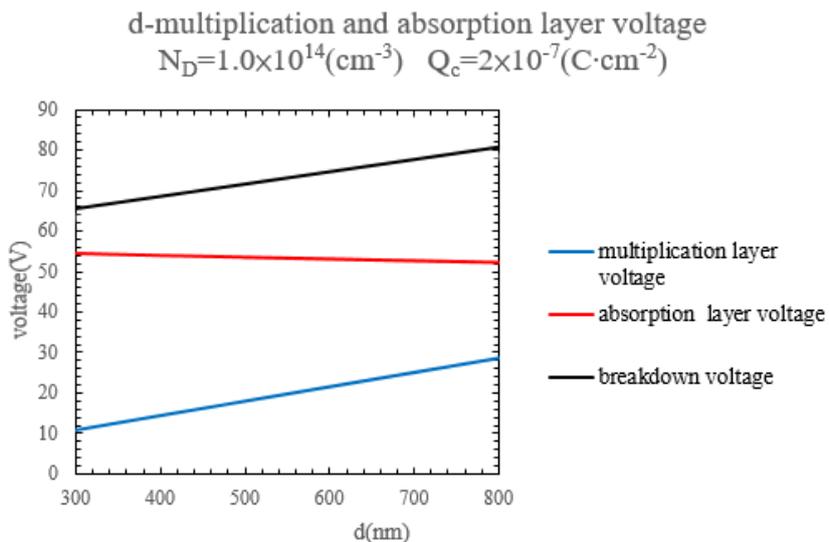
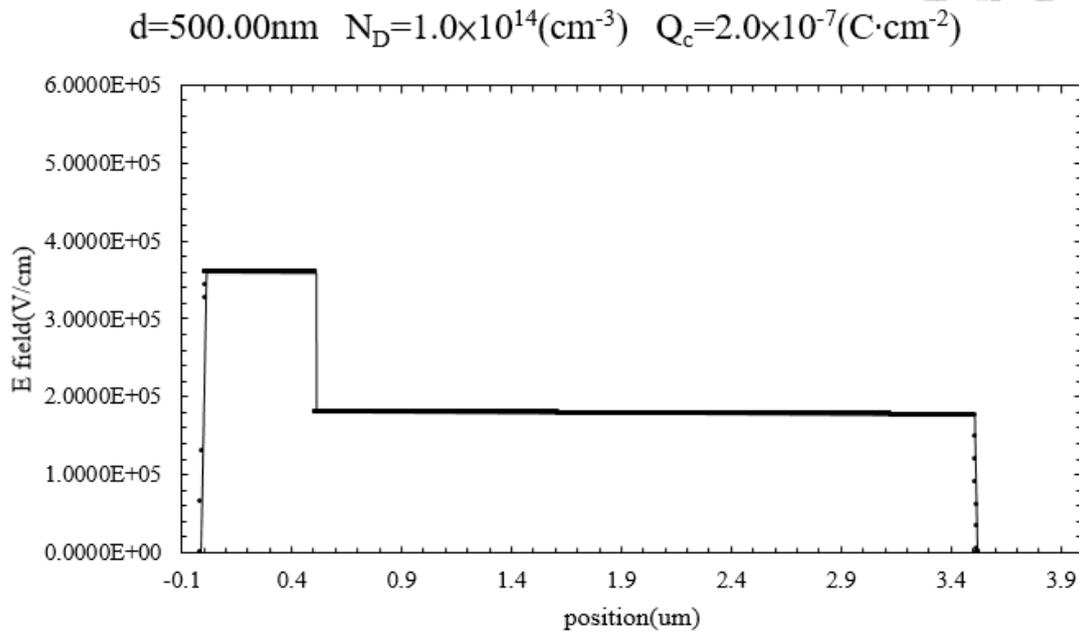


圖 22 固定 N_D 為 $1 \times 10^{14} (1/\text{cm}^3)$ ，改變 Q_c 的崩潰電壓與 Q_c 的關係圖

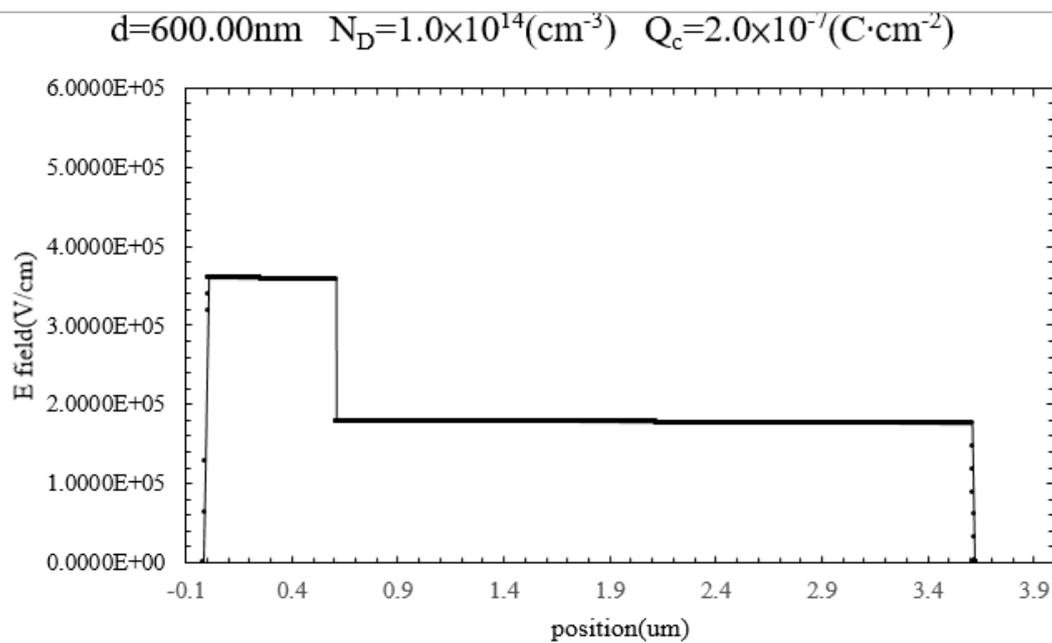
為了研究此現象，本研究先固定 $Q_c = 2 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，做出不同 d 與崩潰電壓關係圖如圖 23(a)所示



(a)



(b)



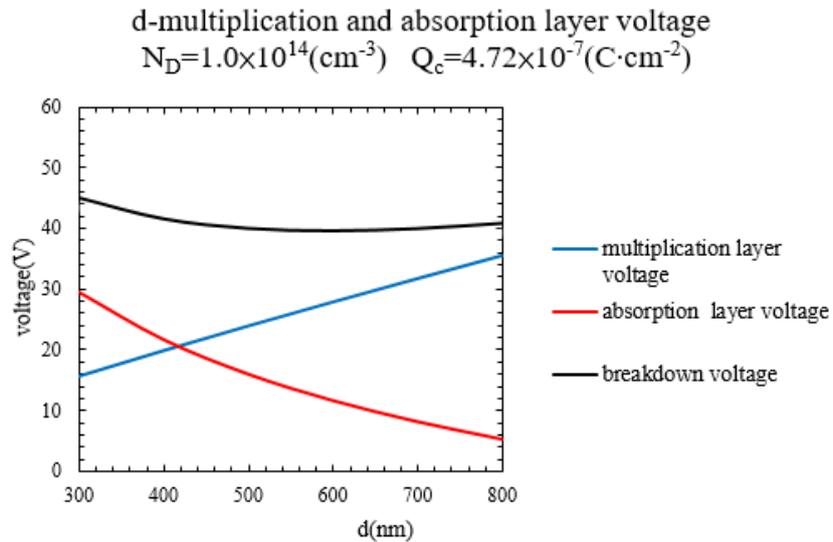
(c)

圖 23 (a)固定 $Q_c = 2 \times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ ， d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖， N_D 為 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ (b) $d=500\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖(c) $d=600\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖

從圖 23(a)中可以觀察隨 d 增加，崩潰電壓增加，而如圖 23(b)、(c)所示，隨 d 增加，倍增層最大電場 E_{max} 減少，但 d 增加，二者綜合結果造成倍增層在崩潰電壓時的電壓降增加，而 E_{max} 減少造成吸收層電場減少，故吸收層在崩潰電壓時的電壓降減少，但減少的不如倍增

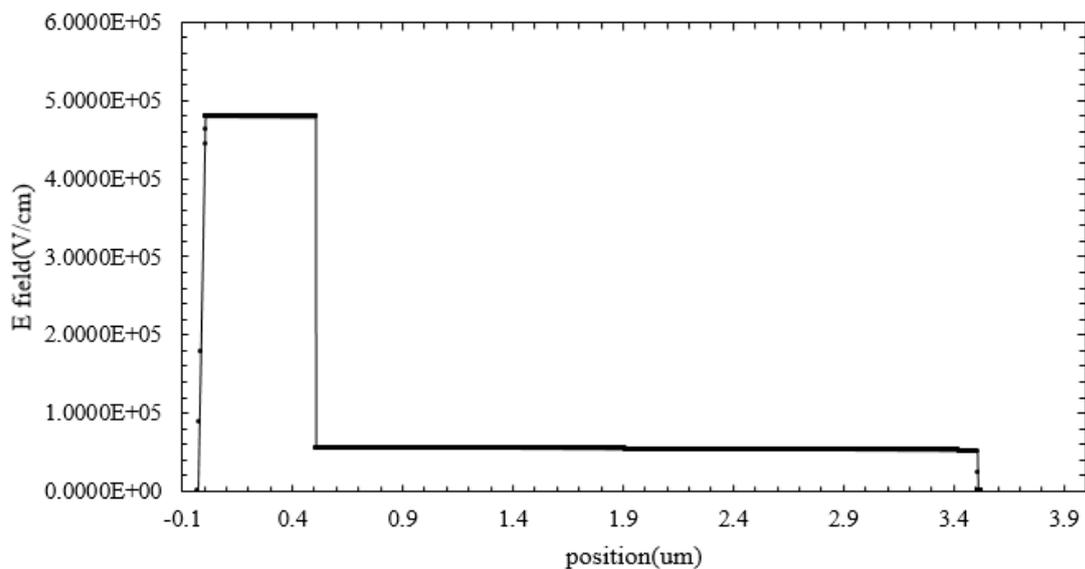
層在崩潰電壓時的電壓降增加，所以總和倍增層及吸收層的電壓降變化，隨 d 增加，崩潰電壓增加，並且增加很明顯造成圖 22 中 Q_c 小於 $3.8 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 時明顯分叉。

而 Q_c 介於 $3.8 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 與 $4.8 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 時幾乎重合成同一條線的現象，本研究先固定 $Q_c = 4.72 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，做出不同 d 與崩潰電壓關係圖如圖 24(a) 所示：

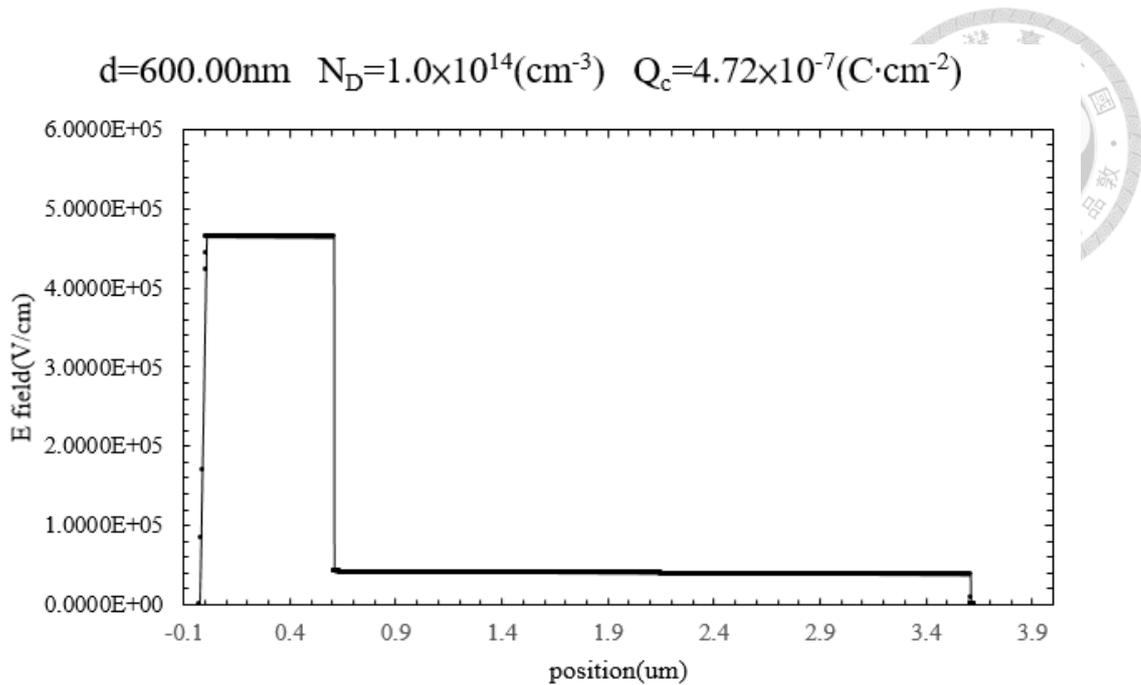


(a)

$d = 500.00 \text{ nm} \quad N_D = 1.0 \times 10^{14} (\text{cm}^{-3}) \quad Q_c = 4.72 \times 10^{-7} (\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$



(b)



(c)

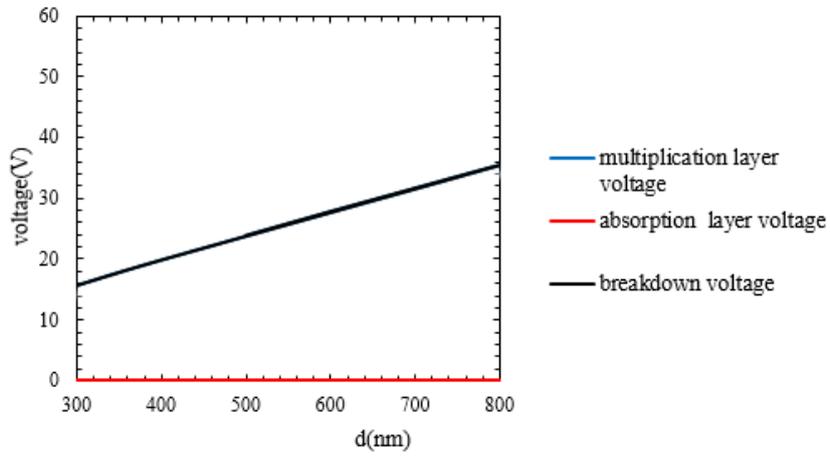
圖 24 (a)固定 $Q_c = 4.72 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ， d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖， N_D 為 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ (b) $d=500\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖(c) $d=600\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖

從圖 24(a)中可以觀察隨 d 增加，崩潰電壓先減少後趨近一定值，而如圖 24(b)、(c) 所示，隨 d 增加，倍增層最大電場 E_{max} 減少，但 d 增加，二者綜合結果造成倍增層在崩潰電壓時的電壓降增加，而 E_{max} 減少造成吸收層電場減少，故吸收層在崩潰電壓時的電壓降減少，但減少的比倍增層的電壓降增加還多，然後漸漸變成大約相等，所以總和倍增層及吸收層的電壓降變化，隨 d 增加，崩潰電壓呈現先減少後趨近一定值的現象，造成圖 22 中 Q_c 介於 $3.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 與 $4.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 時幾乎重合成同一條線的現象。

本研究接著固定 $Q_c = 6 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，做出不同 d 與崩潰電壓關係圖如圖 25(a) 所示

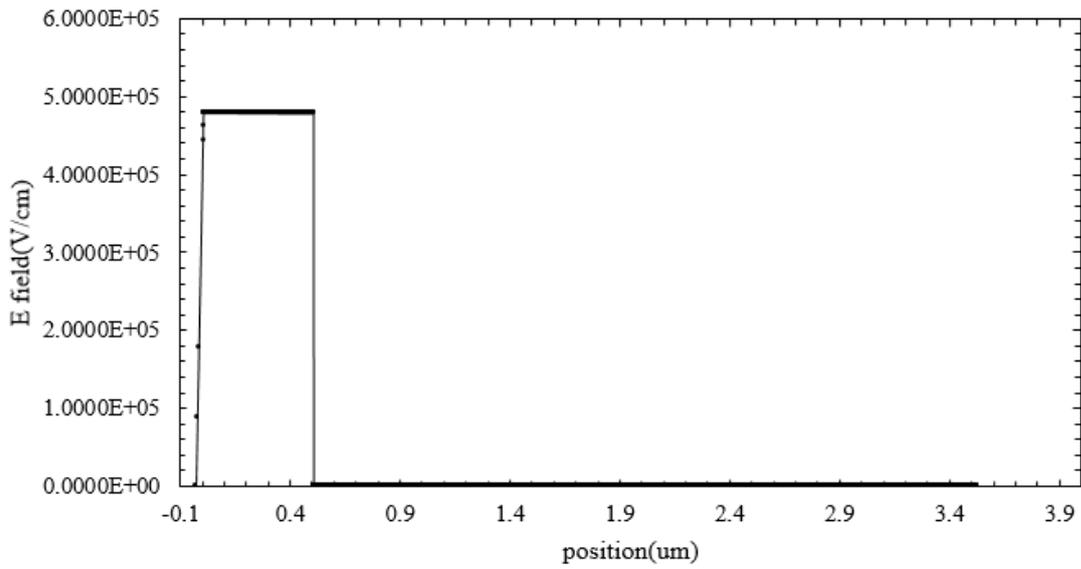


d-multiplication and absorption layer voltage
 $N_D=1.0 \times 10^{14}(\text{cm}^{-3})$ $Q_c=6 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$

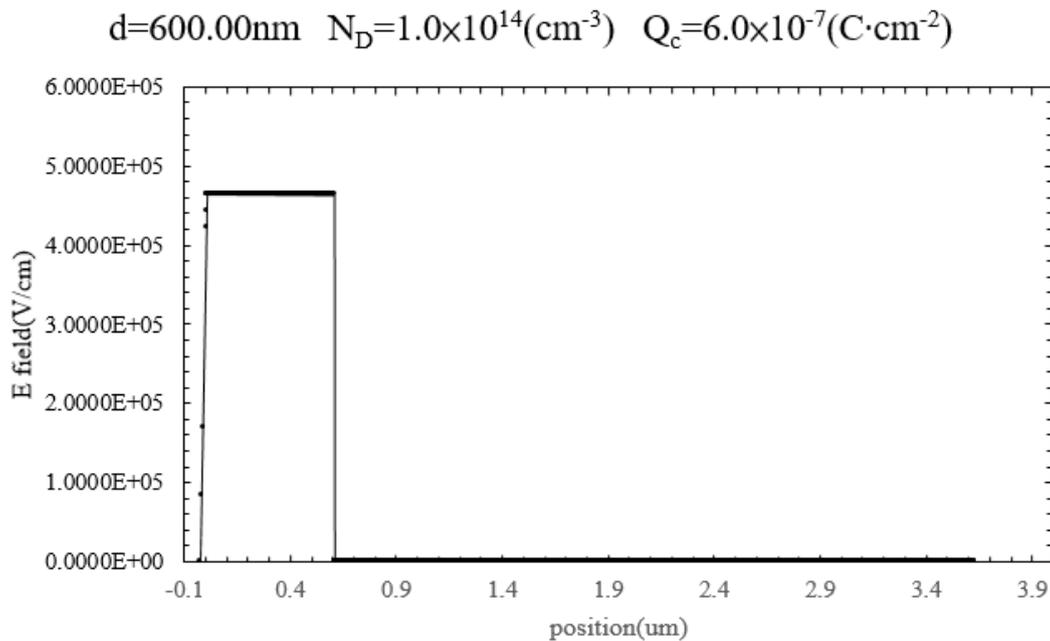


(a)

$d=500.00\text{nm}$ $N_D=1.0 \times 10^{14}(\text{cm}^{-3})$ $Q_c=6.0 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$



(b)



(c)

圖 25 (a)固定 $Q_c = 6 \times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ ， d 與倍增層及吸收層在崩潰電壓時的電壓降關係圖， N_D 為 $1 \times 10^{14}(1/\text{cm}^3)$ ，此圖中看不見倍增層電壓降的線，因與崩潰電壓曲線完全重合
 (b) $d=500\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖(c) $d=600\text{nm}$ 崩潰時的電場分布圖

從圖 25(a)中可以觀察隨 d 增加，崩潰電壓增加，且倍增層電壓降的線，因與崩潰電壓曲線完全重合故圖中看不出有倍增層電壓降的線，表示崩潰時所有電壓降都落在倍增層，原因如圖 25(b)、(c)所示， $Q_c = 6 \times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ 時，空乏區還未延伸到吸收層便發生崩潰，故吸收層電場為 0 且崩潰時所有電壓降都落在倍增層。隨 d 增加，倍增層最大電場 E_{max} 減少，但 d 增加，二者綜合結果造成倍增層在崩潰電壓時的電壓降增加，所以隨 d 增加，崩潰電壓增加，並且增加很明顯，造成圖 22 中 Q_c 大於 $4.8 \times 10^{-7}(\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ 時明顯分叉。

本研究接著探討固定 d 而增加 Q_c 導致崩潰電壓減低的原因，如圖 26(a)、(b) 所示，當 Q_c 增加時，發生崩潰時的吸收層電場降低，而倍增層電場幾乎不變，故導致吸收層電壓降降低而倍增層電壓降幾乎不變，使崩潰電壓降低。

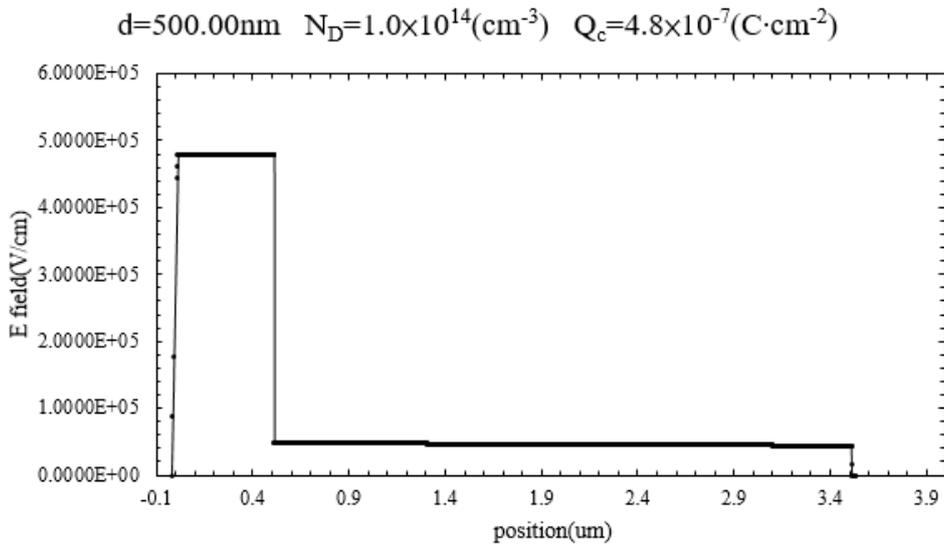
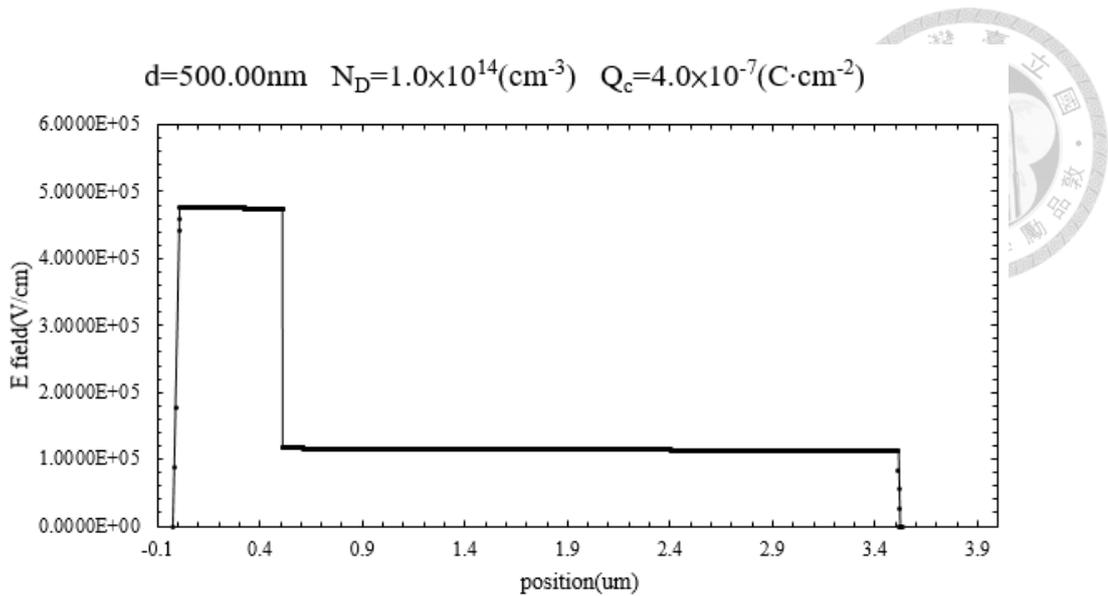


圖 26 (a) $d=500\text{nm}$ ， $Q_c = 4 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，崩潰時的電場分布圖(b) $d=500\text{nm}$ ， $Q_c = 4.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，崩潰時的電場分布圖

綜合上述分析， Q_c 介於 $3.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 與 $4.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 且 N_D 低於 $1 \times 10^{14}(\text{1/cm}^3)$ 時， d 與 N_D 的變化幾乎不影響崩潰電壓，可以容許製程後的 d 與 N_D 的誤差範圍較大，而不會顯著影響崩潰電壓特性，是較理想的設計區域。

第四章 以TCAD模擬銻在磷化銦中的擴散



第一節 曲率半徑最小值 r_0 對電場比值的影響

接下來將探討曲率半徑最小值 r_0 與 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 的關係，本研究作出固定偏壓 $V:40V$ ， $d:472nm$ ， $N_D:1 \times 10^{14}(cm^{-3})$ ， $W^{cen}:3.472\mu m$ ， $Q_c: 4.72 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2})$ 的 r_0 與 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 關係圖如圖27所示，當 r_0 變大時，以式(29)計算 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ ，式(29)的分母不變，分子因 r_0 變大而須重新計算 W^{edge} ，結果是隨著 r_0 變大而分子變小，故 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 變小。所以若設計出來的結構參數其 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 大於1，則可以提高 r_0 來降低，以使邊緣區最大電場小於中心區最大電場，避免邊緣崩潰。

$$\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} - r_0$$

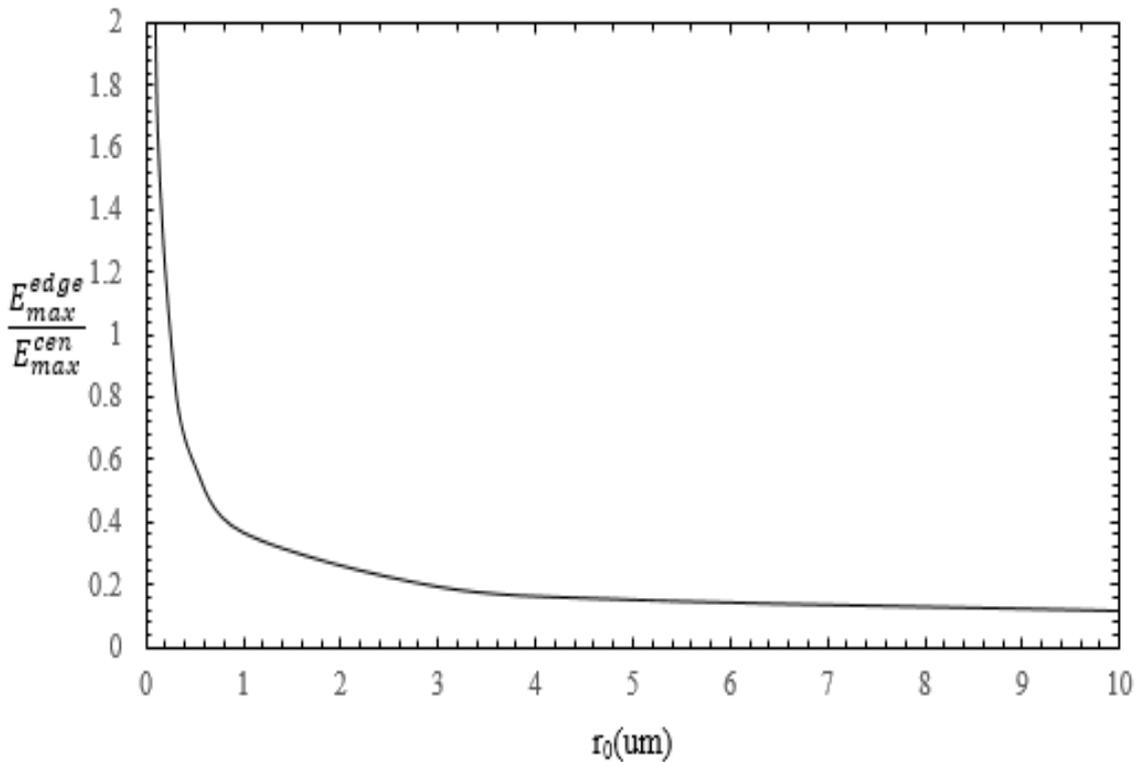


圖 27 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ 與 r_0 之關係圖，固定偏壓 $V:40V$ ， $d:472nm$ ， $W^{cen}:3.472\mu m$

$$Q_c: 4.72 \times 10^{-7} (C \cdot cm^{-2}) \quad , \quad N_D: 1 \times 10^{14} (cm^{-3})$$



既已知道 r_0 會影響 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ ，就必須研究不同擴散條件下的擴散深度，與不同擴散深度的 r_0 的計算方法，以得出不同擴散深度的 r_0 ，故接下來將探討使用軟體模擬擴散的結果。

第二節 使用軟體 Sentaurus TCAD

Sentaurus TCAD 為美國 Synopsys,Inc (新思科技)所出版的套裝軟體，提供多種元件模擬所需功能，本研究使用其製成模擬功能(sprocess)、元件物理計算功能(sdevice)、與查看計算結果功能(svisual)，先以 sprocess 模擬所使用的製程，製造出元件結構，然後再切好網格(mesh)，進入 sdevice 去計算其電流電壓特性與各種物理特性，再以 svisual 觀察得知其計算結果。

本研究的計算部分(sdevice)所使用的物理模型是漂移-擴散模型(Drift-diffusion model)，以此解出所需的各項物理特性與電流電壓特性，以進行分析與研究。主要是在 p 參雜區施加負偏壓，在 n 參雜區施加 0V 偏壓，解出崩潰時的負偏壓和崩潰時的電場分布狀況，以研究各種結構是邊緣崩潰或是本體崩潰，並研究調整結構造成的影響，是否可以使崩潰時的邊緣電場降到比中心區低，以避免邊緣崩潰現象的發生。

第三節 軟體使用物理模型

本研究使用的物理模型可以分為 sprocess 與 sdevice 使用的物理模型兩部份說明，sprocess 的鋅擴散計算是使用 Sentaurus TCAD 裡面的費米模型(Fermi model)。費米模型以公式(32a)與(32b)來計算每個網格點在某溫度 T 下經過某一段時間 t 後的擴散分布狀況[12]:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \nabla \sum_{X,c} D_{AX^c} \left(\frac{n}{n_i}\right)^{-c-z} \nabla \left(C_A^+ \left(\frac{n}{n_i}\right)^z\right) \dots\dots\dots(32a)$$

$$D_{AX^c} = D_{AX^c}^0 \exp\left(-\frac{D_{AX^c}^E}{kT}\right) \dots\dots\dots(32b)$$

其中 C_A 為某參雜物質 A(在此研究中為鋅)在該網格點的濃度， C_A^+ 為參雜物質 A 的活化濃度，c 為點缺陷所帶的電荷量，z 為參雜物質 A 在參雜後所帶的電荷量， n_i 為被參雜半導體的本質濃度，n 為電洞(或電子)在該網格點的濃度，X 為點缺陷的種類，分為間隙型(Interstitial)或是空缺(Vacancy)，所以 AX 有兩種，Ainterstitial 代表間隙型的參雜物質 A，Avacancy 代表取代型參雜物質 A 與空缺位置形成的擴散



移動對， k 為波茲曼常數 T 為溫度， D_{AXc}^0 與 D_{AXc}^E 為間隙型參雜物質 A 和參雜物質 A 與空缺位置形成的擴散移動對的擴散係數的計算參數，可調整以符合實際擴散結果。

如圖 28 所示為以 $c=1$, $D_{AXc}^0 = 10^{-3} (\frac{cm^2}{s})$, $D_{AXc}^E = -1.75eV$ 的費米模型的 TCAD 模擬結果與 [15] 中以間隙型 (Interstitial) 鋅離子帶電量 m 為 1 (如式 (33) 所示) 來計算擴散結果和 [15] 中實際擴散結果以 SIM 量測結果的比較圖，圖中藍色線為費米模型的模擬結果，黑色虛線為以鋅離子帶電量 m 為 1 來計算的擴散結果，黑色實線為實際擴散結果以 SIM 量測結果。從圖 28 中可以發現，以鋅離子帶電量 m 為 1 來計算擴散結果最符合實驗的擴散結果，而費米模型並且 $c=1$ 也大致能符合實際擴散結果。

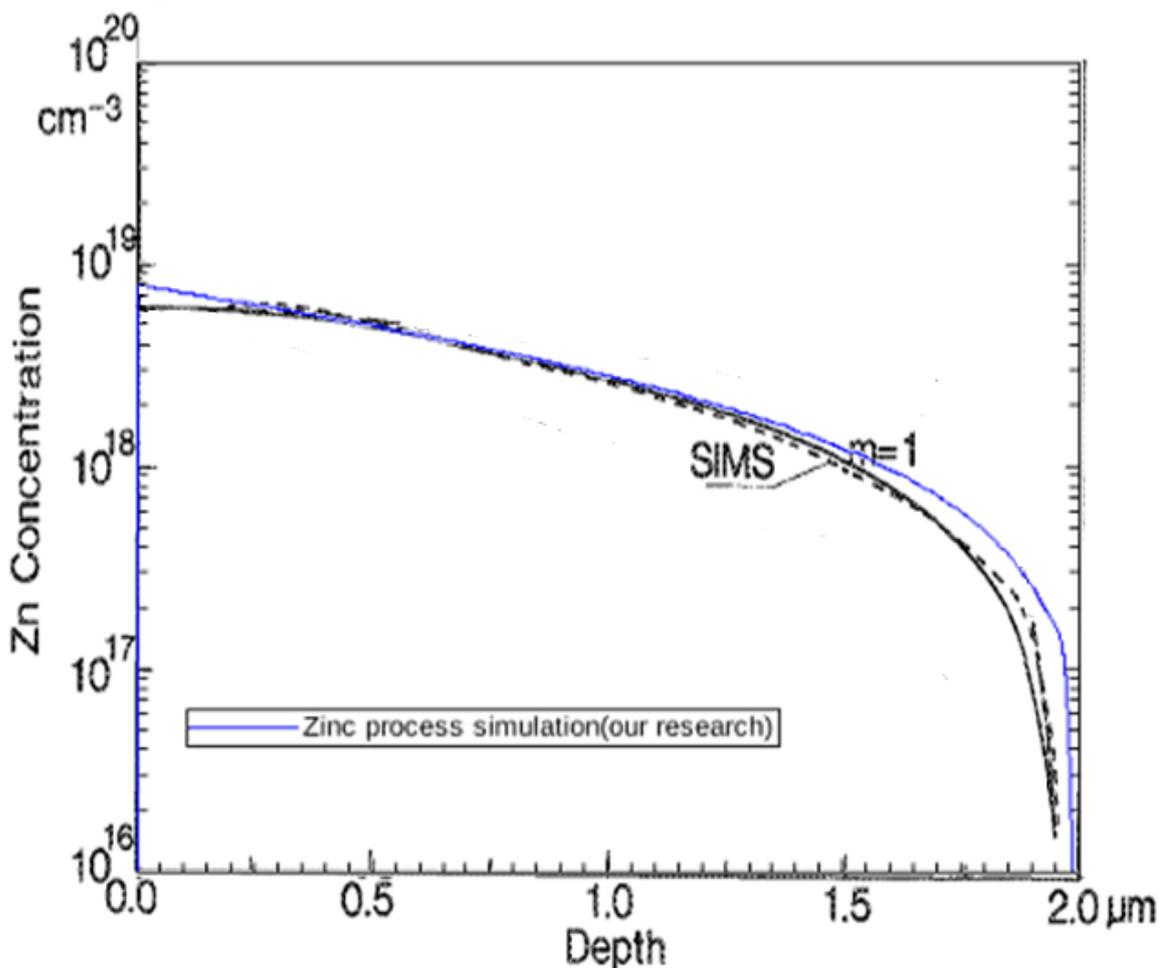
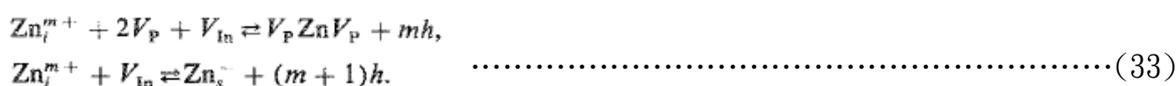


圖 28 費米模型的 TCAD 模擬結果與 [15] 中以間隙型 (Interstitial) 鋅離子帶電量 m 為 1 (如式 (33) 所示) 來計算的擴散結果和 [15] 中實際擴散結果以 SIM 量測結果的比較圖，圖中藍色線為費米模型的模擬結果，黑色虛線為以鋅離子帶電量 m 為 1 來計算的擴



散結果，黑色實線為實際擴散結果以 SIM 量測結果。

而 sprocess 還有另一個須調整的物理模型，即是鋅參雜的活化濃度，本研究所使用的是固態溶解度模型(Solid solubility model)，以公式(34)計算每個網格點的參雜物質 A 的活化濃度[16]:

$$C_A^+ = \frac{C_A^{ss} C_A}{(C_A^{ss} + C_A)} \dots\dots\dots(34)$$

其中

$$C_A^{ss} = f \cdot C_A^{ss0} \dots\dots\dots(35)$$

C_A^{ss0} 為固態溶解度，本研究的固態溶解度取自[15]，設為 $4.327 \times 10^{25} \times e^{-\frac{1}{kT}} (1/cm^3)$ 而 sdevice 使用的物理模型有間接復合模型(SRH recombination model)、能帶穿隧模型(Band to band recombination model)、崩潰倍增模型 (Avalanche generation model)、高電場飽和遷移率 (High Field Saturation) 模型。

第四節 曲率半徑最小值 r_0 的計算方法

根據[8]，一函數 $y=f(x)$ 的每一組 xy 座標的曲率可由式(36)求出

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(36)$$

而曲率的倒數即是曲率半徑。

本研究先以 TCAD 模擬製程後算出 Zn 參雜濃度分布，取出臨近 PN 接面的網格點，再擬合這些點以得到 $y=f(x)$ 的形式的曲線，即可以式(36)求出曲率再倒數求出曲率半徑。

先以 TCAD 模擬 500°C 擴散 32.3 分鐘之後的 Zn 參雜濃度分布，在取出電洞濃度介於本質濃度到 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$ 的網格點的座標，這些網格點分布於邊緣區，因為 500°C 擴散的中心區的 PN 接面都是呈現突斷接面(Abrupt junction)，故接面兩側網格點的電洞濃度皆不在本質濃度到 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$ 之間。而邊緣區也只有靠近接面的鋅參雜區的網格點的電洞濃度在本質濃度到 $1 \times 10^{14} (1/cm^3)$ 之間，故可篩選出接近接面的網格點的座標，再去掉同樣 X 座標但 Y 座標不同的點，與同樣 Y 座標但 X 座標不同的點，所取出的點在 TCAD 原始計算結果所繪製的部分圖形上的位置示意圖如圖 29 所示，圖中可以看出所取出的資料點接近 PN 接面，



可以用這些資料點擬合出擬合線來計算曲率半徑。

因為 TCAD 計算結果是以 X 座標為縱軸，Y 座標為橫軸，並且 X 座標數值次序反轉，也就是越往上越小，為了處理方便，取出資料點後將各資料點的 X 座標改回正常的數值次序(越往上越大)，並且以 X 座標為橫軸，Y 座標為縱軸。而所取出的資料點相鄰兩點的 Y 座標距離在大部分的區域皆是 3-5nm，此距離過小會導致所算出來的曲率半徑值會亂跳的現象，故在 Y 座標小於 $120.5 \mu\text{m}$ 的區域剔除一些資料點使相鄰兩點的 Y 座標距離大於 30nm，Y 座標介於 $120.5 \mu\text{m}$ 與最大 Y 座標的點減去 $0.15 \mu\text{m}$ 的區域剔除一些資料點使相鄰兩點的 Y 座標距離大於 15nm，在 Y 座標大於最大 Y 座標的點減去 $0.15 \mu\text{m}$ 的區域剔除一些資料點使相鄰兩點的 Y 座標距離大於 8nm，以使相鄰兩點的 Y 座標距離擴大，避免算出來的曲率半徑值會亂跳的現象。所取出並經以上處理的點如圖 30(a)中標示” original data” 的點所示，即可以將這些點來計算每一個位置的曲率半徑，進而求出曲率半徑的最小值 r_0 的位置與其值。

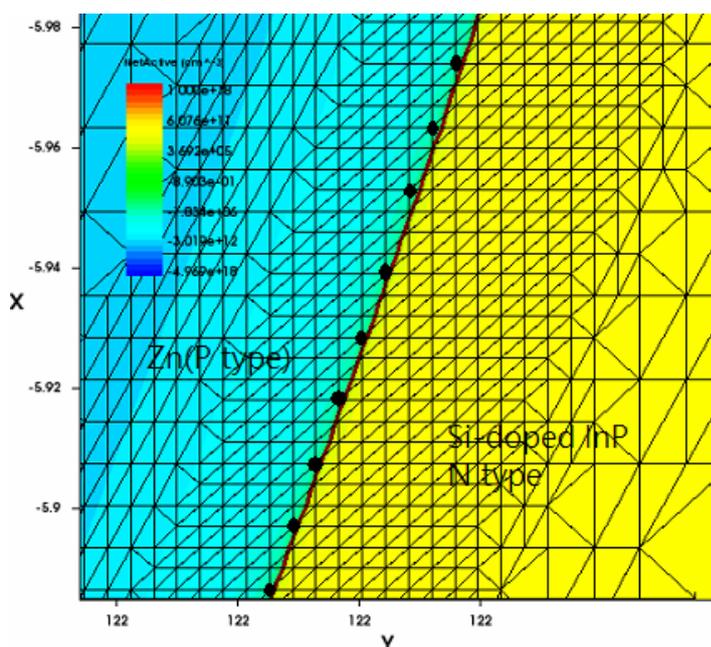


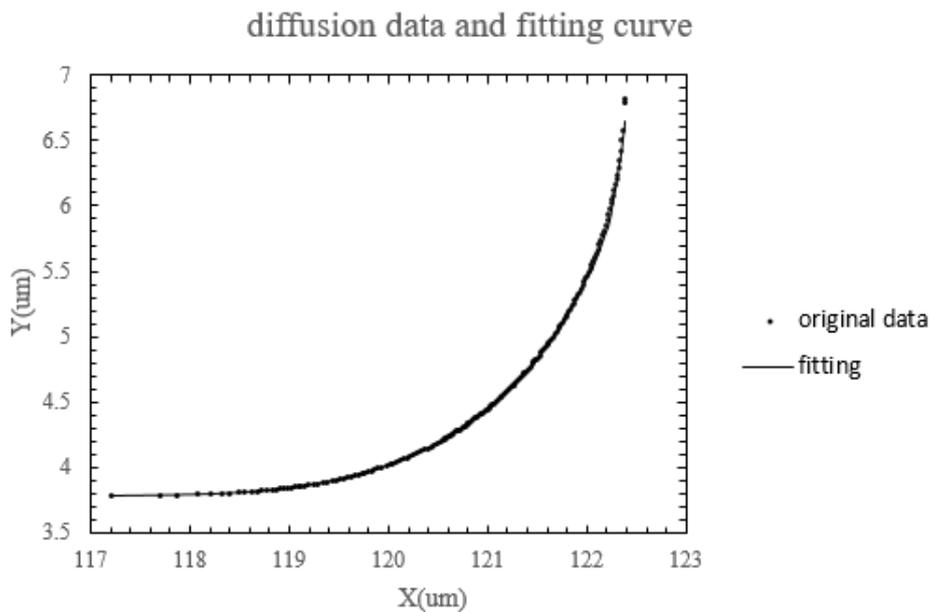
圖 29 取出的點在以 TCAD 原始計算結果所繪製的圖形上的位置示意圖

如圖 29 所示，此示意圖僅繪出 TCAD 原始計算結果所繪製的圖形的一部分，圖中粗黑線的左半部為 Zn 參雜區，為 P 型，右半部為 Si 參雜的 N 型區，粗黑線為 PN 接面，一格一格的為網格點，粗黑點為所取出的網格點。

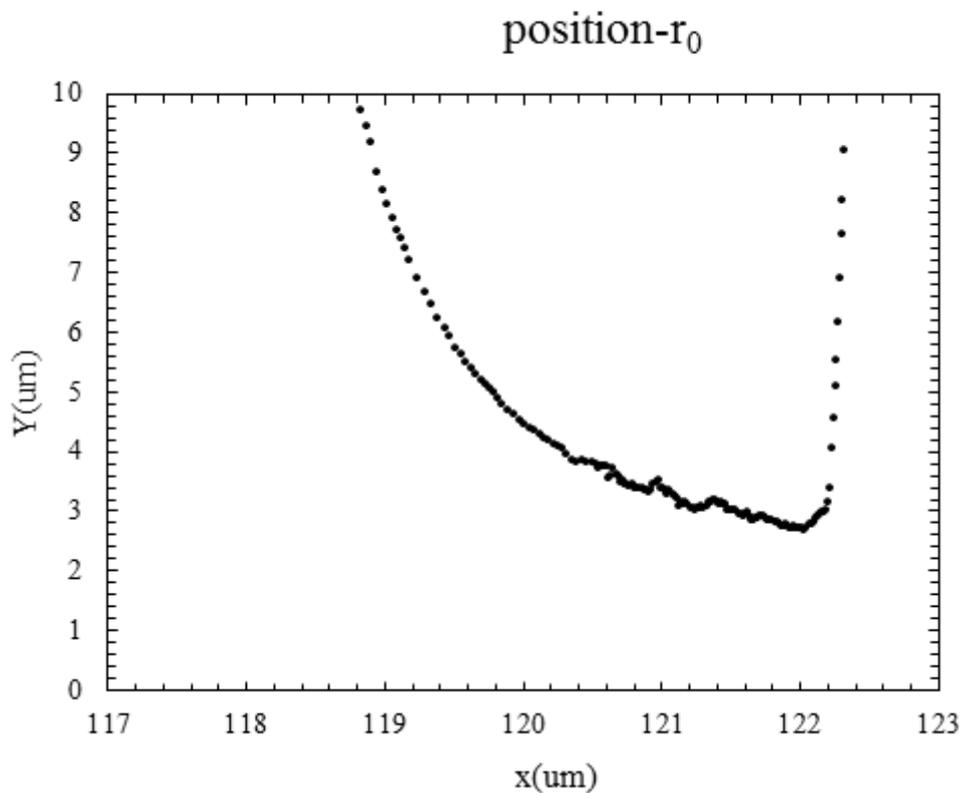
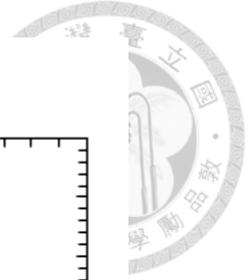
本研究計算曲率半徑的方式參考自三次樣條插值(Cubic spline interpolation)[8] [22]，但並非按照傳統的三次樣條插值方式，傳統的三次樣條插值是以相鄰兩點計算三次多

項式來擬合，故若有 N 個資料點會求出 $N-1$ 條三次多項式來擬合這些資料點，但若以此方式用在本研究從 TCAD 所得出的資料點上，然後以式(36)計算曲率半徑會造成在邊緣區的邊緣處所算出來的曲率半徑會有值亂跳的現象，故本研究採用另一種方式，本研究以相鄰 31 個點計算三次多項式來做為擬合這些點的擬合線，再以式(36)計算每一個資料點位置的曲率半徑。擬合出來的曲線如圖 30(a)中標示"fitting"的線所示，然後從這些點的曲率半徑中找出最小值即是**最小曲率半徑** r_0 。

算出 500°C 在矽參雜濃度 $1 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ 擴散 32.3 分鐘的曲率半徑如圖 30(b)所示



(a)



(b)

圖 30 (a) 從 TCAD 所得出的資料點與擬合後的擬合線表示圖 (b)資料點的位置與曲率半徑關係圖

依上述方法可得到擴散不同時間的曲率半徑最小值 r_0 ，可依這些資料做出在 500°C ，矽參雜濃度 $1 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ 的條件下，擴散時間與曲率半徑最小值的關係圖如圖 30 所示。同時也可計算各個擴散時間的橫向擴散長度與縱向擴散深度和 r_0 的關係，如圖 31 所示，橫向擴散長度是以邊緣區擴散的光罩開口為起點算起到 PN 接面的橫向長度，縱向深度則是以中心區的表面算起到 PN 接面的縱向擴散深度。從圖 31 中可以觀察到，擴散時間越久，橫向擴散長度、縱向擴散深度和 r_0 的成長皆趨緩，且縱向擴散深度和 r_0 的差值漸變大。

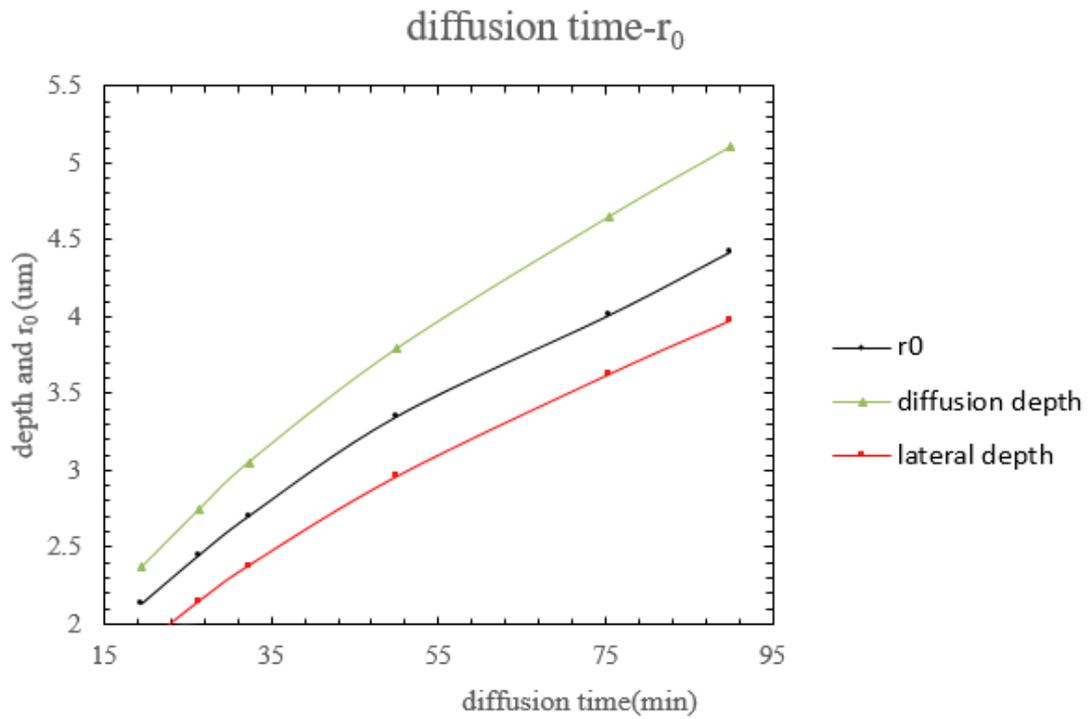


圖 31 在 500°C ，矽參雜濃度 $1 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ 的條件下，曲率半徑最小值 r_0 與橫向擴散長度
和縱向擴散深度對擴散時間關係圖

第五章 光偵測器的設計



第一節 光偵測器的設計步驟

由前面章節的探討，可以規劃光偵測器的設計步驟，本研究所設計的光偵測器結構和其參數如圖 32 所示，參數說明如表 3 所示，其中，假設電荷層可近似為一厚度為 0，帶電量為 Q_c 的一層薄膜，設計出 Q_c 後可由 $Q_c = qN_{ch}W_{ch}$ 決定電荷層參雜濃度與厚度，另外，定吸收層與倍增層參雜濃度皆為 N_D ，規劃光偵測器的設計步驟如下：

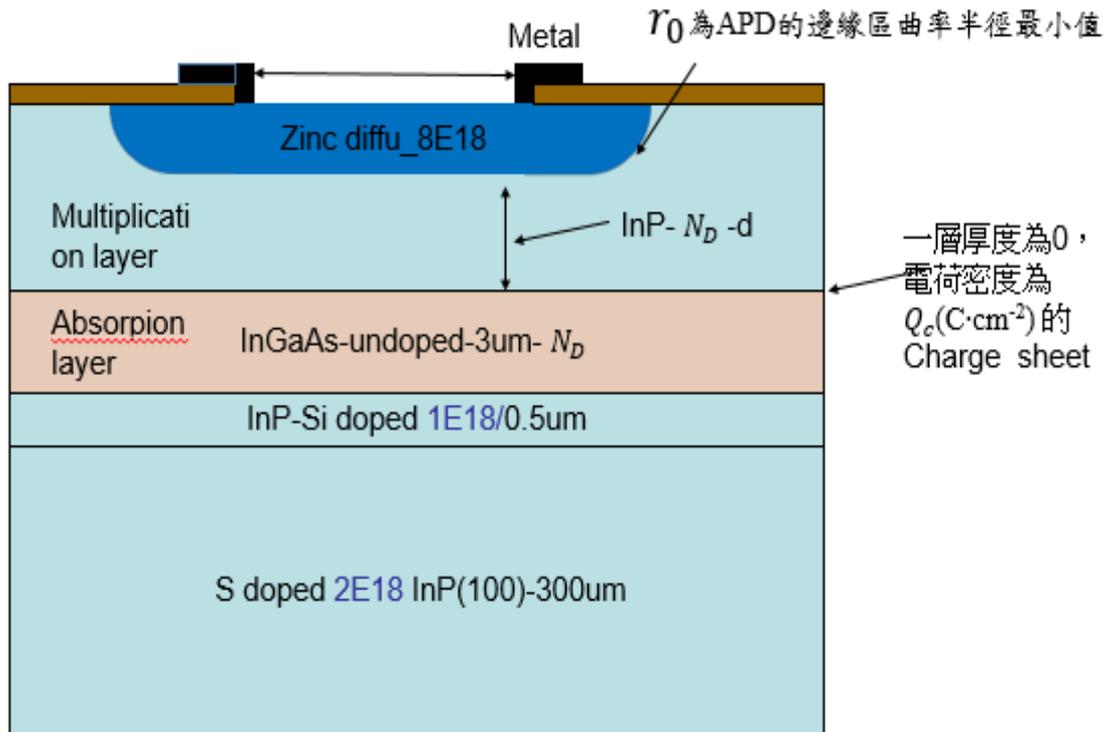


圖 32 光偵測器結構和其參數示意圖

表 3 光偵測器結構參數說明表

層	doping	thickness
倍增層(multiplication layer)	N_D	d
電荷層(charge layer)	N_{ch}	W_{ch}
吸收層(absorption layer)	N_D	3um



1. 吸收層由於無響應性(responsivity)的規格要求，故按照原本的設計為 $3\mu\text{m}$ ， N_D 由 d 變化影響 V_{bd} 較小的 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 以下且文獻中實際能製造出的參雜濃度 [26]、[27]、[28] 決定為 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 。由 V_{bd} 之要求可由 N_D 為 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 的 $V_{bd}-Q_c$ 圖(如圖 33 所示)決定 V_{bd} 時所對應的 Q_c ，決定 Q_c ， $Q_c = q N_{ch} W_{ch}$ 可決定 N_{ch} 和 W_{ch} 。

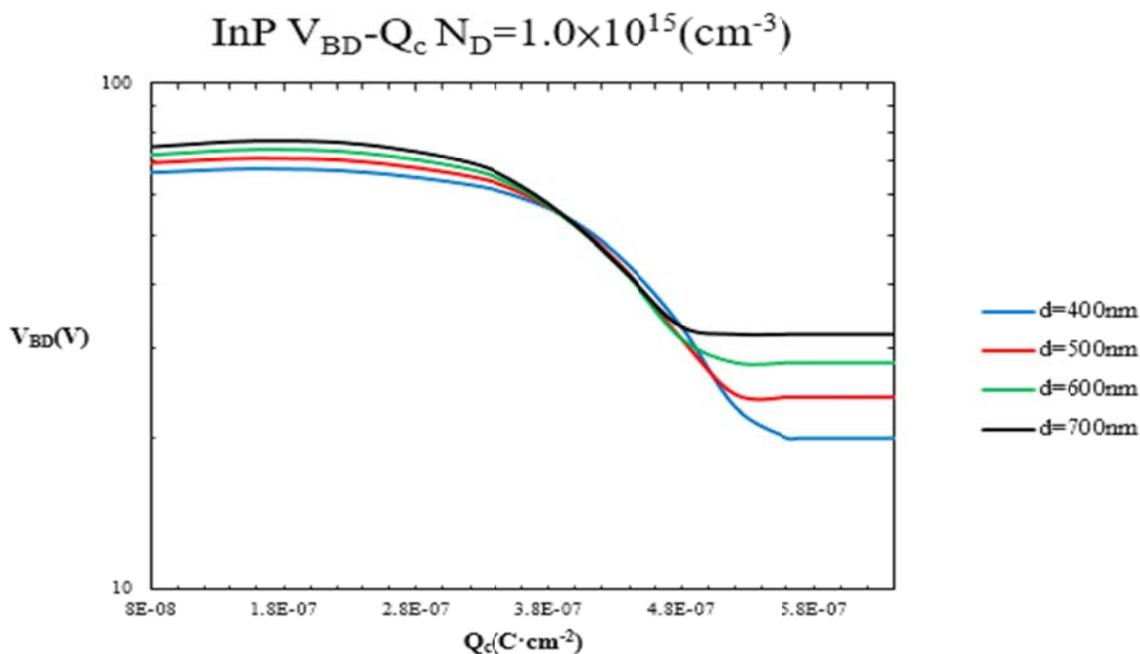


圖 33 N_D 為 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 的 $V_{bd}-Q_c$ 圖

2. 由 $V_{pt} = \frac{qN_D d^2}{2\epsilon} + \frac{Q_c}{\epsilon} d$ 設計 d 的準確值， W^{cen} 為吸收層和倍增層厚度 d 相加。

3. 由 TCAD 模擬擴散條件算出 r_0 。

4. 由 $1 - (\frac{W^{ord}}{r_0})^2 = (1+x)^2 [1 - 2 \ln(1+x)]$ 可算出 W^{edge}

5. 由 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} = \frac{\left(W^{edge} + \frac{W^{edge}^2}{2r_0} \right)}{\frac{1}{2} \left(\frac{2\epsilon(V_{bi}-V)}{qN_D W^{cen}} + W^{cen} \right) + \frac{Q_c \left(1 - \frac{d}{W^{cen}} \right)}{qN_D}}$ 可算出 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}}$ ，若 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{max}^{cen}} > 1$ 可由增加 r_0 來降低

6. 檢查吸收層最大電場是否小於 150kV/cm [13]，根據文獻 [24]，要將 InGaAs 吸收層的穿隧電流降到 $10^{-6}(\text{A/cm}^2)$ 以下，吸收層最大電場約需小於 150kV/cm ，故需檢查此處最大電場在運作偏壓時的值，若大於 150kV/cm 則須調整設計使其小於 150kV/cm 。

第二節 光偵測器的設計實例

此節以上述步驟設計一組結構參數，設計的規格是使 1. 擊穿電壓 V_{pt} 為 20V 2. 崩潰電壓 V_{bd} 為 40V。

以下為設計步驟：

1. 吸收層由於無 responsivity 的規格要求，故照原本的設計為 $3\mu\text{m}$ ， N_D 由 d 變化影響 V_{bd} 較小的 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 以下文獻中實際能製造出的參雜濃度決定為 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 。由 V_{bd} 之要求可由 $V_{bd} - Q_c$ 圖決定 $V_{bd}=40\text{V}$ 時所對應的 Q_c ，決定 Q_c 為 $d=500\text{nm}-700\text{nm}$ 時，所對應的 $Q_c=4.47 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，如圖 34 所示。

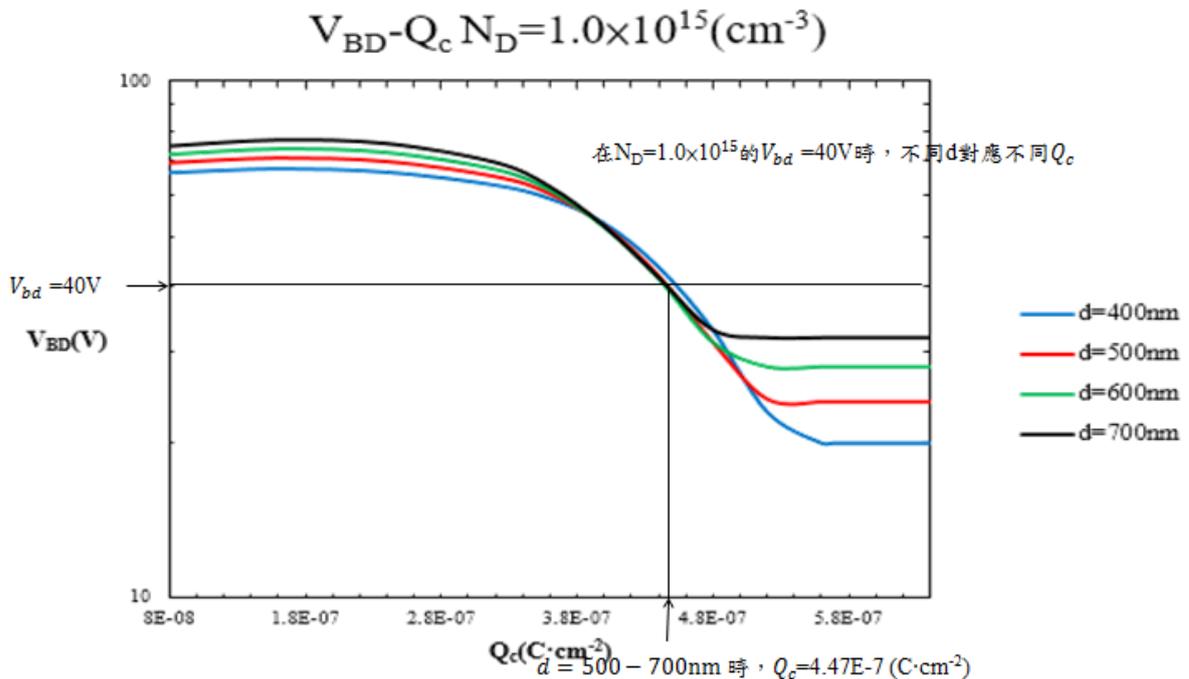


圖 34 $V_{bd} - Q_c$ 圖在要求的 $V_{bd}=40\text{V}$ 時所對應的 Q_c 示意圖

2. 由 $V_{pt}=20\text{V}=\frac{qN_Dd^2}{2\epsilon}+\frac{Q_c}{\epsilon}$ ，解出 d 的準確值 = 496nm ，故設計 $d = 496\text{nm}$ 。可算出

$W^{real}=3.496\mu\text{m}$ 。由 $Q_c = q N_{ch} W_{ch}$ 可決定 N_{ch} 和 W_{ch} 。由於本研究之理論推導是假設電荷層為一層厚度為 0 的薄膜，電荷層厚度越小，電場分布會越接近理論所算得的分布。由於不知磊晶廠商最低可將電荷層做得多薄，故此處僅設計出 Q_c ，若能知道磊晶廠商能將電荷層做出的最小厚度，即可決定 W_{ch} ，便可根據 $Q_c = q N_{ch} W_{ch}$ ，決定 N_{ch} 。

3. 由 TCAD 模擬擴散條件可算出 500 度 C 在 N 型參雜為 $1 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 擴散深度到 $3.05\mu\text{m}$ ， $r_0=2.69\mu\text{m}$ 。



4. 由 $1 - \left(\frac{W^{ord}}{r_0}\right)^2 = (1+x)^2[1 - 2\ln(1+x)]$ 可算出 $W^{edge} = 6.067\mu\text{m}$

5. 由 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{cen}^{edge}} = \frac{\left(W^{edge} + \frac{W^{edge}^2}{2r_0}\right)}{\frac{1}{2}\left(\frac{2\epsilon(V_{bi}-V)}{qN_D W^{cen}} + W^{cen}\right) + \frac{Q_c(1-\frac{d}{W^{cen}})}{qN_D}}$ 可得 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{real}^{edge}} = 0.383$ 。若想降低 $\frac{E_{max}^{edge}}{E_{real}^{edge}}$ 可由增加 r_0 來降低。

6. 檢查運作偏壓時吸收層最大電場是否小於 150kV/cm

本研究的設計結構在崩潰電壓時的電場分布如圖 35 所示，吸收層最大電場大約為 75000 kV/cm，而運作偏壓時吸收層最大電場會小於崩潰電壓時的最大電場，故小於會使吸收層發生穿隧的電場，可避免該處所造成顯著暗電流。

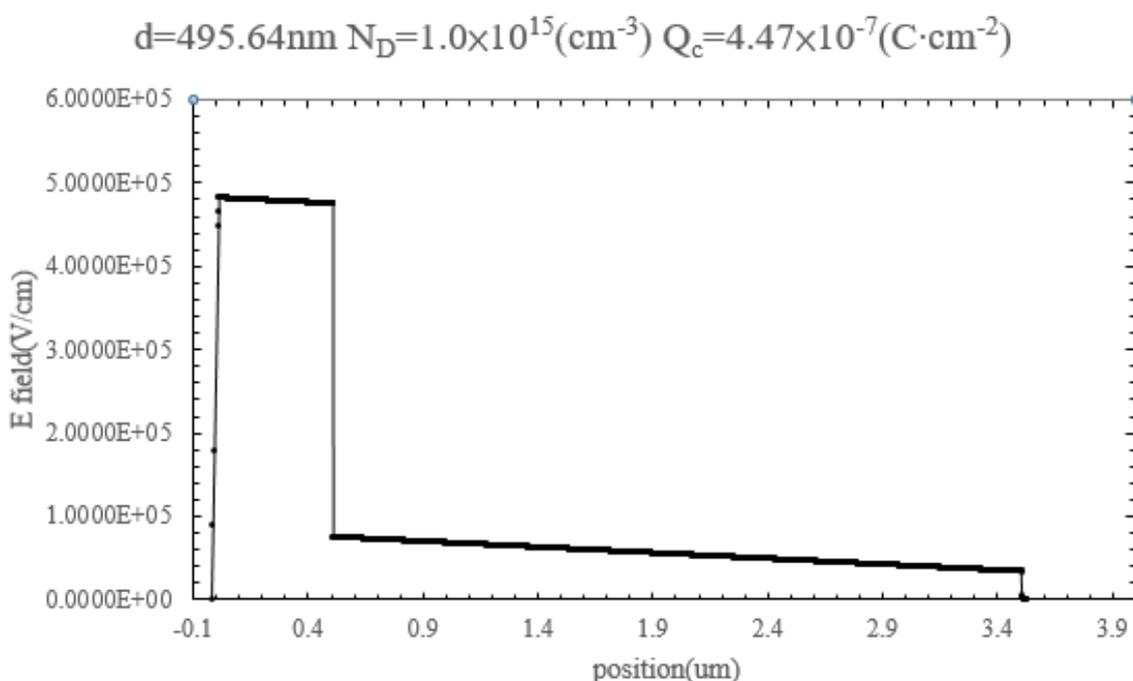


圖 35 本研究的設計結構在崩潰電壓時的電場分布圖，吸收層最大電場大約為 75000 kV/cm

第三節 TCAD 模擬結果

本研究所設計出的結構參數如表 4(a)所示，而實際上用來放到 TCAD 去算而實際上放到 TCAD 的參數如表 4(b)所示。須注意的是，因為 TCAD 必須設定電荷層參雜濃度與厚度，所以為了達到 $Q_c = q N_{ch} W_{ch} = 4.47 \times 10^{-7} (\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ ，將電荷層參雜濃度定為 $5.9 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3})$ ，厚度定為 47nm，如此模擬 $Q_c = 4.47 \times 10^{-7} (\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$ 的效果。

表 4 (a)設計出的結構參數表 (b)放到 TCAD 的結構參數表
(a)

層	doping	thickness
倍增層 (multiplication layer)	$N_D=1E15(\text{cm}^{-3})$	d=496nm
電荷層 (charge layer)	$N_{ch}=5.9E17(\text{cm}^{-3})$	$W_{ch}=47.3\text{nm}$
吸收層 (absorption layer)	$N_D=1E15(\text{cm}^{-3})$	3um

$$Q_c = q N_{ch} W_{ch} = 4.47E-7 \text{ (C}\cdot\text{cm}^{-2}\text{)}$$

(b)

層	doping	thickness
倍增層 (multiplication layer)	$N_D=1E15(\text{cm}^{-3})$	d=506.3nm
電荷層 (charge layer)	$N_{ch}=5.9E17(\text{cm}^{-3})$	$W_{ch}=47\text{nm}$
吸收層 (absorption layer)	$N_D=1E15(\text{cm}^{-3})$	3um

本研究以此結構放到 T C A D 去算，得出的暗電流特性如圖 36 所示

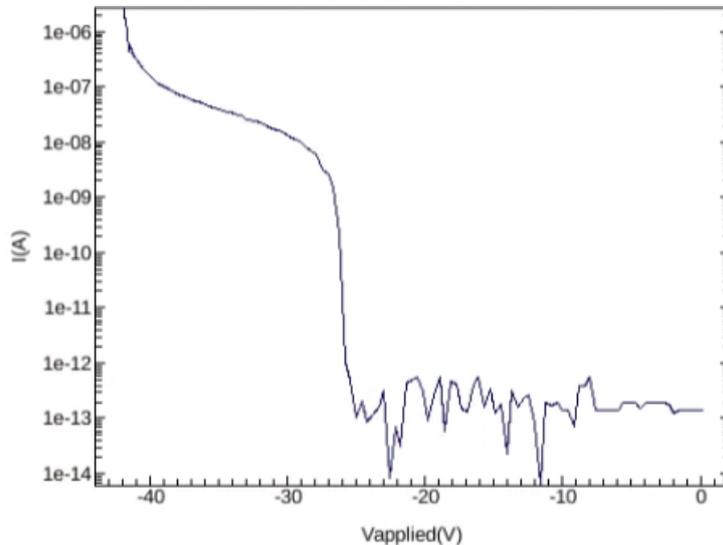


圖 36 T C A D 算出的本研究之設計的暗電流特性圖

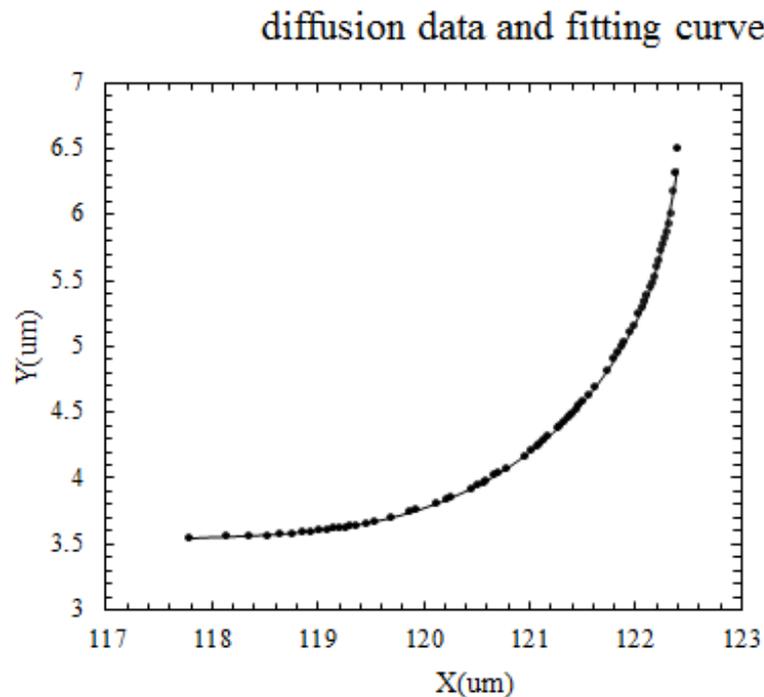
從圖中可看出，擊穿電壓約為 25V，崩潰電壓約為 42V，差異是來自本研究計算崩潰電壓與擊穿電壓的理論值時，是假設 PN 接面為 Abrupt junction，而 TCAD 的 PN 接面為擴散的波前，故是一種 gradient junction，所以會需要更大的偏壓來達到相同的倍增層電場分布，另外，由於理論計算時假設電荷層為一厚度為 0 之薄膜，但放進 TCAD 結構電荷層厚度為 47nm，此厚度不同導致須多加偏壓才能得到與理論計算相同的倍增層電場分布。

綜合上述兩效應導致 TCAD 計算的崩潰電壓結果較理論計算結果高。

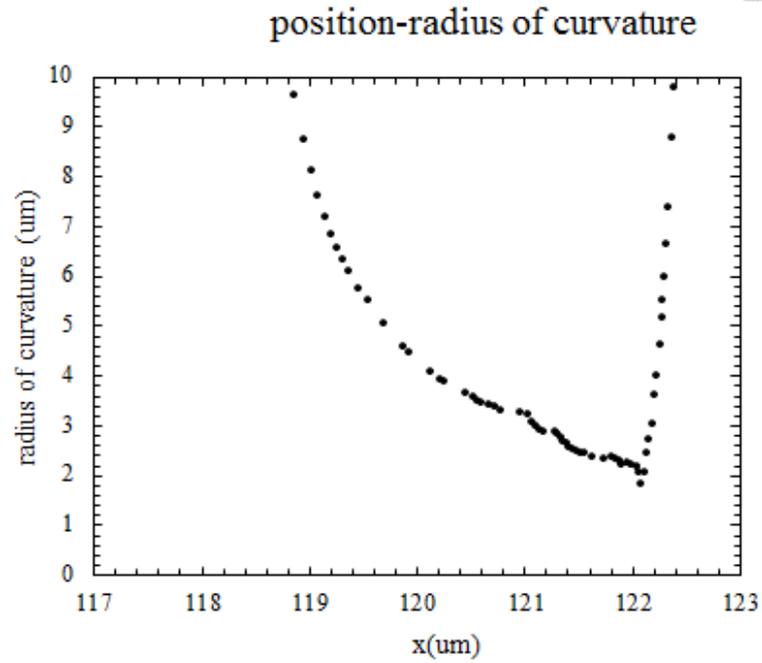
另外，邊緣區 PN 接面處的曲率半徑隨位置關係圖如圖 37(a)所示，在崩潰時邊緣區的電場分布如圖 37(b) 所示，由此圖可觀察，在曲率半徑最小處，PN 接面處的電場確實比中心區 PN 接面處的電場小，但在 x 座標為 119um 處 PN 接面處的電場卻比中心區大，此是因為此偏壓時，中心區與部分邊緣區的空乏區被電荷層限制住，而邊緣區被限制部分的空乏區其最大

電場計算方式不同於本研究所推導的邊緣區最大電場計算方式。本研究推導邊緣區最大電場時，是假設空乏區未被限制，可無限自由延伸，而考慮曲率半徑造成的PN 接面處的電場變大來計算。而邊緣區被限制部分的空乏區因與中心區同樣有電荷層的限制，又有曲率半徑造成的PN 接面處的電場變大，故其PN 接面處的電場會比可無限自由延伸的曲率半徑最小處的電場大，本研究的推倒與設計，雖可使曲率半徑最小處的PN 接面處電場比中心區PN 接面處的電場小，然而仍無法避免邊緣區電場大於中心區的問題。

本研究也做出崩潰電壓時的中心區與被電荷層限制的邊緣區之電場分布如圖 38(b)所示，圖中可觀察被電荷層限制的邊緣區之電場在倍增層區域都大於中心區之電場，而以電場計算的離子積分主要由倍增層的電場決定，故被電荷層限制之邊緣區的離子積分必大於中心區的離子積分，所以崩潰會發生在此處，故本研究之設計仍無法避免邊緣崩潰的發生。

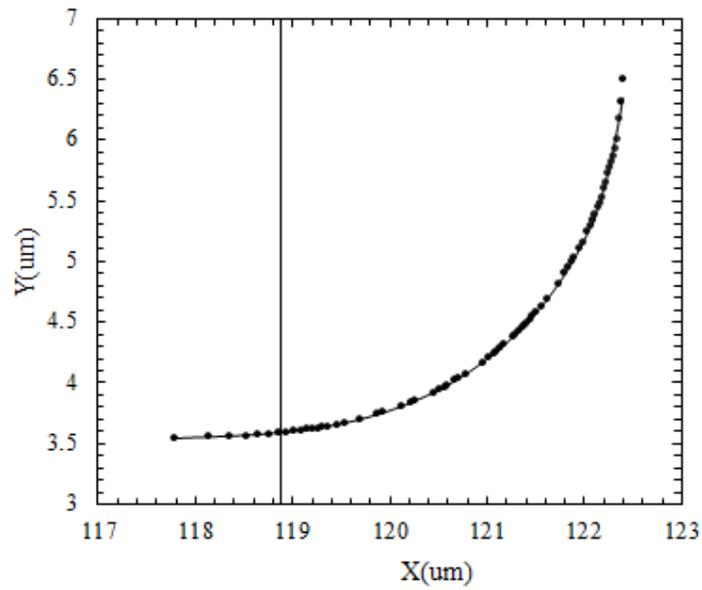


(a)

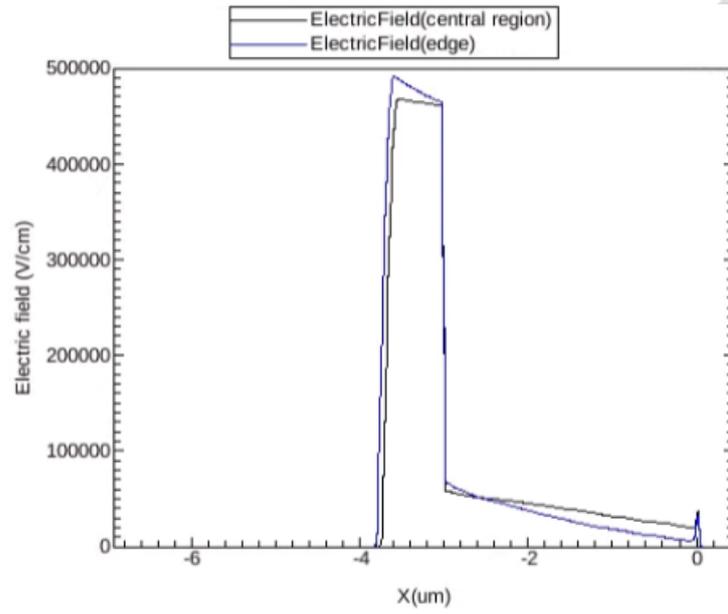


(b)

圖 37 (a) 邊緣區 PN 接面處的曲率半徑隨位置關係圖(b) 崩潰時邊緣區的電場分布圖



(a)



(b)

圖 38(a) 被電荷層限制的邊緣區電場切面位置示意圖(b)崩潰電壓時的中心區與被電荷層限制的邊緣區之電場分布圖



第六章 樣品量測結果與分析

第一節 樣品簡介

樣品外觀如圖 39 所示，為一片基板上有許多雪崩光偵測器，圖中每一個正方形就是一個雪崩光偵測器，中間的圓形區域是受光部分，圓形的右上角有一突出區域是金屬測試點(Pad)，是作為量測時下探針用。每一個正方形左下編號是代表不同的製程條件，而同一編號從左到右是變化保衛環與中心區的距離，從左到右分別是距離最近到最遠。其結構如圖 40 所示，最底層是硫參雜的 n^+ InP 基板，其上面厚度 $0.5\ \mu\text{m}$ 矽參雜的 n^+ InP，再上面是厚度 $3\ \mu\text{m}$ 未參雜的 InGaAs 吸收層，再上面是厚度 $0.12\ \mu\text{m}$ 未參雜的 InGaAsP 層，再上面是厚度 $0.2\ \mu\text{m}$ 矽參雜濃度 $6.8 \times 10^{16} (1/\text{cm}^3)$ 的 InP 電荷層，再上面是厚度 $3.5\ \mu\text{m}$ 矽參雜濃度 $5 \times 10^{16} (1/\text{cm}^3)$ 的 InP 層，製程上採用封住整個表面只在保衛環上面開口(如圖 38 中” 1st Zinc diffu” 所指部分上方咖啡色部分中間開口)，然後進行鋅擴散使鋅形成保衛環，再將此開口封住然後將中間打開(如圖 40 中” 2nd Zinc diffu_3E18” 所指部分上方咖啡色部分中間開口)進行鋅擴散，形成受光層，鋅在 InP 中為 P 型參雜，而矽為 N 型參雜，因此鋅擴散區域的邊界即形成 PN 接面。中央受光層與電荷層之間的區域為倍增層，厚度為 $0.5\ \mu\text{m}$ ，參雜濃度為 $5 \times 10^{16} (1/\text{cm}^3)$ 。受光層上方有金屬連接到 Pad 作為正電極，可供量測之用。樣品底部有背電極，為樣品之負極。

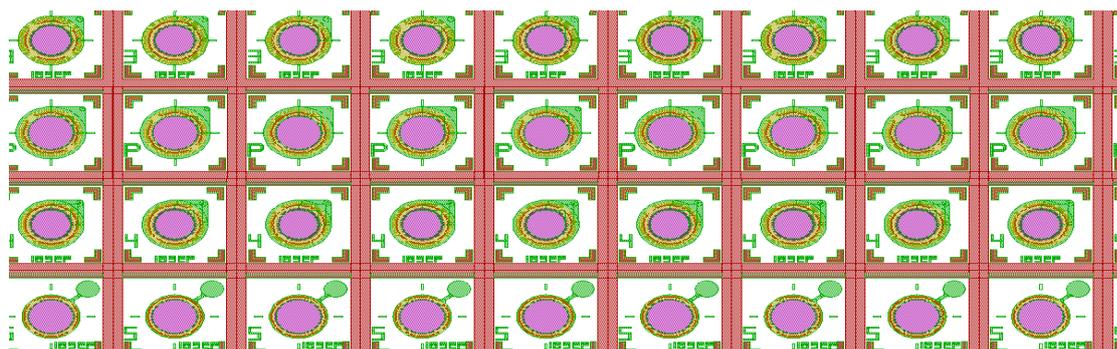


圖 39 樣品外觀示意圖

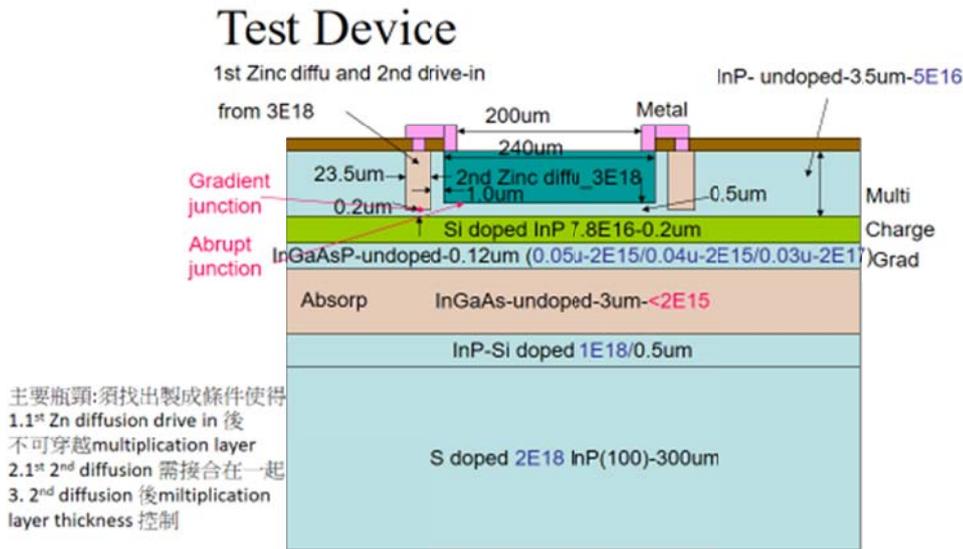


圖 40 樣品結構圖

第二節 量測儀器

一. 半導體參數分析儀 HP-4156A :

HP4156A [19]為半導體電壓電流特性量測分析的儀器，有 4 個電源量測單位 (Source/Monitor Units (SMUs))，兩個電壓源單位 (Voltage Source Units (VSUs)) 和兩個電壓量測單位 (Voltage Measurement Units (VMUs))，可量測低電壓電流關係。電源量測單位可加偏壓量測電流或者加電流量測電壓，電壓源單位可加偏壓。具有 0 偏壓校正功能，可校正 0 偏壓時量得的電流以修正小電流量測時的誤差。

其測量單元規格如下：

1. 電源監視單元 (Source/Monitor Unit ;SMU) :

(1) 高解析度電源監視單元 (High Resolution SMU; HRSMU)。

- 輸出最高電壓：±100V；輸出最大電流：±100 mA。
- 最大輸出功率：2W。
- 最小電流測量範圍：10pA (1fA 解析度)

(2) 中功率電源監視單元 (Medium Power SMU; MPSMU)

- 輸出最高電壓：±100V；輸出最大電流：±100 mA。
- 最大輸出功率：2W。



(3)高功率電源監視單元(High Power SMU; HPSMU)

- a.輸出最高電壓： $\pm 200\text{V}$ ；輸出最大電流： $\pm 1\text{A}$ 。
- b. 最大輸出功率： 20W 。

2.電壓源單元(Voltage Source Unit ; VSU) :

- (1)輸出最高電壓： $\pm 20\text{V}$ 。
- (2)只有 20V (1mV 解析度)可用，所以輸出範圍自動設定至 20V 。
- (3)電流輸出自動設定至 $\pm 100\text{mA}$ 。

3. 電壓監視單元(Voltage Monitor Unit ; VMU) :

電壓監視單元規格如表 5 所示。

表 5 電壓監視單元規格表

Measurement Mode	Range	Measurement Resolutions			Sampling Measurement ¹
		Integration Time			
		1PLC or Longer	640 μs to 1.92 ms	80 μs to 560 μs	
Grounded Measurement	2 V	2 μV	20 μV	200 μV	1 mV
	20 V	20 μV	200 μV	1 mV	10 mV
Differential Measurement	0.2 V	1 μV	2 μV	20 μV	200 μV
	2 V	2 μV	20 μV	200 μV	2 mV

4. 脈波產生器單元(Pulse Generator Unit ; PGU) :

- (1)脈波產生器單元電壓設定範圍與解析度如表 6 所示。

表 6 脈波產生器單元電壓設定範圍與解析度表

Range	Peak Setting Value ¹	Base Setting Value ¹	Resolution	Maximum Current ²
20 V	$0 \leq V \leq 20\text{V}$	$0 \leq V \leq 20\text{V}$	4 mV	$\pm 100\text{mA}$
40 V	$0 \leq V \leq 40\text{V}$	$0 \leq V \leq 40\text{V}$	8 mV	$\pm 100\text{mA}$

- (2)脈波產生器單元週期、波幅、與延遲時間設定範圍如表 7 所示。

表 7 脈波產生器單元週期、波幅、與延遲時間設定範圍表

Range	Pulse Period	Pulse Width	Delay Time ¹	Resolution
1	2.0 μs to 100.0 μs	1.0 μs to 99.9 μs	0 to 100.0 μs	0.1 μs
2	100 μs to 1000 μs	1 μs to 999 μs	0 to 1000 μs	1 μs
3	1.00 ms to 10.00 ms	0.01 ms to 9.99 ms	0 to 10.00 ms	10 μs
4	10.0 ms to 100.0 ms	0.1 ms to 99.9 ms	0 to 100.0 ms	100 μs
5	100 ms to 1000 ms	1 ms to 999 ms	0 to 1000 ms	1 ms
6	1.00 s to 10.00 s	0.01 s to 9.99 s	0 to 10.00 s	10 ms

(3)脈波產生器單元的脈波上升緣與下降緣暫態時間設定範圍如表 8 所示。

表 8 脈波產生器單元的脈波上升緣與下降緣暫態時間設定範圍表

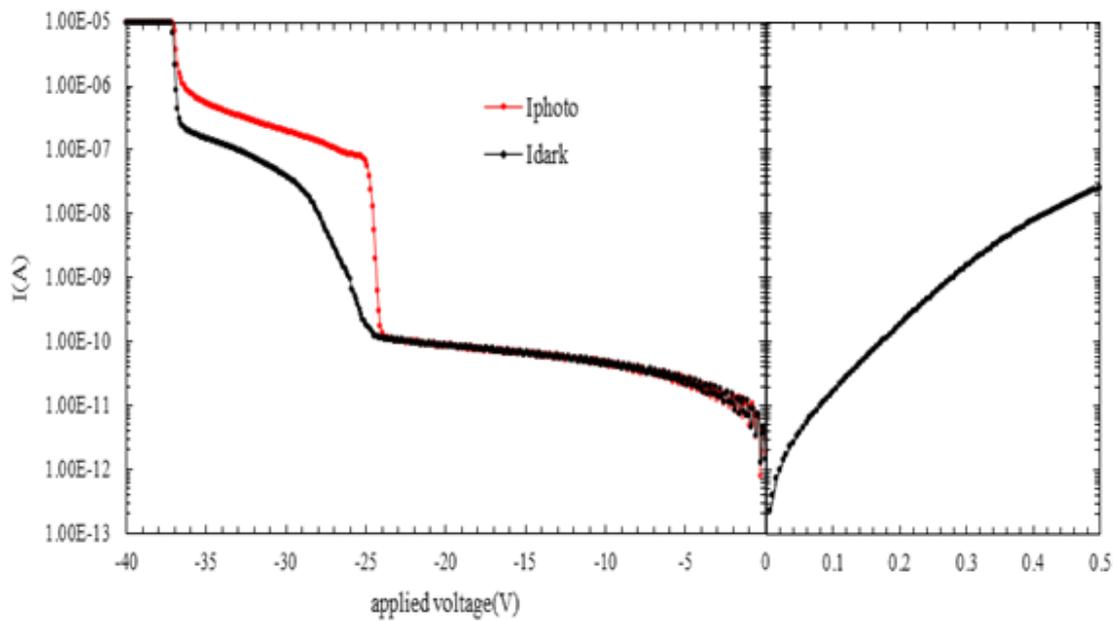
Range	Leading and Trailing Transition Time	Resolution
1	100 ns to 1000 ns	1 ns
2	0.50 μ s to 10.00 μ s	10 ns
3	5.0 μ s to 100.0 μ s	100 ns
4	50 μ s to 1000 μ s	1 μ s
5	0.5 ms to 10.00 ms	10 μ s



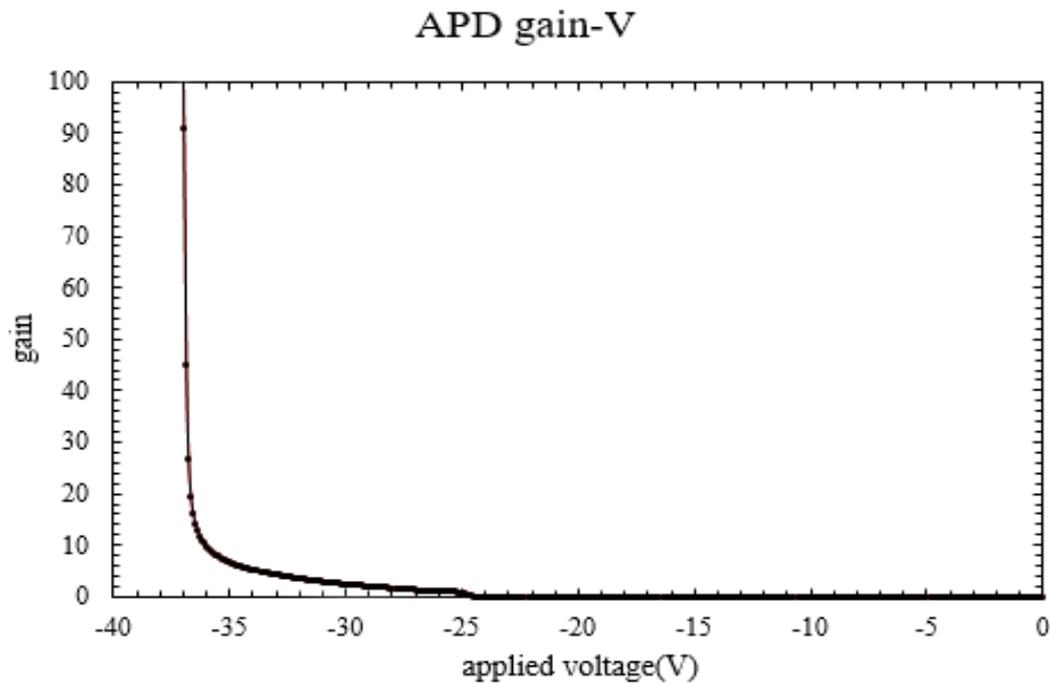
5. 接地單元(Ground Unit ; GNDU)

- (1)電壓：0V。
- (2)電流：1.6A。

第三節 順偏壓與反偏壓量測結果



(a)



(b)

圖 41 (a) 樣品電流電壓特性圖(b)樣品電壓與增益關係圖

樣品的電流量測結果如圖 41(a)所示，此樣品的電流量測是將樣品放置於銅座上，以 HP-4156A 一組 VSU 接到探針，此 VSU 電位為接地，以此探針接觸銅座，因樣品有背電極故使負極電位為 0V，以 HP-4156A 一組 SMU 接到另一探針點 Pad，加電壓於此探針並量電流，順偏壓為加正電壓於此探針，反偏壓為加負電壓於此探針。量測時是將樣品放在一有蓋子的黑箱子中，蓋好蓋子以避免外來光源入侵，再進行量測。暗電流是將此樣品安裝好後蓋好蓋子直接量測，光電流是將此樣品放好後打開尖峰波長為 1550nm 的紅外光 LED 照射待測的雪崩光偵測器。而電壓電流量測使用的電壓電流量測儀，其儀器型號為 HP-4156A。此樣品的順偏壓特性為理想因子 1.6，表示仍是以復合-產生電流居多，反偏壓特性的擊穿電壓 24.8V，崩潰電壓 37V，基本上符合所要求的規格，但在 0.9 倍崩潰電壓為 33.3V 時的暗電流是 107 nA，此電流太大，必須再降低，理想是在 0.95 倍崩潰電壓時暗電流為 0.5 nA 以下。本研究量測的元件受光面積為 0.045 mm^2 ，與商用規格受光面積為 0.04 mm^2 的 InGaAs APD(型號:G8931-04)運作偏壓時的暗電流約為 90 nA [25]相比，沒有相差很多。

而本研究算出其 V_{pt} 為 24.8V， V_{m1} 為 25.4V， V_{m1} 時之光電流為 79.3nA，由各偏壓時所得光電流除以 V_{m1} 時之光電流得出樣品電壓與增益關係圖如圖 41(b)所示。可得在 0.9 倍崩潰電壓(33.3V)時之增益為 4.56，與上述商用規格的運作偏壓時的 gain 約為 10[25]相比，仍有許多進步空間。

第四節 電容電壓特性

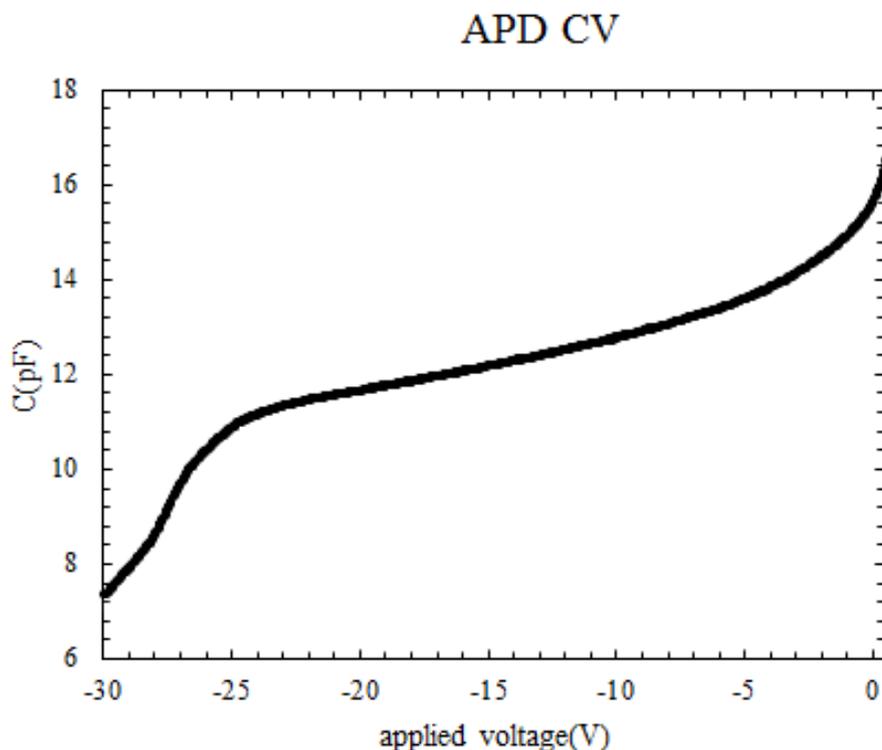


圖 42 樣品電容電壓特性圖

如圖 42 所示為測量得知的電容電壓關係圖，可由此圖算出每個偏壓時的空乏區大小，在 0V 時，空乏區為 628.77nm，根據此圖 42 可以得出 $\frac{1}{C^2}-V$ 關係圖如圖 43 所示，根據此圖 43 可明顯看出 $\frac{1}{C^2}-V$ 關係圖有兩個不同區域，區域 2 的斜率 $(\frac{d(\frac{1}{C^2})}{dV})$ 較大，區域 1 較小，此是因為隨著偏壓加大，空乏區在零偏壓時原本只存在於倍增層、部分受光層與部分電荷層，反偏壓加大時則空乏區向電荷層延伸，當達到擊穿電壓時則空乏區占滿整個電荷層，開始接觸到低參雜濃度的緩衝層，所以斜率發生變化。故可由此圖 39 得知擊穿電壓為 24.5V，而由電容電壓關係圖的擊穿電壓的電容值可以推算此時的空乏區寬度為 892.63nm。而隨著位置的參雜濃度變化可由式(17)推算得知，結果如圖 44 所示，此圖可以得知不同空乏區寬度(W)時，N 參雜區之空乏區邊緣參雜濃度(N(W))，因此得知參雜濃度隨位置分布狀況。

而由斜率可推算 $\frac{d(\frac{1}{C^2})}{dV}$ 而以式(17)算出該區域的參雜濃度，以 -10V 的 $\frac{1}{C^2}$ ($4.789E+15(1/cm^3)$) 和 -15V 的 $\frac{1}{C^2}$ ($5.26E+15(1/cm^3)$) 來算區域 2 的參雜濃度，得出參雜濃度為 $1.189 \times 10^{17}(1/cm^3)$ 也就是電荷層的參雜濃度。

以 -28V 的 $\frac{1}{C^2}$ ($1.036 \times 10^{16}(1/cm^3)$) 和 -29V 的 $\frac{1}{C^2}$ ($1.2375 \times 10^{16}(1/cm^3)$) 來算區域 1 的參雜濃度，

得出參雜濃度為 $5.57 \times 10^{15} (1/cm^3)$ 也就是緩衝層的參雜濃度。

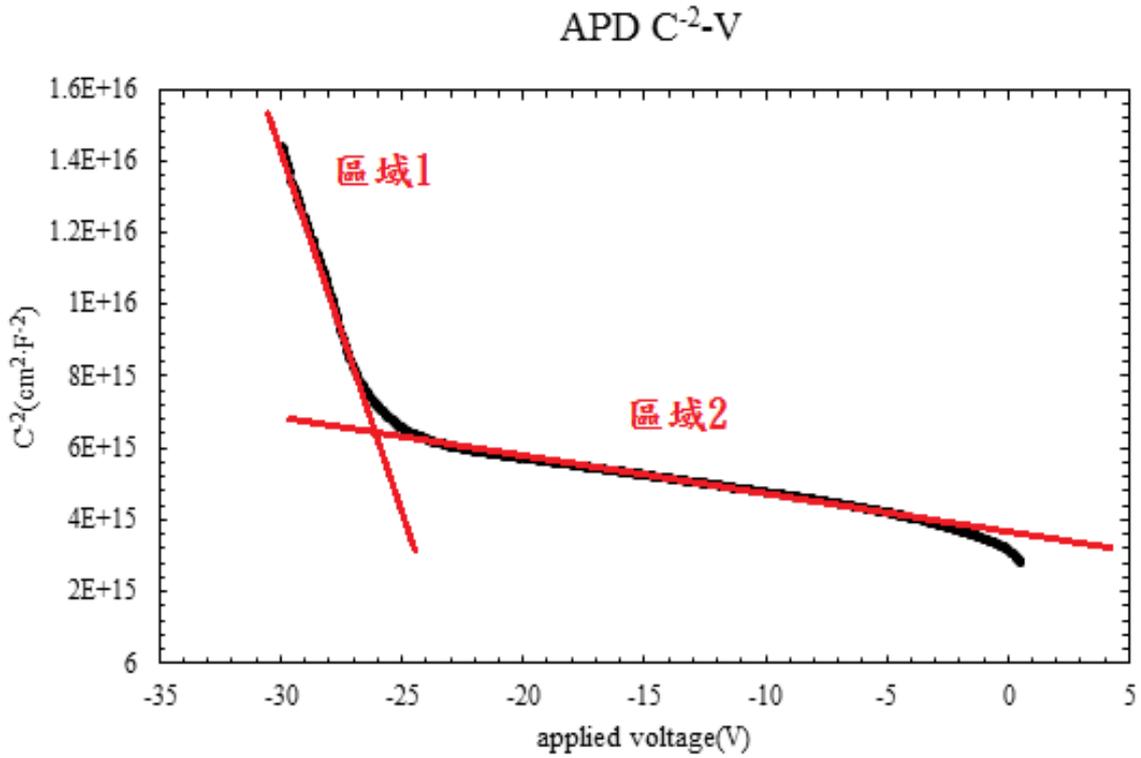


圖 43 樣品 $\frac{1}{C^2}-V$ 關係圖

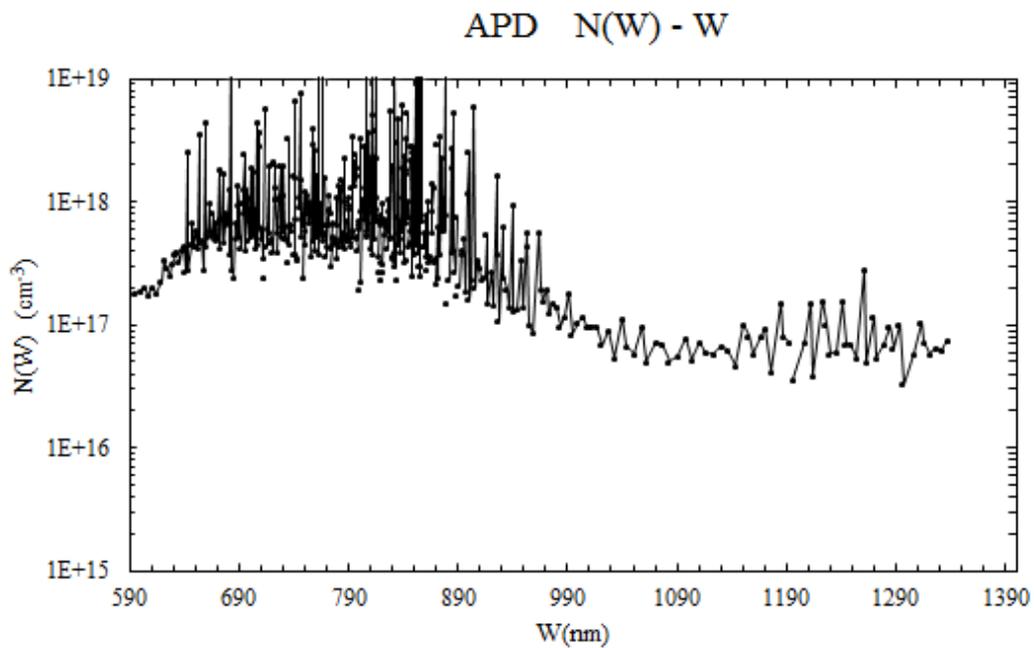


圖 44 樣品 $N(W)-W$ 關係圖

第七章 結論

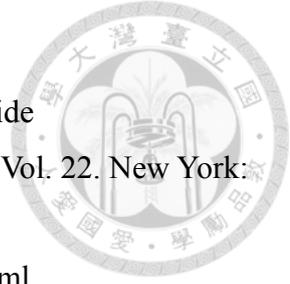


本研究推導APD的結構參數與崩潰電壓與光偵測器邊緣區與中心區最大電場的關係，探討曲率半徑對避免邊緣崩潰的作用，並研究結構參數對崩潰電壓的影響，得出倍增層與吸收層參雜濃度 N_D 與倍增層厚度變化不劇烈影響崩潰電壓的範圍，倍增層空間電荷量 Q_c 介於 $3.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 與 $4.8 \times 10^{-7}(\text{C} \cdot \text{cm}^{-2})$ 且 N_D 低於 $1 \times 10^{14}(\text{1}/\text{cm}^3)$ 。以Sentaurus TCAD製程模擬軟體模擬鋅在磷化銦中擴散不同時間的濃度分布，得出PN接面的曲率半徑會隨擴散縱向深度增加而增加。並且規劃設計符合特定崩潰電壓與擊穿電壓的結構參數的步驟，並實地設計出一組符合特定規格要求的APD結構參數。量測一APD樣品並分析其電壓、電流、電容特性，需改善設計使其在0.9倍崩潰電壓時的暗電流需降低，增益須提升。

參考文獻



- [1] Simon M. Sze, Kwok K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices"
- [2] C. A. Lee, R. A. Logan, R. L. Batdorf, J. J. Kleimack, W. Wiegmann, "Ionization rates of holes and electrons in silicon", *Phys. Rev.*, vol. 137, pp. A761-A773, May 1964.
- [3] 鄧建鴻, "以電腦輔助半導體工藝模擬及器件模擬工具設計砷化銦環繞式閘極奈米線穿隧式場效應電晶體之結構", 2017年7月
- [4] Meier, H.T.J., "Design, Characterization and Simulation of Avalanche Photodiodes", Dissertation, ETH Zurich, Switzerland (2011).
- [5] S. Forrest, "Performance of InGaAsP photodiodes with dark current limited by diffusion, generation recombination, and tunneling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 217–226, Feb. 1981.
- [6] Sze, S. M. and Gibbons, G., Effect of Junction Curvature on Breakdown Voltage in Semiconductors, *Solid State Electron*, 9, 1966, pp. 831-845.
- [7] https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2_10.html
- [8] <https://zh.wikipedia.org/wiki>
- [9] <https://baike.baidu.com/item>
- [10] 半導體元件物理，李嗣涪，三民書局股份有限公司。
- [11] https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_3.htm#fig4_3_5
- [12] T. Knežević, T. Suligoj, "Analysis of Electrical and Optical Characteristics of InP/InGaAs Avalanche Photodiodes in Linear Regime by a New Simulation Environment", *Proc. of the 39th International Convention MIPRO 2016*, pp. 34-39, Rijeka, Croatia
- [13] C. L. F. Ma, M. J. Deen, and L. Tarof, "Characterization and modelling of SAGCM InP/InGaAs avalanche photodiodes for multigigabit optical fiber communications," in *Advances in Imaging and Electron Physics*, vol. 99, P. Hawkes, Ed. New York, NY: Academic, 1998, pp. 65–170
- [14] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, Eds., *Fundamentals of Photonics* (Wiley, New York, 1991).
- [15] G. J. van Gorp, P. R. Boudewijn, M. N. C. Kempeners and D. L. A. Tjaden, "Zinc diffusion in n-type indium phosphide" *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, pp. 1846-1855, 1987.
- [16] Sentaurus Process User Guide, Synopsys, Mountain View, CA, USA, Mar. 2016.
- [17] T. Cheng-Yu, J. Seiler, and M. Geva, "Modeling of Zn diffusion in InP/InGaAs materials during MOVPE growth," in *Proc. 11th Int. Conf. Indium Phosphide Related Mater.*, 1999, pp. 245–248.
- [18] B. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. New York: Springer Verlag, 2008



- [19] <http://www.hp1718.com/pddetailthree/product/detail-17367766.html>
- [20] HP 4155A/4156A Semiconductor Parameter Analyzer User's Task Guide
- [21] *T. P. Pearsall, M. A. Pollack*. 1985. *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 22. New York: Academic Press
- [22] <http://mropengate.blogspot.com/2015/04/cubic-spline-interpolation.html>
- [23] 私下諮詢林浩雄教授
- [24] H. Ando, H. Kaaba, M. Ito, and T. Kaneda, "Tunneling current in InGaAs and optimum design for InGaAs/InP avalanche photo-diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 6, pp. L277–L280, Jun. 1980.
- [25] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g8931_series_kapd1018e.pdf，本研究參考 G8931-04
- [26] S. A. Stockman, A. W. Hanson, C. M. Coulomb, M. T. Fresina, J. E. Baker, and G. E. Stillman, *J. Electron. Mater.* 23, 791 ,1994
- [27] K. L. Hess, S. W. Zehr, W. H. Cheng, and D. Perrachione, *J. Electron. Mater.* Hi, 127 (1987)
- [28] C. X. Shi, D. Grutzmacher, M. Stollenwerk, Q. K. Wang, and K. Heime, *IEEE Trans. Electron Devices* 39, 1028 ,1992