

硅雪崩二极管光子辐射特性的实验研究*

邵军虎 黄涛 王晓波 赵延霆 肖连团 贾锁堂**

(量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西大学物理电子工程学院,太原 030006)

摘要 利用计数统计测量的方法,对工作在击穿状态下的硅雪崩光电二极管(APD)光子辐射的暂态特性以及计数统计特性进行了实验研究.将 APD 辐射光子的计数统计曲线与相应 Poisson、热光场进行比较,发现其在采样时间为 10 ms 的情况下计数统计服从 Super-Poisson 分布.另外实验给出了 APD 光子辐射的光谱特性.

关键词 雪崩光电二极管;光子辐射;光子统计;光谱

中图分类号 TN312+.7 O431

文献标识码 A

0 引言

近年来,雪崩光电二极管探测器以其体积小、工作电压低、测量波段范围宽以及在近红外波段有较高灵敏度等一系列的优点^[1],在弱光场测量、光子计数等相关领域中得到广泛应用^[2-5].

雪崩光电二极管(APD)是一种具有内部放大作用的光电二极管,工作时 PN 结加反向偏置电压.当入射光子在 P 区被吸收产生电子空穴对后,这些载流子在渡越耗尽区时将会被强电场加速而获得极大的动能,通过碰撞半导体的晶格使之电离产生二次电子空穴对.这些二次电子空穴对又被加速产生更多的电子空穴对,从而形成载流子的雪崩倍增效应,倍增因子可达 10^8 以上^[6],因此使用 APD 探测器进行单光子计数测量成为目前最常用的手段.对于雪崩二极管的性能参数和使用方法的实验研究也有许多的报道^[7-11].

然而,由于半导体材料自身电致发光的效应,使得 APD 在伴随着载流子被雪崩倍增放大的同时产生光子辐射现象.最早对这一现象进行报道的是德国的 Kurtsiefer 小组^[12].为了解决在量子密钥通信中 APD 的光子辐射造成探测器之间的串扰,以及带来的使窃密者有机会从返回信道的光子中窃取信息降低通信安全性等问题,他们对 APD 的光子辐射光谱进行了测量研究^[12].另外在单光子干涉、长光纤的使用以及光子关联测量等的实验中,由于光子辐射返回到探测器的二次光都将对测量带来扰动影响;在探测器阵列中,探测器的光子辐射还会造成临近探测器间的串扰.

本文利用单光子计数器(SPCM)进行计数统计测量,首次对工作于反向击穿状态下 APD (HAMAMATSU S3884)的光子辐射暂态特性以及光子计数统计特性进行了测量研究.此外,通过单色

仪对 APD 的光子辐射进行了光谱测量,获得了相应的光谱特性曲线.

1 实验装置

实验装置如图 1.我们采用的 APD 为 HAMAMATSU 公司的 Si APD(型号为 S3884),其有效感光面直径 $\phi = 1.5$ mm,波长响应范围 400 ~ 1000 nm,雪崩击穿电压 159.7 V(25°C),暗电流小于 166 pA.探测器的响应峰值为 800 nm,在增益 $M = 1$ 时的量子效率 $QE = 75\%$.

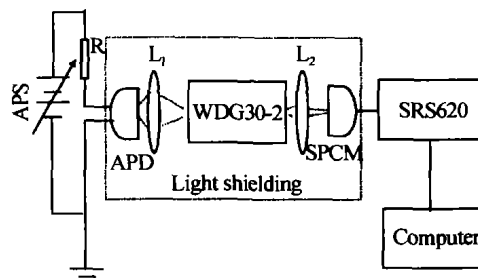


图 1 APD 光子辐射的统计测量实验装置图

Fig. 1 Schematic of optical and instrumentation setup used to measure the photon statistics for APD photon emission. 可调电压源 (APS) 用于改变 APD 的反向工作电压.

调节 WDG30-2 型平面光栅单色仪,使不同波长的光进入探测器.透镜 L_1 用来收集 APD 辐射的光子;透镜 L_2 把光子束聚焦.实验过程中采取光屏蔽处理,以消除背景杂散光对计数带来的影响.另外,在测量过程中还必须避免单色仪的限位红外光学开关对测量计数值的影响.

这里采用的探测器为 SPCM-AQR-15 的单光子计数模块,其输出为 TTL 电平,测量波长范围在 400 ~ 1060 nm;死区时间约 50 ns;平均暗计数为 50 cps.

时间间隔计数器 (SRS620) 用来对单光子计数器的输出进行计数. SRS620 工作在计数模式 (Count mode) 下,采样时间 (Sample Time) 为 10 ms,用 Labview 编程远程控制 SRS620,进行数据采集.

2 实验结果与分析

2.1 单光子探测器暗计数的测量

首先对 SPCM-AQR-15 单光子计数器的暗计

* 国家基金(60378004)、山西省留学基金资助、高等学校博士学科点专项科研基金(20040108002)和国家人事部留学人员科技活动优秀项目

** Tel:0351-7018489 Email:laserspe@sxu.edu.cn

收稿日期:2004-01-15

数进行统计测量.

对暗计数测量中采集到 11267 个数据,其时域特性如图 2 插图所示,其平均值为 48.2 cps. 数据统计分析的结果如图 2 中的数据点.

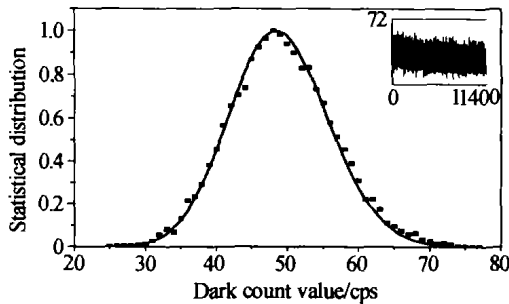


图 2 暗计数统计分布特性(散点)与 Poisson 分布特性(实线),插图为相应的时域信号

Fig. 2 The characteristic of statistical distribution of dark counts (scatter) and Poisson distribution (solid line). The inset is the signal of time domain

根据 Poisson 分布公式

$$P(n) = (\lambda^n e^{-\lambda} / n!) \quad (1)$$

式中, λ 对应为光子计数的平均值.

这里取 $\lambda = 48.2$ cps, 计算获得相应 Poisson 分布的理论曲线如图 2 实线所示.

图 2 中, 实验测量数据与理论曲线相吻合, 说明暗计数满足 Poisson 分布. SPCM 的这种基于 Poisson 分布的暗计数统计特性对光(子)源的 Super-Poisson 以及 Sub-Poisson 特性的测量和分析都具有重要意义^[13].

2.2 APD 光子辐射的暂态特性

实验中对 APD 施加阶跃电压, 研究了其光子辐射的暂态特性. 图 3 中数据点为光子计数值随时间的变化特性, 用指数函数 $y = y_0 + A_1 e^{-\frac{x}{\tau}}$ 对其进行拟

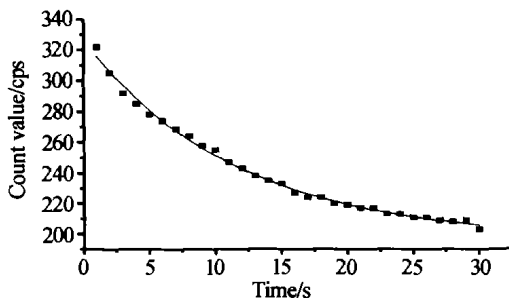


图 3 APD 光子辐射的暂态特性(实线为拟合曲线)

Fig. 3 The temporal characteristic of the photon emission from APD (the solid line is the fitted data)

合, 拟合结果如图 3 中实线所示, 获得其弛豫时间 $\tau = 11.56$ s.

2.3 APD 辐射光子的计数统计特性

在进行 APD 自发辐射测量的过程中, 将单色仪的波长固定在 750 nm. 通过调节可调电压源的输出电压, 使 APD 的反向电压为 162.8 V (高于击穿电压 3.1 V), 相应反向电流为 1.59 mA. 对 APD 在这一状态下的辐射光子进行测量, 得到时域特性如图 4 中插图, 其光子计数平均值为 26,224 cps, 统计特性如图 3 数据所示.

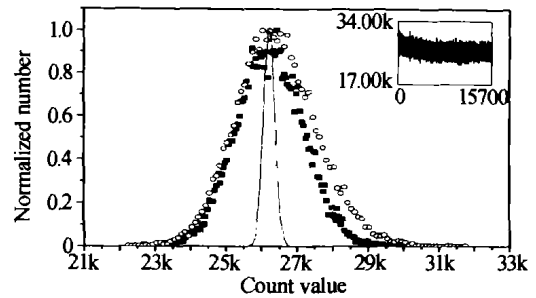


图 4 APD 光子辐射统计分布(■数据点)与 Poisson 光场(实线)以及热光场统计分布(○数据点)的比较. 插图为 APD 光子辐射计数的时域信号

Fig. 4 Comparison of APD photon emission statistic distribution (■ scatter) with corresponding Poisson distribution (solid line) and thermal field statistic distribution (○ scatter). The inset is the time domain signal of the photon emission of APD

实验中还选择了汞灯作热光源, 对热光场进行统计测量. 调节光路使光子计数值的大小与 APD 自发辐射光子计数的平均值相接近, 对此时的热光场进行光子计数统计测量, 得到统计结果如图 4 数据点.

另外, 根据式(1), 取 $\lambda = 26,224$ cps, 计算得到相应的理论 Poisson 分布曲线如图 4 中实线.

由于对 APD 自发辐射、热光场的光子计数测量中, 其平均值均为 26,224 cps, 远大于单光子计数器的暗计数平均值 48.2 cps. 考虑到暗计数服从 Poisson 分布, 在这里暗计数对数据分析的结果没有影响.

由图 4 中 APD 辐射光子的计数统计分布与 Poisson 分布、热光场计数统计分布在归一化的情况下的比较, 发现 APD 辐射光子的计数统计分布曲线较 Poisson 曲线宽, 而与相应热光场的统计分布接近. 由此我们可以得出 APD 的光子辐射更接近热光场所服从的 Super-Poisson 分布.

改变 APD 的反向工作电压, 实验结果发现 APD 的辐射光子具有相同的计数统计分布特性.

2.4 APD 辐射光子的光谱特性

图 5 是在 APD 工作电流为 1.14 mA 的状态下用单色仪扫描, 获得的 APD 自发辐射光子计数的光谱特性. 插图为单光子探测器的探测效率曲线, 将测量计数值减去 SPCM 暗计数平均值得原始数据

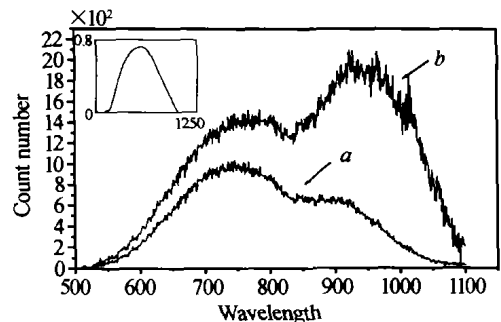


图 5 APD 自发辐射的光谱响应曲线, 插图为单光子探测器对于波长的探测效率曲线

Fig. 5 Fluorescence spectrum for APD photon emission. The inset is the detection efficiency curve of SPCM

a ,再经探测效率曲线校正得到修正曲线 b . 由图中 APD 光子辐射的光谱特性图,实验发现在 1.14 mA 的反向电流的条件下,APD 自发辐射光场范围在 500 ~ 1100 nm,在波长为 737 nm 和 944 nm 的附近出现峰值.

改变 APD 的反向工作电压,实验发现 APD 的自发辐射的光谱特性曲线保持一致.

3 结论

雪崩光电二极管探测器已经被广泛地应用在各种微弱光场探测,单分子、单原子、量子点等辐射源光子计数测量领域中. 实验中对工作于击穿状态下的 APD 探测器自身辐射光子的暂态特性和光子计数统计特性进行了测量. 研究结果表明其暂态特性曲线为指数衰减曲线,工作在不同反向工作电压下的 APD 的光子辐射统计特性相似,其分布与热光场的 Super-Poisson 分布更为接近. 我们对其光谱特性进行了测量,发现其峰值响应波长在 737 nm 和 944 nm 附近,波长范围在 500 ~ 1100 nm.

参考文献

- Ekkehard O, Christian S, Ivo F, et al. Silicon avalanche photodiodes as detectors for correlation. *Rev Sci Ins*, 1998, **69**(10):3516 ~ 3523
- Damien S, Gregoire R, Andre S, et al. Photon counting for quantum key distribution with peltier cooled InGaAs/InP APDs. *J Mod Opt*, 2001, **48**(13):1967 ~ 1981
- Daniel F Yu, Fessler J A. Mean and variance of single photon counting with dead time. *Phys Med Biol*, 2000, **45**:2043 ~ 2056
- 黄涛,赵延霆,赵建明,等. 谐波探测在 Cs 原子饱和吸收光谱中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(10):1247 ~ 1249
- Huang T, Zhao Y T, Zhao J M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1247 ~ 1249
- 尹王保,汪丽蓉,赵延霆,等. 靶材料 BRDF 现场模拟测量. *光子学报*, 2003, **32**(4):473 ~ 476
- Yin W B, Wang L R, Zhao Y T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):473 ~ 476
- 宋登元,王小平. APD、PMT 及其混合型高灵敏度探测器. *半导体技术*, 2000, **25**(3):5 ~ 12
- Song D Y, Wang X P. *Semiconductor Technology*, 2000, **25**(3):5 ~ 12
- Lacaita A, Zappa F, Cova S, et al. Single-photon detection beyond 1 μm : performance of commercially available InGaAs/InP detectors. *Appl Opt*, 1996, **35**(16):2986 ~ 2996
- Henri D, Pierre D, Bruno D, et al. Photon counting techniques with silicon avalanche photodiodes. *Appl Opt*, 1993, **32**(21):3894 ~ 3900
- Grayson T P, Wang L J. 400 ps time resolution with a passively quenched avalanche photodiode. *Appl Opt*, 1993, **32**(16):2907 ~ 2910
- Haapalinn A, K rh  P, Lkonen E. Spectral reflectance of silicon photodiode. *Appl Opt*, 1998, **37**(4):729 ~ 732
- 梁创,廖静,梁冰,等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器. *光子学报*, 2000, **29**(12):1142 ~ 1147
- Liang C, Liao J, Liang B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12):1142 ~ 1147
- Christian K, Patrick Z, Sonja M, et al. The breakdown flash of silicon avalanche photodiodes - backdoor for eavesdropper attacks. *J Mod Opt*, 2001, **48**(13):2039 ~ 2047
- Treussart F, Alleaume R, LeFloch V, et al. Direct measurement of the photon statistics of a triggered single photon source. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(9):1 ~ 4

Measurement of the Photon Emission Characteristic of Silicon Avalanche Photodiode

Shao Junhu, Huang Tao, Wang Xiaobo, Zhao Yanting, Xiao Liantuan, Jia Suotang

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi Univ., Taiyuan 030006

Received date:2004-01-15

Abstract The temporal and photo-statistic characteristics of silicon APD photon emission were got experimentally by measuring its photon statistics under breakdown condition. Compared with corresponding Poisson distribution and thermal field photon statistic distribution, the photo-statistic distribution of APD photon emission with 10 ms bin time was found to be Super-Poisson distribution. The fluorescence spectrum of the APD photon emission was also achieved in experiment.

Keywords Avalanche Photodiode; Photon emission; Photo-statistics spectrum

Shao Junhu was born in 1980, received the bachelor degree from Shanxi University in 2002. And now he is studying for his M. S. degree there. His research interests include laser spectroscopy and quantum cryptography.