

雪崩光电二极管的雪崩发光串扰研究

高艳磊^{1,2} 芦小刚¹ 白金海¹ 王 梦^{1,2} 吴令安¹ 王如泉¹ 庞兆广² 杨世平² 傅盘铭¹ 左战春¹

¹中国科学院物理研究所,北京凝聚态物理国家实验室,北京 100190

²河北师范大学,物理科学与信息工程学院,河北 石家庄 050018

摘要 在使用时间关联单光子计数的量子保密通信、量子密码术等量子光学领域中,雪崩光电二极管(APD)拥有广泛的应用。然而在其工作过程中,吸收层接收到光子形成载流子,载流子个数在倍增层进行指数型增益,每个载流子通过P-N结节点均有一定概率发出光子,发出的光子在一定条件下会串扰进入另一个雪崩二极管。在盖革模式下进行单光子探测时,这种串扰光子会严重影响时间关联单光子计数的实验结果。研究了APD雪崩原理,实验中做出了串扰峰对比度比较高的现象,分析了影响串扰峰间距和形状的因素,提出通过光隔离规避串扰现象,并通过实验验证了这种避免串扰方法的可行性。

关键词 量子光学;雪崩光电二极管;串扰;光隔离;时间相关单光子计数

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0727004

Avalanche Luminescence Crosstalk between Avalanche Photodiodes

Gao Yanlei^{1,2} Lu Xiaogang¹ Bai Jinhai¹ Wang Meng^{1,2} Wu Ling-an¹ Wang Ruquan¹
Pang Zhaoguang^{1,2} Yang Shiping^{1,2} Fu Panming¹ Zuo Zhanchun¹

¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²College of Physics and Information Engineering, Heibei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract Avalanche photodiode (APD) has a wide range of applications for time-correlated single-photon counting in quantum secure communication, quantum cryptography, and other quantum optics fields. However, during APD operation, incident photons in the absorption layer create carriers, which then multiply exponentially. As each carrier goes through the P-N junction node there is a certain probability that it will cause the emission of another photon. Under certain conditions this newly emitted photon can generate crosstalk in the other avalanche photodiode, thus affecting the time-correlated single-photon counting results when detecting single photons in the Geiger mode. Through experimentally reproducing the phenomenon of relatively high contrast crosstalk interference we analyze the factors influencing the crosstalk peak, including peak spacing and shape. A scheme using optical isolation is proposed to avoid the crosstalk, and its feasibility is verified experimentally.

Key words quantum optics; avalanche photodiode; crosstalk; optical isolation; time-correlated single-photon counting

OCIS codes 270.5565; 270.5290; 040.1345

1 引 言

目前,弱光探测在生物医学、空间科学、环境辐射检测、精密分析、量子通信等领域有着广泛的应用^[1-11]。尤其在现在研究较热的量子保密通信领域,单光子探测是其中必不可少的关键环节。而半导体技术的发展

收稿日期:2014-12-30;收到修改稿日期:2015-03-19

基金项目:国家自然科学基金(11274376, 61308011)、国家重点基础研究发展计划(2013CB922002, 2010CB922904)

作者简介:高艳磊(1991—),男,硕士研究生,主要从事单光子探测、量子信息存储等方面的研究。E-mail:gaoyanlei100@163.com

导师简介:左战春(1978—),女,博士,副研究员,主要从事非线性光学、量子信息存储等方面的研究。

E-mail:zc_zuo@iphy.ac.cn(通信联系人)

为单光子探测提供了重要的探测材料。

为了实现光电转换,雪崩二极管工作时需要满足增益机制:在雪崩二极管上加一个反向的高于击穿电压几个伏特的高电压,从而使得受光子激发出的载流子在半导体中运动打出新的电子-空穴对,产生载流子雪崩增益。假如持续增加偏压,雪崩增益会导致二极管工作不稳定,甚至损坏二极管。为了避免这种情况,在每个光子引发雪崩后需要一个雪崩的淬灭抑制电路将二极管进行恢复。这种工作机制常被称为盖革模式^[12-13]。通常情况下,抑制方式有以下几种:被动抑制、主动抑制、混合抑制及门控抑制。使用的硅基单光子探测器(Perkin-Elmer SPCM-AQR型)的抑制方式为主动抑制,这种方式的优点在于它的死时间比被动抑制的短很多,大大增加了探测效率。然而,热载流子在p-n结反向偏压的情况下会发光已经是一个已知的现象^[14],即APD载流子在雪崩增益过程中会同时产生少量的宽光谱光子辐射。近年来,有很多关于记录APD雪崩发光的研究^[15-18],具有代表性的是使用CCD对发光进行直观观测,实验设计较为复杂,成本很高,而且基本上都是微观上对APD发光点大小、发光的位置、发光机制模型等进行细致的研究,没有在实践中提出规避串扰方案。本课题组的方案是用两个APD,其中一个APD发光被另一个检测到,从而也可以达到提取APD雪崩发光信号的目的,实验设计简单、精确度较高(直观反映出发光强度随时间的变化规律,精度达12 ps)、可操作性强,实验中创新性地提出了宏观上避免这种串扰的可行方案,为量子信息实验同时使用两个APD测量数据关联性时提供依据。因为这种发光被另一个APD所接收带来外来的关联峰对比度较高,严重影响感兴趣的数据关联的测量。在量子保密通信中这种发光辐射可造成APD之间的串扰,使窃密者有机会从返回信道的光子中窃取信息,使通信安全性受到威胁。

本文研究了工作在主动抑制方式下Si-APD产生的光子辐射造成的串扰现象。在测量时间相关单光子计数的实验中应该规避这种串扰现象。

2 实验设计

首先使用两个硅雪崩单光子探测器(SPCM-AQR),观察到工作在盖革模式下的二极管热载流子发出的光对于一个时间相关光子计数实验的干扰影响。在本实验中通过一定条件设计光路来记录这个串扰现象。实验装置如图1所示。来自钠灯发出的589 nm,589.6 nm双谱线波长的光通过光纤分束器进入两个单光子探测器APD1和APD2,分束器到APD1和APD2的光纤长度均为55 cm。探测器输出的电脉冲信号分别连接时间相关单光子技术卡的开始(start)通道和停止(stop)通道。APD2加一段6 m长的同轴电缆,以对信号进行延时后再输入停止通道。实验中硅基雪崩单光子探测器模块均为Perkin Elmer公司SPCM-AQRH-15-FC型号。时间相关单光子技术卡为B&H公司SPC-130型号,测量来自两个通道(CFD作为Start通道,Sync作为Stop通道)的某一时间差时到来的光子数。由于APD的输出为一正的正TTL信号,在数据采集卡之前需通过衰减器、脉冲反相器连接,使之转换为负的李M脉冲,同时满足SPC-130的输入脉冲电压范围(-50 mV至-1 V)要求。

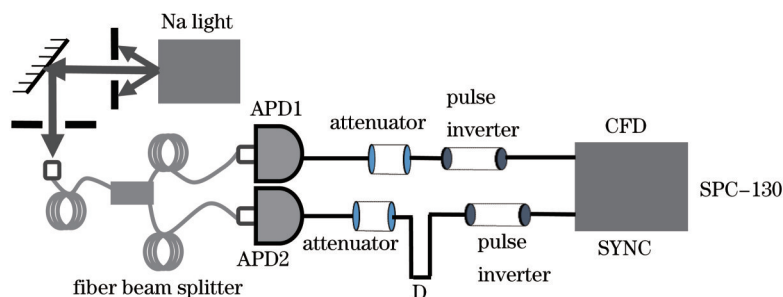


图1 钠灯作为光源测得APD串扰实验图。左侧为定做的多模1×2光纤分束器,可将光强均分为50%:50% Attenuator: 20 dB

Fig.1 Taking sodium lamp as light source, experimental setup measuring APD crosstalk. Left side is fiber beam splitter that is for multimode fiber (1×2), which can make the light intensity divided into 50%:50%. Attenuator: 20 dB

首先观察单光子探测器接收光子时雪崩输出波形。图2中(a)为方波输出、(b)为三角波输出。输出波形由探测器内部的整形电路决定,三角波电压具有更窄的半高宽度。APD1参数:死时间:29.6 ns;暗计数:33 c/s;最大计数率:27.4 MHz。APD2参数:死时间:20.7 ns;暗计数:39 c/s;最大计数率:37.5 MHz。

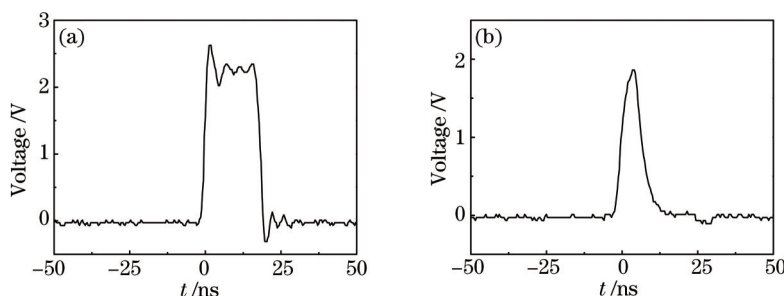


图2 APD雪崩输出信号。(a) APD1雪崩输出方波脉冲信号,脉冲宽度:18.4ns;(b)APD2雪崩输出三角波脉冲信号,脉冲宽度:6.8 ns

Fig.2 APD avalanche output signal. (a) APD1 avalanche output square-wave pulse signal, pulse width: 18.4 ns;
(b) APD2 avalanche output triangular-wave pulse signal, pulse width: 6.8 ns

3 实验结果、解决方案

当APD1接收光子发生雪崩时,发出的光(650~1100 nm)大部分会返回到光纤分束器的左半部分,但仍有一小部分会反射到APD2。同理,APD2接收光子也会出现这个过程,即有少量光子反射到APD1。由于探测是单光子量级的,所以很微弱的光对系统也会造成很大的影响。实验结果如图3所示,其中两个峰的间距为18 ns。左峰是由于APD1探测到来自于APD2雪崩过程发出的光子产生的,右峰恰好相反(由于SPCM板卡工作在反转启-停模式^[19]下,在该模式下横坐标时间轴也是反转的,即横坐标时间轴50 ns处对应真实时间的零点,时间轴零点对应真实时间50 ns处)。根据报道^[16,20],每次雪崩会发出的光子数目大约为 $10^3\sim 10^4$ 个。一个典型的雪崩脉冲电流持续约为10~20 ns,伴随着将有 $10^7\sim 10^8$ 个载流子穿过结点,因此保守预估载流子的发光效率约为 10^{-5} 。可以看出,在单光子量级上雪崩发光较强,有少量光子被另一个探测器探测到也会出现较强的关联峰。通过对比实验:将光纤分束器换成两根独立光纤分别接收来自钠灯光源的光,然后再接到两个探测器上(这样可以避免探测器发出的光进入到另一个探测器),结果只有噪声,没有任何关联峰产生,如图4所示。实验结果验证了两个关联峰是由两个探测器雪崩期间的发光辐射现象造成的。同其他相关领域实验方案对比,本实验方案同样可以得到Si发光的信号,而且得到的信号强度较高、方法简单、可操作性强,主要使用了两个APD以及一个时间相关单光子技术卡完成测量实验。接下来研究了串扰峰间距、形状的影响因素以及提出了一种规避这种串扰峰的具体措施。

发生串扰时,两个峰之间的间距与两个探测器之间的光纤长度、探测器的性能以及SPC-130的参数设置均有一定关系。实验研究了光纤长度对串扰峰间距的影响。在光纤分束器和APD2之间加一根1 m的多模石英玻璃材质光纤后再测试串扰峰(相当于光纤分束器接1 m光纤再接到APD2上,APD1前的接法不变)。Si-APD发光辐射光谱的波长范围为650~1100 nm,中心波长为850 nm^[21]。石英玻璃光纤的折射率n用塞耳迈耶尔(Sellmeier)公式^[22]计算为:

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2}, \quad m = 3, \quad (1)$$

式中 ω_j 是谐振频率, B_j 是第j个谐振强度,计算得到 $n(1100\text{ nm})$ 、 $n(650\text{ nm})$ 分别为1.4492、1.4565,光纤长度为1 m时,其延时分别为4.8301 ns、4.8551 ns,仅相差0.025 ns,所以由APD发光辐射的光波长不同引起的峰的位置和形状相对于其他因素影响可忽略。取其发光密度最大的波长位置850 nm处,由 $n=c/v$,得出1 m光纤延时为4.8417 ns。即APD1雪崩发光到达APD2相比于原来多了4.84 ns的延时,峰的位置移动4.84 ns。同理另一个峰的位置也移动4.84 ns,结果如图5所示。两峰间距相比之前(图3所示)宽度增加 $4.84\text{ ns} \times 2 = 9.68\text{ ns}$ 。

串扰峰的形状可以由雪崩过程中的电流大小解释。一个典型的雪崩二极管雪崩过程中电流大小随着时间的变化关系如图6所示^[21]。电流的大小跟载流子的数目有关,载流子的数目与发光强度成正比(发光效率约为 10^{-5} ,之前已经讨论),因此电流大小和发光强度成正比,这将导致串扰峰随时间变化的形状和电流的形状相近(这里不同波长以及光子渡越时间的变化造成的误差为次要因素),符合预期结果。

在实验过程中应当避免这种串扰现象的发生。方法有多种,主要是光隔离,通过优化光路,改善光路性

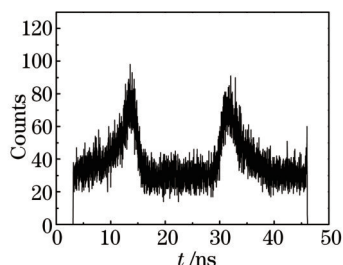


图3 APD发光辐射引发串扰谱线

Fig.3 Crosstalk spectrum caused by APD luminous radiation

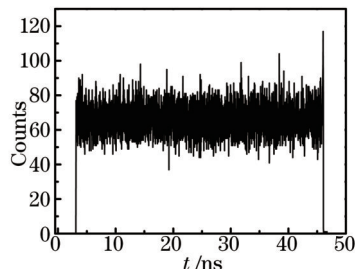


图4 隔离处理,避免APD发光辐射相互影响,得出谱线

Fig.4 Spectrum avoiding mutual influence by APD luminous radiation with isolation

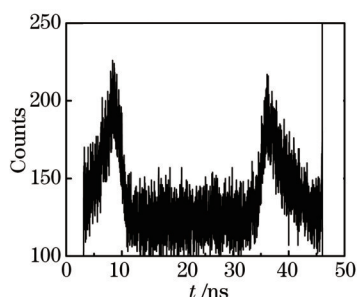


图5 在APD2前添加1 m光纤延时,测得APD1和APD2之间串扰谱线

Fig.5 Crosstalk spectrum between APD1 and APD2 when a 1 meter long optical fiber is added before APD2

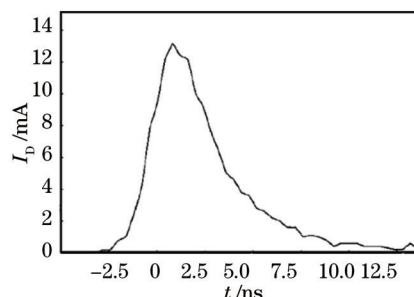


图6 APD雪崩过程中雪崩电流随时间的变化关系(文献[22])

Fig.6 Changing of the avalanche current in the process of APD avalanche (reference [22])

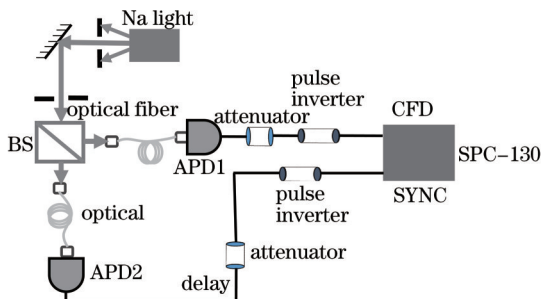


图7 利用自由空间分束器的时间相关光子计数实验。BS:50:50分束器; optical fiber:多模光纤,长度均为1 m。探测器APD、SPC-130、钠灯、反射镜等器件如图2

Fig.7 Time-correlated single photon counting experiment with free space beam splitter. BS: 50:50 beam splitter; optical fiber: multimode fiber, length is 1 meter. APD, SPC-130, sodium light, mirrors are the same as in Fig. 2

能等途径使APD雪崩发光辐射不会通过光路反射到另一个APD。本实验中,将图2所示的光纤耦合器改为自由空间分束器BS(图7)可以很好地避免串扰现象。这样,APD发出的光在出射光纤位置处出射角度各不同,很难通过光路进入另一APD,关联峰消失,类似于图4所示。

4 结 论

雪崩二极管单光子探测器已被广泛应用在各种弱光探测领域,而在量子相关领域实验中防止用于符合测量的两个Si-APD探测器之间可能发生的串扰现象是至关重要的;在实际的实验中应该在设计光路的时候考虑到有可能出现串扰的情况。分析了串扰形成的原理及其影响,并提出了通过光学隔离方案可避免探测器之间的串扰现象。

参 考 文 献

1 Sun Xiaoli, M A Krainak, J B Abshire, *et al.*. Space-qualified silicon avalanche-photodiode single-photon-counting modules[J]. J Mod Opt, 2004, 51(9): 1333-1555.

- 2 Zhu Feng, Wang Qin. Quantum key distribution protocol based on heralded single photon source[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0627002.
朱 峰, 王 琴. 基于指示单光子源的量子密钥分配协议[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0627002.
- 3 Hu J T, Li L S, Yang W D, *et al.*. Linearly polarized emission from colloidal semiconductor quantum rods[J]. Science, 2001, 292(5524): 2060–2063.
- 4 M A Karami, A A Sani, M H Ghormishi. Tunneling in submicron CMOS single-photon avalanche diodes [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 012501.
- 5 Yan Qirong, Zhao Baosheng, Lin Yong'an, *et al.*. Quantum random source based on single photon pulse random time [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0327001.
鄢秋荣, 赵宝升, 刘永安, 等. 基于单光子脉冲时间随机性的光量子随机源[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0327001.
- 6 W P Risk and D S Bethune. Quantum cryptography using autocompensating fiber-optic interferometers[J]. Opt Photon News, 2002, 13(7): 26–32.
- 7 F Stellari, F Zappa, S Cova, *et al.*. High-speed CMOS circuit testing by 50 ps time-resolved luminescence measurements[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(12): 2830–2835.
- 8 Wang Hongpei, Wang Guanglong, Qiu Peng, *et al.*. Design and characteristics analysis of single photon detector based on quantum-dots field effect transistor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0118001.
王红培, 王广龙, 邱 鹏, 等. 量子点场效应晶体管单光子探测器的设计与特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0118001.
- 9 D Comelli, C D Andrea, G Valentini, *et al.*. Analyzing integrated circuits at work with a picosecond time-gated imager[J]. Opt Express, 2005, 13(25): 10075–10084.
- 10 Huang Jianhua, Wu Guanghe, Zeng Heping. Study of 1.5GHz harmonics ultrashort pulse gated InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2), 0204001.
黄建华, 吴光和, 曾和平. 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0204001.
- 11 Shen Shanshan, Chen Qianhe, He Weiji, *et al.*. Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10), 1012001.
沈姗姗, 陈钱和, 何伟基, 等. 基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10), 1012001.
- 12 S Cova, A Longoni, G Ripamonti. Active-quenching and gating circuits for single-photon avalanche diodes (SPADs)[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1982, 29(1): 599–601.
- 13 S Cova, S Lacaita, M Ghioni, *et al.*. 20-ps timing resolution with single-photon avalanche diodes[J]. Rev Sci Instrum, 1989, 60(6): 1104–1110.
- 14 Roger Newman. Visible light from a silicon p-n junction[J]. Phys Rev, 1955, 100(2): 700–703.
- 15 J Bude, N Sano, A Yoshii. Hot-carrier luminescence in Si[J]. Phys Rev B, 1992, 45(11): 5848–5856.
- 16 M L Knoetig, J Hose, R Mirzoyan. SiPM avalanche size and crosstalk measurements with light emission microscopy[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61(3): 1488–1492.
- 17 R Miroyan, R Kosvia, H G Moser. Light emission in Si avalanche [J]. Nucl Instrum Meth Phys Res A, 2009, 610(1): 98–100.
- 18 B F Aull, D R Schuette, D J Young, *et al.*. Detection statistics in Geiger-Mode avalanche photodiode Quad-Cell arrays with crosstalk and dead time[J]. IEEE Sens J, 2015, 15(4), 2133–2143.
- 19 Shuichi Kinoshita, Hironobu Ohta, Takashi Kushida. Subnanosecond fluorescence-lifetime measuring system using single photon counting method with mode-locked laser excitation[J]. Rev Sci Instrum, 1981, 52(4): 572–575.
- 20 A Lancaita, S Cova, A Spinelli, *et al.*. Photon-assisted avalanche spreading in reach-through photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 1993, 62(6): 606–608.
- 21 C Kurtziefer, P Zarda, S Mayer, *et al.*. The breakdown flash of silicon avalanche photodiodes—back door for eavesdropper attacks?[J]. J Mod Opt, 2001, 48(13):2039–2047.
- 22 D Marcuse. Light Transmission Optics[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

栏目编辑: 刘丰瑞