

用于量子通信的增益开关半导体激光器研究进展

彭柏语¹, 袁晨智^{1*}, 张瑞明¹, 沈思¹, 张子昌¹, 李加睿¹, 林毅¹, 邓光伟¹, 王激^{1,2}, 宋海智^{1,2}, 周强^{1**}¹电子科技大学基础与前沿研究院, 四川 成都 610054;²西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 量子通信是当前量子信息领域的研究前沿和热点。增益开关半导体激光产生技术是一种实现脉冲激光产生的成熟方法, 将其与注入锁定技术结合, 可以满足量子通信应用对激光脉冲的需求。系统地介绍了增益开关半导体激光器的工作原理和注入锁定方案, 以及其在量子密钥分发、量子随机数产生等方面的应用现状, 着重从物理原理、实验方案和最新研究进展等方面进行阐述, 并对其下一步的发展进行简要展望。

关键词 量子光学; 量子通信; 增益开关技术; 半导体激光器; 注入锁定技术

中图分类号 O4-1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0327007

Progress in Gain-Switched Semiconductor Lasers for Quantum Communication

Peng Boyu¹, Yuan Chenzhi^{1*}, Zhang Ruiming¹, Shen Si¹, Zhang Zichang¹, Li Jiarui¹,
Lin Yi¹, Deng Guangwei¹, Wang You^{1,2}, Song Haizhi^{1,2}, Zhou Qiang^{1**}¹*Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;*²*Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China*

Abstract Quantum communication is the current research frontier and hotspot in quantum field. The gain-switched semiconductor laser generation technology is a relatively mature method to generate pulsed laser, and can meet the demand for pulsed laser in quantum communication when it is combined with the injection-locking technology. This article systematically introduces the working principle of gain-switched semiconductor lasers, injection-locking schemes, and their applications in quantum key distribution, quantum random number generation, etc. The relevant physical principles, experimental schemes, and recent progress are emphasized, and a brief outlook on the development in the future is finally given.

Key words quantum optics; quantum communication; gain-switching technology; semiconductor laser; injection-locking technology

1 引言

激光器的增益开关技术是一种利用激光谐振腔中的弛豫振荡现象实现光脉冲输出的方案。增益开关半导体激光器结合了半导体激光器和增益开关技

术, 具有体积小、性价比高、结构简单、重复频率任意可调等特点, 广泛应用于经典光通信领域。量子通信是利用量子物理原理实现量子信息传递的新兴科技^[1]。量子通信领域目前最为成熟的应用技术是量子密钥分发(QKD)^[2], 即在传递量子信息的基础上

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-10; 录用日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0307400, 2017YFA0304000, 2017YFB0405100, 2018YFA0306102)、国家自然科学基金(61775025, 62005039, 91836102, U19A2076, 12074058)、中国博士后科学基金(2020M673178)

通信作者: *c. z. yuan@uestc.edu.cn; **zhouqiang@uestc.edu.cn

进行经典通信协商以完成密钥安全分发。自 1984 年 IBM 的 Bennett 等^[3]提出 BB84 协议以来, QKD 技术在安全性理论研究和实用性实验研究方面迅速发展, 其安全性随着诱骗态(包含传递密码信息的信号态与查找窃听者的诱骗态) QKD 协议和测量设备无关的量子密钥分发协议(MDI-QKD)的提出而得到不断完善。同时, QKD 在产业化的道路上稳步前进, 典型的应用场景包括“京-沪量子干线”长距离光纤基 QKD、基于量子卫星(如“墨子号”)的“跨越 4600 km 的天地一体化量子通信网络^[4]”等。

近年来, 有学者提出将增益开关半导体激光器应用于 QKD, 以满足 QKD 对于相位随机激光脉冲的需求。相位随机激光脉冲是 QKD 系统安全性的基本保障之一。在未实现相位随机化的情况下, 利用 USD(Unambiguous State Discrimination) 攻击^[5]可以对 QKD 系统进行攻击, 进而区分出信号态与诱骗态。现有的获取相位随机激光脉冲的方法有两种: 第一种方法利用外部调制技术, 需要使用随机信号发生装置和相位调制器; 第二种方法基于直接调制技术^[6]。直接调制技术相比外部调制技术, 可以省去复杂的调制电路和调制器件。增益开关技术作为一种典型的直接调制技术, 其输出激光脉冲的相位来源于场的真空涨落, 因而天然具有随机化的特点。然而, 增益开关半导体激光器产生的脉冲具有较大的时间抖动, 且存在带宽较大、频率不稳定等问题, 会直接影响 QKD 中的时钟同步以及双光子干涉等过程, 导致误码率上升。注入锁定技术能够有效抑制增益开关半导体激光器所产生脉冲的时间抖动, 减小脉冲带宽, 提升其频率稳定性, 同时保留了相位随机的特点。因而结合注入锁定技术, 增益开关半导体激光器在量子信息领域具有较好的应用前景。

2 增益开关半导体激光器的注入锁定技术原理

2.1 半导体激光器原理

在 20 世纪 60 年代, 苏联学者、1964 年诺贝尔物理学奖获得者 Basov 等^[7]在理论上提出了在半导体 P-N 结中实现粒子数反转并产生激光的设想, 以及将载流子注入 P-N 结中实现半导体注入激光器的理论^[8]。与此同时, 法国国立电信研究中心的 Bernard 和 Duraffourg^[9]正式提出了在半导体中实现粒子数反转的必要条件。在半导体材料中, 粒子数反转指的是处于高能级上的电子数大于处于低能

级上的电子数, 准费米能级(E_1 、 E_2)分别进入导带和价带, 且中间的宽度大于禁带宽度(E_g)。这是一种非平衡状态, 需要适当的外部激励, 外部激励常见的方法包括电注入和光注入等。达到粒子数反转之后, 电子空穴复合, 辐射出光子。满足特定谐振条件的光子会与半导体有源区中受激粒子相互作用, 从而发生受激辐射。当光在谐振腔内的增益大于损耗时, 半导体激光器就可以输出激光。

1962 年, 美国通用电气研究实验室的 Hall 等^[10]采用新的谐振腔结构, 成功研制出了 GaAs 半导体激光器。但因为其较大的阈值电流和严苛的环境温度, 这种同质结半导体激光器并没有被投入到任何实际应用中。随后, 美国加州大学圣塔芭芭拉分校的 Kroemer 和苏联科学院的 Alferov 分别独立提出了异质结半导体激光器的概念, 这极大地推进了该领域的发展。1970 年初, 美国贝尔实验室的 Panish 等^[11]成功研制了在室温下可稳定运行的双异质结注入型半导体激光器, 大大降低了阈值电流密度, 成功实现室温条件下的连续受激激发。但是该激光器的使用寿命极短, 稳定性也不足。对此, 科研人员不断改进器件结构, 使得半导体激光器的工作寿命不断延长, 最终使半导体激光器应用于第一代光纤通信系统。

随着光纤通信系统的发展, 科研人员相继研制出了分布式反馈(DFB)激光器、量子阱激光器、垂直腔面发射激光器(VCSEL)、外腔半导体激光器(ECDL)。这些激光器在不同的工艺方式下可实现单频、窄线宽和波长可调谐的特性, 进而被广泛应用于光通信、光传感和量子调控等领域。

2.2 增益开关技术原理

目前, 产生窄脉冲激光的常见技术包括调 Q 技术、锁模技术、增益开关技术等。不同的方法可以产生重复频率、脉宽、功率等特性不尽相同的激光脉冲^[12-13]。上述三种技术中, 增益开关技术的原理相对简单, 结构简单, 设置灵活, 性能稳定, 重复频率连续可调, 容易实现可调谐输出, 目前已广泛应用于激光短脉冲产生。

增益开关半导体激光器技术是指用高频电脉冲或正弦电信号直接作用于半导体激光器, 利用半导体激光器弛豫振荡特性来输出激光脉冲的一种直接调制方式^[14]。当初始直流偏置低于激光器的阈值电压, 且脉冲电流强度低于半导体激光阈值时, 激光器中只存在少量的自发辐射, 激光增益处于“关”状态, 激光器无光输出。当电脉冲强度高于半导体激

射阈值时,载流子由基态至激发态的跃迁可以使得载流子密度逐渐升高,进而形成粒子数反转,激光增益处于“开”状态,并通过受激辐射释放出光。半导体激光器的弛豫振荡是指在增益或者损耗改变的瞬间(驱动电流注入),激光腔在达到稳态输出之前会有一系列衰减振荡的尖峰。通过对泵浦信号进行控制并在弛豫振荡的第一个尖峰之后立即停止注入电信号,可以控制输出脉冲的形状和宽度^[15]。图 1 展

示了施加不同宽度电脉冲于半导体激光器时输出光功率与载流子密度的变化过程。图 1(a)中,较窄的电流脉冲在载流子密度下降后迅速中止,从而使得激光器停止弛豫振荡,只输出一个光脉冲。图 1(b)中,电流脉冲的加宽使得载流子密度在降低后再次升高,弛豫振荡过程出现第二个尖峰,故激光器可以输出第二个光脉冲。图 1 中 P_o 、 N_c 和 I_i 分别为半导体激光器输出的光功率、载流子密度和注入电流。

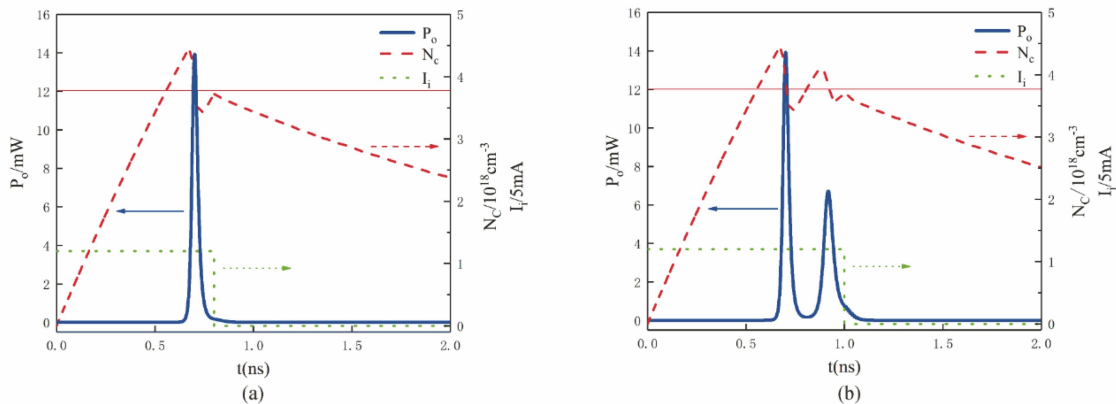


图 1 理论计算得到的激光器驱动电信号时域波形、输出光强时域波形、载流子密度随时间的演化^[14]。

(a)激光器上施加宽度为 0.8 ns 的电脉冲;(b)激光器上施加宽度为 1.0 ns 的电脉冲

Fig. 1 Theoretically calculated temporal evolutions of electronic signal and optical output and carrier density varying with time^[14]. (a) Width of electric pulse applied to laser is 0.8 ns; (b) width of electric pulse applied to laser is 1.0 ns

由上述原理可以看到,在增益开关激光器中,脉冲电流的产生是一个关键环节。本文作者在 2015 年提出了基于数字电子器件的增益开关半导体激光器,并将其作为光源应用于量子保密通信的方案^[14]。其中,增益开关半导体激光器的实现方案如

图 2 所示。基于现场可编程门阵列(FPGA)、数字信号脉宽压缩器和射频(RF)三极管可产生百皮秒量级的电流脉冲。通过将电脉冲直接加载在商用半导体激光器上可直接产生高质量的增益开关激光脉冲。

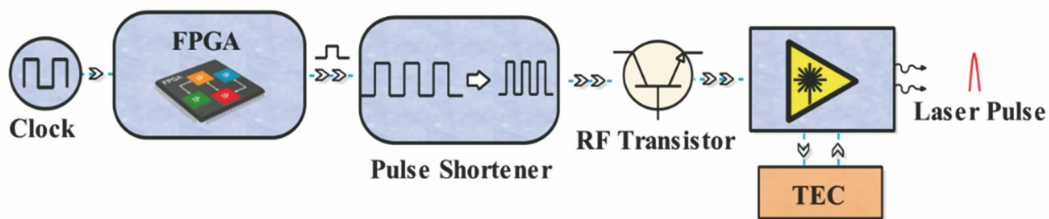


图 2 数字电子器件驱动的增益开关激光器^[14]

Fig. 2 Gain-switched laser driven by digital electronic devices^[14]

图 3(a)为实验中测量得到的数字信号脉宽压缩器输出的电压信号。可以看到测量得到的电压信号的重复频率为 250 MHz,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 0.7 V 开启电压。经过射频三极管之后,电压信号转变为电流信号,半峰全宽减小到约 190 ps。利用该电流信号驱动商品半导体激光器,实现增益开关过

程,即可产生 10 ps 量级的激光脉冲。图 3(b)中插图为使用光电探测器和示波器组合测量得到的激光时域波形。可以看到激光脉冲的重复频率为 250 MHz,但是受仪器带宽的限制,测得激光脉冲的脉宽为 192 ps。图 3(b)中插图展示了使用二阶自相关仪测量激光脉冲得到的实验结果。该结果显示激光脉冲的脉宽为 19 ps。

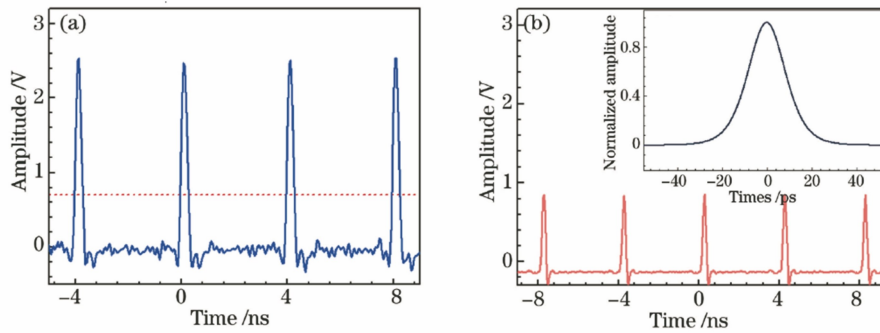


图 3 增益开关半导体激光器的典型实验测量结果^[14]。(a)数字信号脉宽压缩器的输出电压信号；(b)利用光电探测器和示波器测得的光脉冲时域波形(插图为利用二阶自相关仪测量得到的光脉冲时域波形)

Fig. 3 Typical experimental results of gain-switched semiconductor lasers^[14]. (a) Output voltage signal from digital signal pulse shortener; (b) time-domain waveform of optical pulses measured by photodetector and oscilloscope (inset is time-domain waveform of optical pulse measured by second-order auto-correlator)

2.3 注入锁定技术

最初在电子学中,振荡器中的注入锁定现象表现为外部信号对振荡器频率的干扰,这属于带来负面影响的外部干扰^[16]。在对这种振荡器的频率同步现象的认识逐渐深刻之后,研究者们开始对该种现象加以利用。简而言之,就是在注入外部信号之后不稳定系统发生频率牵引并趋于同步。在同步之后,系统获得较强的稳定性。

随着激光技术的发展,注入锁定技术开始逐渐用于激光领域。在该领域,最早应用注入锁定技术的是氦氖激光器^[17]和TEA(Transversely Excited Atmosphere)CO₂激光器^[18]。半导体激光器的注入锁定技术也在之后得到了发展^[1]。根据注入激光的类型,注入锁定技术分为连续光注入锁定和脉冲光注入锁定^[19]。根据注入方式,注入锁定技术分为自注入(外腔式)锁定^[20]和主从式锁定^[21]。本文所综述的应用于量子通信研究中的增益开关半导体激光器注入锁定技术属于主从式注入锁定。

如图4所示,在主从式增益开关半导体激光器注入锁定中,主激光器的输出通过隔离器后注入到另外一个不带隔离器的从激光器。锁定状态下,在同步带宽范围内改变从激光器的频率,锁定状态不会改变,从激光器与主激光器都能实现同步运转,这样可控制从激光器的频率稳定性,还可以控制激光器模式的相位特性和空间特性。图4中隔离器保证了主激光器的运行独立性。

图5为东芝欧洲研究中心的Shields研究组测量得到的注入锁定后增益开关半导体激光器的典型特征^[22]。图5(a)为来自两台独立的增益开关半导体激光器的弱相干脉冲之间发生双光子干涉后干涉

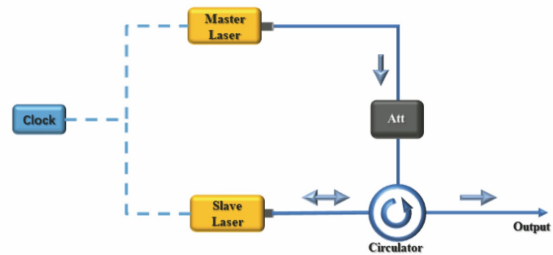


图 4 主-从式注入锁定激光器的实验装置图^[23]

Fig. 4 Experimental setup of master-slave injection-locked laser^[23]

曲线可见度与脉冲时间抖动、带宽之间的关系。由该图可以看到经过注入锁定后,脉冲的时间抖动可以由 12.3 ps 降低至 4.4 ps,而带宽可以由 63 GHz 降低至 15 GHz,相应的双光子干涉可见度则由 25% 提升至 48.2%。图 5(b)则展示了一台注入锁定-增益开关半导体激光器产生的脉冲发生一阶干涉后的强度分布。该结果显示干涉后的光强主要集中于最大和最小处,这是典型的随机相位脉冲的特征^[23]。图 5(a)和(b)的结果表明注入锁定技术在减小增益开关半导体激光器产生的脉冲时间抖动和带宽的同时,可以保持脉冲的相位随机性。

3 增益开关半导体激光器在量子信息领域的应用

3.1 注入锁定-增益开关半导体激光器在量子信息领域的优势

如图 6 所示,以增益开关和注入锁定技术作为技术基础、半导体激光二极管作为器件基础的注入锁定-增益开关半导体激光器主要具有三个特点: 1)可产生高速窄脉冲; 2)脉冲时间抖动低; 3)从激光

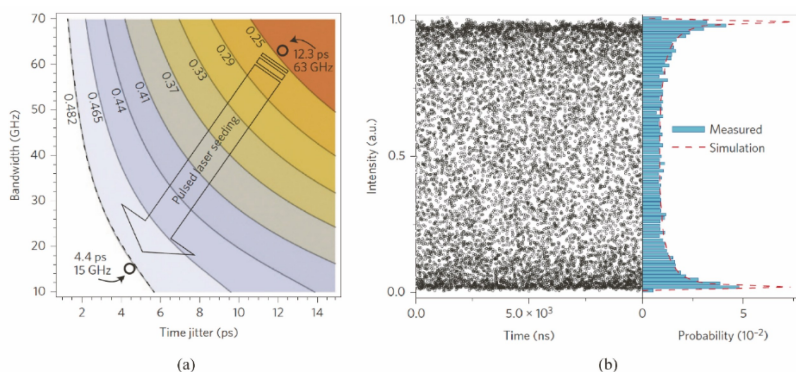


图 5 实验测量得到的注入锁定激光器的典型特征^[22]。(a)来源于两个独立的增益开关半导体激光器的弱相干脉冲之间的双光子干涉可见度与脉冲时间抖动、带宽的关系[其中(12.3 ps, 63 GHz)和(4.4 ps, 15 GHz)分别表示无注入锁定情况和最优注入锁定条件下得到的脉冲时间抖动和脉冲带宽];(b)产生自一台注入锁定-增益开关半导体激光器的相邻脉冲间发生一阶干涉后的归一化强度随时间的分布(左半部分)以及据此统计的强度分布概率(右半部分)

Fig. 5 Experimentally measured typical characteristics of injection-locked lasers^[22]. (a) Visibility of two-photon interference between weak coherent pulses from two independent gain-switched semiconductor lasers varying with time jitter and bandwidth [(12.3 ps, 63 GHz) and (4.4 ps, 15 GHz) represent pulse time jitter and pulse width without injection-locking and with optimum injection-locking, respectively]; (b) normalized intensity varying with time recorded after the first-order interference between two adjacent pulses from injection-locked gain-switched semiconductor laser (left panel), and probability distribution of intensity (right panel)

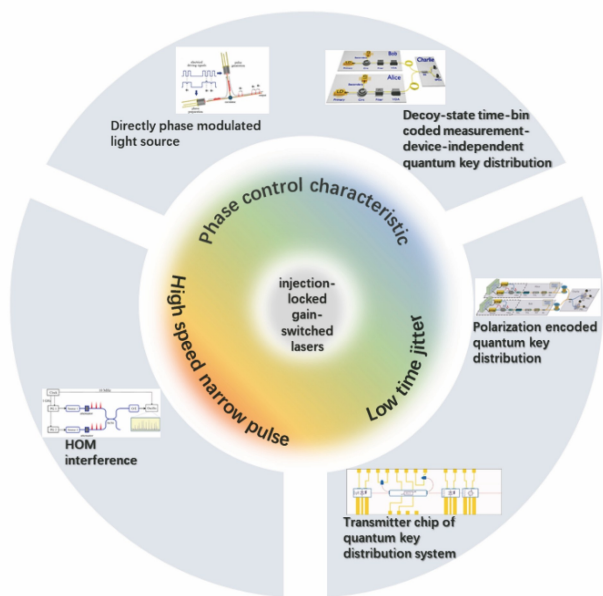


图 6 注入锁定-增益开关半导体激光技术应用于量子信息领域的优势

Fig. 6 Advantages of injection-locked gain-switched semiconductor laser technology applied to quantum information field

器脉冲相位继承于主激光器。这三个特点对于量子通信领域均具有重要意义:高速窄脉冲激光对于 QKD 意味着量子比特的发送速率的提高,有利于提升码率;脉冲时间抖动低则意味着同步难度的降低以及双光子干涉可见度的提升,对于降低相关 QKD

协议中的误码至关重要;从激光器脉冲相位继承于主激光器,基于这一点,可通过直接调制的方式控制脉冲的相位,以有效降低时间片编码 QKD 的系统复杂度。同时需要指出的是,增益开关半导体激光器输出的脉冲具有相位随机特性,而这种随机特性可以通过干涉过程方便地转化为强度上的随机性,因而增益开关半导体激光器输出的脉冲可以用来实现量子随机数产生^[22],而量子随机数发生器(QRNG)是 QKD 系统中的重要组成部分^[24]。基于上述背景,本文着重介绍(含注入锁定的)增益开关半导体激光器在量子信息领域的应用。

3.2 增益开关半导体激光器在量子信息领域的典型应用

2014 年东芝欧洲研究中心的 Yuan 等^[25]提出了基于增益开关半导体激光器的随机数发生器(RNG)。该系统以增益开关激光器中长激光脉冲的稳态发射为基础,提高了对激光器脉冲的时间失谐容忍度和干涉可见度,以 20 Gbit/s 的比特率通过了随机系统测试。2019 年,本文作者进一步提出了另外一种基于增益开关半导体激光器的量子随机数发生器(QRNG)^[24]。该方案的原理图和实物图如图 7(a)和(b)所示,两台中心频率和偏振特性相同的增益开关半导体激光器发出的激光在分束器上发生干涉,从而将二者的脉冲相位随机性转化为分束器两个输出端口的强度差随机性。

经过随后的平衡光电探测(B-PD)、模拟数字转换(DAC)和 FPGA 电路获得随机数。此外,该方案通过使用短时间窗口对准的方法将数据采集限制在激光脉冲的中心,从而确保高脉冲重复频率下的高干涉对比度。得到的实验数据与仿真结果如图 7(c)所示,仿真结果(虚线)与实验数据(点)的吻合程度较高,这体现了探测器两个端口的强度差具备随机性,即两台激光器的相位具备随机性。

在量子密钥分发方面,增益开关半导体激光器也得到了广泛应用。2000 年,美国 Los Alamos 国家实验室物理组的 Hughes 等^[26]应用增益开关半导体激光器分别实现了 48 km 光纤的 BB84 协议和 B92 协议的 QKD 实验。2010 年东芝欧洲研究中心

的 Dixon 等^[27]基于增益开关半导体激光器,外加光纤路径长度和偏振反馈控制系统,实现了传输距离达到 50 km 的 36 h 连续高速 QKD 实验,安全码率达到 1 Mbit/s。2015 年,该研究组利用增益开关半导体激光器在连续 34 d 内的 45 km QKD 场地实验中实现了约 300 kbit/s 的码率^[28]。

2018 年瑞士日内瓦大学的 Grünenfelder 等^[29]应用增益开关激光器,在传输距离为 200 km 的 QKD 实验中实现了 23 bit/s 的码率。实验中使用的商用半导体激光器在增益开关工作状态下,可以产生波长为 1554.94 nm、重复频率为 625 MHz、脉宽为 93 ps 的激光脉冲。

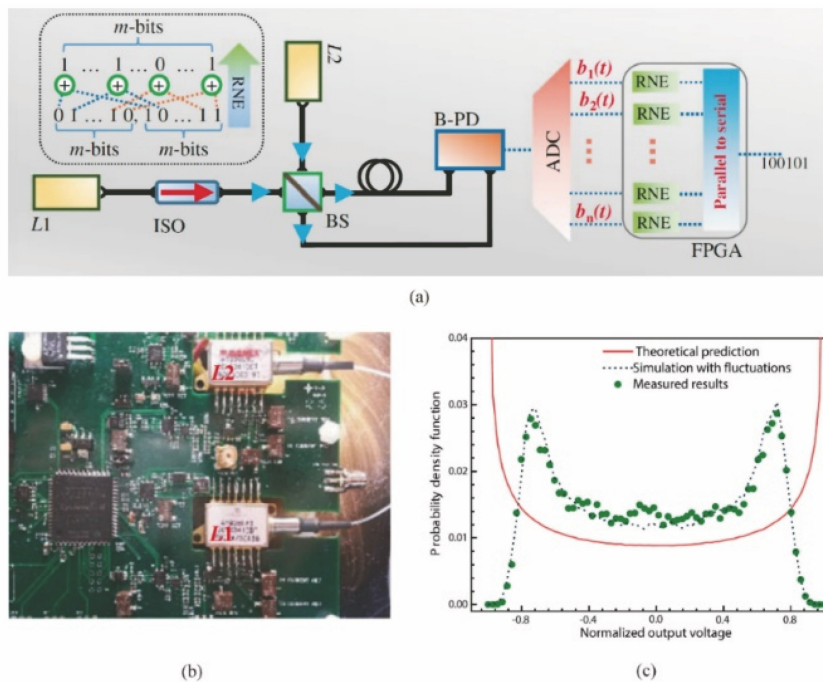


图 7 基于增益开关半导体激光器的量子随机数发生器^[24]。(a)随机数发生器的原理图;

(b)增益开关激光器和驱动电路的实物照片;(c)归一化模拟信号强度概率密度函数的实验和理论结果

Fig. 7 Quantum random number generator based on gain-switched semiconductor laser^[24]. (a) Schematic of random number generator; (b) image of gain-switched lasers and driving circuit; (c) measured and theoretical results of normalized probability density function analog signal intensity

3.3 注入锁定技术-增益开关半导体激光器在量子信息领域的典型应用

3.3.1 独立单光子源之间的干涉

独立单光子源之间的干涉是许多重要量子信息应用的基础^[23],包括量子中继器^[30-31]、线性光学量子计算^[32]、量子隐形传态^[33]等。2016 年东芝欧洲研究中心的 Comandar 等^[23]首次提出将增益开关半导体激光器的注入锁定技术应用于独立单光子源的干涉实验中,显著提高了干涉对比度。该实验中所使用的

注入锁定增益开关半导体激光器结构如图 8(a)所示。主从激光器之间由一个环形器连接,主激光器的脉冲种子光通过可调衰减器后由环形器送入从激光器腔内并锁定从激光器的波长和重复频率。主从激光器之间的时序由一台脉冲发生器(PG)共同控制。

表 1 列举了实验中所使用的注入锁定前后的两个激光器的特性。由表 1 中结果可见,激光器脉宽虽然在加入注入锁定之后略微变宽,但是输出脉冲的时间抖动明显减小。

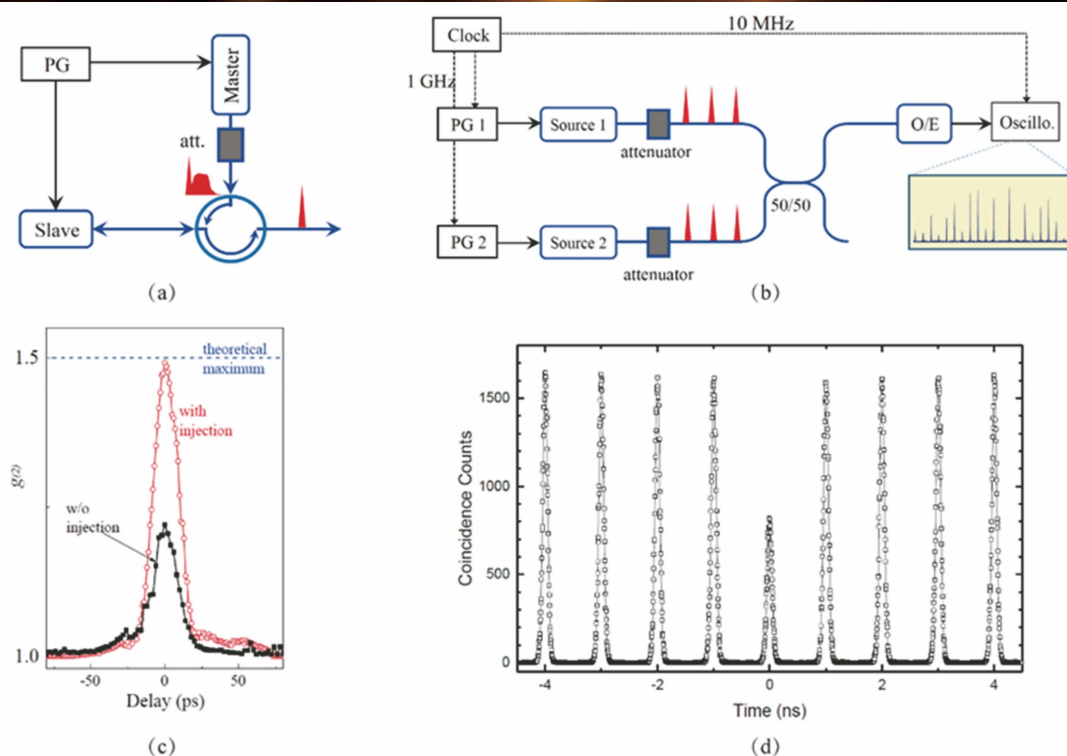


图 8 两台独立的注入锁定-增益开关半导体激光器产生的激光脉冲之间的干涉实验装置图和实验结果^[23]。(a)注入锁定实验装置图;(b)两台激光器产生的激光脉冲之间的二阶干涉测量装置;(c)利用图(b)装置测量得到的来自两台增益开关半导体激光器的激光发生干涉后分束器单端口上光场的二阶强度关联函数 $g^{(2)}$; (d)利用单光子探测与计数系统得到的两个独立光子源发生双光子干涉后的符合计数

Fig. 8 Experimental setup and results of interference between pulses from two independent injection-locked gain-switched semiconductor lasers^[23]. (a) Experimental setup for injection-locking; (b) experimental setup for measurement of second-order interference between laser pulses from two lasers; (c) second-order intensity correlation function $g^{(2)}$ of light field at a port of beam splitter after interference of laser from two gain-switched semiconductor lasers measured by experimental setup in Fig. 8(b); (d) coincidence counts measured by single photon detection and counting system after interference between two independent single photon sources

表 1 加入注入锁定前后激光器输出脉冲的脉宽和时间抖动^[23]

Table 1 Width and time jitter of output pulses from gain-switched slave lasers with or without injection locking^[23]

Condition	Source 1		Source 2	
	Width	Jitter	Width	Jitter
Without injection	26.5	10.6	27.5	12.9
With injection	28.2	3.6	31.8	3.8

图 8(b)为两台独立的注入锁定增益开关半导体激光器发出的激光发生干涉的实验装置。该图中的两个独立光源均具有图 8(a)中所示的结构,两个独立光源之间由一个 1 GHz 重复频率的电信号进行时间同步。两个激光器的输出脉冲经过可调衰减器后在一个 50:50 的分束器处发生干涉,分束器输出侧一臂连接光电探测器和示波器用于记录输出脉冲。插图展示了示波器在采样率为 40 GSa/s 时记

录的干涉结果。通过图 8(b)中示波器记录的强度随时间的变化,可以计算得到图 8(c)中的二阶强度关联函数 $g^{(2)}$ 。图中结果显示,注入锁定可以使得 $g^{(2)}$ 从小于 1.25 提升至接近理论值 1.5,而 $g^{(2)}$ 可以用来表征发生干涉的两个脉冲光场的模式匹配程度。因此,注入锁定使得两台增益开关半导体激光器产生的激光脉冲的频域模式匹配程度得到了有效提升。根据 $g^{(2)}$ 与 HOM(Hong-Ou-Mandel)干涉可见度的关系,可以预计 HOM 干涉可见度将接近于理论值的 50%。进一步地,对两台独立的注入锁定-增益开关半导体激光器产生的弱相干脉冲光之间的 HOM 干涉进行测量,得到的符合计数结果如图 8(d)所示。据此得到的 HOM 干涉可见度 $V_{\text{HOM}} = 0.499 \pm 0.004$,与理论预期相符。该结果表明注入锁定技术可以提升不同增益开关半导体激光器产生的脉冲之间的模式匹配程度,在有效降低系

统复杂度的情况下为相关量子信息应用提供高性能光源。

3.3.2 BB84 协议 QKD 协议

在 BB84 协议的实施过程中,一种重要的量子比特编码方案就是时间片编码,该编码方式对长距离光纤长度扰动具有较好的可靠性,因此在光纤基 QKD 中得到了广泛应用。时间片编码中的示意图如图 9 所示,脉冲光子可以处于前后两个时间片的叠加态中。前后两个时间片 $|e\rangle$ 和 $|l\rangle$ 构成了一组基,通过调节叠加态的相位 φ ,即前后两个脉冲之间的相对相位,就可以改变光量子比特。在实验中,脉冲光的产生通常由连续光经过强度调制产生。这样,光量子比特的相位调控必须依赖外加的相位调控系统完成,因此系统复杂度较高。2016 年,东芝欧洲研究中心的 Yuan 等^[34]利用增益开关激光器的注入锁定技术,提出了一种可适用于大多数时间片编码 QKD 协议的相位直接调制方案。图 10(a)为该方案的装置图。

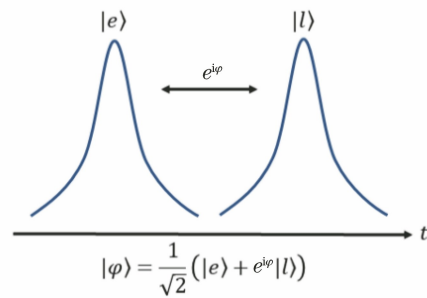


图 9 时间片编码量子比特示意图

Fig. 9 Illustration of time-bin encoding qubit

在图 10(a)所示方案中,光源为一对环形器相连接的主从半导体激光器。其中,主激光器称为相位制备激光器,从激光器称为脉冲产生激光器。相位制备激光器采用直接调制方式输出纳秒量级的准稳态长脉冲。由于半导体激光器具有自发辐射特性,每个长脉冲之间的相对相位是随机的。每一个这样的长脉冲作为种子光锁定脉冲产生激光器的两个或多个短脉冲序列。由此,长脉冲的相位决定了

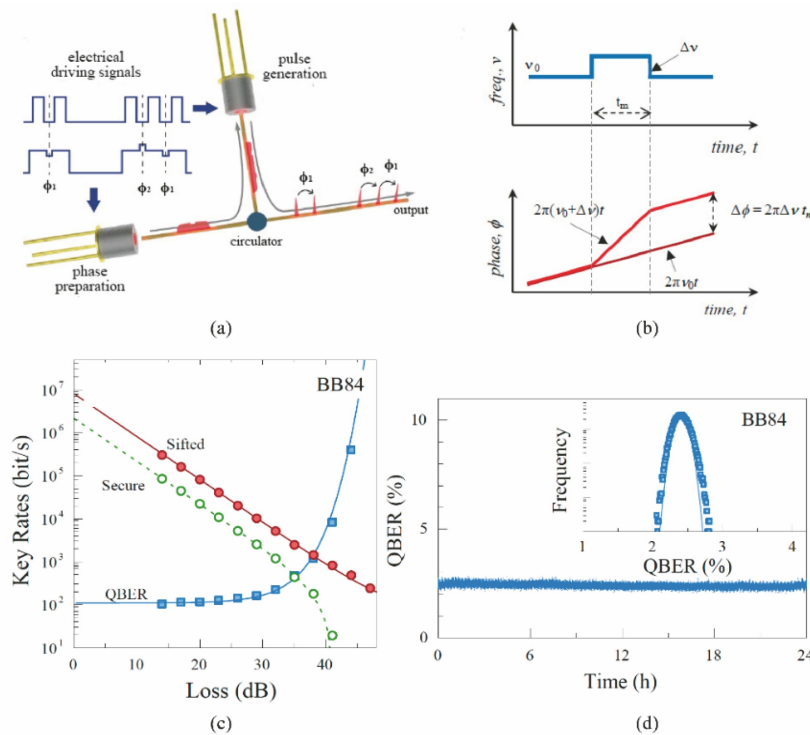


图 10 应用基于注入锁定-增益开关半导体激光器的相位直接调制时间片编码的 BB84 QKD 实验^[34]。(a)相位直接调制光源示意图;(b)主激光器中持续时长为 t_m 的驱动电信号微扰与激光器输出脉冲相位的演化轨迹;(c) BB84 协议实验结果:筛选码率(实心圆)、渐近安全码率(空心圆)和 QBER(矩形);(d) BB84 协议中持续 24 h 测量 QBER 得到的结果

Fig. 10 Time-bin encoded BB84 QKD experiment with directly phase-modulated light source based on injection-locked gain-switched semiconductor laser^[34]. (a) Diagram of directly phase-modulated light source; (b) small perturbation of driving signal with duration of t_m in master laser and phase trajectories of pulses output from the laser; (c) experimental results of BB84 protocol: sifted key rate (solid circles), asymptotic secure key rate (empty circles), and QBER (square); (d) results of QBER with BB84 protocol measured continuously for 24 h

其对应短脉冲序列中每个短脉冲之间的相对相位。

图 10(b)则展示了相位直接调制的原理。在该图中,当主激光器即相位制备激光器加载的长脉冲驱动电信号为稳定的直流信号时,其输出光的相位演化是一个线性且稳定的过程。当长脉冲驱动电信号存在强度微扰时,主激光器内载流子密度随着微扰信号的改变而改变,激光腔内折射率发生改变,等效腔长也随之改变,从而改变主激光器的输出信号频率^[35]。主激光器经过微扰调制后,其输出的长脉冲在附加微扰信号前后产生 π 的相位差。当主激光器的输出信号进入从激光器腔内,从激光器腔内发生受激辐射,其相位继承于主激光器的输出信号。因此,从激光器的每个脉冲序列之中,单脉冲之间具有可调的相位差。同时,主激光器辐射的长脉冲之间的相位随机性也使得从激光器输出的脉冲序列之间具有随机的相对相位^[25]。

将这种基于注入锁定的相位直接调制增益开关

激光器应用于 BB84 协议的 QKD 实验中,得到图 10(c)和(d)的结果。图 10(c)为 BB84 协议的码率测量结果,其中最大传输损耗约为 40 dB(相当于光在 200 km 标准光纤中的传输损耗)且探测器噪声也对实验有影响。实验值(符号)与理论模拟值(线)较为吻合。对于高达 30 dB 的信道损耗,量子误码率(QBER)保持在 2.4%。图 10(d)为 BB84 协议持续 24 h 的 QBER 测量结果,以 1 s 为采样间隔,在平均值为 2.41%左右的波动下,得到的标准差为 0.10%。

3.3.3 诱骗态 BB84 协议 QKD

诱骗态可以与各类 QKD 协议结合,从而显著提高 QKD 系统的安全码率和延长传输距离,极大增加 QKD 系统的实用价值。2018 年,东芝欧洲研究中心的 Roberts 等^[36]将增益开关激光器的注入锁定技术应用到时间片编码的诱骗态 BB84 协议中。

该文献中的量子比特发送端结构示意图见图 11(a)。其中,激光器的设计以文献[34]为基础。实

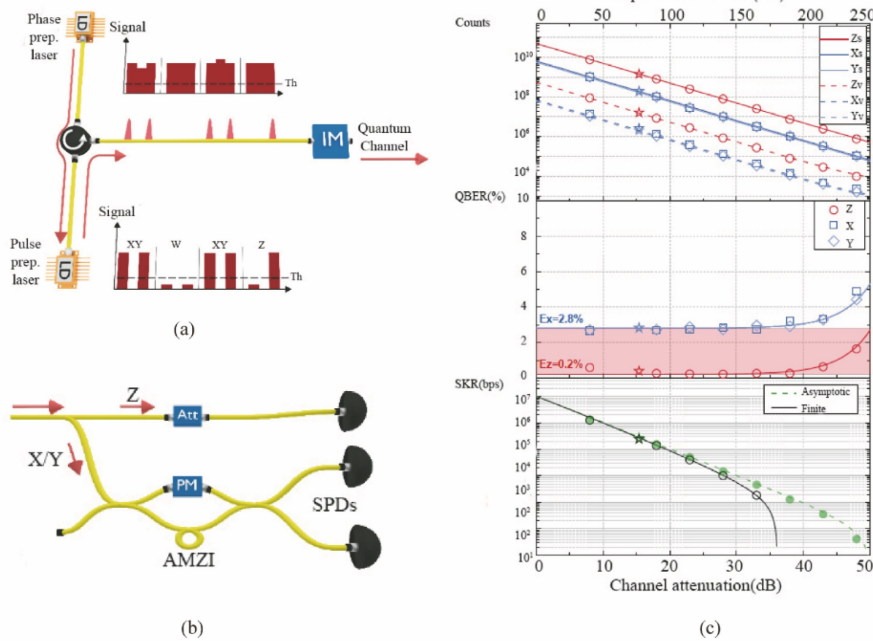


图 11 应用注入锁定-增益开关半导体激光器的诱骗态 BB84 协议实验^[36]。(a) Alice 端实验装置图;(b) Bob 端实验装置图;(c)诱骗态 BB84 QKD 协议实验结果:曲线为理论结果,符号为实验测量的数据或计算得到的离散数值[从上至下,子图 1 为每组基中测量得到的计数与信道损耗的关系;子图 2 为每组基下测量得到的 QBER 与信道损耗之间的关系;子图 3 为渐近(实心圆)和有限码长(空心圆)安全码率与信道损耗之间的关系,以及实验测得的安全码率(星形)]

Fig. 11 Experiment of decoy-state BB84 protocol with injection-locked gain-switched semiconductor laser^[36]. (a) Experimental setup of Alice; (b) experimental setup of Bob; (c) experiment results of BB84 QKD with decoy states: lines are theoretical results and symbols are discrete data measured in experiment or calculated [from top to bottom, the first panel shows the relationship between the measured counts and channel loss in each basis, the second panel shows the relationship between QBER measured in each basis and channel loss, and the third panel shows the asymptotic (solid circles) and finite key-size (empty circles) secure versus channel loss, and experimentally measured secure key rate (star)]

验中在相位制备激光器的驱动电信号中加入微扰信号以制备时间片编码中 X/Y 基所需的量子比特前后脉冲相对相位。脉冲制备激光器的驱动电信号则用于制备处于真空态、Z 基或是 X/Y 基的量子比特。在发射端 Alice 处的输出端口加入一个强度调制器(IM),用于制备诱骗态以及平衡 Z 基和 X/Y 基之间的强度。接收端 Bob 处的实验装置图则如图 11(b)所示。Z 基使用单光子探测器进行直接探测;X/Y 基则使用一个带有 1 bit 延时的非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪(AMZI)以及分别位于其两个输出端口处的单光子探测器来探测。

图 11(c)中子图 1(从上至下)给出了应用注入锁定-增益开关半导体激光器的 BB84 协议中各基的信号态、诱骗态和真空态在相干攻击下的计数值随着等效传输距离的变化。由该结果可以看到,随着距离的增加,计数值将呈指数降低。图 11(c)中子图 2 则为 QBER 随等效传输距离的变化,可以看到 Z 基和 X/Y 基的误码率具有约 2.6% 的差值。图 11(c)中子图 3 给出了渐进和有限码长下的安全码率(SKR)。结果显示在 75 km 传输距离(15 dB 等效损耗)下,SKR 达到 246 kbit/s。

3.3.4 MDI-QKD 与高集成度片上 QKD 系统

QKD 在理论上具有绝对的安全性^[37]。但是器件的非理想性却带来安全漏洞,例如光子源和单光子探测器的非理想性可以带来光子数攻击和探测器攻击^[38]。针对单光子探测器不理想性带来的安全漏洞,研究人员提出了 MDI-QKD^[39-40]。自 MDI-QKD 提出之后,增益开关半导体激光器在该协议的实验实现中迅速得到应用。MDI-QKD 涉及两个独立光源之间的干涉,因而对于脉冲激光器的时间抖动和带宽有较高的要求。针对这种要求,近 5 年有很多研究人员利用注入锁定技术改善增益开关半导体激光器在这两个方面的性能,从而有效地提升了 MDI-QKD 的性能。

2016 年,东芝欧洲研究中心的 Comandar 等^[22]将注入锁定-增益开关半导体激光器应用于偏振编码 MDI-QKD 系统中(图 12)。实验装置如图 12(a)所示,Alice 和 Bob 分别利用基于注入锁定技术的增益开关半导体激光器,将光脉冲的时间抖动从 12.3 ps 降低至 4.4 ps;并且通过抑制啁啾将光脉冲的带宽从 63 GHz 减小至 15 GHz。在制备出性能适用的激光脉冲之后,Alice 和 Bob 分别独立地制备相位随机的弱相干脉冲。该处的相位随机性依然

利用了增益开关半导体激光器的天然特性。随后,将弱相干脉冲在偏振自由度上进行编码,并将其发送到 Charlie。在 Charlie 处,来自 Alice 和 Bob 的量子比特在分束器上发生干涉,进行偏振编码贝尔态测量^[22]。实验结果如图 12(b)所示。由该图可知,在 50 km 光纤传输条件下,图 12(a)所示的 MDI-QKD 系统的码率在考虑和不考虑有限码长时分别可以达到当时普通 QKD 最高码率^[41]的 1/50 和 1/10。该结果说明经过注入锁定的增益开关半导体激光可以在较高重复频率下实现高可见度双光子干涉,进而提升 MDI-QKD 的码率,提高 MDI-QKD 的实用性。

2021 年,Shields 研究组进一步将注入锁定-增益开关半导体激光技术应用于时间片编码 MDI-QKD 系统之中,实现了一个简化、紧凑、具有千兆时钟的 MDI-QKD 系统^[42]。实验装置如图 13(a)所示,Alice 和 Bob 处分别配置一个波长为 1550.12 nm 的注入锁定激光源。由图 13(b)可以看到,通过注入锁定可以使从激光器输出光的频率涨落范围在 ± 15 MHz,进而提升双光子干涉的可见度。如图 13(a)中插图所示,主激光器输出脉冲的时长涵盖了一对从激光器的输出脉冲。这样可保证每对脉冲的整体相位随机性。同时,通过在主激光器的驱动电流中引入或不引入突变,可以实现从激光器输出的每对脉冲内部相对相位在 0 和 π 之间切换。利用滤波器对从激光器输出的脉冲进行带宽调控,脉冲经过衰减器被调节至单光子脉冲,即形成时间片编码量子比特。当 Alice 和 Bob 处发送的量子比特在位于中间节点 Charlie 上发生量子干涉后,结合单光子探测和符合计数完成贝尔态测量,进而实现 MDI-QKD。

在实验过程中,Alice 和 Bob 可以分别在 Z 基和 X 基上制备量子比特。通过调节图 13(a)中衰减器的衰减指数,可以调节单光子脉冲的平均光子数,进而实现包含诱骗态协议的 MDI-QKD。实验结果如图 13(c)所示,可以看到即使在可以应对大多数通用攻击且更加严格的有限码长安全分析中,MDI-QKD 码率依然可以在传输距离为 118 km(36 dB 等效损耗)时达到 1.12 kbit/s。对比本文实验与以往报道的指标较高的几个工作,可以发现在等效损耗介于 30 dB 和 42 dB 的情况下,安全码率可以提升一个量级左右。

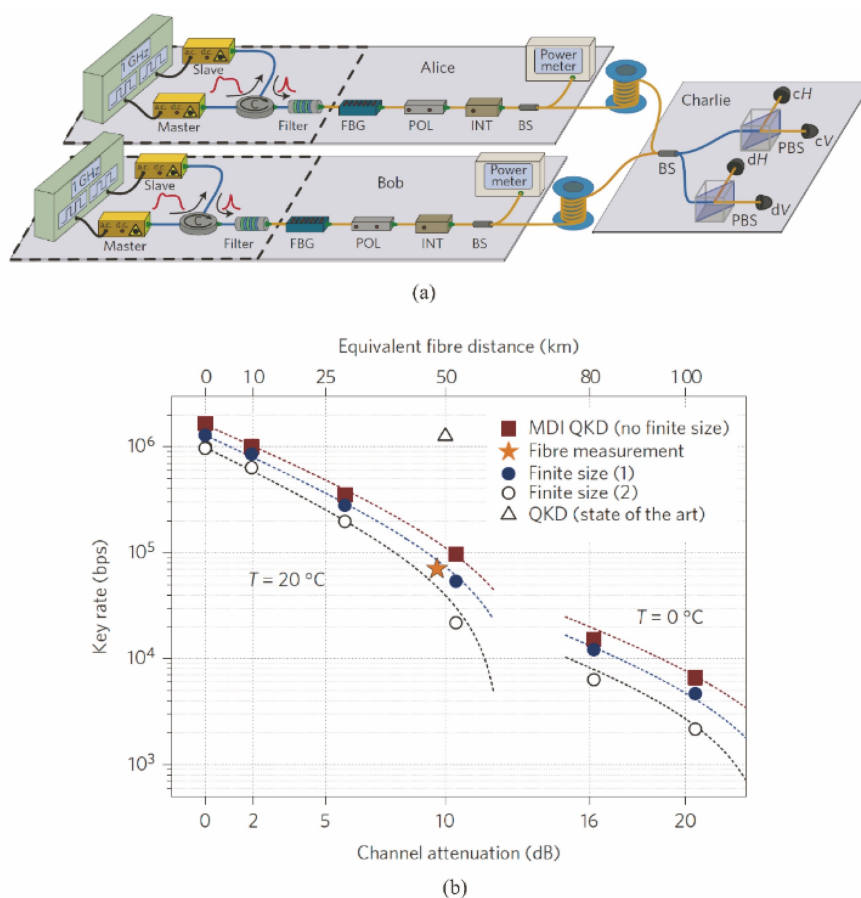


图 12 应用注入锁定-增益开关半导体激光器的偏振编码 MDI-QKD 系统^[22]。(a) MDI-QKD 实验装置;(b) MDI-QKD 的码率与量子通道的总衰减和等效光纤距离的关系[实心矩形框为未进行有限码长分析的码率;星形符号为使用了两卷 25 km 单模光纤获得的码率;空心三角形表示目前 QKD 中观察到的有限码长下最高码率^[41];实心圆^[43]和空心圆^[44]分别表示在不同方法在有限码长分析下得到的码率;左右两侧虚线分别为在探测器处于两种不同温度下对码率的模拟结果]

Fig. 12 Polarization-coded MDI-QKD system with injection-locked gain-switched semiconductor lasers^[22]. (a) Experimental setup of MDI-QKD; (b) measured MDI-QKD key rate varying with channel attenuation and equivalent fiber distance (solid squares are key rates without the finite-size analysis, the star refers to the key rate measured when two 25-km reels of single mode fibers are used, the empty triangle is the highest finite-size key rate observed in conventional QKD^[41], the solid circles^[43] and empty circles^[44] are the key rates obtained with different methods of finite-size analysis, and the dashed lines on the left and right sides are the results of simulations of the key rate when the temperatures of detectors are set at two different values)

在国内,中国科学技术大学潘建伟院士研究组首先将注入锁定-增益开关半导体激光器引入 QKD 的研究中。图 14(a)为 2020 年潘建伟组结合注入锁定-增益开关激光器和硅基光子学实现高速 MDI-QKD 的实验系统^[45]。在该系统中,注入锁定技术可以产生重复频率为 1.25 GHz 的单脉冲,单脉冲的时间抖动较低且相位随机,随后单脉冲被注入硅基光子学芯片。芯片结构示意图和实物照片如图 14(b)和(c)所示。在该芯片中,单光子脉冲首先进入一个强度调制器用于诱骗态制备。该强度调制器

为马赫-曾德尔干涉仪结构,位于其两臂的相位调制单元分别由热光调制器(TOM)和载流子耗尽型调制器(CDM)组成。脉冲随后经过可调衰减器(VOA)以及包含 TOM、CDM 和偏振旋转组合器(PRC)的偏振调制单元后输出。

2021 年,潘建伟研究组对连接山东省济南、青岛、临沂等城市的城域光纤网络进行了长距离的双场量子密钥分发(TF-QKD)场地实验研究^[46]。该工作中的实验系统如图 15 所示。

如图 15 所示,Alice 和 Bob 处随机选择发送诱

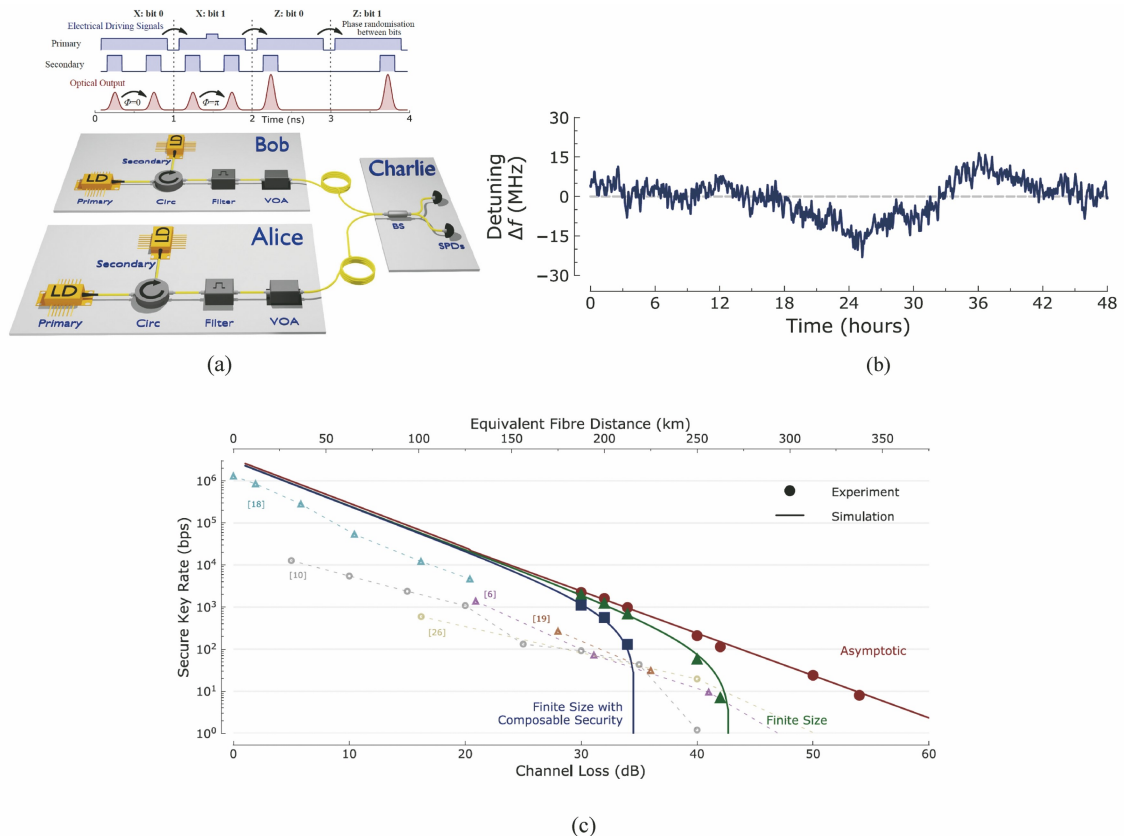


图 13 应用注入锁定-增益开关半导体激光器的时间片编码 MDI-QKD^[42]。(a) MDI-QKD 系统的实验装置,注入锁定过程中主从激光器的驱动电信号以及 Alice 和 Bob 输出的光信号;(b) Alice 端和 Bob 端之间的激光器频率失谐;(c) MDI-QKD 实验结果[实线为数值模拟结果,实心符号为实验结果,包括渐近安全码率(实心圆)、有限码长安全码率(实心三角形)和具有可组合安全性的有限码长安全码率(矩形)与总信道损耗、等效光纤距离的关系(计算中采用超低损耗光纤,其单位长度损耗为 0.16 dB/km),空心数据点为当时文献中最先进的结果^[22,45,47-49]]

Fig. 13 Time-bin encoded MDI-QKD with injection-locked gain-switched semiconductor lasers^[42]. (a) Experimental setup of MDI-QKD, electrical driving signals for the master and slave lasers in injection-locking process, and the optical outputs from Alice and Bob; (b) frequency detuning between the optical outputs from Alice and Bob; (c) experimental results of MDI-QKD [the solid lines are theoretical results and the solid symbols are experimental results, including asymptotic secure key rate (solid circle), finite code length secure key rate (solid triangle), and finite code length security bit rate with composable security (rectangle) versus the total channel loss and the equivalent fiber distance (the ultra-low loss optical fiber is used in the calculation, and the loss per unit length is 0.16 dB/km); the most advanced results in some previous work are shown with unfilled markers^[22,45,47-49]]

骗态或者信号态。诱骗态有一定的概率为真空态或者弱相干单光子态。信号态为弱相干单光子态,但是有一定的概率选择发出和不发出单光子,不发出单光子的情形相当于发送了真空态。在实验中,Alice 和 Bob 处发出的量子态经过长距离传输之后到达 Charlie 处。在 Charlie 处利用分束器和超导纳米线单光子探测器 (SNSPD1 和 SNSPD2) 对来自 Alice 和 Bob 处的量子态进行干涉测量,选择 SNSPD1 和 SNSPD2 仅有一个探测器响应的计数事件。随后可以使用相位对比的方法对 X 基误码进行估计,并利用传统的诱骗态方法对 Z 基下的相

位翻转误码率和有效单光子事件数目进行计算,进而通过 Zigzag 法对安全码率进行计算。实验中,Alice(济南)和 Bob(青岛)至 Charlie(临沂)处的光纤连接距离分别为 223 km 和 205 km,一个重要的问题就是如何实现 Alice 和 Bob 处发送的弱相干单光子态的频率一致性,以保证 Charlie 处的干涉测量的正确进行。为此,在 Charlie 处选择一个线宽仅为 3 kHz 的连续激光器作为主激光器,其产生的光经过长距离传输分别被注入 Alice 和 Bob 处的两台激光器。从激光器均为 DFB 激光器,工作在增益开关模式,经过主激光器注入光的锁定,产生了带宽约为

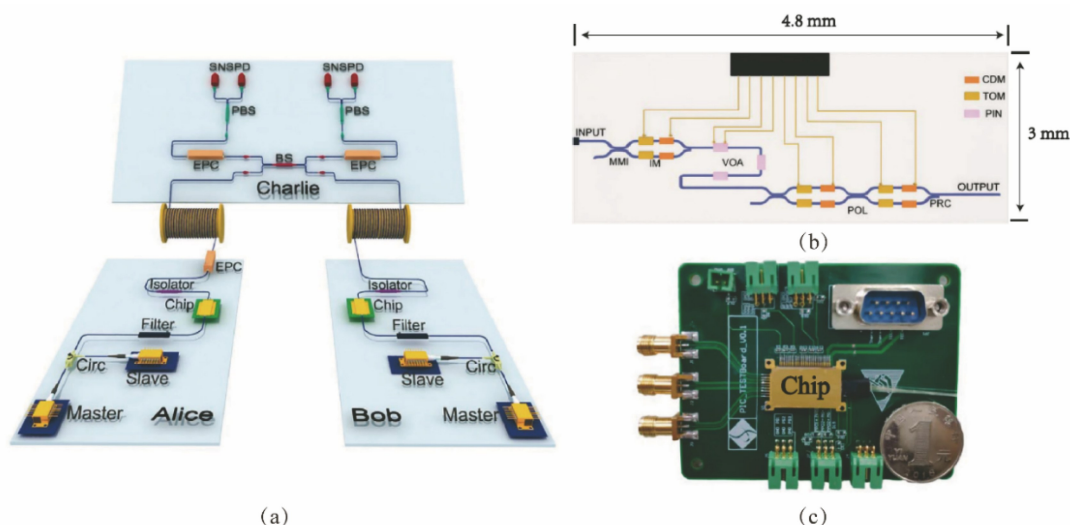


图 14 包含注入锁定-增益开关半导体激光器和集成硅基光子学芯片的 MDI-QKD^[45]。(a) MDI-QKD 系统装置；(b) 硅基光子学芯片原理图；(c) 控制板上的封装芯片实物图

Fig. 14 MDI-QKD with injection-locked gain-switched semiconductor lasers and integrated silicon photonics chip^[45].

(a) Experimental setup of MDI-QKD; (b) schematic of Si photonics chip; (c) picture of packaged chip on control board

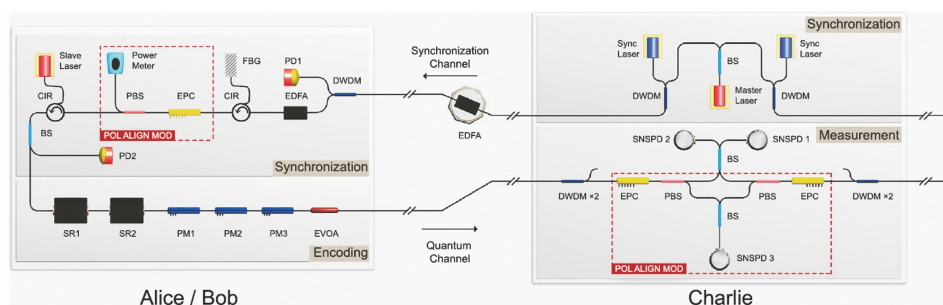


图 15 应用注入锁定-增益开关半导体激光器的双场 QKD 实验装置^[46]

Fig. 15 Experiment setup of TF-QKD with injection-locked gain-switched semiconductor lasers^[46]

100 kHz、重复频率和脉宽分别为 312.5 MHz 和 320 ps 的激光脉冲。实验结果显示安全码率突破了针对无中继情况下的成码率上限，即 PLOB 界。由此可见注入锁定的增益开关激光器在城际 QKD 中具有非常大的应用潜力。

在 2019—2021 年，东芝欧洲研究中心的 Shields 研究组相继报道了其在量子密钥分发芯片方面取得的多个进展^[42,50-51]，其核心技术为片上集成的注入锁定-增益开关半导体激光器。图 16 为其最新成果中的芯片示意图^[50]；图 16(a)、(b)和(c)所示的量子比特发送端、量子比特接收端和随机数发生器均实现了片上集成。发送端的芯片为磷化铟基芯片，其中产生时间片编码的双脉冲方法为注入锁定-增益开关半导体激光技术。如图 16(d)所示，主激光器和从激光器均工作在增益开关模式，前者作为相位准备激光器对双脉冲的相位差进行调控，而后者则负责通过直接调制的方式产生双脉冲。从激

光器产生的双脉冲进入片上电吸收调制器实现诱骗态的制备。接收端的芯片为硅基芯片，其通过长臂长差的非平衡马赫-曾德尔干涉仪实现对时间片量子比特的测量。随机数发生器芯片则用于产生随机数以随机选择发送端编码基和接收端测量基。随机数发生的原理为上文 3.2 节^[24-25]所述方案的集成，即通过来自两个增益开关半导体激光器的相位随机脉冲的干涉将相位随机性转化为强度随机性。该工作证实了注入锁定-增益开关半导体激光器可以结合集成光子学解决方案为量子通信的应用提供可扩展的基础器件。

4 结束语

针对量子信息领域对激光光源的需求，从半导体激光器、增益开关原理以及注入锁定技术出发，介绍了增益开关半导体激光产生技术的原理以及其与注入锁定技术相结合带来的性能提升。在阐明这种

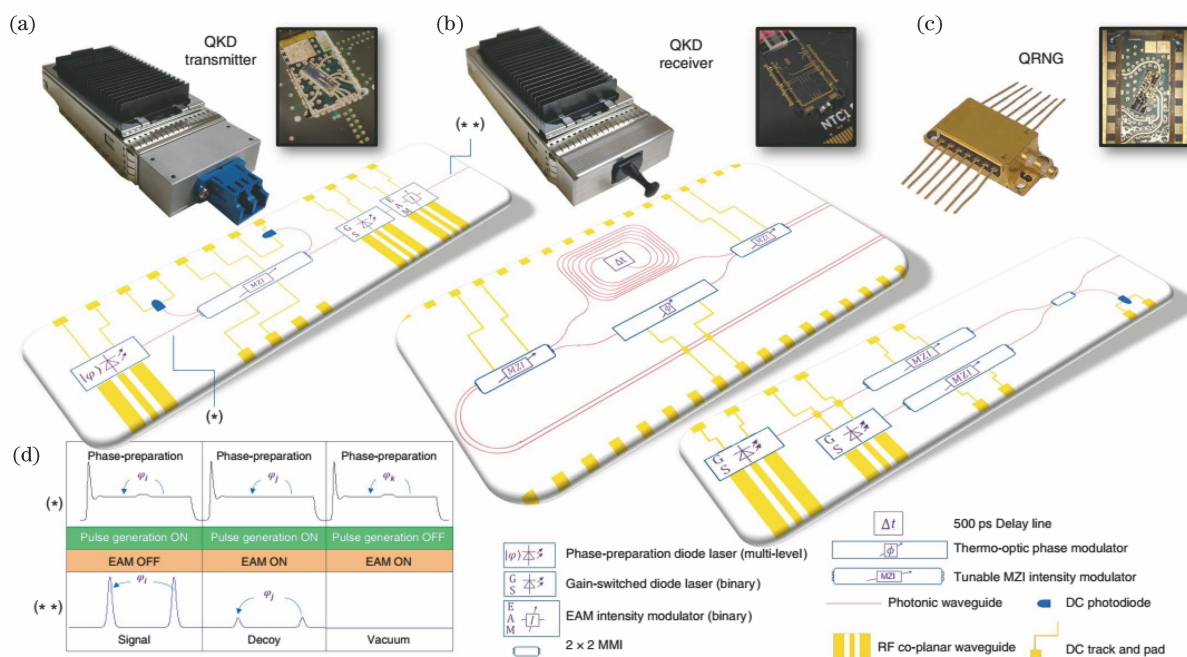


图 16 片上集成的 QKD 系统实物图与原理图^[50]。(a)量子比特发送端芯片;(b)量子比特接收端芯片;
(c)随机数发生器芯片;(d)直接调制方法产生时间片量子比特的原理示意图

Fig. 16 Photos and principle of integrated chips for QKD^[50]. (a) QKD transmitter; (b) QKD receiver;
(c) random number generator; (d) principle for generating time-bin encoded qubit via direct modulation method

性能提升对于量子信息应用的益处之后,梳理了近年来含注入锁定的增益开关半导体激光产生技术应用用于 QKD 以及 QRNG 方面的进展,总结了该技术在提高 QKD 码率、降低误码率、简化系统复杂度方面的优势。光量子信息系统对于脉冲激光有着广泛的需求,例如:在量子隐形传态中,时间片量子比特的编码过程中需要相位随机化的弱相干双脉冲序列^[52];在基于自发参量非线性过程的时间片纠缠光子对产生过程中,则需要光强足够强的双脉冲序列^[53];在基于量子点的光泵浦单光子产生过程中,需要皮秒尺度、低时间抖动的光脉冲^[54-55];量子点中的自旋操控可以用光学手段来实现,而皮秒脉冲的产生与控制则是这种方案中的关键技术^[56]。增益开关半导体激光器产生的脉冲在相位可控性、脉冲形状与宽度可调性方面与上述应用需求有着很高的契合度。因此,可以预期,增益开关半导体激光产生技术在量子信息领域的应用将逐渐从 QKD 以及 QRNG 等方向扩展至量子纠缠网络和量子信息处理领域,促进量子技术向着实用化方向发展。

参 考 文 献

[1] Guo G C. Research status and future of quantum information technology [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(9): 1395-1406.

郭光灿. 量子信息技术研究现状与未来[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1395-1406.

[2] Hong K W, Foong O M, Low T J. Challenges in quantum key distribution: a review [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Information and Network Security - ICINS '16, December 28-31, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: ACM Press, 2016: 29-33.

[3] Bennett C H. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computers. New York: IEEE, 1984.

[4] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres[J]. Nature, 2021, 589 (7841): 214-219.

[5] Tang Y L, Yin H L, Ma X F, et al. Source attack of decoy-state quantum key distribution using phase information[J]. Physical Review A, 2013, 88(2): 022308.

[6] Zhu N H, Shi Z, Zhang Z K, et al. Directly modulated semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24 (1): 1-19.

[7] Basov N G, Krokhin O N, Popov Y M. Generation, amplification, and detection of infrared and optical radiation by quantum-mechanical systems[J]. Soviet

- Physics Uspekhi, 1961, 3(5): 702-728.
- [8] Basov N G, Nikitin V V, Semenov A S. Dynamics of semiconductor injection lasers [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1969, 12(2): 219-240.
- [9] Bernard M G A, Duraffourg G. Laser conditions in semiconductors[J]. Physica Status Solidi (b), 1961, 1(7): 699-703.
- [10] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions [J]. Physical Review Letters, 1962, 9(9): 366.
- [11] Panish M B, Hayashi I, Sumski S. Double-heterostructure injection lasers with room-temperature thresholds as low as 2300 A/cm² [J]. Applied Physics Letters, 1970, 16(8): 326-327.
- [12] 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.
- [13] Lau K Y. Gain switching of semiconductor injection lasers[J]. Applied Physics Letters, 1988, 52(4): 257-259.
- [14] Zhou Q, Liu J L, Gu Y H, et al. Gain-switched semiconductor pulsed laser for quantum secure communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0502005.
周强, 刘金璐, 谷远辉, 等. 量子保密通信增益开关半导体脉冲激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502005.
- [15] Zhou F Z, Ma G B, Shen L Q, et al. Studies on the ps gain-switching of a semiconductor laser[J]. Acta Physica Sinica, 1994, 43(4): 580-590.
- [16] Singh U, Green M M. High-frequency CML clock dividers in 0.13- μ m CMOS operating up to 38 GHz [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(8): 1658-1661.
- [17] Stover H L, Steier W H. Locking of laser oscillators by light injection[J]. Applied Physics Letters, 1966, 8(4): 91-93.
- [18] Girard A. The effects of the insertion of a CW, low-pressure CO₂ laser into a TEA CO₂ laser cavity[J]. Optics Communications, 1974, 11(4): 346-351.
- [19] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. The principle of laser [M]. 4th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 228-233.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 4 版. 北京: 国防工业出版社, 2000: 228-233.
- [20] Liu Y F, Liang W. Compact narrow linewidth external cavity semiconductor laser realized by self-injection locking to Fabry-Perot cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1715001.
刘云凤, 梁伟. 自注入锁定外腔超窄线宽半导体激光 [J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1715001.
- [21] Peng H T, Wang J, Ma C, et al. Arbitrary waveform generation of enhanced high-order harmonics based on injection locking[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0419001.
彭海涛, 王菊, 马闯, 等. 基于注入锁定增强高次谐波中的任意波形产生 [J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0419001.
- [22] Comandar L C, Lucamarini M, Fröhlich B, et al. Quantum key distribution without detector vulnerabilities using optically seeded lasers [J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 312-315.
- [23] Comandar L C, Lucamarini M, Fröhlich B, et al. Near perfect mode overlap between independently seeded, gain-switched lasers [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17849-17859.
- [24] Zhou Q, Valivarthi R, John C, et al. Practical quantum random-number generation based on sampling vacuum fluctuations [J]. Quantum Engineering, 2019, 1(1): e8.
- [25] Yuan Z L, Lucamarini M, Dynes J F, et al. Robust random number generation using steady-state emission of gain-switched laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(26): 261112.
- [26] Hughes R J, Morgan G L, Peterson C G. Quantum key distribution over a 48 km optical fibre network [J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47(2/3): 533-547.
- [27] Dixon A R, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Continuous operation of high bit rate quantum key distribution [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(16): 161102.
- [28] Dixon A R, Dynes J F, Lucamarini M, et al. High speed prototype quantum key distribution system and long term field trial [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7583-7592.
- [29] Grünenfelder F, Boaron A, Rusca D, et al. Simple and high-speed polarization-based QKD [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(5): 051108.
- [30] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, et al. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(26): 5932-5935.
- [31] Zhang X Y, Yuan C Z, Wei S H, et al. Rare earth ion doped solid state quantum memory [J]. Low Temperature Physical Letters, 2019, 41(5): 315-334.
张雪莹, 袁晨智, 魏世海, 等. 稀土掺杂固态量子存储研究进展 [J]. 低温物理学报, 2019, 41(5): 315-334.
- [32] Knill E, Laflamme R, Milburn G J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics [J].

- Nature, 2001, 409(6816): 46-52.
- [33] Sun Q C. Experimental quantum teleportation in metropolitan optical fiber networks [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
孙启超. 城域光纤网络中量子隐形传态的实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [34] Yuan Z L, Fröhlich B, Lucamarini M, et al. Directly phase-modulated light source[J]. *Physical Review X*, 2016, 6(3): 031044.
- [35] Bennett B R, Soref R A, del Alamo J A. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs and InGaAsP[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(1): 113-122.
- [36] Roberts G L, Lucamarini M, Dynes J F, et al. A direct GHz-clocked phase and intensity modulated transmitter applied to quantum key distribution[J]. *Quantum Science and Technology*, 2018, 3(4): 045010.
- [37] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145.
- [38] Lo H K, Curty M, Tamaki K. Secure quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 595-604.
- [39] Xu F H, Ma X F, Zhang Q, et al. Secure quantum key distribution with realistic devices[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2020, 92(2): 025002.
- [40] Fan-Yuan G J, Lu F Y, Wang S, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution for nonstandalone networks [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1881-1891.
- [41] Comandar L C, Fröhlich B, Lucamarini M, et al. Room temperature single-photon detectors for high bit rate quantum key distribution [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 021101.
- [42] Woodward R I, Lo Y S, Pittaluga M, et al. Gigahertz measurement-device-independent quantum key distribution using directly modulated lasers[J]. *Npj Quantum Information*, 2021, 7: 58.
- [43] Ma X F, Fung C H F, Razavi M. Statistical fluctuation analysis for measurement-device-independent quantum key distribution[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(5): 052305.
- [44] Curty M, Xu F H, Cui W, et al. Finite-key analysis for measurement-device-independent quantum key distribution[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3732.
- [45] Wei K J, Li W, Tan H, et al. High-speed measurement-device-independent quantum key distribution with integrated silicon photonics [J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031030.
- [46] Liu H, Jiang C, Zhu H T, et al. Field test of twin-field quantum key distribution through sending-or-not-sending over 428 km [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(25): 250502.
- [47] Semenenko H, Sibson P, Hart A, et al. Chip-based measurement-device-independent quantum key distribution[J]. *Optica*, 2020, 7(3): 238-242.
- [48] Yin H L, Chen T Y, Yu Z W, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [49] Valivarthi R, Lucio-Martinez I, Chan P, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution: from idea towards application [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(14): 1141-1150.
- [50] Paraíso T K, Roger T, Marangon D G, et al. A photonic integrated quantum secure communication system[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(11): 850-856.
- [51] Roger T, de Marco I, Paraiso T, et al. Interferometric quantum random number generation on chip [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: FM2M.1.
- [52] Valivarthi R, Puigibert M L G, Zhou Q, et al. Quantum teleportation across a metropolitan fibre network[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 676-680.
- [53] Zhang Z C, Yuan C Z, Shen S, et al. High-performance quantum entanglement generation via cascaded second-order nonlinear processes [J]. *Npj Quantum Information*, 2021, 7: 123.
- [54] He Y M, He Y, Wei Y J, et al. On-demand semiconductor single-photon source with near-unity indistinguishability [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(3): 213-217.
- [55] Yuan C Z, Zhou Q. Experimental progress on quantum communication with quantum dot based devices [M] // Yu P, Wang Z. Quantum dot optoelectronic devices. Lecture notes in nanoscale science and technology. Cham: Springer, 2020, 27: 135-173.
- [56] Press D, Ladd T D, Zhang B Y, et al. Complete quantum control of a single quantum dot spin using ultrafast optical pulses [J]. *Nature*, 2008, 456(7219): 218-221.