

文章编号 2095-1531(2015)02-0205-06

利用多像素光子计数器的光学 串话效应提高光子探测效率

刘丽娜¹, 张国青^{2*}

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048;
2. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048)

摘要:通过分析多像素光子计数器(MPPC)的工作原理和其光学串话(OC)效应的特点,提出在使用MPPC输出雪崩信号的幅度或电荷量作为光子计数的参量时,利用MPPC的OC效应能提高MPPC的光子探测效率的观点,并从理论上分析了OC效应对光子探测效率的影响。理论分析结果显示,在这两种光子计数模式下,利用OC效应能明显提高MPPC的光子探测效率。利用本文模型计算得出当MPPC的雪崩单元数M为1600个,忽略OC效应时的光子探测效率等于30%,光学串话概率等于50%,以及单脉冲入射光子数均值为10时,包含OC效应影响的等效光子探测效率可提高50%,达45%左右。该结果对MPPC在天体物理、粒子物理、荧光光谱探测等弱光探测场合的应用有一定指导意义。

关键词:探测器;多像素光子计数器;硅光电倍增器;光子探测效率;光学串话效应

中图分类号:TN366 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150802.0205

Increasing the photon detection efficiency by the optical crosstalk effect of multi-pixel photon counter

LIU Li-na¹, ZHANG Guo-qing^{2*}

(1. School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangg_356@163.com

Abstract: This paper proposes that the photon detection efficiency (PDE) of Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) can be improved by the optical crosstalk (OC) effect when taking the output amplitude or output charge of the avalanche pulses as the parameter of photon counting through analyzing the operating principle and characteristics of the MPPC. The influence of the optical crosstalk effect on the photon detection efficiency is analyzed. The theoretical results show that the photon detection efficiency increases significantly by the optical crosstalk effect of the MPPC under these photon counting modes. According to the results calculated by our model, the equivalent photon detection efficiency taking the OC effect into account is increased by about 50% (i. e. : reaching 45%), if the total avalanche pixel number of MPPC is 1600, the photon detection ef-

收稿日期:2014-12-12;修订日期:2015-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11405119);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2014JQ8364);陕西省教育厅自然科学基金资助项目(No. 12JK0975)

efficiency regardless of the OC effect is 30% , the OC probability is 50% and the mean photon number is 10 per light pulse. This result is significant in the application of low light level detection such as astrophysics, particle physics, and fluorescence spectroscopy.

Key words: detector; multi-pixel photon counter; silicon photomultiplier; photon detection efficiency; optical crosstalk effect

1 引言

近年来,一种在常温下具有高效脉冲光子数分辨能力的单光子探测器—多像素光子计数器(Multi-Pixel Photon Counter, MPPC)逐渐受到重视^[1]。它由数百至数万个直径为几到几十微米的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)单元阵列集成在同一个单晶硅片上构成,每个APD单元串联着数百千欧的电阻用于及时淬灭雪崩击穿产生的大电流。所有APD单元共用一个取信号电极,并且工作在盖革模式下。在这种模式下,APD单元的偏置电压高于击穿电压若干伏,当某一个APD单元接收到一个光子时,所产生的光生载流子将有一定概率触发雪崩击穿,雪崩击穿后的光电转换增益可达 $10^5 \sim 10^7$ 。由于每一个APD单元具有完全相同的结构和淬灭电阻,因此在发生雪崩时,雪崩放电的增益,即输出信号的幅度均相同。当光强不太强时,MPPC总的输出信号幅度正比于同时发生雪崩击穿的APD单元的数目,因此在示波器上可以看到雪崩脉冲有清晰的倍数层次关系。由于这种器件可以像光电倍增管一样进行单光子探测,所以也被称作硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM)。

MPPC具有目前最优异的光子数分辨能力,没有像线性模式APD那样大的增益起伏或过噪声,具有远超光电倍增管(PMT)的单光子分辨本领^[1],结实耐用,体积小、易于集成,工作电压低,不受磁场干扰,可靠性好、成本低廉等诸多优点,在高能物理^[2]、天体物理^[3]、核医学成像^[4]以及生命科学^[5]等弱光信号探测领域^[6-7]的部分场合已经成为传统光电倍增管的替代品,在量子通讯^[8]、单光子源的表征^[9-10]等方面也有非常重要的应用前景。

然而,虽然MPPC已得到了较多的应用,其动

态范围和光子探测效率(Photon detection efficiency, PDE)始终是一对矛盾。MPPC的动态范围是指同一时刻能够探测的光子数的多少,它和MPPC的单元数密度成正比,动态范围越大,MPPC的单元数密度就越高,单元之间的间隔(或叫死区, dead area)所占的比例就越高,MPPC的PDE就越小;反之,动态范围越小,MPPC的单元数密度就越低,单元之间的间隔(死区)所占的比例就越小,MPPC的PDE就越大。在实际应用中,只能根据需求来折中选择动态范围和PDE。2010年,作者报道的体电阻淬灭结构的MPPC虽然在一定程度上缓解了这一矛盾,但是由于单元之间不可避免存在死区,为了保证单元之间电学隔离,也必须有一定间隔,从而限制了光敏区所占的比例(即几何填充因子)。因此,当MPPC的动态范围大,也就是高的单元密度情形下,仅仅依靠增加几何填充因子来提高PDE的方法受到限制。倘若有提高PDE的其他方法,将会缓解这一瓶颈。在现有文献中,光学串话(Optical Crosstalk, OC)效应被认为是一种寄生效应,是被研究者尽量避免的^[1],因此如何减小MPPC的OC效应成为一个研究目标。这是很多应用场合不可或缺的,例如需要准确得知入射光子数的统计分布信息以及成像等情况。然而,在关心MPPC输出信号幅度或者电荷量的应用场合,OC的存在反而会增加MPPC的等效PDE,这对MPPC探测光子是有利的,因此无需采取措施降低MPPC的光学串话率,也就无需做光学串话隔离槽等结构,单元之间间隔可以做的更小,单元密度更高,在保持MPPC高密度,即高动态范围的情况下,利用OC效应反而可以提高MPPC的PDE。基于这一观点,本文提出利用MPPC的OC效应提高MPPC的探测效率的模型,从理论上分析了OC效应对PDE的影响。

2 理论分析

现有文献认为 MPPC 激发的单元数和入射脉冲光子数的关系为^[1]:

$$f(\mu) = M(1 - e^{-\frac{\mu}{M}}), \quad (1)$$

式中, μ 为单脉冲光子数的均值, $f(\mu)$ 为 μ 个光子平均激发的 MPPC 的单元数, M 为 MPPC 的总单元数, η 为忽略 OC 效应时, 一个光子照射到 MPPC 上时被探测到的概率。所谓 OC 效应, 是指 MPPC 其中一个盖革 APD 单元在发生雪崩时, 产生的近红外光子被临近单元吸收而引起临近单元也发生雪崩的现象^[1,11]。为了表征 MPPC 光学串话程度的大小, 引入光学串话概率的概念^[1], 记为 p_{ct} , 其定义是 MPPC 的某一个 APD 单元发生雪崩时, 平均触发临近单元发生雪崩的概率, 由下式确定:

$$P_{ct} = \frac{R_{1.5}}{R_{0.5}}, \quad (2)$$

式中, $R_{1.5}$ 和 $R_{0.5}$ 分别是将光电子数等效阈值设为 1.5 p. e. 和 0.5 p. e. (photoelectron equivalent) 高度时, 测得的 MPPC 的暗计数率 (Dark Count Rate, DCR)。

设 MPPC 每个单元的雪崩增益均值为 G_0 , 则

$$\begin{aligned} f(n) &= f(n-1) + \eta \left[1 - \frac{f(n-1)}{M} \right] = \\ &= f(n-2) + \eta \left[1 - \frac{f(n-2)}{M} \right] + \eta \left[1 - \frac{f(n-1)}{M} \right] = \\ &= f(n-3) + \eta \left[1 - \frac{f(n-3)}{M} \right] + \eta \left[1 - \frac{f(n-2)}{M} \right] + \eta \left[1 - \frac{f(n-1)}{M} \right] = \\ &= f(n-4) + \dots = \eta \left[\frac{x(1-x^n)}{1-x} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $x = 1 - \frac{\eta}{M}$ 。其中用到了已知条件:

$$f(0) = 0, f(1) = \eta.$$

式(6)化简后得到:

$$f(n) = M \left[1 - \left(1 - \frac{\eta}{M} \right)^n \right]. \quad (7)$$

由于 $\eta \ll M$ 总是满足, 所以 $\left(1 - \frac{\eta}{M} \right)^n \approx e^{-\frac{\eta n}{M}}$ 始终成立。于是式(7)可简化为:

$$f(n) = eG_0 M \left(1 - e^{-\frac{\eta n}{M}} \right), \quad (8)$$

每个单元的雪崩电荷量均值为 eG_0 , e 为元电荷的电量。于是 μ 个光子照射到 MPPC 上产生的雪崩电荷量均值为:

$$Q(\mu) = eG_0 M \left(1 - e^{-\frac{\mu}{M}} \right). \quad (3)$$

易知 MPPC 的等效光子探测效率为:

$$PDE = M \left(1 - e^{-\eta \mu / M} \right) / \mu, \quad (4)$$

该式虽然考虑到了 MPPC 输出雪崩信号的饱和效应, 但忽略了 OC 效应。由于 OC 效应的存在, 使得 MPPC 输出的雪崩电荷量大于式(3)的值, 因此需要对式(3)进行修正。下面从概率论的角度, 分析 MPPC 输出的雪崩电荷量的递推关系。设 n 为某次入射光脉冲中已经到达 MPPC 的光子数, $f(n)$ 为这 n 个光子平均激发的 MPPC 的单元数, 则当第 $n+1$ 个光子照射到 MPPC 上时, 总共激发的单元数 $f(n+1)$ 的期望值为:

$$f(n+1) = f(n) + \eta \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right], \quad (5)$$

式中, $1 - \frac{f(n)}{M}$ 为某个 APD 单元还没有被激发的概率 (即未发生雪崩的概率), 则 $\eta \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right]$ 为该 APD 单元被成功激发雪崩的概率。

式(5)即为 $f(n+1)$ 和 $f(n)$ 之间的递推关系。由式(5)得:

显然式(8)和文献中的式(1)是一致的。不过式(8)还未考虑到 OC 效应。由于 OC 的存在, 使得每个光子成功触发一个单元的概率有所增加, 变为 $\eta(1+p_{ct})$, 其中 η 和 p_{ct} 分别为 MPPC 的单光子探测概率和 OC 概率。于是递推关系式(5)应修正为:

$$f(1+n) = f(n) + \eta(1+p_{ct}) \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right]. \quad (9)$$

通过类似式(6)的推导过程,可以得出:

$$f(n) = M \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\eta(1+p_{ct})}{M} \right]^n \right\}. \quad (10)$$

于是 μ 个光子照射到MPPC上产生的雪崩电荷量均值为:

$$Q(\mu) = eG_0M \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\eta(1+p_{ct})}{M} \right]^\mu \right\}. \quad (11)$$

根据式(11),易知考虑了OC的MPPC的等效光子探测效率为:

$$PDE = M \left\{ 1 - \left[1 - \eta(1+p_{ct})/M \right]^\mu \right\} / \mu. \quad (12)$$

进一步分析发现,该式依然忽略了一个问题:当入射光子数较多,不满足入射光子数 $n \ll M$ 时,考虑某个正发生雪崩的单元A,它的临近单元B恰好也正在发生雪崩的概率会增加,当OC光子被单元B吸收时,B雪崩输出的电荷量并不会增加,因此相当于该OC事件无效,总的结果是使得等效OC概率 p_{ct-eq} 降低。 p_{ct-eq} 可以表示为:

$$p_{ct-eq} = \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right] p_{ct}. \quad (13)$$

将式(9)中的 p_{ct} 替换为 p_{ct-eq} ,并将式(13)代入式(9)得:

$$f(1+n) = f(n) + \eta \left\{ 1 + \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right] p_{ct} \right\} \left[1 - \frac{f(n)}{M} \right]. \quad (14)$$

该递推关系既考虑了OC,又考虑了MPPC雪崩单元数的饱和效应以及光学串话MPPC单元数饱和效应的相互影响。从理论上来说,该模型更加精确,然而该式无法推出解析式,需要通过数值运算来计算出 $f(n)$ 与 n 的关系,从而计算出等效光子探测效率(PDE)。

3 结果与讨论

为了比较未考虑OC效应的式(4)和考虑了OC效应的式(12)以及同时考虑OC效应和饱和效应及其相互影响的式(14)所得PDE的大小,将3个式中的参数取相同的数值,取 $M=1600$, $\eta=30\%$, $\mu=10$,研究 p_{ct} 取不同值时,3个式所得探测效率的差别。图1为3种模型下光子探测效率随

p_{ct} 变化的函数关系曲线。图中方形点连成的线为不考虑OC效应,只考虑信号饱和效应时(传统模型),光子探测效率随光学串话概率的变化曲线;圆形点连成的线为孤立地考虑OC效应和饱和效应时,PDE随 p_{ct} 的变化曲线;三角形点连成的线为同时考虑到OC效应和饱和效应的相互影响时,PDE随 p_{ct} 的变化曲线。由图可以看出,随着 p_{ct} 的增加,第1种模型(传统模型)得出的PDE不发生变化,后两种模型得出的PDE均单调增加。在 $p_{ct}=0.5$ 时,后两种模型得出的PDE比第一种模型(传统模型)高出约50%,说明OC效应使得MPPC的等效光子探测效率显著增加。从图中还可以看出,后两种模型得出的PDE几乎完全相同。说明在入射光子数不多时(\sim 每个脉冲10个光子),可以忽略OC效应和饱和效应的相互影响,第2种模型(式(12))已足够精确。在实际应用中可以利用式(12)简便地进行MPPC的参数表征,避免了利用第3种模型繁琐的数值计算。

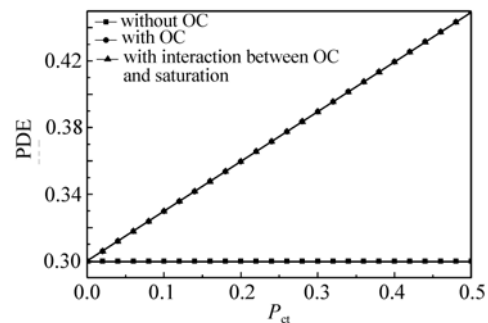


图1 3种模型下光子探测效率随 p_{ct} 变化的函数关系曲线。图为取 $M=1600$, $\eta=30\%$, $\mu=10$ 所得的曲线

Fig. 1 Dependence of the photon detection efficiency (PDE) on optical crosstalk probability (p_{ct}) of three models. Here we choose $M=1600$, $\eta=30\%$, $\mu=10$

图2为 $M=1600$, $\eta=30\%$, $p_{ct}=50\%$ 时,3种模型下PDE与入射光子数的关系。图中曲线的标识形状与图1的含义相同。由图2(a)可以看出,随着入射到MPPC上的光子数的逐渐接近并超过MPPC的总单元数 M ,雪崩信号的饱和效应均有体现,等效PDE均有所降低,但后两种模型

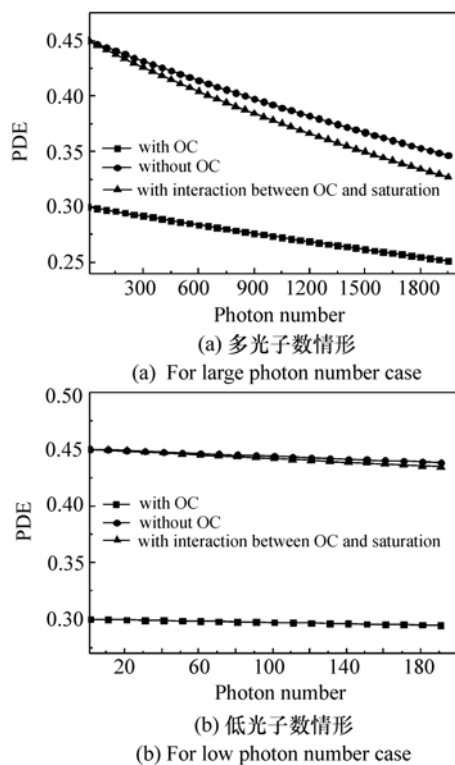


图2 3种模型下PDE与入射光子数的关系

Fig. 2 PDE versus incident photon number of three models

得到的PDE始终比传统模型大。由图2(b)可以看出,当入射光子数在10个光子量级时,后两种模型算得的PDE几乎没有任何差别。随着入射光子数增加,第2种模型与第3种模型逐渐发生偏离,当入射光子数为1800时,两者的PDE相差了2%。说明在大光子数入射(接近MPPC饱和)时,利用OC效应提高MPPC的PDE的效果有所降低。不过这种情况比较少见,在MPPC大部分

的应用场合,MPPC均工作在远离饱和的状态,即照射到MPPC的单脉冲平均光子数 $\ll M$,因此第2种模型(式(11)、(12))可以适用于大部分场合,方便地进行MPPC的PDE的表征。

需要注意的是,模型2并不仅是PDE的表征计算式,重要的是反映了在以MPPC输出信号幅度或者电荷量为光子计数参量的情况下,由于OC效应的存在,客观上确实提高了MPPC的PDE。这种光子计数模式在高能物理中和天体物理中闪烁体的荧光探测、随机光探测等场合具有较重要作用^[12-13]。在这些应用场合,依靠MPPC输出雪崩信号的幅度或总电荷量进行后续的信号分析,这时MPPC的OC效应并不会有害于信号处理,反而增加了实际的光子探测效率,这对于实际应用是有利的。

4 结 论

本文提出了电荷积分光子计数模式下,3种光子探测效率的模型。第1种模型未考虑光学串话效应;第2种模型孤立地考虑了光学串话效应和MPPC的雪崩信号饱和效应;第3种模型还考虑到了这两种效应的相互影响。理论模型的数值计算结果显示,关注MPPC输出信号幅度或电荷量的应用时,利用OC效应能显著提高MPPC的光子探测效率。在入射单脉冲光子数较小的情况下,可以忽略这两种效应的相互影响,第2种模型已足够精确。该结果对MPPC在闪烁体的荧光探测等弱光探测领域的应用有一定意义。

参考文献:

- [1] RENKER D, LORENZ E. Advances in solid state photon detectors[J]. *JINST*, 2009, 4(P04004): 1-56.
- [2] KORPAR S, DOLENEC R, HARA K, *et al.*. Silicon photomultiplier as a detector of Cherenkov photons[J]. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 2008, 595: 161-164.
- [3] KUDENKO Y. The near neutrino detector for the T2K experiment[J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2009, 598: 289-295.
- [4] BRAEM A, CHESI E, JORAM C, *et al.*. Wavelength shifter strips and G-APD arrays for the read-out of the z-coordinate in axial PET modules[J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2008, 586: 300-308.
- [5] MIK Ł, STEPIEŃ J, JASTRZAB M, *et al.*. System for low intensity fluorescence light measurement based on silicon photomultiplier[C]. The International Conference of Signals and Electronic Systems, Gliwice, Poland, 2010: 383-386.
- [6] 张合勇, 郭劲, 赵帅, 等. 基于多像素光子计数器的赝热光场 Fano 因子研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008010-

1-1008010-6.

ZHANG H Y, GUO J, ZHAO SH, *et al.*. Research on fano factor for pseudo-thermal light field based on multi-pixel photon counter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(10):1008010-1-1008010-6. (in Chinese)

[7] 赵帅, 郭劲, 刘洪波, 等. 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(5):972-976.

ZHAO SH, GUO J, LIU H, *et al.*. Application of multi pixel photon counters to single photon detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011(5):972-976. (in Chinese)

[8] ZHANG G Q, ZHAI X J, ZHU C J, *et al.*. The silicon photomultiplier-a new detector for photon-number-resolving at room temperature[J]. *International J. Quantum Information*, 2012, 10(3):1230002-1-1230002-9.

[9] SHIELDS A J. Semiconductor quantum light sources[J]. *Nat. Photonics*, 2007, 1:215-223.

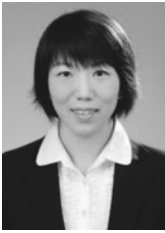
[10] EISAMAN M D, FAN J, MIGDALL A, *et al.*. Single-photon sources and detectors[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, 82:071101-1-25.

[11] BUZHAN P, DOLGOSHEIN B, ILYIN A, *et al.*. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 610:131-134.

[12] VAN DAM H T, SEIFERT S, VINKE R, *et al.*. Silicon photomultiplier response model[J]. *IEEE*, 2009:2362-2364.

[13] VAN DAM H T, SEIFERT S, VINKE R, *et al.*. A Comprehensive model of the response of silicon photomultipliers[J]. *IEEE*, 2010, 57(4):2254-2266

作者简介:



刘丽娜(1985—),女,黑龙江绥化人,硕士,助理工程师,2009年于天津师范大学获得学士学位,2012年于北京师范大学获得硕士学位,主要从事弱光探测技术及其应用方面的研究。E-mail: baofeng00004@163.com



张国青(1983—),男,青海民和人,博士,副教授,硕士生导师,2006年、2011年于北京师范大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电子学、光电探测等方面的研究。E-mail: zhangg_356@163.com