

用于高速量子密码系统的 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器的研制

梁晓磊¹ 蒋文浩¹ 刘建宏² 张 军² 陈增兵² 金 革¹

(¹中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026)

(²合肥微尺度物质科学国家实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要 随着量子密码领域的快速发展,近红外单光子探测器的研究已经成为该领域的研究重点和技术制高点。报道了一种基于正弦门控与滤波技术的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (APD) 高速单光子探测器,门控频率达到 1.25 GHz。在探测效率为 10.3% 时,暗计数概率为 1.3×10^{-6} /gate,后脉冲概率为 5.6×10^{-5} /ns。这种高速单光子探测器将大幅度提升量子密码系统的两个关键指标——密钥率和传输距离,为下一代高速量子密码系统的实用化应用奠定了基础。

关键词 探测器;单光子探测;正弦门控滤波技术;InGaAs/InP 雪崩光电二极管;量子密码

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0818001

A 1.25 GHz InGaAs/InP Single-Photon Detector for High-Speed Quantum Cryptography

Liang Xiaolei¹ Jiang Wenhao¹ Liu Jianhong² Zhang Jun² Chen Zengbing² Jin Ge¹

(¹Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

(²Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract With the rapid development of quantum cryptography, infrared single-photon detection becomes the key technology in this research field. A high-speed InGaAs/InP avalanche photodiode (APD) is presented based on single-photon detector with a 1.25 GHz gating frequency, using the technique of sine wave gating and filtering. When the detection efficiency is 10.3%, dark count probability per gate is 1.3×10^{-6} and the afterpulse probability per nanosecond is 5.6×10^{-5} . This kind of detector can significantly enhance the performance of quantum cryptosystem in terms of secret key rate and transmission distance, which paves the way towards the practical applications of the next generation quantum cryptography.

Key words detectors; single-photon detection; sine wave gating and filtering; InGaAs/InP avalanche photodiode; quantum cryptography

OCIS codes 040.5160; 030.5260; 270.5568

1 引 言

基于量子物理基本原理的量子密码技术^[1]能够提供一种理论上无条件安全的保密通信方式。近年来,量子密码技术在理论、实验、实用化研究方面都取得了很大重大的进展,许多国家的政府部门、国防

部门和信息产业界均投入大量人力物力致力于量子密码技术的实验和应用研究。事实上,当前量子密码技术激烈的国际竞争已经演变为关键器件以及关键技术研发的竞争。在这些关键器件研发中,单光子探测器是处于核心地位的器件,其参数指标直接

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家 863 计划(2011AA010802)和国家自然科学基金委杰出青年科学基金(61125502)资助课题。

作者简介: 梁晓磊(1986—),男,硕士研究生,主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: lxlei6@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 金 革(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事物理电子学方面的研究。

E-mail: goldjin@ustc.edu.cn(通信联系人)

制约着量子密码系统的性能。对于点对点的量子密码系统,原始密钥率 $R_{\text{raw}}^{[1]}$ 与以下几个参数成正比关系:系统的工作频率 f ,系统每光脉冲平均光子数 μ ,量子信道衰减 t ,单光子探测器的探测效率 η 。从量子密码协议的安全性角度考虑, μ 值通常小于 1 并且是固定的。对于一个确定距离的量子密码系统来说,量子信道的衰减也是固定的。从单光子探测器性能的权衡角度来讲,其探测效率变化范围通常也是极小的。因此,为了提高量子密码系统的密钥率,提高系统的工作频率是最为直接的方法。

基于门控模式 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (APD) 的单光子探测^[2,3] 由于具有体积小、易制冷和成本低的优点,因此成为实用化量子密码系统的主要选择,对 InGaAs/InP 单光子探测的研究已经成为量子密码领域的研究重点。目前,已有几家公司开发出门控模式的 InGaAs/InP 单光子探测器商业化产品,比如瑞士 id Quantique 公司,中国安徽量子通信技术有限公司。不过,这些 InGaAs/InP 单光子探测器产品的工作频率一般在 10 MHz 量级。在 2007 年左右国际上开始出现针对高速单光子探测技术的研究,目前已经吸引了多个小组,比如英国的东芝欧洲研究中心^[4],日本的日本大学^[5,6],瑞士的日内瓦大学^[7,8] 以及美国的国家标准技术研究院等,国内的华东师范大学也从事了该方面的研究^[9,10]。

本文报道了一种工作频率为 1.25 GHz 的 InGaAs/InP 单光子探测器的研制。应用这种新型的高速单光子探测器,量子密码系统的传输距离和密钥率都会有大幅度提升,这将为未来高速量子密码系统的实用化奠定基础。

2 高速单光子探测的基本原理

利用 InGaAs/InP APD 进行单光子探测时,APD 一般工作在盖革模式^[11~13] 下。由于 APD 反向偏压超过 APD 本身的雪崩击穿电压,入射的单个光子被吸收层吸收后,在碰撞电离效应作用下,载流子可形成雪崩效应并最终产生宏观电流。在每次雪崩之后,由于倍增层材料(InP)存在杂质和缺陷,雪崩过程中的部分载流子会被捕获。当被捕获的载流子释放时,如果 APD 仍然工作在盖革模式,则这个释放的载流子有可能再激发一次雪崩信号,这种效应称为后脉冲效应。后脉冲效应严重限制了单光子探测器的性能。传统的 InGaAs/InP 单光子探测器门控持续时间较长,其后脉冲效应使单光子探测

器的门控频率只能限制在 10 MHz 量级。因此,为了提高单光子探测的门控频率必须有效地抑制后脉冲效应。

有效抑制后脉冲效应是提升 InGaAs/InP 单光子探测器性能的关键。从后脉冲效应机制分析可知,升高温度可以缩短被释放的载流子寿命从而减少后脉冲效应,但同时会带来暗计数偏高的问题;延长死时间可以减少载流子的释放速率从而降低后脉冲概率,但同时会严重限制饱和计数率。因此,这两种方法都不是抑制后脉冲效应的有效选择。相比较而言,高速门控技术才是抑制后脉冲效应的最佳方式。在高速门控方案中,由于雪崩信号持续时间极短,从而大幅度减少雪崩过程中的载流子数量,有效地抑制了后脉冲效应。此外,该方案并不会影响单光子探测器的其他性能参数。

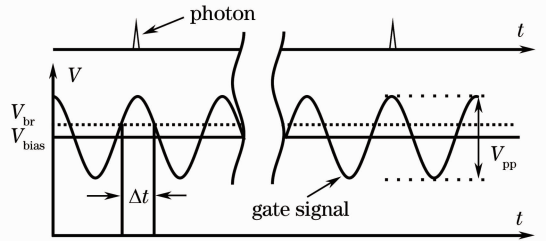


图 1 正弦门控与滤波技术工作原理

Fig. 1 Scheme of sine wave gating and filtering

目前,国际上有两种不同的高速门控方案,分别为自差分技术^[4,9] 和正弦门控与滤波技术^[5~8]。文中的系统设计采用正弦门控与滤波技术,其工作原理如图 1 所示。在图 1 中,APD 工作在反偏状态下,其中直流偏置为 V_{bias} ,APD 雪崩电压为 V_{br} 。采用正弦波作为门控信号并叠加在 V_{bias} 上,其幅度峰值为 V_{pp} ,工作频率为 f 。因此,通过图 1 可以估算门控时间 Δt :

$$\Delta t = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_{\text{pp}} - 2V_{\text{ex}}}{V_{\text{pp}}}}{2f}, \quad (1)$$

式中 V_{ex} 为 APD 过压,即 $V_{\text{ex}} = V_{\text{bias}} + \frac{V_{\text{pp}}}{2} - V_{\text{br}}$ 。若 V_{pp} 为 10 V, V_{ex} 为 2 V, f 为 1.25 GHz,则门控时间 Δt 在 250 ps 左右。这比传统的 InGaAs/InP APD 单光子探测的门控时间低了 1 个数量级,在这种情况下后脉冲效应得到了根本性的抑制,所以高速门控技术有效解决了传统 InGaAs/InP 单光子探测工作频率不高的问题。但是另一方面,由于雪崩信号持续时间的降低,造成雪崩信号极其微弱,雪崩信号湮没在背景信号中。为了有效提取雪崩信号,需要

利用高抑制比的滤波技术,将频谱单一的正弦信号进行移除,滤波后的信号经过低噪声系数的射频放大器放大,即可进行甄别探测。

3 高速单光子探测器的设计实现

研制了基于正弦门控与滤波技术的高速单光子探测器,系统原理如图 2 所示。高速单光子探测器主要分为三个部分:输入门控信号的产生模块,输出信号的处理模块以及相应的附属电路模块。输入门控信号模块首先由锁相环(PLL)产生一路频率为 1.25 GHz 的正弦信号,进入数字可调衰减器衰减

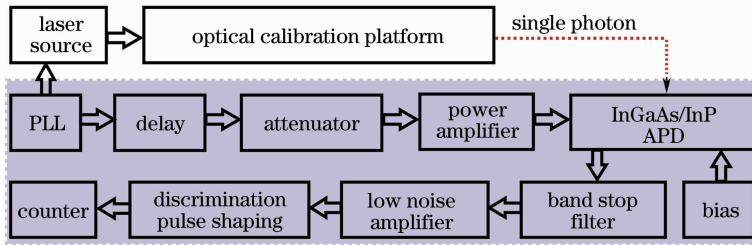


图 2 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器设计框图

Fig. 2 System diagram of the 1.25 GHz InGaAs/InP single-photon detector

4 高速单光子探测器性能测试

图 3 显示的是经过低噪声放大器后的雪崩信号在示波器上的截图。信号的下冲部分是由于 APD 的容性响应造成的。由图 3 可以看出,雪崩幅度将近 90 mV,而电子学本底噪声小于 20 mV,这种高信噪比雪崩信号的获取将有利于后续电路的甄别。高速单光子探测器主要性能包括探测效率、暗计数概率、有效门宽、饱和计数率、后脉冲概率以及探测器时间分辨等。由于篇幅有限,文中主要介绍探测效率、暗计数概率、后脉冲概率和探测器时间分辨的测试方法以及结果。

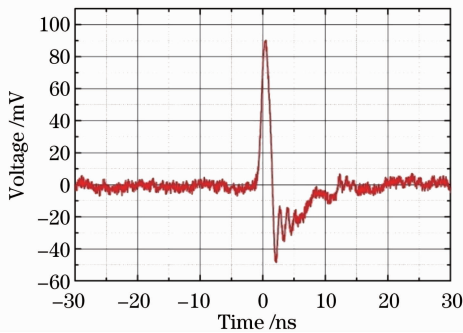


图 3 雪崩信号在示波器上的截图

Fig. 3 Oscilloscope trace of the avalanche signal

4.1 探测效率和暗计数概率

对弱相干光源而言,其光子数服从泊松分布,经

到某一特定功率,然后经过具有固定增益的功率放大器进行放大,产生幅度峰峰值 V_{pp} 为 10 V 的稳定正弦波。输出信号的处理模块首先把从 APD 输出的响应信号经过高抑制比的窄带滤波器,滤除掉门控信号的频谱,提取出微弱的雪崩信号,经过低噪声放大器放大后进行脉冲甄别和脉冲整形,然后送入现场可编程门阵列(FPGA)进行处理和计数。附属电路模块实现了高速单光子探测器正常工作所必需的辅助性功能,比如为 APD 提供直流偏置、对 APD 进行制冷等。

过理论推导,单光子探测器的探测效率 η 计算公式为^[7]

$$\eta = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1 - \frac{R_{dc}}{f_g}}{1 - \frac{R_{dc}}{f_L}}, \quad (2)$$

式中 μ 为每光脉冲平均光子数, R_{dc} 为暗计数率, R_{dc} 为光子计数率, f_g 为门控信号频率, f_L 为光脉冲频率。实验中的测试条件是 f_L 为 125 MHz, μ 为 1, 工作温度为 -50°C , 死时间为 50 ns。首先在示波器上观测放大后的雪崩信号,然后逐步加高偏压,增大探测效率,在探测效率为 10.3% 时,暗计数概率为 $1.3 \times 10^{-6}/\text{gate}$ 。此外,通过精密扫描光脉冲与门控信号的相对延时,得到相应计数与延时的关系曲线,并进行高斯拟合,得到高速单光子探测器的有效门控时间 Δt 为 223 ps。因此,在探测效率 10.3% 时归一化的暗计数概率为 $5.8 \times 10^{-6}/\text{ns}$ 。

4.2 后脉冲概率

单光子探测器的后脉冲概率 P_{ap} 是另一个关键指标。在实验中,使用高速时间数字转换(TDC)系统对每个雪崩探测事件进行记录,对这些事件进行离线统计和分析,从而得到后脉冲概率的精确数值。TDC 系统采用 Agilent 的 U1051A 仪器,其时间分辨率为 50 ps。利用锁相环产生一路与光脉冲同步

的信号作为 TDC 的 START 输入端,雪崩探测信号作为 TDC 的 STOP 输入端。后脉冲概率可以由以下公式计算得到:

$$P_{ap} = \frac{N_{dc} - N_{peak} - N_{dc}}{N_{peak}}, \quad (3)$$

式中 N_{dc} 为加光脉冲时的所有探测计数, N_{dc} 为不加光脉冲时的探测计数, N_{peak} 为探测到的光子数。测试条件是温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, f_L 为 625 kHz , μ 值为 1, 死时间为 50 ns 。

TDC 测试的结果显示在图 4(彩图见电子版)中:图的下层部分显示的是没有光脉冲时的均匀暗计数分布;图的上层部分显示的是加上光脉冲时的探测事件分布。由图 4 可以看出,在光子入射 APD 发生雪崩后的一段时间里,后脉冲概率是指数衰减的。在探测效率 10.3% 时,利用 $P_{ap}/(f_g \Delta t/R_{de})$ 归一化,得到每纳秒的后脉冲概率 P_{ap}^{ns} 为 5.6×10^{-5} 。实际应用量子密码系统中时,可通过延长死时间的方式进一步降低后脉冲效应,从而增大量子密码系统的传输距离。

4.3 探测器时间分辨

单光子探测器的时间分辨代表了雪崩累计过程中总的时间不确定性,对量子密码系统来说是一项重要的指标。实验中激光脉冲的宽度小于 50 ps 。利用与触发光源脉冲的同步脉冲作为 TDC 的 START 端,以 InGaAs PIN 光电探测器转换光脉冲后的电信号作为 TDC 的 STOP 端,可以测得光源、锁相环和 TDC 一体的时间晃动为 100 ps 。在探测效率 10.3% 时,测得整个探测器的时间晃动为 300 ps ,则 InGaAs/InP APD 自身的时间分辨为 280 ps 。

表 1 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器性能参数

Tabel 1 Performance parameters of 1.25 GHz InGaAs/InP single photon detector

Detection efficiency /%	Dark count probability / ns^{-1}	Afterpulse probability / ns^{-1}	Effective gating width /ps	Dead time (tunable) /ns	Maximum counting rate /MHz
10.3	5.8×10^{-6}	5.6×10^{-5}	223	50	20

5 在量子密码系统中的应用

根据以上测得的实验数据,对这种高速单光子探测器应用于量子密码系统时所带来的性能提升进行了计算。量子密码系统采用诱骗态 BB84 协议^[14,15],系统中除单光子探测器外其他的所有参数如光学对比度、接收方系统的插入损耗等均采用参考文献[16]中的数值。在参考文献[16]中,系统工作频率为 4 MHz , 20 km 距离时最终密钥率为

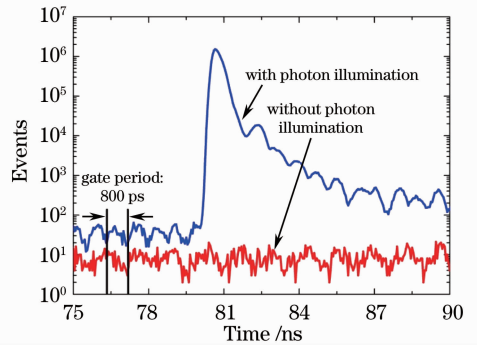


图 4 探测事件时间分布图。图下方红线部分显示的是没有加光脉冲时的暗计数分布,图上方蓝线部分显示的是有光脉冲时的探测事件分布。测试时间为 5 min

Fig. 4 Temporal histogram of 5-min detection events. The lower and upper lines show the histograms when the laser is switched off and on, respectively

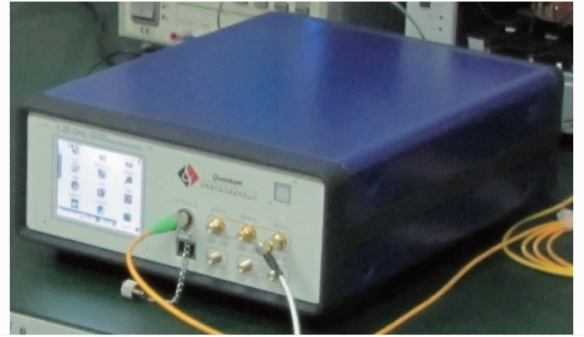


图 5 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器原型样机
Fig. 5 Prototype photo of the 1.25 GHz InGaAs/InP single-photon detector

研制的单光子探测器实物图如图 5 所示,其各项性能参数值如表 1 所示。

10.5 kbit/s 。通过计算,采用研制的 1.25 GHz 单光子探测器,在 20 km 现场光纤条件下,量子密码系统的安全密钥率达到了 754 kbit/s ,比参考文献[16]的结果提高了 71 倍。此外,采用这种高速单光子探测器的量子密码系统在 100 km 处可实现 537 bit/s 的密钥率。因此,采用 1.25 GHz 单光子探测器的量子密码系统,不论是在密钥率还是在最远距离等关键指标上都有大幅度提升。

6 结 论

研制的 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器在探测效率为 10.3% 时,暗计数概率为 1.3×10^{-6} /gate,后脉冲概率为 5.6×10^{-5} /ns。这种高速单光子探测器应用到量子密码系统中时可大幅度提升其性能,为下一代高速量子密码系统的实现奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- 1 N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel *et al.*. Quantum cryptography [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, **74**(1): 145~195
- 2 G. Ribordy, N. Gisin, O. Guinnard *et al.*. Photon counting at telecom wavelength with commercial InGaAs/InP avalanche photodiodes: current performance [J]. *J. Mod. Opt.*, 2004, **51**(9-10): 1381~1398
- 3 M. A. Itzler, R. Ben-Michael, C. F. Hsu *et al.*. Single photon avalanche diodes (SPADS) for 1.5 μm photon counting applications [J]. *J. Mod. Opt.*, 2007, **54**(2-3): 283~304
- 4 Z. L. Yuan, B. E. Kardynal, A. W. Sharpe *et al.*. High speed single photon detection in the near infrared [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(4): 041114
- 5 N. Namekata, S. Sasamori, S. Inoue. 800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10043~10049
- 6 N. Namekata, S. Adachi, S. Inoue. 1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6275~6282
- 7 J. Zhang, R. Thew, C. Barreiro *et al.*. Practical fast gate rate InGaAs/InP single-photon avalanche photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(9): 091103
- 8 J. Zhang, P. Eraerds, N. Walenta *et al.*. 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution [C]. *SPIE*, 2010, **7681**: 76810Z
- 9 Lilin Xu, E Wu, Xiaorong Gu *et al.*. High-speed InGaAs/InP-based single-photon detector with high efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(16): 161106
- 10 Yan Liang, E Wu, Xiuliang Chen *et al.*. Low-timing-jitter single-photon detection using 1-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(13): 887~889
- 11 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2771~2775
王 飞, 赵 远, 张 宇等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2771~2775
- 12 Cai Wenqi, Chen Tengyun, Liang Hao *et al.*. Development of synchronized laser discriminator in quantum key distribution system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 703~707
蔡文奇, 陈腾云, 梁 昊等. 量子密钥分发系统中同步激光甄别器的研制 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 703~707
- 13 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0414003
徐 璐, 张 宇, 张 勇等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0414003
- 14 H. K. Lo, X. Ma, K. Chen. Decoy state quantum key distribution [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(23): 230504
- 15 X. B. Wang. Decoy-state protocol quantum cryptography with four different intensities of coherent light [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(1): 012322
- 16 T. Y. Chen, H. Liang, Y. Liu *et al.*. Field test of a practical secure communication network with decoy-state quantum cryptography [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6540~6549

栏目编辑:何卓铭