上转换单光子探测器最新进展

申屠国樑^①, 郑名扬^②, 张强^{①③*}

① 中国科学技术大学微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026

② 山东量子科学技术研究院有限公司, 济南 250101

③ 济南量子技术研究院, 济南 250101

* 通信作者. E-mail: qiangzh@ustc.edu.cn

收稿日期: 2013-07-01; 接受日期: 2013-12-20

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB921300, 2011CBA00300) 资助项目

摘要 单光子探测器的研制是量子光学和量子信息领域的一个重要研究课题. 本文提出了一种基于长波泵浦频率转换技术和多模光纤耦合接收方法的新型上转换单光子探测器, 有效的解决了上转换单光子探测器所面临的高噪声和系统不稳定等问题, 成功获得最高量子效率为 27%, 噪声仅 2800 Hz 的实验结果. 该方法不仅降低传统上转换探测的噪声, 并且大大提高了系统的稳定性, 为实用化上转换单光子探测器提供了可能.

关键词 量子信息 周期性极化铌酸锂 上转换 非线性光学 单光子探测器

1 引言

量子密码利用量子测不准原理和未知量子态不可克隆定理, 实现绝对安全的保密通信, 在国防、公共安全和经济活动中都有重要意义. 相比量子计算机和量子中继器等研究分支, 量子密码是量子信息学当前最接近实用化的分支. 然而量子密码的实用化进程中仍然存在着技术瓶颈, 其中之一就是通信波段单光子探测器的性能不完美, 这就限制了量子密码的传输距离和成码率^[1~7].

当前, 国际上通用的通讯波段单光子探测器主要有三类: 超导探测器, 铟镓砷雪崩二极管单光子探测器和上转换单光子探测器, 超导探测器需要工作在液氦温度下, 所以其设备体积大、成本昂贵^[8], 为量子密码实用化设立了巨大障碍; 商用的铟镓砷磷雪崩二极管单光子探测器, 不需制冷剂、可集成, 然而由于材料工艺的不完美性造成了其过高的暗计数, 仅 10% 的量子效率, 约几千赫兹的暗计数和 2% 以上的后脉冲也限制了其在量子密码中长距离通讯的实际应用^[9].

上转换单光子探测器是利用非线性光学的和频过程, 将通讯波段光子上转换成为可见光光子, 同时保持着量子特性不变, 然后利用硅雪崩二极管单光子探测器探测. 硅雪崩二极管单光子探测器具有效率高, 暗计数低和后脉冲少等优点, 但是其只能探测可见光波段, 周期极化铌酸锂波导可以以 99.9% 的效率转换通讯波段单光子为可见光单光子, 弥补这一频率差异. 上转换单光子探测器不需制冷剂, 可集成, 且量子效率可达 40%^[10~14], 但是传统的上转换单光子探测器噪声很高, 约为几十万赫兹. 因此在 2008 年, 日本 NTT 实验小组采用单色分光仪来滤除非线性过程中产生的高噪声, 获得了噪声水平仅为 100 Hz 的上转换单光子探测器, 但是同时其量子效率也随之降至 6%^[15]. 2012 年斯坦福大学的

引用格式: 申屠国樑, 郑名扬, 张强. 上转换单光子探测器最新进展. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 389–393, doi: 10.1360/N112013-00086

Fejier 团队发展了长波泵浦技术, 他们利用 1800 nm 的长波泵浦将噪声降低了两个数量级, 同时保持高量子效率不变^[16]. 但是所有传统的上转换单光子探测器无一例外地采用了棱镜等色散器件来进行滤波去除噪声. 这就使其不便于集成、体积大, 性能不稳定, 同时也不易于调节, 严重限制了上转换探测器的实用化.

本文中采用了多模光纤耦合接收和长波泵浦技术, 消除非线性过程中产生的自发参量下转换光子, 减少拉曼噪声, 同时结合周期性极化铌酸锂波导的非线性和频过程和滤波片滤波作用, 成功发展了一种性能稳定的新型上转换单光子探测器, 其量子效率为 27%, 噪声为 2800 Hz. 这一新型上转换单光子探测器相对于采用棱镜等色散器件的传统上转换单光子探测器, 性能更加稳定, 更易于集成, 且便于操作, 为上转换单光子探测器的实用化提供了可能.

2 实验装置

2.1 噪声分析

在满足相位匹配的条件下的周期性极化铌酸锂波导中, 除了非线性和频过程外, 同时存在其他的非线性效应, 比如泵浦光的二阶非线性效应 (SHG) 和三阶非线性效应 (THG)、泵浦光的自发参量下转换 (SPDC)、泵浦光的拉曼效应 (SRS) 等. 泵浦光的 SHG 和 THG 可被硅单光子探测器响应而产生噪声, 当 SPDC 和 SRS 所产生的光子, 其波长落在满足波导相位匹配条件下的转换带宽 (本实验波导转换半宽为 0.5 nm) 内时, 这些光子可以有效的与泵浦光一起转换为可见光, 然后被硅单光子探测器记录从而引入噪声, 因此需要对非线性过程后的光子进行有效滤波来减除噪声.

由于自发参量下转换只会产生波长高于泵浦光的光子, 因此采用波长大于信号光的长波泵浦时, 可以使 SPDC 波长远离信号光, 也就避免了其落与波导的转换带宽内, 从而滤除其对噪声的影响^[16]. 同时当采用长波泵浦时, 落在波导转换带宽内, 引入噪声的 SRS 光子为反斯托克斯光子, 当采用短波泵浦时, 能引入噪声的 SRS 光子为斯托克斯光子, 在室温下, 反斯托克斯光子的布居要远远低于斯托克斯光子, 因此采用长波泵浦还可以减少 SRS 对噪声的影响^[16]. 本实验采用了 1950 nm 的长波作为泵浦光来减少探测器的噪声.

2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 1550 nm 通信波段信号光由可调谐外腔二极管激光器提供, 泵浦激光的种子激光同样来自一个可调谐外腔二极管激光器, 其波段为 1900 ~ 2000 nm, 种子激光经功率可调节的掺铯激光放大器放大后, 经第一个 1.55 μm /1.9 μm 波分复用滤掉自发辐射噪声 (ASE), 然后与信号光一起通过第二个 1.55 μm /1.9 μm 波分复用合束进入周期极化铌酸锂波导. 其中信号光在进入波分复用之前, 分别经过可调衰减器, 1/99 的分束器和固定衰减器, 用以调节输入到探测器的光子数.

由于周期性极化铌酸锂波导只传播 TM_{00} 光, 泵浦光和信号光的极化均通过极化控制器调节至 TM_{00} 模式, 同时我们采用 TEC 模块对波导的温度进行控温, 使其稳定在 56 度, 以满足波导中非线性转换过程中的相位匹配条件, 达到最优转换效率. 波导后的光束由非球面物镜准直输出, 和频光、噪声光和残留泵浦光经由二向色镜分束, 透射的泵浦光被引入光谱仪 (OSA) 监控, 反射的上转换可见光依次通过 857 nm 带通滤波片、945 nm 短通滤波片和 785 nm 长通滤波片滤去泵浦光 SHG, THG 等, 最后由准直镜耦合进入多模光纤接收入硅雪崩二极管单光子探测器, 单光子探测器的输出由计数器读出.

3 总结

本实验中采用了多模光纤耦合接收和长波泵浦技术成功发展了一种新型上转换单光子探测器系统, 不仅达到了采用棱镜色散系统的传统上转换单光子探测器所具有的高量子效率, 同时也大大降低了噪声水平. 而且其系统更易集成, 性能更加稳定, 更加易于调节, 为实用化上转换单光子探测器提供了可能.

若要进一步滤除噪声, 可以采用更窄的滤波器件, 比如, 本团队最近采用体光栅的方法成功将噪声降至 100 Hz, 同时保持 28% 的量子效率^[17], 但是这种探测器与传统的上转换单光子探测器一样存在着空间色散器件, 相比于本实验中的方案, 不易于集成, 不利于调试, 未来可以考虑采用光纤布拉格光栅滤波的方法实现实用化.

致谢 本文得到了科技部、科学院、基金委的支持, 感谢 SAICT 引进高层次人才(团队)经费资助, 同时感谢 SAICT 量子通信公共研发平台的技术支持, 申屠国樑感谢中国科学院研究生科技创新与社会实践资助专项资助对本实验的支持.

参考文献

- 1 Takesue H, Nam S W, Zhang Q, et al. Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors. *Nat Photonics*, 2007, 1: 343–348
- 2 Stucki D, Walenta N, Vannel F, et al. High rate long-distance quantum key distribution over 250 km of ultra low loss fibres. *New J Phys*, 2009, 11: 075003
- 3 Liu Y, Chen T Y, Wang J, et al. Decoy-state quantum key distribution with polarized photons over 200 km. *Opt Express*, 2010, 18: 8587–8594
- 4 Wang S, Chen W, Guo J F, et al. 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber. *Opt Lett*, 2012, 37: 1008–1010
- 5 Dixon A R, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Gigahertz decoy QKD with 1 Mbit/s secure key rate. *Opt Express*, 2008, 16: 18790–18797
- 6 Zhang Q, Takesue H, Honjo T, et al. Megabits secure key rate quantum key distribution. *New J Phys*, 2009, 11: 045010
- 7 Namekata N, Takesue H, Honjo T, et al. 2 GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiodes. *Opt Express*, 2011, 19: 10632–10639
- 8 Gol'tsman G, Okunev N, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Appl Phys Lett*, 2001, 79, 705
- 9 ID Quantique Inc, Id100ID210/ID220 series selection guide, 2012
- 10 Kumar P. Quantum frequency conversion. *Opt Lett*, 1990, 15: 1476–1478
- 11 Vandevender A P, Kwiat P G. High efficiency single photon detection via frequency up-conversion. *J Mod Opt*, 2004, 51: 1433–1445
- 12 Langrock C, Diamanti E, Roussev R V, et al. Highly efficient single-photon detection at communication wavelengths by use of upconversion in reverse-proton-exchanged periodically poled LiNbO₃ waveguides. *Opt Lett*, 2005, 30: 1725–1727
- 13 Albota M A, Wong F N C. Efficient single-photon counting at 1.55 μm by means of frequency upconversion. *Opt Lett*, 2004, 19: 1449–1451
- 14 Thew R T, Zbinden H, Gisin N. Tunable upconversion photon detector. *Appl Phys Lett*, 2008, 93, 071104
- 15 Kamada H, Asobe M, Hongo T, et al. Efficient and low-noise single-photon detection in 1550 nm communication band by frequency upconversion in periodically poled LiNbO₃ waveguides. *Opt Lett*, 2008, 33: 639–641
- 16 Pelc J S, Ma L, Phillips C R, et al. Long-wavelength-pumped upconversion single-photon detector at 1550 nm: performance and noise analysis. *Opt Express*, 2011, 19: 21445–21456

- 17 Shentu G L, Pelc J S, Wang X D, et al. Ultralow noise up-conversion detector and spectrometer for the telecom band. *Opt Express*, 2013, 21: 13986–13991

The new development of up-conversion single-photon detector

SHENTU GuoLiang¹, ZHENG MingYang² & ZHANG Qiang^{1,3*}

1 *National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2 *Shandong Institute of Quantum Science and Technology Co., Ltd, Jinan 250101, China;*

3 *Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan 250101, China*

*E-mail: qiangzh@ustc.edu.cn

Abstract Single photon detector is an essential part of quantum optics and quantum information. We demonstrate up-conversion single-photon detector for the 1550 nm telecommunications band using long-wavelength pump and multimode fiber coupling. We achieve total-system detection efficiency of around 27% with noise as low as 2800 Hz. This method decreases the noise and significantly improves the system stability. What is more, it is very suitable for the practical product of up-conversion single-photon detector.

Keywords quantum information, periodically poled LiNbO₃ waveguide, up-conversion, nonlinear optics, single photon detector

SHENTU GuoLiang was born in 1987. He is now a Ph.D. candidate in the University of Science and Technology of China, Hefei. Currently, His research interests include quantum information and single photon detection.

ZHENG MingYang was born in 1986. He received the Ph.D. degree from the University of Science and Technology of China, Hefei, in 2013. Currently, he is a Research Fellow at the Quantum Science Research Institute of Shandong. His research interests include nonlinear optics and waveguide.

ZHANG Qiang was born in 1979. He received the Ph.D. degree from the University of Science and Technology of China, Hefei, in 2006. Currently, he is now a professor at the University of Science and Technology of China. His research interests include quantum information, single photon detection, nonlinear optics, and quantum entanglement.