

量子保密通信用增益开关半导体脉冲激光器

周 强^{1,2} 刘金璐² 谷远辉¹ 樊 矾² 王云祥¹ 徐兵杰²

¹电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

²保密通信重点实验室, 四川 成都 610041

摘要 近 30 年来,量子信息科技是令人激动的研究领域之一。其中,量子保密通信技术,已逐渐开始从实验研究迈向工程应用,有望率先实现商用化发展。面向量子保密通信系统的全面普及和推广,基于半导体激光器的增益开关效应和商品电子学芯片,设计和实现了皮秒脉冲激光器模块。其特点包括:工作波长位于光纤量子信道的低损窗口,即 1.5 μm 波段;输出光频的波动小于 20 MHz;光脉冲的时域宽度为 10 个皮秒量级;输出光脉冲间不具有确定的相位关系。进一步地,结合“弱相干”单光子源在量子保密通信技术中的应用,对上述特点进行检验和讨论。

关键词 量子光学;量子保密通信;半导体激光器;脉冲激光器;增益开关

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0502005

Gain-Switched Semiconductor Pulsed Laser for Quantum Secure Communication

Zhou Qiang^{1,2} Liu Jinlu² Gu Yuanhui¹ Fan Fan² Wang Yunxiang¹ Xu Bingjie²

¹*School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology,*

Chengdu, Sichuan 610054, China

²*Science and Technology on Communication Security Laboratory, Chengdu, Sichuan 610041, China*

Abstract In the last three decades, quantum information science and technology is one of the most exciting research fields. Among all the achievements, quantum secure communication technology is gradually started from experimental research to engineering application and expected to take the lead in achieving the commercial development. Towards the comprehensive popularization of the quantum secure communication system, a picosecond pulsed laser module has been designed and fabricated based on the gain-switching effect of the semiconductor laser and commercial electronic chips. The realized laser module has the following properties: operating wavelength at the low transmission loss window of fiber quantum channel, i. e., 1.5 μm ; with a frequency fluctuation of less than 20 MHz; pulse time domain width of tens of picoseconds; no fixed phase correlation between any two pulses. Moreover, these properties are verified and discussed based on the requirement of weak coherent single photon source for quantum secure communication application.

Key words quantum optics; quantum secure communication; semiconductor lasers; pulsed lasers; gain switching

OCIS codes 270.5568; 060.5565; 140.5960; 140.3538

1 引 言

量子信息科技旨在将量子力学基本原理和量子资源应用到信息科技的交叉研究领域^[1-3]。利用不同的量子物理系统,如光子、原子/离子、量子点、超导量子线路和纳米机械结构等,研究人员在信息的处理、传输和获取等方面开展了大量的研究工作,并取得了显著的成果^[4]。在众多的量子物理系统中,光子不易与外部环境发生耦合,易于保持自身的量子状态,便于通过量子通道进行可靠、高速和高效传递。在量子信息的应

收稿日期: 2015-12-30; 收到修改稿日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61405030, 61501414, 61308041)、教育部中央高校科研业务经费、电子科大科研启动经费

作者简介: 周 强(1984—),男,博士,讲师,主要从事复合量子信息系统方面的研究。

E-mail: zhouqiang@uestc.edu.cn(通信联系人)

用中,其被广泛用作量子信息的载体。其中的一个成功示范是量子保密通信技术,其原理方案由 C H Bennett 等^[5]于 1984 年提出,其主要目的是利用量子物理的基本原理,解决通信双方(通常称作 Alice 和 Bob)间进行密钥分发的安全问题;在此基础上,双方利用安全性已被信息理论证明的“一次一密”加解密算法,实现绝对安全的保密通信。区别于经典保密通信中基于数学问题求解难度的安全性假设,量子保密通信的安全性根植于量子物理的基本原理,其优异的信息安全特性,吸引了大量的关注和研究投入。目前,基于光量子系统,研究人员已经在 100 km 的地理尺度范围内,完成了点对点通信系统的实验验证,并基于可信中继的方案,实现了该技术的网络化发展^[6-7]。目前,已有相应的商品系统可供购买。

但与经典通信相比,量子保密通信还未实现全面普及和推广。主要原因在于,该系统组成中涵盖丰富的光电子学技术,包括单光子产生、量子随机数产生、光子态高速调制、量子通道稳定控制、光子态高速检测、单光子探测及生成安全密钥的后处理等。在已报道的工作中,研究人员侧重于不同量子保密通信方案的安全性和原理实验论证,因此该领域仍处于多种技术路线并存,最佳技术路线不断探寻的阶段。实现量子保密通信技术的全面普及和推广,需要对上述光电子学技术进行技术创新和优化,研制可全面推广和普及的高性价比量子保密通信系统。

在上述背景下,本文报道了一种可用于“弱相干”单光子产生的增益开关脉冲激光器的实现方案。从实际量子保密通信系统的安全性出发,人们对“弱相干”单光子的产生方案提出以下要求:1) 在频率、偏振和时间等自由度上可灵活操控;2) 每个单光子波包具有随机的相位^[8]。基于增益开关效应实现的半导体脉冲激光器可以满足上述要求。同时,相比于激光器的外调制、调 Q 和锁模等激光脉冲产生方案,该方案可极大地简化“弱相干”单光子的产生^[9-11]。制作实现的脉冲激光器输出光脉冲的宽度为 19 ps,重复频率可达到 250 MHz;激光器的中心波长可在 4 nm 范围内进行调谐;在固定输出波长的情况下,其频率波动小于 20 MHz。结果表明,增益开关半导体激光器可实现 10 个皮秒量级的高质量激光脉冲产生,在量子保密通信中有很大的应用潜力。

2 基本原理

2.1 半导体激光器的增益开关技术

与调 Q 和锁模(相)技术相比,半导体激光器的增益开关技术产生光脉冲的方法更为便捷,仅需在其上加脉冲宽和能量受限的电流脉冲,即可灵活地控制激光脉冲的产生^[9-14]。先讨论半导体激光器中的增益开关过程:在 $t=0$ 时刻,把电流脉冲加载到半导体激光器上。该电流脉冲的偏置电流 I_b 的取值范围为 $[0, I_{th})$ 。其中, I_{th} 为激光器的阈值电流;在电流脉冲刚开始加载时,激光腔内通过自发辐射过程产生光子。在这一时段,腔内的光子数缓慢增加,并且没有大量的受激辐射过程发生,使得上能级载流子(电子)数不断积累,并迅速达到且超过受激辐射所需的粒子数反转条件,在受激辐射作用下,腔内的光子数迅速增加;尽管电流持续流过增益媒质,但由于受激辐射过程消耗了大量上能级粒子,使得其数目迅速减小到受激辐射所需的反转条件。此时,腔内的光子数达到最大值,并实现单个增益开关激光脉冲的输出;此后,若停止向腔内注入载流子,腔内的粒子数反转水平将进一步降低,光子数也不断减少,并迅速减少到电流注入之前的腔内光子数水平(在没有偏置电流的情况下,该光子数水平为真空涨落);若电流脉冲继续流过激光器,上述过程重复发生,进而输出多个增益开关激光脉冲;若相比于激光腔内光子的寿命,电流注入时间进一步延长到数个纳秒,激光器会在多个增益开关脉冲峰后,进入稳定激射状态^[15]。针对产生单个增益开关脉冲峰的情况进行实现。

上述过程可发现,半导体激光器的增益开关过程涉及的光子和载流子浓度之间的变化关系,与 Q 开关过程类似。但相较于普通 Q 开关激光腔,半导体激光腔具有更小的光子寿命,使得从两者中输出激光脉冲的能量、峰值功率和脉冲宽度各不相同^[9-10]。定量分析的速率方程为^[9,16-17]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_e}{dt} &= \frac{I}{eV} - \frac{N_e}{\tau_e} - \frac{G_A(N_e - N_0)N_p}{1 + \kappa N_p} \\ \frac{dN_p}{dt} &= \frac{G_A(N_e - N_0)N_p}{1 + \kappa N_p} - \frac{N_p}{\tau_p} + \frac{\Gamma\beta N_e}{\tau_e} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, N_e 和 N_p 分别是腔内的电子和光子浓度; τ_e 和 τ_p 分别是电子和光子在腔内的寿命; G_A 是腔内有源媒质的增益常数; I 是注入电流值; e 是单个电子的带电量; V 是半导体激光器有源区的体积; N_0 是透明载流子(电子)浓度; β 是自发辐射系数, 约为 10^{-3} 量级; κ 为增益饱和(压缩)系数, 约为 10^{-17} cm^{-3} 量级; Γ 为光学限制系数。对(1)式进行求解, 可以得到腔内光子数的动态变化情况, 并进一步分析出激光脉冲的峰值功率和时间宽度等参数。已有的理论分析表明, 对于单次增益开关输出光脉冲的情况, 激光脉冲的宽度约为激光腔中光子寿命的 5 倍, 典型的半导体激光器中光子的寿命为 $2\sim 3 \text{ ps}$ 。因此, 当使用百个皮秒量级电流脉冲激励单次增益开关过程时, 在理论上可以实现 10 个皮秒量级的激光脉冲产生^[11]。

2.2 实现增益开关激光器的原理方案

如何产生百个皮秒量级的电流脉冲, 是实现单个增益开关激光脉冲产生的关键技术。在已报道的工作中, 上述电流脉冲的产生方案主要有: 基于微波信号源配合微波放大器、雪崩晶体管和阶跃恢复二极管等^[18-23]。上述方案方便对增益开关激光器的特性进行实验研究, 但它们需要昂贵的微波器件和调试繁复的模拟电路, 增加了方案的成本和复杂性, 且难以灵活地操控激光脉冲的产生, 限制了这些方案在量子保密通信中的应用。随着信息技术的不断发展, 数字芯片的工作带宽已经提升到 10 GHz 以上。因此, 可以直接使用数字电子器件配合射频三极管实现数百个皮秒电流脉冲的产生, 进而实现 10 个皮秒量级的增益开关激光脉冲的产生。图 1 给出了实现增益开关激光脉冲产生的原理方案。基于现场可编程逻辑器件(FPGA)、数字信号脉宽压缩器和射频(RF)三极管, 实现百个皮秒电流脉冲的产生, 通过将其加载到商品半导体激光器上, 可直接产生高质量的增益开关激光脉冲。

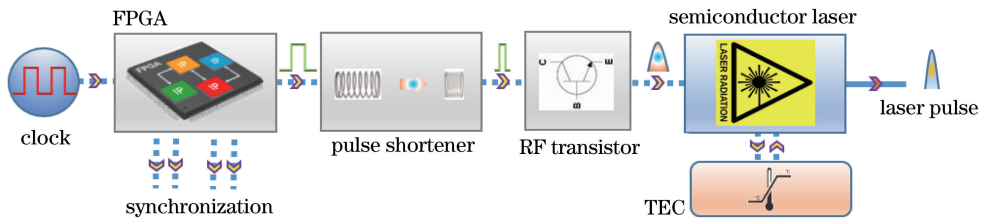


图 1 基于数字电子器件的增益开关激光脉冲产生原理方案

Fig. 1 Schematic of gain-switched laser pulse generation based on digital electronic devices

在图 1 的方案中, 使用 FPGA 读取系统的时钟信息, 并从其中分别输出用于触发和同步激光脉冲的触发和同步电信号(synchronization)。使用数字信号脉宽压缩器将触发电信号的脉宽压窄到百个皮秒量级, 并保证其幅值大于射频三极管的开启电压。将压窄后的电压信号输入到射频三极管(RF transistor)中, 通过射频三极管的导通效应产生脉宽约为百个皮秒量级的脉冲电流。将该电流注入到半导体激光器中, 即可从激光器中产生数十个皮秒的激光脉冲。为了实现对激光器输出波长的连续调谐和稳定控制, 使用比例-积分-微分(PID)反馈控制技术的温度控制单元(TEC), 对激光器的温度进行控制, 进而对输出波长进行调谐和稳定控制。

3 实验结果

在制作出增益开关半导体脉宽激光器的基础上, 对它的性能特点进行实验测试和分析。首先, 使用实时数字示波器(Wave Master 8600A, LeCroy), 对信号脉宽压缩器的性能进行了实验测试。图 2(a)中给出了相应的测量结果, 可见测量得到电信号的重复频率为 250 MHz, 对应的半峰全宽为 250 ps, 峰峰值为 2.5 V, 大于方案中射频三极管的开启电压 0.7 V, 如图 2(a)中虚线所示。在射频三极管的作用下, 将图 2(a)中所示的电压信号, 转换为与之对应的电流信号。由于三极管的导通效应, 使得产生的电流信号的半峰全宽减小到约 190 ps。将该电流信号直接加载到商品半导体激光器(CQF975, JDSU Uniphase)上, 在增益开关效应的作用下, 即可产生 10 个皮秒量级的激光脉冲。使用宽带光电探测器(AD200xr, New Port)和实时数字示波器, 对输出的激光脉冲进行测量, 图 2(b)中的结果为测量得到的对应电信号。可以看到, 产生激光脉冲的重复频率为 250 MHz, 与触发信号保持一致; 测量得到激光脉冲的时域宽度为 192 ps, 这受限于光电探测器和示波器的带宽。进一步地, 使用二阶自相关仪(FR-103XL, Femtochrome Research Inc), 对激光器输出脉冲

的实际宽度进行测量。图 2(b)套图中给出了测量得到激光脉冲的时域波形,其对应的光脉冲宽度为 19 ps,与已有的理论预期相互吻合^[11]。

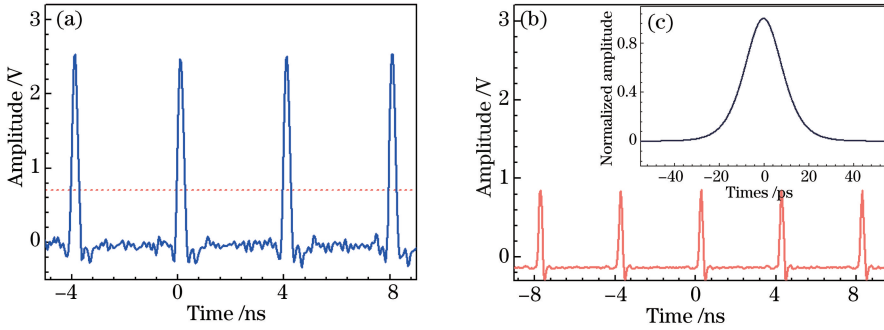


图 2 实验测量结果。(a) 数字信号脉宽压缩器中输出电信号的测量结果;

(b) 光电探测和实时示波器测量得到的光脉冲时域波形; (c) 使用二阶自相关仪测量得到的光脉冲波形

Fig. 2 Experimental results. (a) Output electrical signal from digital signal pulse shortener;

(b) laser pulses of time domain waveform measured by photon detector and real-time oscilloscope;

(c) laser pulse measured using second-order auto-correlation instrument

值得指出的是,在三极管开启时,电流流过半导体激光器产生激光脉冲;而当其关断时,没有电流流过半导体激光器。因此,当从激光器中输出一个激光脉冲后,激光器腔内剩余的光子将极大地衰减并迅速回到真空涨落水平。例如,当激光脉冲输出 100 ps 后(典型半导体激光器中光子的寿命为 2 ps^[11]),激光器腔对腔内剩余光子的光学衰减可达到 150 dB 以上,剩余的平均光子数远小于 1,即达到真空涨落的水平。因此,在激光器产生光脉冲的重复频率小于 10 GHz 的情况下,激光器中产生的每一个光脉冲,均始于腔内的真空涨落。基于量子力学的海森堡不确定性关系,不难发现任何两个激光脉冲之间将不存在确定的相位关系^[8],满足量子保密通信系统对量子随机数发生器的要求^[24]。另外,激光脉冲相位随机的特性,还可弥补量子保密通信系统中存在的“USD 攻击漏洞”^[25]。

基于 TEC 对激光器的输出波长进行调谐和稳定控制。其物理原理是:通过调整半导体激光芯片的温度,改变半导体激光腔的谐振,进而对激光器输出波长进行调谐。图 3(a)中给出了不同温度下,激光器输出光波长的测量结果,测量使用的光谱仪的型号为(OSA,MS9710C,Anritsu)。测量结果表明:在实验中,激光器的波长可以在 4 nm 范围内进行输出。使用两束同频激光之间的拍频测量方法,对激光器输出波长的稳定性进行了实验测量。在实验中,两个激光器被设定为直流工作模式,并把半导体激光芯片的温度变化控制在 0.01 °C 之内。图 3(b)所示为测量得到的两束激光间的拍频测量结果。其中,圆点为不同时刻测量到的频谱信号的中心频率,即两束激光间的绝对频率差;实线为该频率差的平均值(4.6 MHz),阴影部分为正负 1 倍标准差(3.3 MHz)的覆盖范围。若两束激光输出的频率没有任何波动,那么该频率差应为一个常数;相

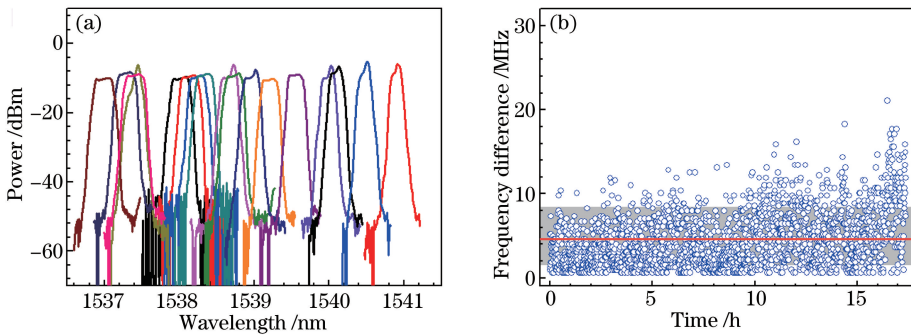


图 3 激光器输出波长调谐和稳定的实验测量结果。(a) 不同温度下,激光器的输出波长;

(b) 在特定温度下,两束独立激光束之间绝对频率差

Fig. 3 Experimental results for laser output wavelength tuning and stability. (a) Laser output wavelengths under different temperatures; (b) absolute frequency difference between two independent lasers under certain temperature

反,若两激光束的频率随着时间波动,那么该频率差也随之变化。因此,测量得到的频率差可以反应输出的两束激光的频率(波长)稳定性。测量结果表明:两束激光的输出频率长期稳定在设定值处,单个激光器输出频率的波动不大于 20 MHz。

4 结 论

针对增益开关脉冲激光器进行了分析和实现,取得的结果包括:1) 制作实现的激光器能够实现重复频率达 250 MHz,脉宽为 19 ps 的激光脉冲产生,且每个激光脉冲之间不具有确定的相位关系;2) 输出波长可通过调节激光器的温度进行调谐和稳定,调谐范围可达 4 nm,且其输出频率的波动小于 20 MHz。在此基础上,通过使用光学衰减器,便可实现“弱相干”单光子的产生;通过配合量子态和诱骗态的制备装置,可实现光量子比特的制备。另一方面,制作的脉冲激光器还可作为量子随机数产生的物理基础,应用在量子保密通信系统中。同时,实现的激光器模块具有稳定的输出波长,可以直接应用到测量器件无关的量子保密通信方案中,满足其中 Hong-Ou-Mandel 干涉对两个独立光量子比特的频域不可区分的要求^[8,26]。因此,设计和实现的脉冲激光器,可作为量子保密通信技术的关键功能部件,加快该领域的进一步普及和实用化发展。相比于已报道的方案,所报道的脉冲激光器还具有产生光脉冲的质量好、使用简单和运行可靠等特点,在保证性能的同时,可大大降低获得 10 个皮秒量级激光脉冲的成本。因此,从功能部件的角度出发,该激光器可以推动量子信息科技相关领域的实用化发展,比如基于非线性光学的量子光源^[27-29]。另外,实现的百个皮秒电流脉冲源与温度控制单元,还可用于 800 nm、1.0 μm 及 2.0 μm 波段的增益开关激光脉冲产生,推动光电子技术生物光子学、微细加工和光学传感方面的实用化发展。

致 谢 感谢彭增寿老师在电子学设计和制作方面的帮助;感谢邱琪教授实验室提供的电子学脉冲和激光脉冲测试条件。本文得到电子科技大学海外研修计划和国家留学基金委“未来科学家”计划的支持。

参 考 文 献

- 1 曾谨言. 量子力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 2 Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation and quantum information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 3 Zhou Zhengwei, Chen Wei, Sun Fangwen, *et al.*. A survey on quantum information technology[J]. Chin Sci Bull, 2012, 57(17): 1498-1525.
周正威, 陈 巍, 孙方稳, 等. 量子信息技术纵览[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1498-1525.
- 4 Kurizki G, Bertet P, Kubo Y, *et al.*. Quantum technologies with hybrid systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(13): 3866-3873.
- 5 Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing[J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560(1-4): 7-11.
- 6 Liu Yang, Chen Tengyun, Wang Jian, *et al.*. Decoy-state quantum key distribution with polarized photons over 200 km[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 8587-8594.
- 7 Sasaki M, Fujiwara M, Ishizuka H, *et al.*. Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD network[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10387-10409.
- 8 Lo H K, Curty M, Qi B. Measurement-device-independent quantum key distribution[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(13): 130503.
- 9 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. The principle of laser[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2000.
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- 10 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 163-165.
王 旌, 张洪明, 张 黎, 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 163-165.
- 11 Lau K Y. Gain switching of semiconductor injection lasers[J]. Applied Physics Letters, 1988, 52(4): 257-259.
- 12 Zhu Chen, Wang Xiongfei, Zhang Kun, *et al.*. Experimental study of high power pulse fiber laser based on gain-switched

- LD[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(2): 145-148.
- 朱 辰, 王雄飞, 张 昆, 等. 基于增益开关 LD 的高功率脉冲光纤激光器研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(2): 145-148.
- 13 Wang Xiong, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Contrastive research on hybrid-pump pulse and gain-switch pulse Tm-Ho co-doped fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302010.
- 王 雄, 周 朴, 王小林, 等. 混合抽运和增益开关铥/钬共掺脉冲光纤激光器对比研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302010.
- 14 Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Wei Shouyu, *et al.*. 1570 nm nanosecond pulse generation from Er/Yb co-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q-switched[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1002006.
- 金东臣, 孙若愚, 魏守宇, 等. 基于光纤被动调 Q 的 1570 nm 纳秒脉冲铒镱双掺全光纤双腔激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1002006.
- 15 Yuan Z L, Lucamarini M, Dynes J F, *et al.*. Robust random number generation using steady-state emission of gain-switched laser diodes[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 261112.
- 16 Zhou Fuzheng, Ma Guobin, Shen Liqing, *et al.*. Studies on the ps gain-switching of a semiconductor laser[J]. *Acta Phys Sin*, 1994, 43(4): 580-590.
- 周复正, 马国彬, 沈丽青, 等. 半导体激光器的微微秒增益开关特性研究[J]. *物理学报*, 1994, 43(4): 580-590.
- 17 Ma Xiaohong, Yu Jinlong, Dai Jufeng, *et al.*. Extraction of the parameters of laser rate equation by measurement and dynamic character experiment[J]. *Acta Electronics Sinica*, 2002, 30(9): 1295-1297.
- 马晓红, 于晋龙, 戴居丰, 等. 激光器速率方程参数的实验提取及动态特性实验[J]. *电子学报*, 2002, 30(9): 1295-1297.
- 18 Qiu Kun, Gao Yizhi, Zhou Bingkun. Production of ultrashort optical pulses by direct modulation of a 1.3 μm InGaAsP/InP semiconductor laser diode[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1991, 20(1): 38-40.
- 邱 昆, 高以智, 周炳琨. 长波长 1.3 μm 直接调制 InGaAsP/InP 半导体激光器产生超短光脉冲[J]. *高速摄影与光子学*, 1991, 20(1): 38-40.
- 19 Wang Yuncai. Experimental study on the timing jitter of gain-switched laser diodes with photon injection[J]. *Acta Phys Sin*, 2003, 52(9): 2190-2193.
- 王云才. 增益开关半导体激光器在外光注入下脉冲抖动的实验研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(9): 2190-2193.
- 20 Lanz B, Vainshtein S, Kostamovaara J. High power gain-switched laser diode using a superfast GaAs avalanche transistor for pumping[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(8): 081122.
- 21 Pataca D M, Gunning P, Rocha M L, *et al.*. Gain-switched DFB lasers[J]. *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, 1997, 1(1): 46-63.
- 22 董 帅. 用于光量子信息实验的直调窄脉冲激光源[D]. 北京: 清华大学, 2012: 19-30.
- 23 Haibin Du, Yan Liang, Shengxiang Zhang, *et al.*. Practical high-speed light source for decoy-state quantum key distribution[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072702.
- 24 周 强. 一种真随机数产生方法以及装置: 中国, CN103942030A[P]. 2014-07-23.
- 25 Tang Yanlin, Yin Hualei, Ma Xiongfang, *et al.*. Source attack of decoy-state quantum key distribution using phase information[J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(2): 022308.
- 26 Hong C K, Ou Z Y, Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 59(18): 2044-2046.
- 27 Zhou Qiang, Zhang Wei, Cheng Jierong, *et al.*. Properties of optical fiber based synchronous heralded single photon sources at 1.5 μm [J]. *Physics Letters A*, 2011, 375: 2274-2277.
- 28 Zhou Qiang, Zhang Wei, Wang Pengxiang, *et al.*. Polarization entanglement generation at 1.5 μm based on walk-off effect due to fiber birefringence[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1679-1681.
- 29 Zhou Qiang, Zhang Wei, Tianzhu Niu, *et al.*. A polarization maintaining scheme for 1.5 μm polarization entangled photon pair generation in optical fibers[J]. *The European Physical Journal D*, 2013, 67: 202.