

·光电探测·

## 基于SPM的光子探测技术

胡涛, 刘严严

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:**光子探测技术是弱光探测领域的热点,介绍了SPM(硅光电倍增管阵列)探测器件的工作原理、基本结构、性能特点,为了验证SPM探测器的光子探测性能以及光子分辨能力,利用高速跨导放大器设计了SPM光子探测电路,并进行了光子探测实验研究。根据实验结果可以得出结论,SPM探测器具有较好的光子分辨特性。

**关键词:**SPM探测器;光子探测;跨导电路;光子分辨

中图分类号:TN29

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)03-0030-03

## Photon Detection Technology Based on SPM

HU Tao, LIU Yan-yan

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The photon detection technology is a hot area in the low light detection. The working principle, basic structure and performance characteristics of SPM (silicon photo multipliers) detector are introduced, in order to verify the photon detection performance and photon resolution ability of SPM detector, SPM photon detection circuit using high speed transconductance amplifier is designed, and the photon detection experiment is studied. The experimental results show that SPM detector has a better photon resolution property.

**Key words:** SPM detector; photon detection; transconductance circuit; photon resolution

光电探测技术作为一种重要的研究手段,在现代科学研究中扮演着重要的角色,广泛地应用于各个领域。目前,科研中用到的光信号的最低强度已达到光子级水平,远低于现有光电探测系统的探测极限,难以满足科学研究的需要。因而,开展光子级别光电探测技术的研究显得十分迫切。

单光子探测(single photon detection, SPD)是对单个光子或者光子能量水平的微弱信号进行探测的技术<sup>[1, 2]</sup>。光子是光的最小能量量子,在信号强度仅为几个光子能量级的条件下,进行光子探测的作用十分巨大。利用光子探测技术可以极大地提高探测系统的探测灵敏度,尤其在生物光子学、医学影像、非破坏性材料检查、国土安全与监视、军事视觉与导航、量子成像以及加密系统等方面有很好的应用前景。

### 1 SPM探测器

从20世纪50年代开始,随着光子探测技术的发展,光子探测器件经历了光电倍增管(PMT)、微通道阵列板(MCP)、盖革雪崩二极管(GAPD)、单像素盖革模式雪崩二极管(SPAD)。其中GAPD具有体积小、成本低、可靠性高、环境适应性强等特点,是目前光子计数设备的主流。但是GAPD的最大缺点是光子计数动态范围小,针对这一问题,俄罗斯研发部门提出采用多个GAPD单元并联,实现光子计数的思路<sup>[3, 4]</sup>,并很快得以实现。目前,能够研制和生产多单元光子计数设备的公司主要有爱尔兰SensL<sup>[5]</sup>、日本滨松、加拿大Zecotek及法国Photonique<sup>[6]</sup>。硅光电倍增管阵列(silicon photo multipliers, SPM)就是一种新型的多单

收稿日期:2012-04-10

基金项目:光电信息控制和安全技术重点实验室基金(9140C1501010901)

作者简介:胡涛(1979-),男,辽宁锦州人,工程师,主要研究方向为信号探测、信号处理和计算机仿真。

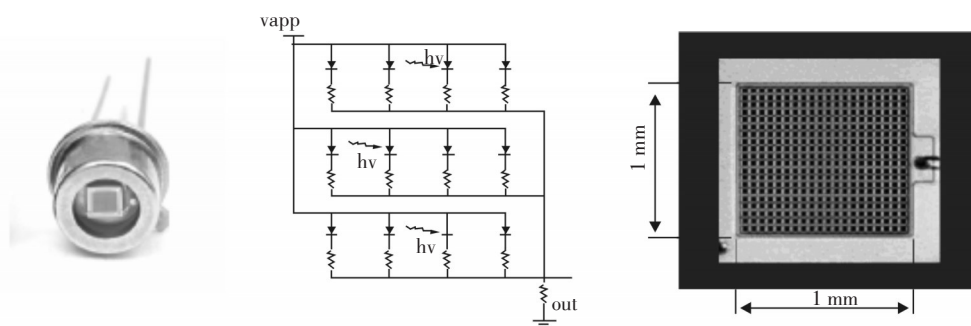


图1 SPM的基本原理及结构图

元光子计数器。

如图1所示,SPM探测器由集成在 $1\text{ mm}^2$ 大小硅片上的一系列APD微元构成,每一个APD微元由一个盖革模式APD和一个大阻值淬灭电阻(quenching resistor, RQ)串联而成,所有这些微元并联在一起,形成一个面阵阵列。当SPM两端加上反向偏压后,每个微元内的APD耗尽层有很高的电场,此时若外界有光子入射进来,会有一定概率激发相应的光电子,产生的光电子在PN结内建电场作用下加速,加速后的光电子获得较大的动能,不断与晶体原子发生碰撞,使共价键中的电子激发形成电子空穴对。高能电子和空穴又在电场中加速,通过碰撞激发出大量的次级电子和空穴,即产生雪崩效应。由于每个APD微元均独立工作,输出的信号是所有微元产生的输出之和,可以根据输出级上的脉冲幅度计算入射的光子数。

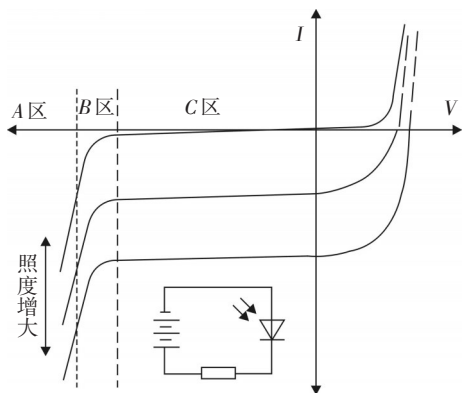


图2 光电二极管典型伏安特性曲线

图2是典型的光电二极管伏安特性曲线,在光电二极管两端施加很小的反向偏压的情况下,光电二极管工作在C区,即单位放大区,光电二极管的增益 $< 1$ ,此时PN结输出的电流为暗电流和表面电流之和;当反向偏压增大,达到某一阈值 $V_{br}$ (反向击穿电压)后,光电二极管工作在B区,即雪崩放大区,光电二极

管的增益从数十到数百之间,此时PN结的输出电流将急剧增加;当反向偏压继续增大,超出 $V_{br}$ (反向击穿电压)后,光电二极管工作在A区,即盖革放大区,光电二极管的增益从 $10^6 \sim 10^9$ ,此时,当有光子照射到PN结后,将输出一个“巨电流”。

为了防止雪崩效应一直发展下去,对元器件造成损伤,可以采用淬灭电路来控制PN结两端偏置电压,使之小于PN结的雪崩电压值,迫使雪崩过程停止。淬灭电路是在电路中接入一个阻值较高的淬灭电阻,随着PN结雪崩效应的加剧,输出电流将逐渐提高,此时淬灭电阻上的电压降将逐渐增大,当淬灭电阻的电压降增大到使PN结两端的电压小于雪崩击穿电压后,就能直接迫使PN结的雪崩效应自动停止<sup>[7]</sup>,如图3所示。

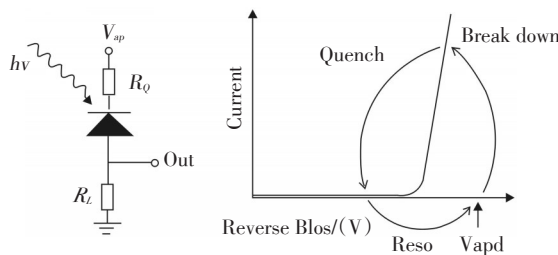


图3 淬灭电路示意图

雪崩效应停止后,光电二极管的结电容开始充电,等待下一个光子到来引发雪崩效应。两次引发雪崩效应的时间间隔称为驻留时间,SPM探测器的驻留时间比较短,通常为皮秒量级<sup>[8]</sup>。

若同时有多个光子分别触发SPM探测器表面不同位置的APD微元(如图4所示),多个微元同时被触发,每个微元独立的产生雪崩倍增电流,由于所有的微元都并联在一起,所以经过电阻 $R_L$ 的电流等于所

有微元的雪崩倍增电流之和。SPM探测器采用大规模半导体集成电路的制作方法,各APD微元之间的均匀性比较好,雪崩倍增电流近似相等,因此,光子触发APD微元的数量可以通过测量输出电压来确定。通常1个微元被触发记为1.p.e(photon equivalent),2个微元被触发记为2.p.e,依此类推,N个微元被触发即记为N.p.e。

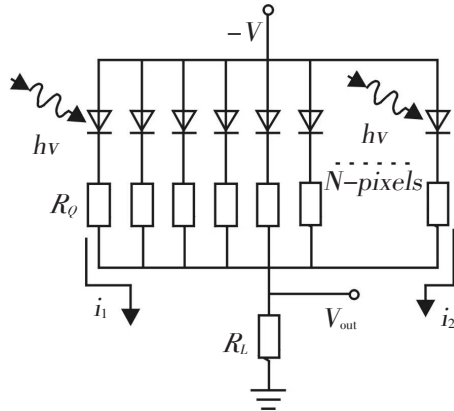


图4 SPM等效电路图

当入射到SPM探测器表面的光子数量较多时,受串扰(cross-talk)、后脉冲效应(after-pulse)等非线性效应的影响,SPM输出的电压值要比实际触发APD微元的个数所产生的电压值要高。SPM探测器的主要参数有:过电压、增益、暗计数率、结电容、动态范围、量子效率、光子探测效率等。

## 2 SPM探测电路

SPM探测电路采用高速跨导放大器OPA656将SPM输出的光生电流转换成电压信号输出,由于SPM探测器和跨导放大器都存在极间分布电容,跨导放大器还存在输入电容,这些电容加在一起形成的总电容用 $C_S$ 表示。 $C_S$ 与反馈电阻 $R_F$ 组成一个滞后网络,引起输出电压相位滞后,容易使放大电路产生自激震荡。此时,需要在反馈电阻 $R_F$ 上并接一个补偿电容 $C_F$ 进行相位补偿,可以使探测电路的稳定性得到改善,如图5所示。补偿电容的大小为

$$C_F \approx 2 \sqrt{\frac{C_S}{2\pi \cdot R \cdot f_T}} \quad (1)$$

为了增加探测系统的增益和信噪比,可以采用增加 $R_F$ 和 $f_T$ 的方法,虽然 $R_F \cdot C_S$ 的数值比较高,但只要跨导放大器的单位增益带宽 $f_T$ 足够大,就不会影响探测电路的带宽和稳定性。

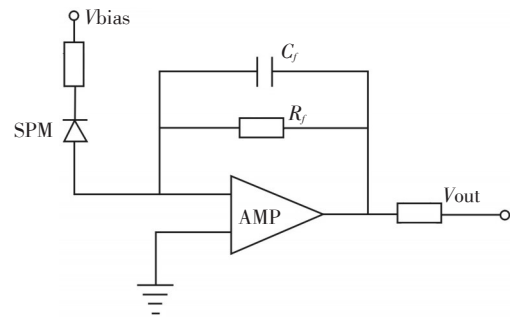


图5 SPM探测电路原理图

## 3 SPM光子探测实验

为了验证SPM探测器的光子探测特性,开展了光子探测实验研究。实验装置如图6所示,采用532 nm激光器作为光源,配合衰减片、窄带滤光片、PIN光电探测器、探测电路等设备,利用示波器对SPM探测器的输出波形进行采集。

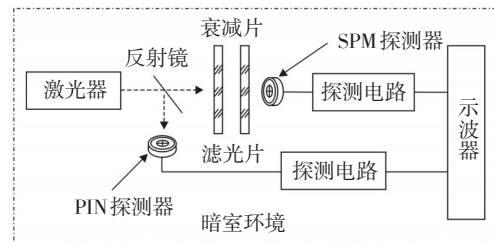


图6 SPM光子探测实验装置示意图

图7所示是SPM探测器的光子响应波形图,其中的曲线代表着APD微元被光子激发产生雪崩效应,1.p.e代表着有1个APD微元被触发,2.p.e代表着有2个APD微元被触发,依此类推,N.p.e代表着有N个APD微元被触发。每条曲线之间的间隔大致是相等的,这是由于每个APD微元产生的均匀性较好,触发过程近似相似,故每个APD微元被触发后,输出的电信号近似相同。由此可以得出结论,SPM探测器的输出具有明显的光子分辨特性。

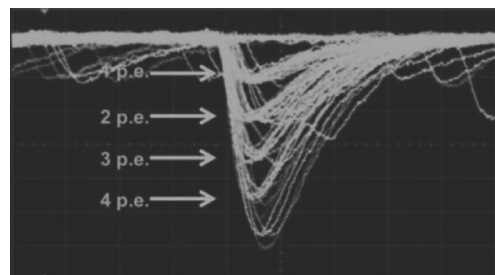


图7 SPM光子响应在示波器的截图

照度均匀,效果也最好,因此在生产过程中采用此种阵列方式可以减少不必要的材料浪费,降低产品的生产成本,提高LED灯具的性价比,为LED照明的普及提供一个方面的借鉴。

### 参考文献

- [1] 公文礼.大功率LED在照明灯具设计中需要解决的问题[J].灯与照明,2008,12:21-24.
- [2] 郑代顺,钱可元.功率型白光LED研究进展[J].中国照明电器,2006(3):1-7.
- [3] 杨光.大功率发光二极管(LED)路灯配光方案[J].光源与照明,2009,12:17-21.
- [4] 张哲娟,杨介信,张燕萍,等.白光发光二极管及其集成光源模块的研究[J].半导体光电,2007,28(4):482-486.
- [5] 吴海彬,何素梅,王昌铃.多LED组合照明设计的关键技术[J].液晶与显示,2009(3):453-457.

(上接第32页)

## 4 结 论

以SPM探测器作为光子探测器件,对其光电探测特性进行分析,并搭建了光子探测实验系统,对SPM探测器的光子探测性能进行实验研究。从实验得出的数据可以看出,SPM探测器是一种性能优良的光子探测器件,与目前光电探测设备中所采用的探测器件(如PIN、APD等)相比较,在探测灵敏度方面具有极大的优势。随着光电探测领域研究的不断深入,可以预见这种器件将会在弱光探测领域发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 刘伟.近红外单光子探测[J].物理,2010,39(12):825-831.
- [2] Amnon Yariv. Optical Electronics in Modern Communica-

(上接第36页)

- [6] Itti L, Gold C, Koch C. Visual attention and target detection in cluttered natural scenes[J]. Optical Engineering,2001,40(9):1784-1793.
- [7] Sun Y, Fisher R. Object-based visual attention for computer vision[J]. Artificial Intelligence,2003,146(1):77-123.
- [8] Itti L, Koch C. A comparison of feature combination strategies for saliency-based visual attention[C]//in SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV, San Jose, CA, 1999 (in press).
- [9] Tsotsos J K, Culhane S M. Modeling visual-attention via se-

- [6] 夏勋力,余彬海,脉镇强.近朗伯光型LED透镜的光学设计[J].光电技术应用,2010,25(1):22-25.
- [7] D Wood. Optoelectronic semiconductor devices [M]. UK: Prentice Hall International, 1994.
- [8] Bahaa E A Saleh, Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics [M]. US: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [9] 胡海蕾,赖爱光,谢树森.基于道路照明的LED阵列光照度分布研究[J].照明工程学报,2009,20(1):78-80.
- [10] Reynolds George O, Develis John B, Thompson Brian J, et al. The new physical optics notebook [M]. San Francisco: SPIE Press, 1989.
- [11] M A Gennert, N Wittels, G L Leatherman. Uniform frontal illumination of planar surfaces: where to place the lamps [J]. Opt. Engng, 1993, 32: 1261-1271.
- [12] 杨光.照明灯具中白光LED阵列的排列及配光[J].灯与照明,2008,32(1):1-4.
- [13] 同济大学应用数学系.高等数学[M].5版.北京:高等教育出版社,2004.

tions[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

- [3] 赵勋杰.光子计数成像原理及其应用[J].红外与激光工程,2003,32(1):42-45.
- [4] Dolgoshein B, Balagura, Buzhan P, et al. Status report on silicon photomultiplier development and its applications [J]. Nucl. Instr. and Meth. A.,2006,563:368-376.
- [5] SPM datasheet. <http://www.ams-technologies.com/>.
- [6] 赵帅.多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J].光学精密工程,2011,19(5):972-976.
- [7] Cova S, Ghioni M, Lacaita M, et al. Avalanche photodiodes quenching circuits for single-photon detection[J]. Applied Optics,1996,35(12):1956-1976.
- [8] Gulinatti P, Maccagnani P, Rech I, et al. 35ps time resolution at room temperature with large area single photon avalanche diodes[J]. Electron.Lett.,2005,41:272-273.

lective tuning[C]//Artif Intel, 1995,78:507-551.

- [10] Barun J, Julesz B. Withdrawing attention at little or no cost: detection and discrimination tasks[C]//Percept Psycho, 1998,60:1-23.
- [11] Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuit[C]// Hum Neurobiol, 1985,4:219-235.
- [12] Treisman A. Features and objects: the fourteenth Barlett memorial lecture[C]//Q J Exp Psychos, 1998,40:201-237.