

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

非晶質矽/單晶矽吸光區累崩區分離累崩光二極體

Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Separate Absorption Multiplication Avalanche Photodiode

計畫編號：NSC 89-2215-E-164-002

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：施能夫 修平技術學院電機工程系
nfshih@mail.hit.edu.tw

計畫參與人員：莊文榮，白豐榮 中央大學電機研究所

一、中文摘要

本計畫擬利用標準 BJT 製程製作吸光區及累崩倍增區分離累崩光二極體，在製作元件前，我們利用 TSUPREM-4 模擬製程，並利用 MEDICI 模擬特性。此元件共使用八道光罩，大概和標準的 BJTIC 數目差不多，目前元件所量得光增益及光電流的特性較差，主要原因來自於元件製作過程的複雜度及元件製作過小所致。

關鍵詞：累崩，非晶質矽，光偵測器，單一載子注入雙載子倍增，吸光區及累崩倍增區分離累崩光二極體

Abstract

A BJT compatible process were used to fabricate an amorphous/crystalline Si separated absorption multiplication avalanche photodiode (SAM-APD) in this study. The performance and process parameters of the designed SAM-APD were simulated by using the MEDICI and TSUPREM-4. Eight levels of mask, which are almost the same with standard BJTIC

process, were needed to fabricate the device and the finished devices had rather poor characteristics, such as low optical gain and photocurrent, due to process complexity and small dimension of the proposed device.

Keywords: Avalanche, Amorphous silicon, Photo-detector, Single Carrier Injection Double Carriers Multiplication, Separate absorption multiplication Avalanche Photodiode

二、緣由與目的

光偵測器系統主要的雜訊包含了負載電阻的熱雜訊、背景雜訊和光偵測器本身的雜訊。而對於寬頻光偵測中要降低負載電阻的熱雜訊辦法唯有改變光偵測器內部增益的機制。光偵測器內部增益的機制亦是雜訊的來源之一，但是整個系統訊雜比卻可改善。

光倍增管所提供的高增益及低雜訊為目前所有光偵測器最佳，但卻因其體積過大及須加高電壓(數百至一千伏)而限制了它的用途。取而代之的是累崩光二極體，累崩光二極體(APD)藉由半導體材料內部載子倍增的現象而提供出高增益。這種微小

結構的元件可以很容易的和其它元件組成積體電路而常常應用於有高增益低雜訊需求的光偵測應用，尤其是在光纖通訊中 APD 更是廣為大家所使用。1966 年時 McIntyre 推導出當電子和電洞碰撞游離係數(impact ionization coefficient)相差很多 APD 可以得到較低的過雜訊(Excess noise)[2]，而大部分三五族化合物半導體擁有幾乎相同的電子與電洞碰撞游離係數[3]。

Chin 等人提出將三五族化合物半導體導帶緣(conduction band edge)的部分以多量子井 GaAs/AlGaAs(multi-quantum well)的結構[4]。相較於原本 GaAs 材料的電子碰撞游離率(α)及電洞碰撞游離率(β)，藉由導帶緣在 GaAs/AlGaAs 介面的不連續，電子的碰撞游離率比可大為提昇。近年來 α/β 的比值約為 8-20[5]。

之後陸續發展出的帶緣不連續(band edge discontinuity)和多量子井/超晶格結構、以完全空乏 p-I-n 內建電場、p-n 同質界面或 p-n 異質界面等組合的結構，以及吸光區及倍增區分離累崩光二極體等結構[6]。

理論方面自從 McIntyre 於 1966 年發表雙載子倍增的傳統累崩光極體的表示式後[2]，各種結構的表示式陸續發表，如雙載子倍增超晶格累崩光極體[7]，和單載子倍增階梯式累崩光極體[8]。M.C.Teich 等隨後發表了多層任意能階改變的一般表示式[9]。累崩光極體的理論算是十分完備。

但是三五族化合物半導體能帶緣不連續結構製程所需求的設備(分子束磊晶成長系統)過於昂貴，所需求的超高真空成本亦所費不貲。矽質積體電路於半導體工業算是十分成熟，本計劃擬利用單晶矽中 $\alpha/\beta \gg 1$ 及非晶矽半導體光吸收係數較高的特質製作高增益低雜訊的光偵測器，並

且與 BJT(P substrate)積體電路製程相容而易於將此光偵測器積體電路化。

三、結果與討論

SAM-APD 元件剖面圖如圖一所示。圖二為 SAM-APD 的能階圖。假設 I 型非晶質矽層及 P 型單晶矽完全空乏，光線射入 ITO 後，大部份入射光會被非晶質矽薄膜層所吸收產生電子電洞對，部份入射光經非晶質矽與單晶矽界面反射回非晶質矽薄膜層並被吸收產生電子電洞對。所產生的電洞飄移至 P+型非晶質矽，電子則飄移至累崩區經電場的超加熱而碰撞游離出電子電洞對。碰撞游離出的電子繼續超加熱並碰撞游離出下一對電子電洞對直到飄移至 N 型中性區單晶矽，所產生的電洞則經 P 型單晶矽飄移及 I 型非晶質矽薄膜層至 P+型非晶質矽薄膜層，而形成單一載子注入雙載子倍增。

圖三為射極處所模擬不同深度的摻雜濃度分佈情形及隔離區處硼原子的分佈情形，其中虛線為隔離區處硼原子的分佈。圖四為 SAM-APD 的暗電流及於照射 450nm, 0.3nW 的光線所量得的光電流。圖五為 SAM-APD 於照射 450nm, 0.3nW 的光線所量得的光電增益。

SAM-APD 元件的離子植佈在國科會毫微米實驗室完成，離子驅入及矽氧化及部分的光蝕刻術於交通大學半導體中心完成，磊晶則委託工研院電子所代工，非晶矽、氧化銻錫及鋁金屬的成長、其後的光蝕刻術及退火則移至中央大學電機系完成。雖然元件的光罩數只有八道，但由於元件需至不同的地方製作而降低了元件的良率。其次當初設計元件的尺寸過小，致使光電流過小，而又因於交通大學半導體中心、國科會毫微米實驗室製作及工研院電子所代工皆需排隊等待，往往發現問題時已經來不及修改及重新製作！

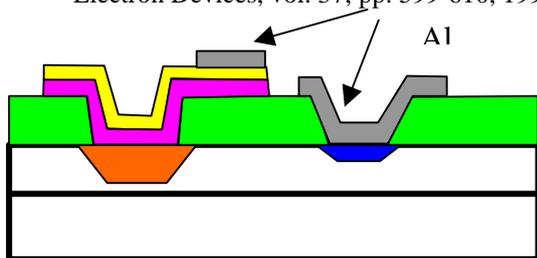
四、計畫成果自評

本計畫已經成功研發出非晶質矽/單晶矽吸光區累崩區分離累崩光二極體，目前的累崩現象約發生在 90V，而崩潰電壓在 100V 以上，實驗成果未達到所預期實驗研究結果大概可發表於一般的學術研討會，而理

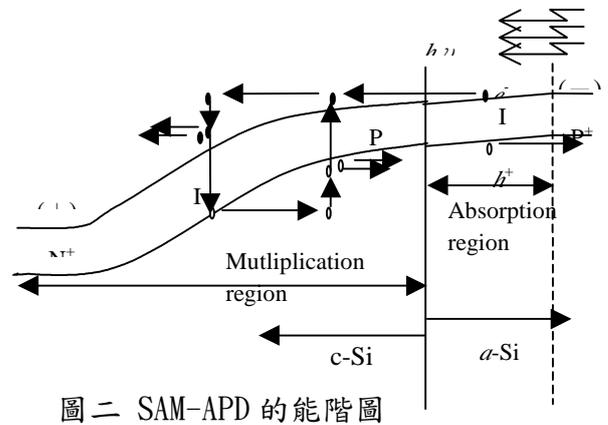
論部分已經發表於 *EEE Trans. Electron Devices*, Vol.48, no.6, pp.1705-1801, 2001.

五、參考文獻

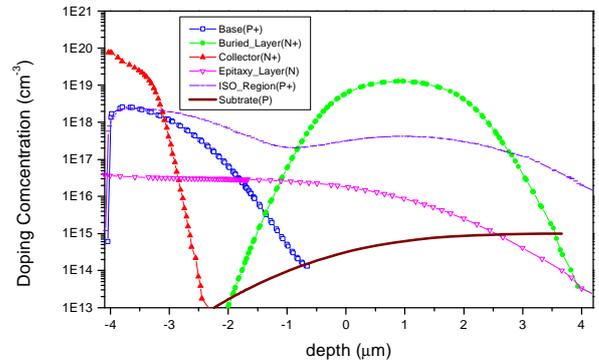
- [1] G. E. Stillman, V. M. Robbins, and N. Tabatabaie, "III - V compound semiconductor devices: Optical detectors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-31, pp. 1643-1655, 1984.
- [2] R. J. McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-13, pp. 164-168, 1966.
- [3] G. E. Bulman, V. M. Robbins, K. F. Brennan, K. Hess, and G. E. Stillman, "Experimental determination of impact ionization coefficients in (100) GaAs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. EDL~4, pp. 181-185, 1983.
- [4] R. Chin, N. Holonyak, G. E. Stillman, J. Y. Tang, and K. Hess, "Impact ionisation in multilayered heterojunction structures," *Electron. Lett.* vol.1.16, pp. 467--469, 1980.
- [5] F. Capasso, W. T. Tsang, and G. F. Williams, "Staircase solid-state photomultipliers and avalanche photodiodes with enhanced ionization rates ratio," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-30, pp. 381-390, 1983.
- [6] H. Blauvelt, S. Margalit, and A. Yariv, "Singl-carrier-type dominated impact ionisation in multilayer structures," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 375-376, 1982.
- [7] M. C. Teich, K. Matsuo, and B. E. A. Saleh, "Excess noise factors for conventional and superlattice avalanche photodiodes and photomultiplier tubes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 1184-1193, 1986.
- [8] K. M. Van Vliet, and L. M. Rucker, "Theory of carrier multiplication and noise in avalanche devices -- Part I: One-carrier processes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 746-751, 1979.
- [9] N. Z. Hakim, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, "Generalized excess noise factor for avalanche photodiodes of arbitrary structure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 37, pp. 599-610, 1990.



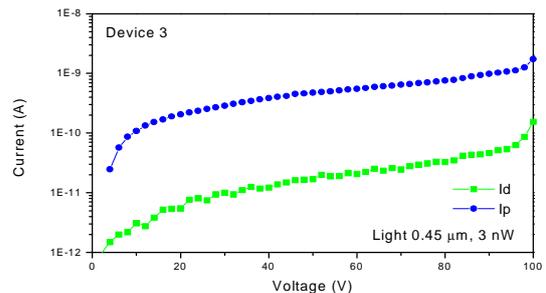
圖一 元件的摻雜濃度



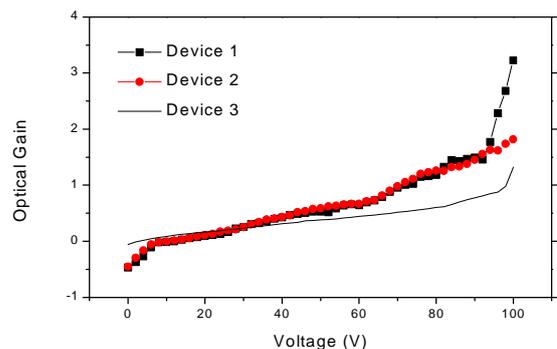
圖二 SAM-APD 的能階圖



圖三 射極處所模擬不同深度的摻雜濃度分佈情形及隔離區處硼原子的分佈情形，其中虛線為隔離區處硼原子的分佈。



圖四 SAM-APD 的暗電流及於照射 450nm, 0.3nW 的光線所量得的光電流。



圖五為 SAM-APD 於照射 450nm, 0.3nW 的光線所量得的光電增益。