

非相干变频转换实现室温下红外单光子源

江萍^{1,2}, 郭蒙蒙¹, Tim Schroeder², Oliver Benson²

(1. 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580;
2. Institute for Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin Germany 10245)

摘要: 纳米金刚石中的 NV-center (Nitrogen-Vacancy center) 是目前室温下具有高发射率和稳定性的可见光波段单光子源, 而如何实现及优化红外单光子源则是未来实现量子信息和量子通信应用的一大挑战。介绍了一种近期提出的实现红外单光子源的新型机制。该方法以金刚石中的 NV-center 作为可见光波段的单光子源, 利用非相干变频转换实现室温下近红外波段稳定、无闪烁的单光子源。具体的实施方案为在中空芯光子晶体光纤中选择性地填充含有量子点的溶液, 以可见光波段的单光子源作为激励源, 选择合适的量子点即可得到红外波段的单光子源。中空芯光子晶体光纤保证了较高的单光子吸收效率以及荧光收集效率。该方案的实施在理论上可以达到 26% 的转换效率, 而初步的实验得到了 0.1% 的转换效率。进一步分析了一些影响转换效率的因素, 并提出了一些解决方案。

关键词: 单光子源; 红外; 中空芯光子晶体光纤

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3709-04

Incoherent photon conversion to generate infrared single photons at room temperature

Jiang Ping^{1,2}, Guo Mengmeng¹, Tim Schroeder², Oliver Benson²

(1. College of Science, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China;
2. Institute for Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, 10245 Berlin, Germany)

Abstract: At present, there exist a number of on-demand single photon sources with high emission rates and stability even at room temperature such as NV centers in diamonds. However, further improvement of infrared single photon sources is a major challenge for future implementations of quantum information and quantum communication applications. A conceptually novel method for the generation of infrared single photons was concerned which was recently presented. The presented method was applied to realize a stable, non-blinking, room temperature infrared single photon source by converting visible single photons from a defect center in diamond to the near infrared. A hollow core photonic crystal fiber selectively filled with a solution of quantum dots was used to achieve a single photon absorption probability of near unity and a very high re-collection efficiency of Stokes-shifted fluorescence. For this presented implementation, a theoretical conversion efficiency is estimated to be 26%. And a conversion efficiency

收稿日期: 2014-03-12; 修订日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11204381)

作者简介: 江萍(1982-), 女, 副教授, 博士, 主要从事纳米光学方面的研究。Email: pjiang@upc.edu.cn

of 0.1% is achieved in a first prove of principle experiment. To improve this efficiency, the conversion process was taken insights and some solutions were put forward.

Key words: single photon sources; infrared; hollow core photonic crystal fiber

0 引言

鉴于在基于光纤的量子密钥分发以及纠缠态传输中的应用,近红外波段尤其是通讯波段的单光子源的研究尤为重要。然而,只有极少数的量子系统可以满足此波段的要求。原则上自组织的量子点可以在红外波段辐射,但是需要低温的操作环境,并且生长低密度的量子点本身也是一个很大的挑战。个别铅硫属化物的交替量子点(例如硫化铅)或 CdHgTe 量子点可以提供在近红外波长范围内的单个光子,但是在激光长时间激发下并不稳定^[1]。最近,金刚石中的缺陷中心,例如 NV-center(Nitrogen-Vacancy center)或 SiV-center(Silicon-Vacancy center)作为室温下的稳定单光子源引起了很多研究组的兴趣^[2],但是这些缺陷中心的工作波长都在可见光频段。文中提出了一种新型的机制,以室温下可见光波段的稳定单光子激励源激发量子点,利用非相干变频转换实现室温下近红外波段稳定的单光子源。

1 实施方案

利用非相干变频转换来实现室温下近红外波段稳定的单光子源,单光子的吸收和随后的再发射有两个基本要求:(1) 明亮的单光子源,(2) 在目标波段内具有合适的斯托克斯频移辐射的高吸收物质。在此机制中利用金刚石中的 NV-center 作为光子源,金刚石颗粒附着在固体浸没透镜上,利用一个物镜激发和收集单光子辐射,如图 1 所示,其光子辐射率可以达到 2.4 Mcts/s^[3]。

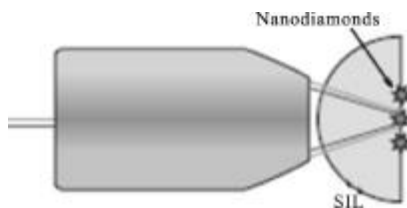


图 1 附着在固体浸没透镜上含 NV-centre 的金刚石

Fig.1 Visible single photons coming from nitrogen-vacancy centres in nanodiamonds on a solid immersion lens (SIL)

实验中选用 CdHgTe 胶体量子点作为吸收剂。为了提高吸收效率以及得到比较高的荧光吸收效率,该方案中将胶体量子点选择性地填充到中空芯光子晶体光纤中,选用的光子晶体光纤的截面结构如图 2 所示。量子点的甲苯溶液仅填充到中心孔中。

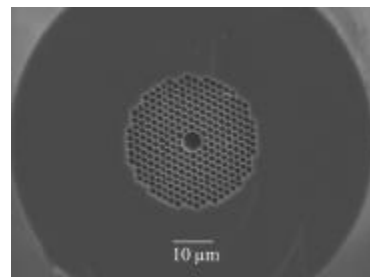


图 2 中空芯光子晶体光纤截面结构图

Fig.2 Sectional view of hollow core photonic crystal fiber

首先在理论上估算其荧光收集效率:填充到光子晶体光纤中空芯中的是胶体量子点的甲苯溶液,为了增加其折射率以及保持其挥发稳定性在其中加入了聚苯乙烯,其中聚苯乙烯与甲苯为 1:1 的比例,纤芯中填充物的折射率可以估算为 1.53,而中空芯光子晶体光纤周边孔结构的折射率可以估算为 1.05。只有大于 43°全内反射角的量子点的辐射才可以在中心孔中传播,这样只有 26%的辐射量将传输到光纤末端并被收集,需要说明的是在此估算中忽略了再吸收效应的影响。

在具体的实验方案中,填充好的光子晶体光纤被固定在一个三维移动台上,通过两个物镜实现光的耦合输入与输出。可见光波段的单光子经过光芯内填充的量子点吸收和再辐射后由光谱仪和 CCD 相机接收。为了验证单光子特性,利用 Hanbury Brown and Twiss(HBT)设备进行自相关测量。在进行频率转换实验之前,需要对可见光波段的单光子源进行优化及单光子特性的测量,最终得到了辐射率为 280 kcts/s 的可见光单光子源,单光子特性如图 3 所示。零时间延迟时其归一化的自相关函数 $g^{(2)}(0) < 0.2$ 说明了很好的单光子特性。

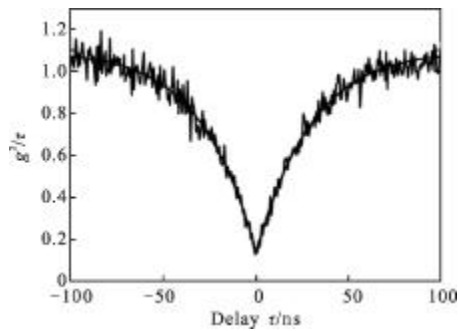


图 3 金刚石中的 NV-center 的单光子特性测量结果

Fig.3 Normalized second-order correlation function of fluorescence of a single NV-center in a nano-diamond

此方案中选择性填充的量子点为 CdHgTe 量子点,其光致发光谱如图 4 所示,其辐射在近红外波段。改变量子点的浓度,在一定的浓度下会出现较强的再吸收现象,因此在实验实施的过程中需防止再吸收现象的出现,这就要求填充的量子点浓度不宜太高,而这影响了转换效率。

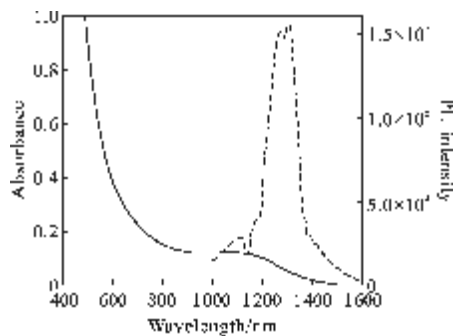


图 4 甲苯溶液中 CdHgTe 量子点的吸收(直线)及荧光致(虚线)发光谱

Fig.4 Absorption (linear) and photoluminescence (dotted line) spectra of CdHgTe QDs in toluene

2 实验结果及分析

初步的实验中得到了 0.1% 的总转换效率^[4],也就是说最终到达光纤尾端并被收集的红外波段的单光子数只有 280 cts/s,而实验设备并不能对其测量,因此需采取措施提高转换效率。

为了对光子晶体光纤对单光子的传输效率进行评测,首先对仅填充了聚苯乙烯和甲苯溶液、未填充量子点的系统进行了测量,结果显示在耦合以及传输过程中有 86% 的损耗。为了分析该损耗的主要来源,对入射面的光场分布进行成像,如图 5 所示,入

射面上的液体溅射有很强的散射,损耗较大。

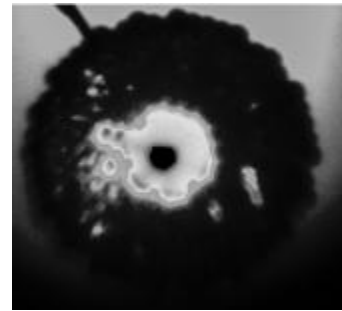


图 5 选择性填充的光子晶体光纤入射面的光场分布图像

Fig.5 CCD image of photoluminescence from CdHgTe QD-solution in HCPCF

此外测量了实验中应用的 CdHgTe 胶体量子点的荧光寿命,如图 6 所示,此种量子点的荧光寿命在 100 ns。

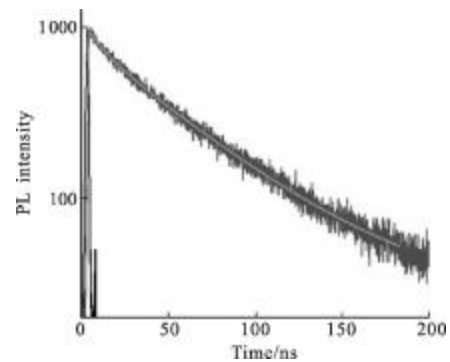


图 6 CdHgTe 量子点的荧光寿命

Fig.6 Lifetime of CdHgTe QDs

根据前文的叙述,光子在耦合以及在选择性填充的光子晶体光纤传输过程中产生了很高的损耗,因此对此部分进行优化可以大大提高转换效率,其中一种方案即只在光子晶体光纤中空芯内壁沉积量子点,利用带隙机理传输光子,这样可以避免耦合面光散射以及液体气泡中的散射损耗;另外,也可以选择更为合适的量子点,选择寿命较短的量子点可以提高单光子激发速率,并且可以减少再吸收的问题,进而提高转换效率。

3 结论

文中介绍了一种利用非相干变频将可见光单光子转换为红外单光子的机制,以金刚石中的 NV-center 作为可见光单光子激励源,以 CdHgTe 量子点

作为工作物质, 并且整个转换系统置于光子晶体光纤中以保证较高的吸收及收集效率。最终实验上实现了 0.1% 的总转换效率, 并且进一步提出了改善此转换效率的可行性方案。

参考文献:

- [1] Peterson J J, Krauss T D. Fluorescence spectroscopy of single lead sulfide quantum dots[J]. *Nano Lett*, 2006, 6(3): 510-514.
- [2] Kurtsiefer C, Mayer S, Zarda P, et al. Stable solid-state source of single photons [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(2): 290-293.
- [3] Schröder T, Gädeke F, Banholzer M J, et al, Ultrabright and efficient single-photon generation based on nitrogen-vacancy centres in nanodiamonds on a solid immersion lens [J]. *New J Phys*, 2011, 13(5): 055017.
- [4] Ping Jiang, Tim Schroeder, Oliver Benson, et al, Incoherent photon conversion in selectively infiltrated hollow-core photonic crystal fibers for single photon generation in the near infrared[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11536.