

文章编号: 0258-7025(2010)03-0703-05

量子密钥分发系统中同步激光甄别器的研制

蔡文奇 陈腾云 梁昊 金革

(中国科学技术大学安徽省物理电子学重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要 介绍了量子密钥分发(QKD)系统及该系统中的单光子探测器,说明了为降低单光子探测器的暗计数而开发的收发端的激光同步系统。该同步系统由同步激光发射与接收方的激光甄别器组成,详细讲述了其中的同步激光甄别器各部分的制作,包括光电转换器、前置放大器、电压甄别器、电平转换电路 4 个部分。给出了最终的测试情况,通过长时间的测试实验证实了其工作稳定可靠、甄别性能良好,未发现误触发和漏触发。目前,该同步信号甄别器已成功地应用于量子密钥分发系统中,很好地实现了收发双方的同步,保证了单光子探测器的低暗计数和成码率。

关键词 量子信息;同步激光;激光甄别器;单光子探测器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0703

Development of Synchronized Laser Discriminator in Quantum Key Distribution System

Cai Wenqi Chen Tengyun Liang Hao Jin Ge

(The Key Laboratory of Physical Electronics of Anhui, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract The quantum key distribution (QKD) system and single-photon detector are introduced. For the reduction of the dark counts of the single-photon detector, a synchronized laser system which consists of a synchronized laser of the transmitter and a laser discriminator of the receiver is developed. The method of developing the synchronized laser discriminator including photo electricity translator, preamplifier, voltage discriminator and level translator is shown detailedly. Test results show that the synchronized laser discriminator works stably by long time experiments. Error discrimination and fault discrimination can not be found. Now the synchronized laser discriminator has worked well on the QKD system. Transmitter and receiver are synchronized exactly. The dark counts of the single-photon detector are reduced effectively.

Key words quantum information; synchronized laser; laser discriminator; single-photon detector

1 引言

量子密码是量子信息科学领域有实用意义的一个研究方向,已经初步实现了实用化。基于 4 量子态的 BB84 协议^[1]框架下的单光子量子密钥分发(QKD)系统,利用量子力学中的不可克隆原理和量子态测量塌缩原理^[2],可以实现无条件保密通信。但是在现有的技术条件下,真正意义上的单光子源

仍无法实现,使得基于弱相干光源的量子密码存在安全上的漏洞。诱骗态弱相干光源量子密码分发系统理论^[3,4]的提出,堵住了原有的安全漏洞,在理论上保证了信息的绝对保密性质。基于该理论提出的方法,出现了许多很有价值的实验报道^[5~7],进一步验证了其可靠性。

最近,本实验小组研制的 20 km 光纤量子密钥

收稿日期:2008-12-04;收到修改稿日期:2009-06-05

基金项目:国家自然科学基金(60625401)、中国博士后科学基金和王宽诚教育基金会资助项目。

作者简介:蔡文奇(1982—),男,博士研究生,主要从事物理电子学、量子光学及其应用方面的研究。

E-mail:caiwq@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)

分发系统^[8],利用现有的网通通信光纤,通过诱骗态方案,实现了绝对安全的实时双向保密通信。在该系统中,使用重复频率为4 MHz的窄脉冲光源,平均每脉冲信号光0.6个光子,而诱骗态0.2光子。末端单光子探测器则用同步信号门控方式接收,因此,同步信号的稳定与可靠,在一定程度上决定最终探测器的可靠性。

2 实验方案设计

20 km 实用化光纤量子密钥分发系统的结构如图 1 所示。在发射端,Signal laser 是1550 nm波长信号激光,通过强度调制器(IM)调制成强度比为3:1的信号态与诱骗态两种激光,然后由分束器(BS)进入干涉仪,干涉仪的一个臂上的相位调制器(PM)对经过此臂光纤的信号激光做相位编码,再将

两臂激光干涉合束,即完成了量子信息的加载,之后经20 km的光纤输送到接收端进行量子测量,从而测得加载于激光光子上的量子信息。

基于低暗计数的考虑,接收端的单光子探测器采取门模式的工作方式,需要对收发两端作同步处理。图 1 中 SYN IN 为1310 nm波长的同步光,经一个波分复用器(WDM)和信号激光进入同一根光纤,经过20 km的光纤传输后,再通过另一个 WDM 将两束不同波长的激光分开,利用不同波长激光在光纤中传输速度相同的原理,做到了发送与接收的两端同步。SYN OUT 为同步激光输出甄别器,包括了光电转换器、前置放大器、电信号甄别器和发射极耦合逻辑(ECL)转晶体管-晶体管逻辑(TTL)与核食品插件标准(NIM)电平等 4 部分。最后输出标准 TTL 或 NIM 信号送至单光子探测器作为同步信号。

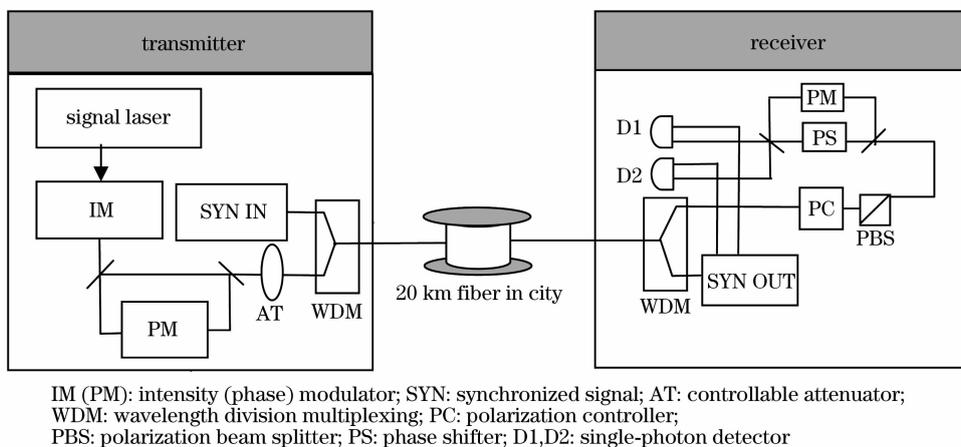


图 1 20 km 量子密钥分发系统结构图

Fig. 1 Sketch of the experimental setup for 20 km-QKD system

3 单光子探测器工作模式

单光子探测器所探测的光电流强度(一个光子功率 10^{-19} W)比光电检测器本身在室温下的热噪声水平(10^{-14} W)还要低。单光子探测器的雪崩光电管(APD)一般工作在所谓的“盖革模式”下,偏压大于雪崩电压。当有光子到达时,被 APD 吸收,触发 APD 雪崩产生电信号。雪崩效应会延续较长一段时间,即产生了所谓的死时间,因此需要采取一定的抑制电路,使雪崩发生后 APD 迅速恢复到接收光子的状态,即淬灭电路。不同的淬灭电路对应着单光子探测器不同的工作模式。常用的有 3 种:

1) 无源抑制模式:使用简单的 RC 网络被动充放电即可实现,设计简单,但时间分辨率和计数率低,暗计数高。

2) 有源抑制模式:使用开关来主动地抑制雪崩后的拖尾,其时间分辨率、计数率等较无源抑制模式提高很多,但暗计数较高^[9]。

3) 门模式:对单光子探测器加入一定宽度(门宽)、频率的同步信号,只有在“门”内才触发雪崩。相对前两种模式,其时间分辨率和计数率都较高,而暗计数大大降低,其工作原理如图 2 所示。其中虚线 V_b 为雪崩电压,只有在同步信号的高电平期间,APD 的驱动电压大于雪崩电压,此时才有可能发生

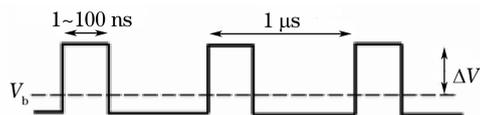


图 2 门模式原理图

Fig. 2 Principle of gated-mode operation

雪崩,在其他时刻都没有任何信号产生(包括暗计数),只有当信号光子在同步信号加载期间到达时才有可能被探测到。通过这种方式,可以显著地降低暗计数。但是门模式的实现电路相对比较复杂,需要对收发端做精确的同步。

对于重复频率为 4 MHz 的系统,每周期为 250 ns,如采用门宽为 2 ns 的同步信号作门模式抑制,则相对其他两种抑制方式可以减少 99.2% 的暗计数率。基于此种考虑,在系统中单光子探测器采取门模式的工作方式,因而也对同步信号的甄别电路提出了较高要求。同步激光甄别电路必须达到两点要求,一是对较微弱激光进行有效甄别,二是确保精确的时间定位(时间晃动小)。

4 同步激光甄别器电路

随着激光技术的迅速发展,近年来激光探测技术也日益成熟,出现了许多非常有意义的研究和新的应用^[10~12]。

在本系统中,由于 1310 nm 波长激光在光纤中的非线性展宽效应,经过光纤的传输,可能有一部分 1310 nm 光子转变为 1550 nm 左右波长的光子,从而

对信息光产生不良影响,最终导致误码率的增加。为保证误码率保持在可接受的水平以下,必须控制同步光的光强,光强越弱,对信号光的影响就越小,同时要避开 1310 nm 光的非线性展宽区域。实验证明,1310 nm 光经过 20 km 光纤后的非线性展宽时间宽度大概为 50 ns,在 4 MHz 重复频率,1.25 ns 脉宽条件下,接收端输出平均光强为 30 nW 左右,同时避开了非线性展宽区域后,同步光对信号光的影响可以忽略。

精确的时间定位:信号激光的脉冲宽度为 1 ns,同步信号门宽为 2 ns,要保证激光在 2 ns 宽的“门”内到达,该门的最大时间晃动为 0.5 ns,如果再加上信号激光与同步激光本身固有的时间晃动,对门的时间精度要求更大。

激光甄别器电路结构如图 3 所示,同步激光从接收端 WDM 分束出来后进入光电转换器转换成电脉冲信号,再经前放后进入电压甄别器中,甄别器输出为 ECL 信号,但是最终单光子探测器输入端需要标准 NIM 或 TTL 电平,因此还要通过电平转换器转换成 NIM 或 TTL 电平。单光子探测器内部自带延时器,可在 25 ns 范围内调节延时,以保证信号激光可在同步信号门加载期间到达。

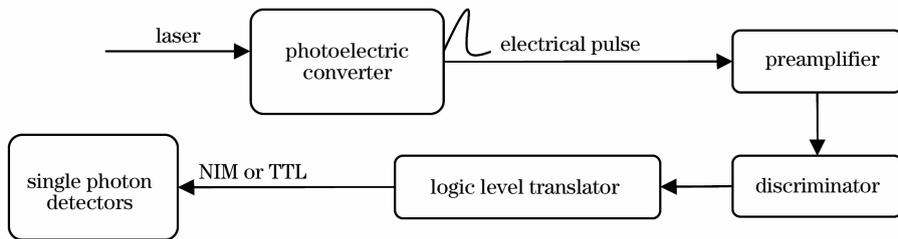


图 3 激光甄别器电路

Fig. 3 Circuit of laser discriminator

4.1 光电转换器

为了使同步光对信号光的影响保持在可承受的水平以下,同步光经过 20 km 光纤传输后,在输出端平均光强 W 应在 30 nW 水平,重复频率为 4 MHz,光脉冲宽度 1.25 ns。为此在灵敏度、带宽方面有较高要求,而且为后面甄别器考虑,光电转换器输出电脉冲有较高的信噪比。选择 New Focus 公司型号为 1611 的高速低噪声光电转换器,对 900 ~ 1700 nm 波长激光敏感,带宽 1 GHz,转换增益比值 G 为 700 V/W。因此从理论上来说,1611 中输出的电脉冲幅度约为

$$V_o = \frac{1}{4} \times \frac{1}{1.25} \times W \times G = 200 \times 30 \times 700 = 4.2 \text{ mV}. \quad (1)$$

示波器上观察在 4 mV 左右,符合较好。

4.2 前置放大器

从光电转换器出来的信号幅度仅 4 mV 左右,甄别该信号有一定难度,因此需要先经过一个低噪声的前置放大器。根据输入信号幅度小(4 mV)、脉冲宽度窄(半峰全宽 1.25 ns)的特点,选用 Ortec 公司的产品 VT120C,其上升时间 ≤ 1 ns,放大倍数 20,输入端等效噪声 $\leq 20 \mu\text{V}$,带宽 10 ~ 350 MHz,是较理想的前置放大器。由于带宽限制及传输损耗等原因,最终得到的结果是输出幅度为 50 mV 左右,放大倍数未达到理想的 20 倍,但信噪比好于 10 dB。

4.3 甄别器

待甄别信号脉宽 1.25 ns,幅度 50 mV,因此选取 MC10E1651 作为甄别器件,其 3 dB 带宽

≥ 1 GHz, 传输延时 775 ps, 上升/下降时间 350 ps, 门限宽度(迟滞宽度) 28 mV, 可以很好地满足要求。

4.4 电平转换

甄别器 1651 输出的是差分 ECL 信号, 不能直接输入到单光子探测器中, 必须先转成 NIM 或

TTL 电平。可用三极管与电阻网络组成 NIM 电平转换器, 用 MC10198 作 TTL 电平转换, 并且输出脉冲宽度均可调节。

甄别器与电平转换部分的电路如图 4 所示。

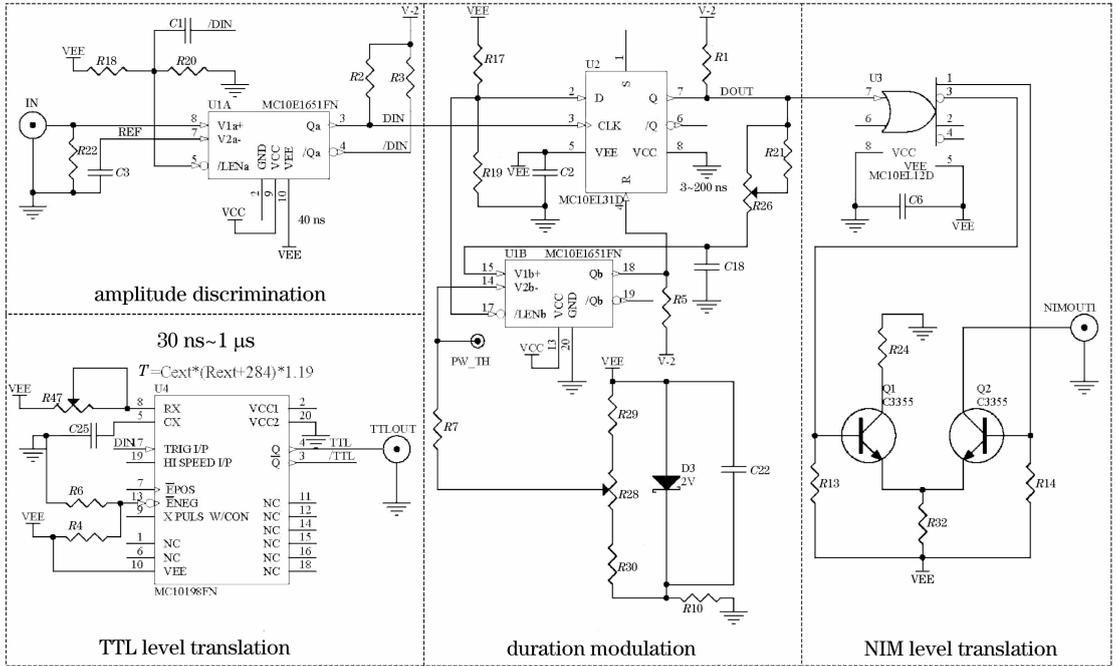


图 4 甄别器与电平转换部分电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of discriminator and logic level translator

5 测试结果

同步光甄别器已经调试成功并且已在系统中工作运行, 经长时间测试, 该甄别器工作较为稳定和可靠, 可准确探测出同步激光脉冲, 还未发现有同步信号的漏探测和误探测。

同步信号的时间晃动是最关键的指标, 引起晃动的因素有同步激光器发射激光本身的晃动, 激光经过长距离光纤传输后由于色散和非线性展宽等效效应产生的晃动, 激光甄别器探测激光时引入的时间晃动。通过 Lecoy 1 Gb 带宽示波器观察, 同步信号相对于信号激光脉冲的总体时间晃动小于 100 ps (包含了示波器本身的晃动), 输出 NIM 与 TTL 的脉冲宽度均在 2~200 ns 间可调, 很好地满足了单光子探测器的同步信号触发要求, 对于整个系统的可靠运行发挥了很好的作用, 并保证了最终的高成码率。

图 5 为通过示波器观测到的最终同步输出信号, 图中上面波形为 NIM 同步信号输出, 下面的波形为 TTL 同步信号输出。

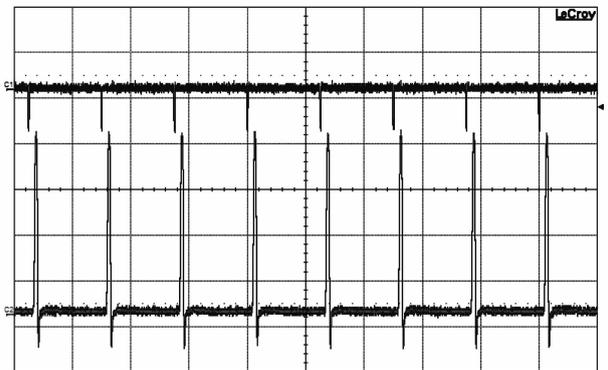


图 5 输出同步信号脉冲(上为 NIM, 下为 TTL)

Fig. 5 Output of synchronized signal (the upper signal is NIM, and the below signal is TTL)

6 结论

在该同步光甄别器中, 设计方案的光电转换与甄别部分是各自独立的, 并且甄别器的比较阈值可调节, 所以也可以作为单独的电压甄别器使用。并且可以根据不同的要求, 设计多路输出口或多种电平输出, 稍加改变就可以运行在更多的场合。

参 考 文 献

- 1 C. H. Bennett, G. Brassard. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [C]. *Proceeding of the IEEE International Conference on Computer, Systems and Signal Processing*, 1984. 175~179
- 2 W. K. Wootters, W. H. Zurek. A single quantum cannot be cloned [J]. *Nature (London)*, 1982, **299**:802 - 803
- 3 X. Wang. Beating the photon-number-splitting attack in practical quantum cryptography [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(23):230503
- 4 H. Lo, X. Ma, K. Chen. Decoy state quantum key distribution [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(23):230504
- 5 Y. Zhao, B. Qi, X. Ma *et al.*. Experimental quantum key distribution with decoy states [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(7):070502
- 6 C. Peng, J. Zhang, D. Yang *et al.*. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(1):010505
- 7 D. Rosenberg, J. W. Harrington, P. R. Rice *et al.*. Long-distance decoy-state quantum key distribution in optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(1):010503
- 8 Teng-Yun Chen, Yang Liu, Wen-Qi Cai *et al.*. Field test of a practical secure communication network with decoy-state quantum cryptography [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8):6540~6549
- 9 Wei Xiao, Yang Tao, Peng Chengzhi *et al.*. Research of a SiAPD single photon detector in a constant temperature system [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2006, **26**(6):1013~1016
韦 啸, 杨 涛, 彭承志 等. 恒温控制下的硅雪崩光电二极管单光子探测器的研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2006, **26**(6):1013~1016
- 10 He Ning, Liao Xin, Ao Faliang. Application of laser in the measurement of object surface coating uniformity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(Suppl.):189~192
何 宁, 廖 欣, 敖发良. 激光在物体表面涂层均匀度探测中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(增刊):189~192
- 11 Wang Jingfeng, Zhang Haiyang, Zhao Changming *et al.*. Injection seeding Nd:YAG laser and its application in heterodyne detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):186~190
王景峰, 张海洋, 赵长明 等. 种子注入固体激光相干探测实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):186~190
- 12 Li Li, Lu Qisheng, Jiang Houman *et al.*. Photoconduction-type CdS detector irradiated by two laser beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):85~89
李 莉, 陆启生, 江厚满 等. 双光束组合激光辐照型 CdS 光电探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):85~89

《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于 2009 年 7 月正刊上出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于 2010 年 7 月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010 年 4 月 15 日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: C JL@siom. ac. cn;电话:021-69918427。