

文章编号 1004-924X(2011)05-0972-05

多像素光子计数器在单光子探测中的应用

赵 帅^{1,2*}, 郭 劲¹, 刘洪波¹, 冯 强¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用
国家重点实验室, 吉林 长春 130031; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高多像素光子计数器(MPPC)的光子探测效率,量子效率和动态探测范围,研究了MPPC的光子探测性能,特别是光子分辨能力。以MPPC作为光子探测器件,采用半导体制冷降噪技术及信号外触发技术将其温度稳定在15℃,暗噪声降低为 6.5×10^{-4} count/pulse;采用统计学方法,利用泊松分布拟合MPPC输出信号。结果显示,衰减后的入射脉冲光强分布符合泊松分布的特性。根据MPPC的光子探测效率,分析计算出MPPC的能量分辨率;综合脉冲分布特性及能量分辨率,得出了入射到MPPC上的光脉冲能量的平均值。实验结果表明,MPPC在532 nm波长下,能量分辨率为 1.96×10^{-18} J;不同衰减倍率下,入射到MPPC的光脉冲平均光子数分别为1.665和4.201;显示MPPC具有光子分辨能力,适用于大动态范围的弱光探测。

关键词:光子计数器;多像素;光子分辨;能量分辨率;泊松分布

中图分类号:TH724;TP211.6 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111905.0972

Application of multi-pixel photon counters to single photon detection

ZHAO Shuai^{1,2*}, GUO Jin¹, LIU Hong-bo¹, FENG Qiang¹

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
* *Corresponding author, E-mail: ZS040148@yahoo.com.cn*

Abstract: To improve the Photon Detection Efficiency(PDE), quantum efficiency and the dynamic detection range of a Multi-pixel Photon Counter(MPPC), its detection characteristics, especially photon number resolving capability were researched. By taking the MPPC as a photon detecting device and utilizing the Peltier effect and external trigger technology, the temperature of MPPC was controlled down to 15℃ and the dark counts of MPPC was reduced to 6.5×10^{-4} count/pulse. Then, by using the Poisson distribution, the output signal of MPPC was fitted in the statistical method. Obtained results indicate that the intensity of laser pulses obeys the Poisson distribution. According to the PDE given in the datasheet, the energy resolution of MPPC was calculated. Furthermore, combined the energy resolution and intensity distribution, the average energy of laser pulses was obtained. The experimen-

收稿日期:2010-07-14;修订日期:2010-08-06.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所第3期创新工程资助项目(No. O98Y32C100)

tal results indicate that the MPPC has the energy resolution about 1.96×10^{-18} J in 532 nm and the average photon number of laser pulse after attenuation is 1.665 and 4.201, respectively. In conclusion, the MPPC is capable of photon resolving and suit for the ultralow light detection in a large dynamic range.

Key words: photon counter; multi-pixel; photon resolving; energy resolution; Poisson distribution

1 引 言

高光子探测效率、高量子效率的光子计数器是弱光探测领域研究的热点,近年来,工作在盖革计数模式下的雪崩二极管探测器(Geiger-mode Avalanche Diode, GAPD)以其独特的光子计数原理得到了广泛应用。相比传统的光子计数设备(如 PMT、MCP 等),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。不过 GAPD 的光子计数动态范围小,限制了 GAPD 应用范围的推广。针对这一问题,俄罗斯研发部门提出了使用多 GAPD 并联完成光子计数的思路^[1],此后,世界上许多研发部门相继开展了多 GAPD 的光子计数器研究。目前研制生产多像素光子计数设备的公司主要有爱尔兰的 SensL 公司、日本滨松公司、加拿大 Zecotek 公司及法国 photonique 公司等。

日本滨松公司于 2007 年推出了多像素光子计数器(Multi-pixel Photon Counter, MPPC),其一经推出就受到广泛关注,各种应用报道层出不穷。E. Pomarico 等人^[2]使用 MPPC 在室温条件下探测近红外光信号,利用 980 nm 与 1 559 nm 激光经过频率上转换,得到了 600 nm 的光信号,对 1 559 nm 近红外光信号探测能量分辨率达到了 3.2×10^{-18} J; Zhang. G. Q 等人^[3]使用 MPPC 探测器,实现了对拉曼信号的探测;Y. Mizumura 等人则使用 MPPC 探测器作为成像大气切伦科夫望远镜的探测单元,实现了对大气中高能射线信号的探测^[4]。MPPC 的高增益、低噪声、低偏置电压、高探测概率、低功率消耗、高可靠性等优点,使其在远距离激光测距技术、激光雷达技术、超快光谱学、量子光学、原子物理学等现代科研领域均有潜在应用价值^[5-8]。

本文利用 MPPC 器件测试了 MPPC 输出信

号特性,根据测量结果,反演出了激光器输出脉冲的光子数分布特性。

2 原理与实验

2.1 MPPC 工作原理

MPPC 是一种新型的光子计数设备,由一系列集成在 1 mm^2 基底的 APD 像素构成,如图 1、图 2 所示,每个 APD 工作在盖革模式下,每个 APD 的输出并联到输出电路上,如图 3 所示。当光子入射到工作在盖革模式下的 APD 时,按一定几率产生一个光电子,该电子将在耗尽区产生诱导雪崩效应,产生一个恒定的电脉冲输出,这时

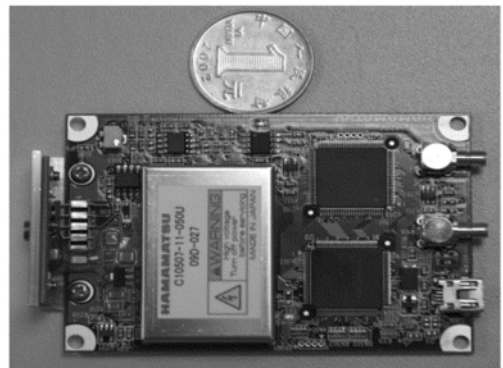


图 1 MPPC 模块实物图

Fig. 1 Photo of MPPC module

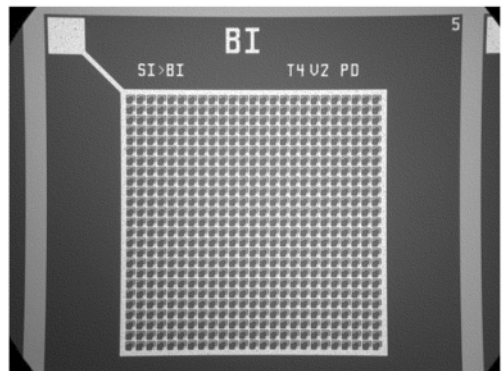


图 2 MPPC 探测器表面结构

Fig. 2 Surface structure of MPPC

称这个像素处在“点燃”状态。雪崩后, APD 处在猝灭状态下, 其他入射光子将不能再引起雪崩效应。因此, 每个像素点只能提供光子的“有”、“无”信息。由于输出端口并联, 每个像素输出的电脉冲叠加成为一个巨脉冲, 通过测量巨脉冲的电量或者幅值, 可以计算出被“点燃”像素的个数, 反演出入射光子的分布特性。

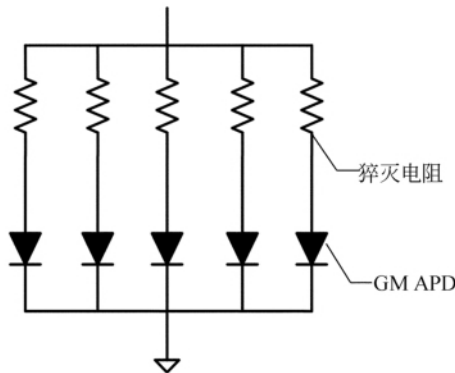


图 3 MPPC 等效电路示意图

Fig. 3 Scheme of MPPC equivalent circuit

2.2 实验装置

实验装置图如图 4 所示, 激光器发射激光脉冲经过可调谐衰减器和固定衰减器入射到 MPPC, MPPC 输出信号与示波器相连, Si PIN 探测器的作用是示波器提供触发信号。为了减少背景噪声, 在 MPPC 入口处安装一块带宽 (FWHM) 为 10 nm 的窄带滤光片, 滤除大部分背景噪声。使用 Peltier 制冷器为 MPPC 探测器制冷, 以降低 MPPC 的暗噪声^[6-7], 实验中将 MPPC 的工作温度设定在 15 °C, 对应的暗噪声为 141.3 kHz(设定阈值为 0.5 等效光子)。

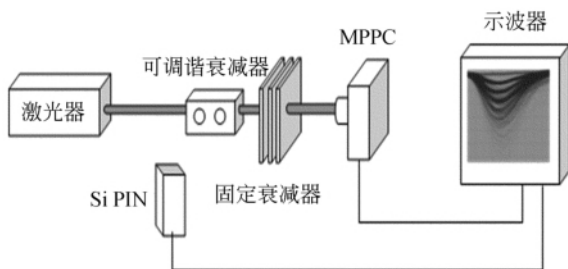


图 4 MPPC 光子探测实验装置实验图

Fig. 4 Experimental setup of photon detection with MPPC

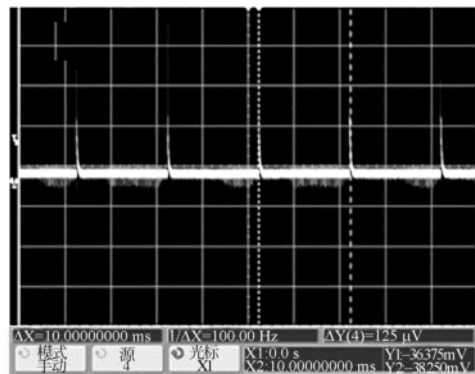
实验中使用的激光器为国科激光公司的 Valiant 4ω-100 型激光器, 其输出波长为 532 nm, 重频为 100 Hz, 单脉冲能量为 3 mJ, 脉宽为 4.64

ns; MPPC 为日本滨松公司生产的 C10507-11-025U, 像素个数为 1 600 元, 光敏面积为 1 mm², 填充因子为 30.8%, 532 nm 处的光子探测效率为 19%^[5]; 示波器为安捷伦公司研制的 MSO 7104B 型示波器, 其探测带宽为 1 GHz, 采样率为 4 GHz; Si PIN 探测带宽为 1 GHz, 上升沿为 170 ps。

3 结果与讨论

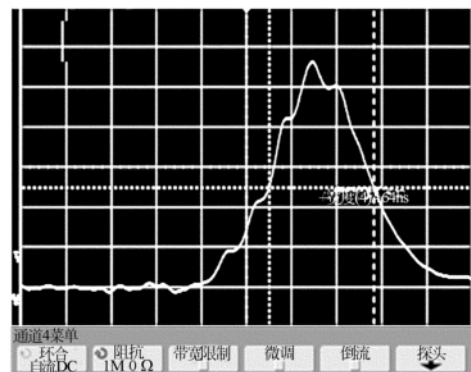
3.1 输出波形

激光器以 100 Hz 的重频发射激光脉冲, 其输出特性如图 5 所示; 调节固定衰减片的数量及可调谐衰减器的衰减, 将光脉冲衰减到光子量级后, 入射到 MPPC 上。Si PIN 探测激光脉冲的散射光, 提供示波器的触发信号。探测到的示波器波形如图 6 所示。利用触发信号, 在每个信号光脉冲周期内, 暗计数为 6.5×10^{-4} count/pulse。



(a) 激光脉冲序列

(a) Laser pulse sequence



(b) 单脉冲波形

(b) Sing pulse waveform

图 5 激光器输出脉冲波形图

Fig. 5 Output waveforms of laser pulse

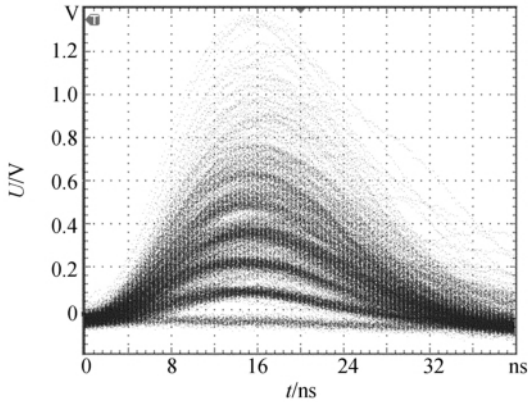


图 6 示波器显示的 MPPC 输出波形图

Fig. 6 Output waveforms of MPPC from oscilloscope

由于每个雪崩的像素输出的电信号近似相同, MPPC 的输出波形经过重叠后, 分别代表着 1, 2, 3 个等像素同时发生雪崩。每条迹线之间的间隔约为 100 mV, 说明 MPPC 每个像素的增益均匀性比较一致。

3.2 能量分辨率

MPPC 属于多像素结构, 每个像素接收到光子而产生雪崩的概率可以用光子探测效率(PDE)表示, 雪崩的像素个数与入射光子数的关系^[5]可表示为:

$$N_{\text{Fired}} = N_{\text{tot}} \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{tot}}}\right) \right], \quad (1)$$

式中, N_{Fired} 为发生雪崩的像素个数, N_{tot} 为 MPPC 总像素个数, PDE 为光子探测效率, N_{photon} 为入射光子数。在 $N_{\text{Fired}} \ll N_{\text{tot}}$ 的条件下, 对式(1)求微分, 可求出 MPPC 的能量分辨率。实验使用的激光器为 532 nm 激光, 其单光子能量为 3.73×10^{-19} J, 能量分辨率为 1.96×10^{-18} J。相对于普通光子计数器只能探测光子事件有无的情况, MPPC 更加适合高灵敏度、大动态范围的探测环境。

3.3 光子统计

相干光被衰减到光子量级时, 光子分布特性将遵循高斯分布^[8-9]:

$$P(x=k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中 $P(x=k)$ 为 k 个光子出现的概率, λ 为平均光子数。经过 MPPC 后产生的光电子噪声主要由两项构成, 一部分是由于 MPPC 探测器积分时间内光强分布特性造成的“光子集束噪声”, 另一

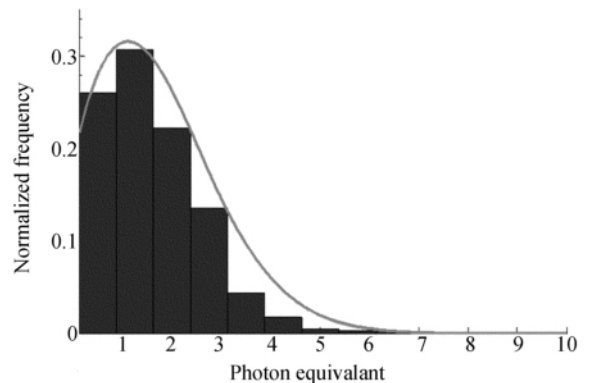
部分则是由 MPPC 探测过程中的量子效应引起的, 这部分噪声称为散弹噪声。

实验中, 调整动态衰减器的衰减倍率, 如图 7 所示, 分别采集 3 200 个波形与 1 693 个波形作为光子分布的统计样本, 经过直方图分析, 每个直方图代表着相同输出电压信号出现的相对概率, 并利用泊松分布拟合^[10], 得出两个衰减倍率下平均光子数分别为:

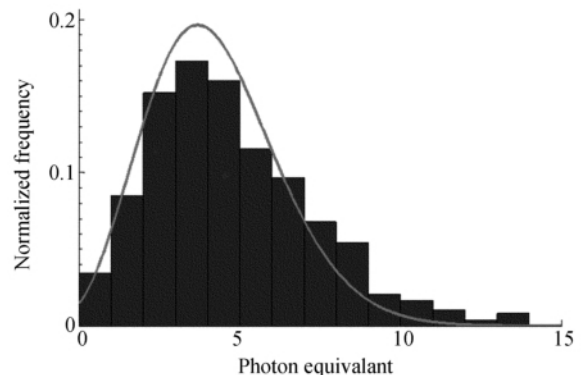
$$\begin{cases} \lambda_1 = 1.665 \text{ photon} \\ \sigma_1^2 = 1.665 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \lambda_2 = 4.201 \text{ photon} \\ \sigma_2^2 = 4.201 \end{cases}. \quad (4)$$

可以看出激光脉冲衰减到光子量级后, 光分布特性遵从泊松分布, 可通过光子计数信号特征反演出信号关系。图 7 分析结果表明, 达到 MPPC 表面的平均光信号能量分别为 3.26×10^{-18} J 与 8.23×10^{-18} J。当光强很微弱时, 通常“光子集束噪声”很小, 可忽略不计, 因此, MPPC 探测器探测到的噪声主要为散弹噪声, 通过对 MPPC 输出波形的统计分析, 即可得到入射光子的散弹噪声的噪声特性。



(a) $\lambda_1 = 1.665$



(b) $\lambda_2 = 4.201$

图 7 探测信号统计直方图

Fig. 7 Histograms of detected signals

4 结 论

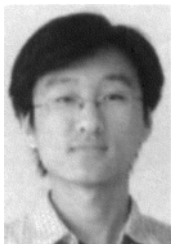
本文以 MPPC 作为光子计数设备,对其性能进行实验研究。研究发现 MPPC 具有优秀的光子分辨能力,通过触发电路的设置,可将每个信号光周期内的暗计数噪声降低到 6.5×10^{-4}

count/s。实验测得 MPPC 的光信号能量分辨率达到 1.96×10^{-18} J,入射到 MPPC 表面的平均光能量分别为 3.26×10^{-18} J 与 8.23×10^{-18} J。从实验得出数据可以看出,MPPC 是一种性能优良的光子计数器件,随着研究的深入,MPPC 将会在弱光探测领域发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] DOLGOSHEIN B, BALAGURA V, BUZHAN P, *et al.*. Status report on silicon photomultiplier development and its applications [J]. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 2006,563:368-376.
- [2] POMARICO E, SANGUINETTI B B, THEW R, *et al.*. Room temperature photon number resolving detector for infrared wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2010,18:10750-10759.
- [3] ZHANG G Q, HU X B, YANG R, *et al.*. Fast identification of trace substance by single-photon detection of characteristic Raman scatterings with gated coincidence technique and multipixel photon counters [J]. *App. Opt.*, 2010, 49:2601-2605.
- [4] MIZUMURA Y, KODANI K, KUSHIDA J, *et al.*. Study of the basic characteristics of PPD (SiPM) for the next generation of IACTs [C]. *Proceedings of the 31st Icrc, ODZ*, 2009:1-4.
- [5] HITOMI K, SATO E, NOMIYAC S, *et al.*. Evaluation of the multi-pixel photon counters with inorganic scintillators [J]. *SPIE*, 2009, 6706, C1-C8.
- [6] FULCONIS J, ALIBART O, O'BRIEN J, *et al.*. Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2007, 99:120501(1-4).
- [7] HAMAMATSU. C10507-11 Series Datasheet[E/OL]. <http://www.hamamatsu.com>.
- [8] ZHANG J, THEW R, BARREIRO R, *et al.*. Practical fast gate rate ingaas/inp single-photon avalanche photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95:091103 (1-3).
- [9] AKIBA M, TSUJINO K, SATO K, *et al.*. Multipixel silicon avalanche photodiode with ultralow dark count rate at liquid nitrogen temperature [J]. *Opt. Express*, 2009, 17:16885-16897.
- [10] AFEK I, NATAN A, AMBAR O, *et al.*. Quantum state measurements using multipixel photon detectors [J]. *Phys. Rev. A*, 2009,79:0438301-0438306.

作者简介:



赵 帅(1981—),男,博士研究生,2000年、2004年于南开大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电探测及光电对抗方面的研究。E-mail:zs040148@yahoo.com.cn



刘洪波(1956—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学仪器研发设计工作。E-mail:hbliu120@sina.com



郭 劲(1964—),男,研究员,博士生导师,1986年于吉林工学院获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电对抗与光电跟踪方面的研究。E-mail:guojin@ciomp.ac.cn



冯 强(1978—),男,吉林长春人,助理研究员,硕士研究生,2003年于吉林大学获学士学位,主要从事电子学设计的研究。E-mail:fengqq1378@163.com