

超短光脉冲波形对门模单光子探测的影响*

方俊彬, 廖常俊, 魏正军, 刘小宝, 王金东[†], 刘颂豪

(华南师范大学 信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室, 广州 510631)

摘要:采用两种不同的皮秒光脉冲波形进行了门模单光子探测实验. 测量了单光子探测效率随探测器和超短脉冲光源之间的同步延迟细微调节时的变化曲线. 结果表明: 光脉冲波形直接影响光子到达时间与门脉冲时间窗口之间的精确同步和探测效率, 使用其中一种脉宽较短的皮秒光脉冲时探测效率比使用另一种脉冲提高了约 9%.

关键词:单光子探测; 超短光脉冲; 门模式; 探测效率

中图分类号: TN247; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)09-2192-4

0 引言

单光子探测是量子密钥分发 (Quantum Key Distribution, QKD) 系统中实现从微弱光信号中提取量子编码信息的基础单元技术^[1], 其技术参量直接影响系统的性能. 在实用 QKD 系统中, 单光子探测器的暗计数概率与探测效率之比决定了系统的量子误码率. 由于量子误码率不仅是 QKD 系统安全性的判据, 还决定着密钥的最大生成率和最大分发距离^[2], 所以进一步降低量子误码率并增强 QKD 系统的实用性就必须减小暗计数和提高探测效率.

目前, 工作在红外通信波段单光子探测器的核心器件是 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (Avalanche photodiode, APD)^[3], 减小暗计数的常规方法是降低探测器温度和采用门模单光子探测^[4]. 门模单光子探测的原理是: 为 APD 加上一个略低于雪崩击穿电压的常偏压, 在光子到达 APD 时将一个门脉冲电压叠加在常偏压上, 使得加载在 APD 上的电压幅值大于雪崩击穿以准备探测单光子. 因为热噪声在时间上是随机均匀分布, 这种符合测量方法过滤了门脉冲窗口之外、等待光子到达过程中可能产生的暗计数, 特别是在使用降温方法将热噪声降低到一定的水平后, 采用门控技术能有效地减小误码. 但是, 门模单光子探测要求单光子到达的时间与门开启时间精确同步^[5]. 和门脉冲不能良好同步甚至落在时间窗口之外的光子不能在 APD 上触发雪崩信号, 单光子探测效率因而下降, 量子误码率会因为

探测效率的降低而增大, 实际的 QKD 系统已经遇到这样的情况^[6].

实际应用中 QKD 系统所使用的单光子源是由常规半导体激光脉冲经强衰减而成的接近于单光子 Fock 态的极微弱相干激光脉冲^[7], 因此, 本文研究了同步门模单光子探测中超短光脉冲波形和宽度对同步性能和探测效率的影响. 实验中使用两个脉宽相差大约 100 ps 的皮秒光脉冲分别进行了测量, 光脉冲的宽度均远小于门脉冲宽度. 实验结果表明光子到达 APD 的时刻与门脉冲时间窗口之间的精确同步是和光脉冲波形紧密相关的; 而且, 在各自达到最佳同步的条件下, 使用脉宽较小的光脉冲有较高的探测效率, 探测效率比使用另一脉冲提高了约 9%.

1 实验方案

实验装置如图 1, 其中超短脉冲半导体激光光源为德国 PicoQuant 公司生产的专为量子保密通信研制的 PDL808 激光驱动器和 LDH-P-N-1550 型激光器, 最小的输出光脉冲宽度为 48 ps; 单光子探测器为 id quantique 的 id200, APD 的冷却温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 数字脉冲/时延发生器为 Stanford 的 DG535, 高速光电示波器为 Tektronix 的 TDS8200, 可调衰减器和精密功率计分别为 EXFO 的 FVA3100 和 PM1600.

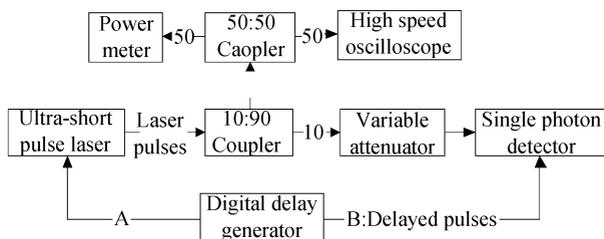


图 1 实验装置原理
Fig. 1 Schematic of experimental setup

* 国家重点基础研究发展计划 (G2001039302)、教育部博士学科点专项科研基金 (20050574001)、广东省科技计划 (2007B010400009) 和广州市科技支撑计划 (2008Z1-D501) 资助

[†] Tel: 020-32487481

Email: jindongw@126.com

收稿日期: 2008-08-18

修回日期: 2008-10-27

首先,由 DG535 的 A 通道输出周期脉冲触发 PDL808 激光器产生超短光脉冲串,光脉冲经过 10:90 耦合器分光后进入可调衰减器 FVA3100 做精确的衰减,在耦合器的另一输出端分别使用功率计和高速示波器测量光功率和光脉冲波形.由于激光器在高于阈值工作时,产生的激光是服从泊松分布的相干态光子^[7],在一个光脉冲中含有 n 个光子的概率为: $P(n, \mu) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$,其中 n 为光子数, $\mu = \langle n \rangle$ 是每个光脉冲中含有的平均光子数(个/每脉冲).由测量功率可计算进入单光子探测器的微弱激光脉冲的每脉冲平均光子数 μ .当将激光脉冲衰减到 $\mu = 0.1$ 时,任意脉冲中包含两个或以上光子数的概率为: $P(n \geq 2, 0.1) = 1 - P(0, 0.1) - P(1, 0.1) = 0.0047$,则从衰减器输出到 id200 的微弱激光脉冲近似于单光子源.然后,由 DG535 的 B 通道输出与 A 通道同步延迟 t_d 的触发脉冲用于启动 id200 的探测门脉冲,id200 设置在最小探测门宽 2.5 ns,改变 t_d 并测量不同 t_d 时对应的单光子计数率得到门模单光子探测效率随同步延迟变化的曲线.

2 实验结果与分析

PDL808 的驱动方式是使用单发的大电流短电脉冲对半导体激光器进行直接的增益开关调制,调节注入电流的大小可以在一定程度上改变输出皮秒光脉冲的波形.如图 2(a)和(b)两种不同的光脉冲

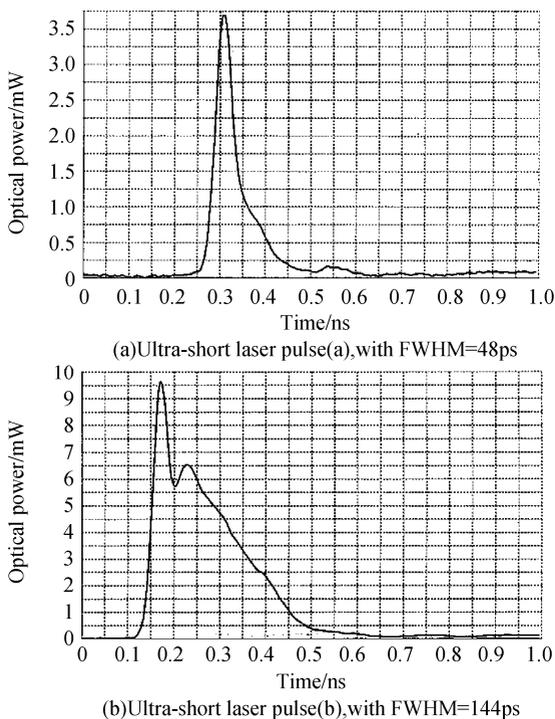


图 2 用于单光子探测的两种光脉冲
Fig.2 Two laser pulses used in synchronized single photon detection

包络,分别对应于激光器的最短输出脉冲和增大注入电流后的输出脉冲.光脉冲(a)的上升沿与下降沿比较对称,波形接近于高斯型;而光脉冲(b)的波形由于注入功率的增大不仅有所加宽,而且产生了拖尾和次峰,这是因为用于调制激光器的短电脉冲有较长的下降沿,即使细微地增大注入电流也很容易令光脉冲波形中产生次峰.两种光脉冲的主要参量分别为:(a)半高宽度(Full Width at Half Maximum,FWHM)为 48 ps,1/10 高宽度(FW(1/10)M)为 148 ps,峰值功率为 3.75 mW;(b)FWHM=144 ps,FW(1/10)M=326 ps,峰值功率为 9.6 mW.

在重复频率为 100 KHz 的工作条件下,对两种光脉冲进行适当的衰减使其均达到每脉冲平均光子数为 0.1 的单光子水平以作为微弱相干激光脉冲源接入单光子探测器.在 51.0~52.6 ns 之间以 10 ps 为步长仔细调节探测器与激光器之间的同步延迟 t_d ,测量对应的单光子计数率,将数据在 Matlab 中重绘得到单光子计数率随同步延迟变化的曲线分别对应于图 3(a)和(b).比较图 3 的数据得到:

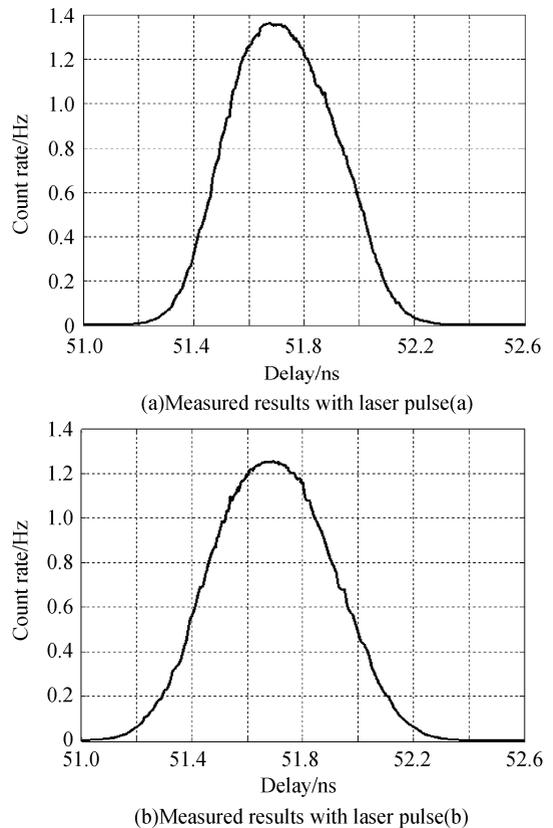


图 3 单光子计数率随同步延迟调节的变化
Fig.3 Count rate of single photon detection versus synchronous delay t_d

1)图 3(a)和(b)中最大的计数率分别为 1 363.83 Hz和 1 255.05 Hz,由探测器公式^[8]: $\eta = \frac{1}{\mu} \ln(\frac{P_d - 1}{P_d + P_{sig} - 1})$ 计算对应的探测效率为 13.73%

和 12.63%，式中 $\mu=0.1$ ； P_d 为测量的每门暗计数概率，对应于 2.5 ns 门宽为 3.2×10^{-5} /门； P_{sig} 为测量的每门雪崩概率。因此，在两种光脉冲分别与门脉冲达到最佳同步的条件下，虽然光脉冲的宽度均远小于门脉冲宽度，但是相对于光脉冲(b)，采用较短的光脉冲(a)能将探测效率提高 $(13.73\% - 12.63\%) / 12.63\% = 8.73\%$ 。

2)在图 3(a)的曲线中，单光子计数开始和结束时所对应的 t_d 分别为 51.16 ns 和 52.32 ns，宽度为 1.16 ns；而曲线图 3(b)中则为 51.0 ns 和 52.44 ns，宽度为 1.44 ns。这表示在相同线路延迟的条件下，来自光脉冲(b)的光子较早到达探测器，而且 t_d 的可调节范围较宽。对比图 3 与图 2 可以发现：图 3 中单光子到达时间的提前和同步延迟可调范围的增宽分别对应于图 2 中光脉冲(b)比(a)的开通时间提前和脉冲宽度较大这两个时域分布上的特点，而且提前的时间量和增加的宽度分别接近于两个光脉冲之间上升沿的时间差和脉冲底部宽度的差值。

轻微调整光纤线路改变线路延迟，重复以上实验得到相近的结果：对应于光脉冲(a)和(b)，最大计数率分别为 1 358.41 Hz 和 1 251.53 Hz，而同步延迟 t_d 的调节范围分别为：51.87~53.0 ns 和 51.69~53.10 ns；宽度各为 1.13 ns 和 1.41 ns。

对本文实验结果进行分析，时间相关单光子计数的研究^[9]指出：测量微弱相干脉冲时，单光子探测概率在时域上各个位置的分布等于光脉冲衰减前的包络与探测器时间响应函数的卷积。门模单光子探测等价于对在门宽范围内的单光子探测概率分布进行统计积分。由于光脉冲(a)的 FWHM 值和 FW(1/10)M 值比(b)分别减小了 96 ps 和 178 ps，虽然在衰减前脉冲的光能量较低，但是脉冲主峰能量占总能量的比率反而较大。当两种光脉冲均衰减到在任意一个脉冲包络内包含单光子的平均概率等于 0.1 的水平以后，表现为光脉冲(a)的单光子分布更集中在脉冲峰值附近，更有利于同步的门模单光子探测，所以探测效率较高。另一方面，由于光脉冲(b)随功率的增大而脉宽变宽和开通时间提前，因此经过衰减后单光子在时域上的分布就相对较宽而且较提前，光脉冲波形的变化在通过探测器系统后表现为单光子探测概率在时域上的分布也出现相应地增宽和提前。另外，值得注意的是图 3 中同步延迟 t_d 的可调节范围分别为 1.16 ns 和 1.44 ns，而门脉冲的宽度为 2.5 ns，这说明在去除探测器的 APD 对入射光子信号的响应时间(雪崩建立和放大时间)之后，实际上允许单光子探测的门脉冲窗口也减小到 1 ns 左右。

分析可见：由于脉宽较小的光脉冲经衰减后单光子在时域上的概率分布更为集中，当进行门模单光子探测时，单光子到达时间的抖动较小，能与门脉冲实现更佳同步，从而有利于提高探测效率。虽然在通常的实验中认为门脉冲宽度等于光脉冲宽度 2 倍便能满足探测的要求^[10]，但实际上使用脉宽更小的光脉冲能将探测效率进一步提高。此外，较小的光脉冲宽度还有利于进一步减小探测器门宽，一方面减小暗计数，另一方面能提高重复频率。下一代高速 QKD 系统要求将线路传输速率提升到千兆级别，在一些实验系统中探测器的门脉冲宽度已经下降到 250 ps^[11]，减小门宽必然同时提高了对光源和同步技术的要求，而可同步触发的量子点单光子源所发射的单光子在实验中的衰落时间仍大于 1 ns^[12-13]，从单光子同步探测效率的角度考虑，采用皮秒级别的超短光脉冲具有一定的优势。

3 结论

从实验上研究了皮秒级的超短光脉冲波形对门模单光子同步探测性能的影响。光脉冲波形与衰减后单光子在脉冲包络中各个时间位置的概率分布有关，因而影响了门模同步测量的探测效率。实验中测量了两种不同波形的皮秒光脉冲在门脉冲宽度为 2.5 ns 的条件下单光子探测效率随同步延迟微调的变化曲线，实验数据显示：虽然光脉冲宽度比门脉冲宽度小一个数量级，但脉宽较小的光脉冲波形有更集中的光子时间分布，并使探测效率提高了约 9%。由此可见，对于将进一步减小门宽以提高重复频率的高速单光子探测的研究和应用来说，超短光脉冲的波形和光子在时域上的分布将成为影响同步测量的更重要因素。

参考文献

- [1] GISIN N, RIBORDY G, TITTEL W, *et al.* Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, **74**(1): 145-195.
- [2] TOMITA A, NAKAMURA K. Balances, gated-mode photon detector for quantum-bit discrimination at 1550 nm[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(20): 1827-1829.
- [3] HAN Qin, PENG Hong-ling, DU Yun, *et al.* 1.55 μm low-temperature-grown GaAs resonant cavity enhanced photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 549-551.
韩勤, 彭红玲, 杜云, 等. 1.55 μm 低温生长 GaAs 谐振腔增强型探测器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 549-551.
- [4] NAMEKATA N, MAKINO Y, INOUE S. Single-photon detector for long-distance fiber-optic quantum key distribution [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(11): 954-956.
- [5] WANG Jun, LIU Yuan, DONG Shuang-li, *et al.* Single-photon detection with synchronizing photo and electric switches[J].

- Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 444-447.
- 王俊,刘源,董双丽,等. 基于光电双开关的单光子同步探测[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 444-447.
- [6] YUAN Z L, KARDYNAL B E, SHARPE A W, *et al.* High speed single photon detection in the near infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(4): 041114.
- [7] FELIX S, GISIN N, STEFANOV A, *et al.* Faint laser quantum key distribution: Eavesdropping exploiting multiphoton pulses [J]. *Journal Of Modern Optics*, 2001, **48**(13): 2009 - 2021.
- [8] "Single photon detection module - Near infrared range" from id quantique[J/OL]. <http://www.idquantique.com/products/id200.htm>.
- [9] HISKETT P A, BULLER G S, LOUDON A Y, *et al.* Performance and design of InGaAs /InP photodiodes for single-photon counting at 1.55 μm [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(36): 6818-6829.
- [10] MA Rui-lin. Quantum cryptography communication [M]. Beijing: Science Press, 2006: 56-60.
- 马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 56-60.
- [11] GORDON K, FERNANDEZ V, BULLER G, *et al.* Quantum key distribution system clocked at 2 GHz[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(8): 3015-3020.
- [12] WARD M B, FARROW T, SEE P, *et al.* Electrically driven telecommunication wavelength single-photon source [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(6): 063512.
- [13] ZHAO Shun-cai, LIU Zheng-dong, LIAO Qing-hong. The study of a single quantum dot lasers particular output property in microcavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1085-1088.
- 赵顺才,刘正东,廖庆洪. 微腔中单量子点的激光输出特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1085-1088.

Influence of Ultra-short Laser Pulse Shapes on Gate-mode Single Photon Detection

FANG Jun-bin, LIAO Chang-jun, WEI Zheng-jun, LIU Xiao-bao, WANG Jin-dong, LIU Song-hao
(*Laboratory of Photonic Information Technology, School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*)

Abstract: Experiments of gated-mode single photon detection are performed using two picosecond laser pulses with different pulse shapes. The variation of single photon detection efficiency versus synchronous delay between detector and ultra-short pulse laser source is measured. The experimental results show that laser pulse shapes directly influence the precise synchronization between the arrival time of photon and the time window of gating pulse and so the detection efficiency. The detection efficiency can be improved about 9% using the shorter one of picosecond laser pulses compared with the other one.

Key words: Single photon detection; Ultra-short laser pulse; Gate-mode; Detection efficiency



FANG Jun-bin is working for his Ph. D. degree at South China Normal University, and his research interests focus on quantum cryptography and optoelectronics.