量子通信技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250923001

抗干扰量子编解码芯片设计与仿真研究

王少华，王昌雷，许华醒*

（中国电子科技集团公司电子科学研究院，北京 100041）

摘　要： 针对当前量子安全通信系统对小型化、规模化及产业化的迫切需求，文章基于信道干扰自补偿原理，设计了一种硅基SiO_2光量子编解码芯片，并对其核心模块进行仿真验证。首先，提出基于正交偏振旋转反射迈克尔逊干涉仪的芯片整体架构，实现信道干扰的自补偿功能。其次，分别对定向耦合器、光延迟线、偏振分束器、热光相位调制器及偏振旋转器等关键模块进行结构设计与仿真优化。仿真结果表明：在1 550 nm工作波长下，定向耦合器实现50%∶50%分光比，片上插入损耗小于等于3.1 dB，均匀性小于等于0.000 4 dB；偏振分束器消光比大于30 dB，损耗低于0.15 dB；光延迟线实现400 ps延迟；热光相位调制器调制范围覆盖0～2π，静态损耗低于0.2 dB。所设计的芯片方案有效消除了量子信道引起的偏振诱导衰落，为量子通信设备的小型化与实用化提供了技术支撑。

关键词： 编解码芯片；量子通信；硅基SiO_2

中图分类号： TN929.1　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0219－07

Anti-Interference Quantum Encoding/Decoding Chip Design

WANG Shaohua, WANG Changlei, XU Huaxing

(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, CHN)

Abstract: To address the urgent requirements for miniaturization, large-scale deployment, and industrialization of quantum secure communication systems, this paper presents the design and simulation of a silica-on-silicon quantum encoding/decoding chip based on the principle of channel interference self-compensation. The overall chip architecture was established using an orthogonal polarization rotation reflective Michelson interferometer to achieve self-compensation of channel disturbances. The key functional modules, including directional couplers, optical delay lines, polarization beam splitters, thermo-optic phase modulators, and polarization rotators, were structurally designed and optimized using simulations. Simulation results at the operating wavelength of 1 550 nm demonstrate that the directional coupler achieves a 50%∶50% splitting ratio with an on-chip insertion loss of less than or equal to 3.1 dB and uniformity of less than or equal to 0.000 4 dB. The polarization beam splitter exhibits an extinction ratio greater than 30 dB with a loss of less than 0.15 dB. The optical delay line achieves a delay of 400 ps, and the thermo-optic phase modulator provides a phase tuning range (covering the range of 0～2π) with a static loss of less than 0.2 dB. The proposed chip design effectively eliminates the polarization-induced fading caused by quantum channels, providing technical support for the miniaturization and practical deployment of quantum communication devices.

Key words: encoding/decoding chip; quantum communication; silica-on-silicon

收稿日期：2025－09－23.

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(62001440).

* **通信作者：**许华醒

0 引言

自从Bennett和Brassard于1984年提出第一个量子密码协议以来[1]，量子密钥分发（QKD）历经四十年的发展，取得一系列里程碑式成果。在协议安全性方面，2005年中国科学家提出的多强度诱骗态调制方案有效解决了QKD弱相干脉冲光源的多光子安全漏洞，为QKD的实用化奠定了基础[2-6]。在传输距离上，1992年Bennett等在32.5 cm自由空间首次实现实验验证[7]，至2017年中国完成1 200 km星地QKD试验[8-9]，并于2018年实现与奥地利之间7 600 km的跨洲星地传输[10-14]。密钥率从2013年在50 km光纤下的1 Mbit/s[15]提升至10 Mbit/s[16-19]。在网络建设方面[20]，目前中国成功建成了全场2 000 km的光纤量子骨干网；英国启动了“量子通信枢纽”项目，计划构建量子网络；美国正部署其首条暗光纤量子网络，连接华盛顿特区与马萨诸塞州波士顿，全长800 km。经过这一系列的发展[21-26]，QKD从理论协议到器件系统初步成熟，已进入产业化应用的初级阶段。目前，QKD的广泛部署亟需开发低成本、稳健的微型系统，而集成光学凭借其在复杂性、鲁棒性和可扩展性方面的优异性能，为实现这一目标提供了可行路径[27]。

本文以信道干扰自补偿光量子编解码芯片为研究对象，基于硅基SiO_2平台设计了光子集成的光量子编解码芯片，该方案适用于基于时间相位编码的QKD系统。完成了硅基SiO_2光量子编解码芯片的设计，并对编解码芯片的关键部分分别进行仿真计算，为量子通信设备的小型化以及量子安全设备的广泛部署奠定技术基础。

1 芯片整体架构

硅基SiO_2光量子编解码芯片设计总体方案如图1所示。硅基SiO_2光量子编解码芯片主要分为五个部分：（1）耦合器（Coupler），主要功能为将同时包含TE&TM两个偏振态的输入光信号等分为两路信号光，采用定向耦合结构实现耦合器功能；（2）光延迟（Delay），主要对其中一路光信号进行延迟，采用环形波导绕圈实现延迟结构；（3）偏振分束器（PBS），主要对同时包含TE&TM两个偏振态的输入光进行偏振分束，将两个偏振态分开，采用定向耦合器和不同宽度波导实现偏振分束；（4）热光相位调制（TOPM），主要对光信号进行相位调制和衰减，采用马赫-曾德尔（Mach-Zehnder）结构实现热光相位调制结构；（5）偏振翻转（PR），对光信号进行偏振翻转，采用插入波片形式，实现偏振翻转。

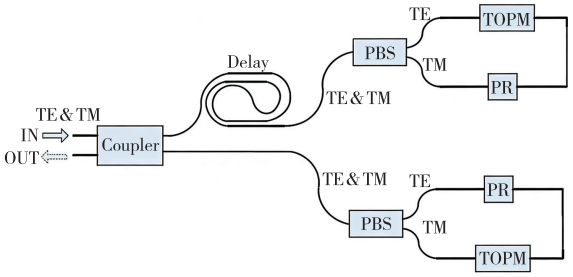


图1 硅基SiO_2光量子编解码芯片设计整体方案

本文基于正交偏振旋转反射迈克尔逊干涉仪（OPERMI）模型[30]，设计了该信道干扰自补偿光量子编解码芯片方案。该方案由一个耦合器、两个不等臂的萨尼亚克（Sagnac）环组成。其中，Sagnac环由偏振分束器、热光相位调制和偏振旋转器件组成。当信号光经过耦合器后，平均分成两束，分别进入两个不等臂Sagnac干涉环，之后经偏振分束器分为水平偏振光和垂直偏振光，偏振光经过Sagna环后，水平偏振光将变成垂直偏振光，垂直偏振光将变成水平偏振光，假设水平偏振光沿顺时针方向传输，垂直偏振光沿逆时针传输。由于顺时针方向路径和逆时针方向路径的相位积累相同，入射光在Sagnac环中只发生偏振方向的交换，进而消除由量子信道引起的偏振诱导衰落[28-29]。

实验基于硅基SiO_2平台，综合考虑尺寸和损耗的要求，设计采用折射率差为2.0%，在波长1.55 μm下，芯区折射率n_1=1.473 5，上下包层的折射率n_2=1.444。为保证器件的单模传输，选择波导截面尺寸为4 μm×4 μm。

2 核心模块设计

2.1 定向耦合器

定向耦合器结构如图2所示，其核心参数包括：定向耦合器直波导的缝隙（g）和定向耦合器长度（l_{arm1}）。通过光束传播法（BPM）分别将两个参数对定向耦合器的影响进行分析，如图3所示。从图中可以看出，随着缝隙的增大，定向耦合器两波导之间的耦合逐渐减小，输出通道2的功率逐渐减小；随着定向耦合长度的增大，定向耦合器两波导之间的耦合逐渐增大，输出通道2的功率逐渐增大。

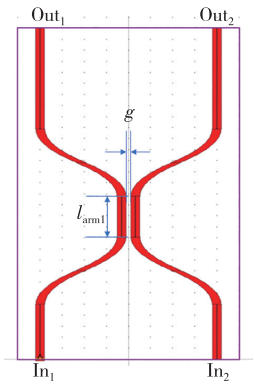
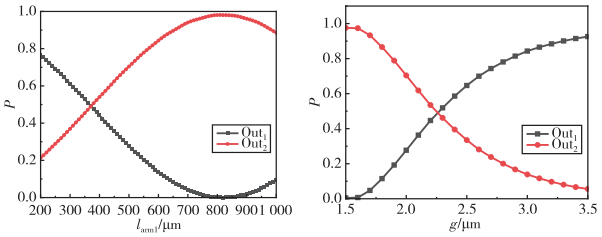


图 2　定向耦合器结构示意图



（a）长度　　（b）缝隙

图 3　定向耦合器模拟结果

2.2　光延迟

光延迟部分采用直波导和弯曲波导绕圈的形式实现光延迟，考虑单光子探测速率对光脉冲延迟时间的要求，实验设计延迟时间为 400 ps。其延迟的长度可以通过公式(1)得出：

$$\Delta l = v\Delta t = c\Delta t / n_g \tag{1}$$

通过光束传播法计算出群折射率 n_g=1.496 768，通过公式(1)可计算出延迟 400 ps 所需的延迟长度为 80.172 mm。

2.3　偏振分束器

偏振分束器由三部分组成，其结构如图 4 所示，包括两个 3 dB 定向耦合器和一个长度为 l_{arm2} 宽度不同的非对称臂。因不同宽度下 TE 和 TM 偏振态的有效折射率不同，经过长度为 l_{arm2} 的非对称臂的传输可以将 TE 和 TM 光分别积累不同的相位差。通过选择合适的非对称臂长度和宽度，可以使 TE 和 TM 累计的相位差分别为 0 和 π，使得 TE 和 TM 分别从不同的端口输出，实现偏振分束的功能。

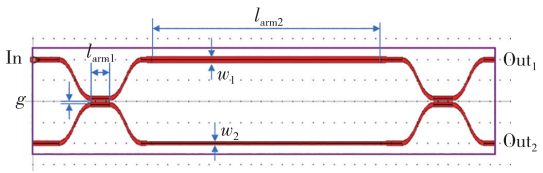


图 4　偏振分束器结构示意图

2.4　热光相位调制器

热光相位调制器的结构示意如图 5 所示，其由输入/输出波导、两个定向耦合器及两个调制臂构成。假设一束单模光信号从输入波导输入，其振幅为 A，经过第一个定向耦合器后分成两束完全相同的光分别在两个调制臂中传输。如果两个调制臂完全相同，那么这两束光将会在第二个定向耦合器处干涉合成，产生与输入光完全相同的光从输出波导输出。如果通过热光效应改变两调制臂的折射率，那么两个调制臂中光束的相位也会改变，假设两光束由于调制臂折射率的改变产生的额外的相位分别为 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$，那么两束光可以表示为：

$$E_1 = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t + \Delta\varphi_1)] \tag{2}$$

$$E_2 = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t + \Delta\varphi_2)] \tag{3}$$

干涉后的平均输出光强 I_{out} 为：

$$I_{out} = \frac{1}{2} \times \left| \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t + \Delta\varphi_1)] + \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\omega t + \Delta\varphi_2)] \right|^2 = A_0^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2}\right) = I_{in}\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \tag{4}$$

式中，$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$。若经过两调制臂调制后，两束光的相位差 $\Delta\varphi$ 为 π 的偶数倍，则这两束光为同相位，在第二个定向耦合器合成后的光功率达到最大值；若 $\Delta\varphi$ 为 π 的奇数倍，则这两束光相位相反，合成后的输出光功率达到最小值。通过选择不同的输出通道，实现一组相位基编码(0 和 π 相位)，通过调节热光效应的强弱实现相位漂移补偿。

本文设计的热光相位调制器的结构示意图如图 5 所示，其中一个调制臂上溅射有加热电极和引线。当引线连接到外加稳压源后，电流通过加热电极，产生的热量将被传输到波导芯区改变调制臂的折射率，对波导芯层中传输的光进行相位调制。

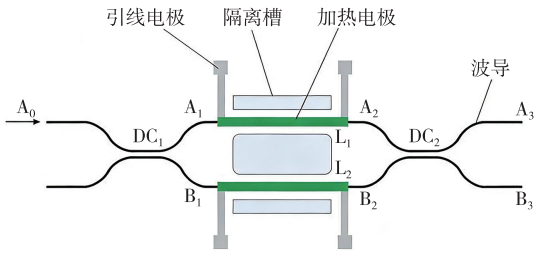


图 5　热光相位调制器结构示意图

2.5 偏振旋转

SiO_2波导材料双折射系数很小，通过波导形式很难实现偏振旋转的功能，本文采用插入半波片的方式实现偏振旋转，采用超薄型聚酰亚胺波片实现偏振旋转，如图6所示。当输入光为TE模式偏振时，通过半波片后，输出光将变为TM偏振状态，反之亦然，通过半波片可以实现TE和TM模式的偏振旋转。采用型号为AT-HWP聚酰亚胺半波片，相位延迟为$\lambda/2$(1 550 nm)，消光比大于等于25 dB(1 550 nm)，膜厚取10～15 μm，尺寸为0.75 mm×0.5 mm。

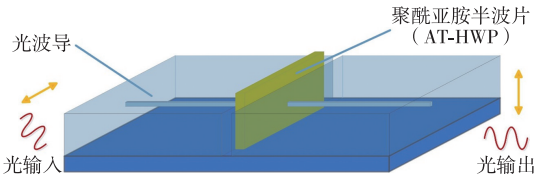


图6 波片工作示意图

2.6 输出波导

为了和单模光纤更好地耦合，采用锥形光栅展宽波导结构(PSW)和光纤耦合，可降低和光纤的耦合损耗，其结构如图7所示。该结构主要由两部分构成：一部分为锥形展宽的光栅结构，与折射率差为2.0%的波导相连接，展宽光栅数量为N_{taper}；另一部分为宽度一样的光栅结构，与单模光纤相连接，均匀光栅数量为$N_{straight}$。实验设置$N_{straight}$为35、N_{taper}为40、末端宽度w_{end}为6 μm，耦合损耗可以达到相对较小的值。

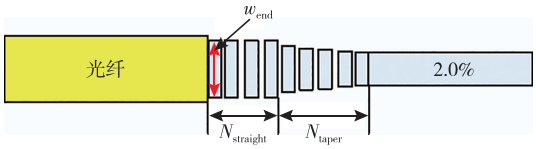


图7 锥形单模光纤耦合结构示意图

3 核心模块仿真与芯片整体实现

3.1 定向耦合器

由于光刻工艺的限制，选择g=2 μm，通过优化定向耦合长度，设定l_{arm1}=371 μm。通过光束传播法进行计算，在1.55 μm波长下，输出通道Out_1和输出通道Out_2的功率分别为0.490 63和0.490 67，实现了50%∶50%分光比的定向耦合器结构，如图8所示。在1.52～1.57 μm波长范围内对定向耦合的输出功率进行扫描，结果如图9所示，片上插入损耗IL≤3.6 dB，均匀性$UNIF$≤0.93 dB。

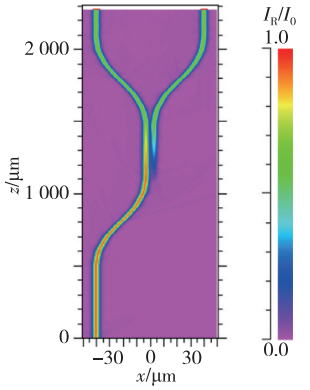
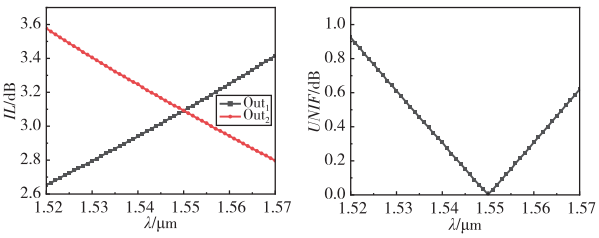


图8 1.55 μm波长入射下定向耦合器的光场分布



(a) 插入损耗 (b) 均匀性

图9 定向耦合器在1.52～1.57 μm波长范围内仿真结果

3.2 偏振分束器

如图4所示，设定偏振分束器定向耦合的l_{arm1}为371 μm，g为2 μm。设置波导宽度为4 μm，选择非对称臂的宽度w_1和w_2分别为5.5 μm和2.5 μm，长度为l_{arm2}。非对称臂引入双折射$n_{TM}-n_{TE}$(n_{TM}和n_{TE}分别是TM和TE模式的有效折射率)，相位差积累满足公式如下：

$$\Delta(nl)_{TE}=n_{TE}(w_1)\times l-n_{TE}(w_2)\times l=N\lambda \quad (5)$$

$$\Delta(nl)_{TM}=n_{TM}(w_1)\times l-n_{TM}(w_2)\times l=(M+1)\lambda \quad (6)$$

使TE和TM模式累计的相位差分别为0和π，可实现偏振分束的功能，使得TE和TM分别从不同的端口输出。图10为非对称臂长度变化对偏振分束器性能影响的仿真结果。可以看出，随着非对

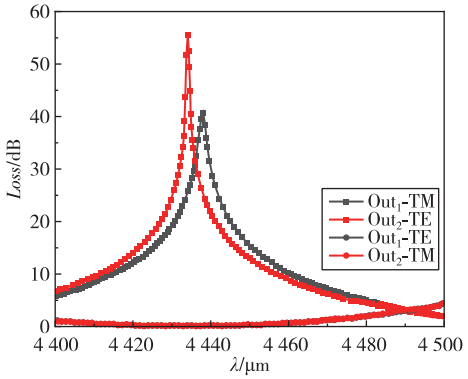


图10 非对称臂长度变化对偏振分束器性能的影响

称臂长度的变化，消光比变化较大。选择非对称臂长度为 4 436 μm，此时在两个偏振态输入下的损耗小于 0.15 dB，消光比大于 30 dB。

同时对偏振分束器的波长特性进行了分析，其结果如图 11 所示。可以看出，在 1.55 μm±0.005 μm 波长范围内，均可以实现消光比大于 20 dB。

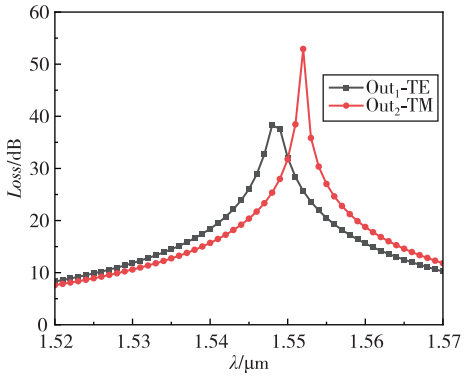


图 11　偏振分束器的波长特性

3.3　热光相位调制器

SiO_2 属于热光材料，其折射率是温度的函数，用热光系数可表征为：

$$\alpha=\frac{\partial n}{\partial T} \tag{7}$$

式中，α 是材料的热光系数，n 为材料的折射率。如图 5 所示，通过引线将调制臂的加热电极连到直流电压源上，产生的热量传输到波导芯层，使其折射率发生改变，因此会在两个调制臂间产生一个相位差，即：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\alpha\Delta TL \tag{8}$$

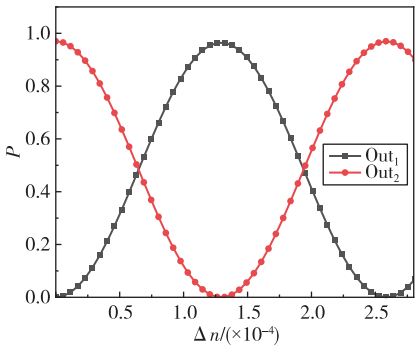
式中，λ 为光的波长，ΔT 为波导芯层加热前后的温度差，L 为调制臂的长度。由公式(8)可知，调制臂长度 L 越长，所需要的温度差越小，考虑到器件的尺寸，这里选定 L=6 000 μm。当相位差为 π 的时候，所需的加热温度约为 10.9℃。

在一维线性假设的条件下，当相位差为 π 时，所需要的功耗 P_π 为：

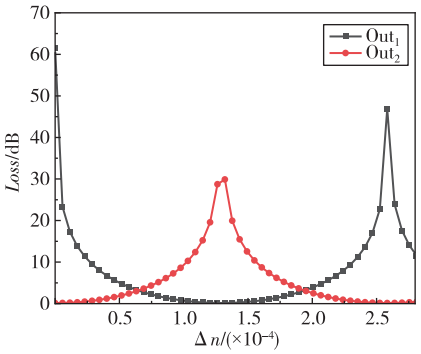
$$P_\pi=\frac{\lambda k_w}{2}\frac{w_h}{t_c}\left(1+0.88\frac{t_w}{w_h}\right)\Big/\alpha \tag{9}$$

式中，k_w 为芯层和包层的热导率，由于芯层和包层都是 SiO_2 而且折射率差很小，实验假设它们热导率是相等的；w_h 为加热电极的宽度；t_c 为波导芯层的中心到上包层的距离；t_w 为波导芯层与上包层的厚度总和。由公式(9)可知 w_h 越小，功耗越小，但如果加热电极太窄，热量传导到波导区恐怕覆盖不了整个波导芯层。因此，选定加热电极宽度 w_h=20 μm。加热电极选择电阻率比较高的钨 W，引线电极选择电阻率比较低的铝 Al。

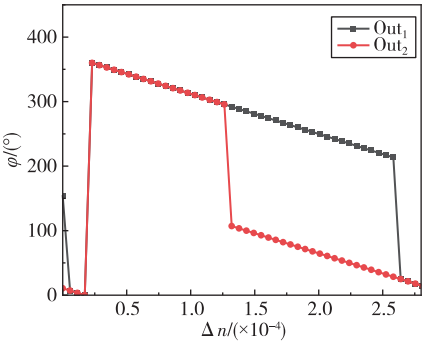
通过三维光束传播法，调整调制臂的折射率变化实现输出通道功率和相位的变化。当折射率在 0～0.000 28 范围内变化时(控温精度约为 0.5℃)，Mach-Zehnder 干涉型相位调制器输出通道的功率、损耗和相位变化如图 12 所示。从图中可以看出，折射率在 0～0.000 28 范围内(对应的温度变化约为 24℃)，该器件静态损耗小于 0.2 dB，热光相位调制范围可覆盖 0～2π。



(a) 功率



(b) 损耗



(c) 相位

图 12　Mach-Zehnder 相位调制器输出通道的功率、损耗和相位随折射率的变化

3.4 硅基SiO_2光量子编解码芯片设计实现

硅基SiO_2光量子编解码芯片最终设计方案如图13所示。第一部分采用定向耦合器;第二部分为光延迟,采用环形波导绕圈实现延迟结构;第三部分为偏振分束器,采用两个定向耦合器和非对称臂波导实现偏振分束;第四部分为热光相位调制,采用Mach-Zehnder结构实现热光相位调制结构;第五部分为偏振翻转,采用插入波片形式,实现偏振翻转。输入和输出波导采用单模波导。

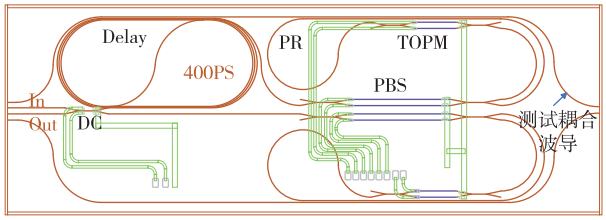


图13 硅基SiO_2光量子编解码芯片设计图

4 结论

本文基于信道干扰自补偿原理,开展了硅基SiO_2光量子编解码芯片整体方案设计,并完成了对关键模块的仿真。在波长1 550 nm下,定向耦合器片上损耗小于3.1 dB、均匀性小于0.000 4 dB,偏振分束器偏振消光比大于30 dB,实现了400 ps的延迟线,热光相位调制器的调相范围覆盖0~2π,静态损耗小于0.2 dB。

参考文献:

[1] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560: 7-11.

[2] Wang X B. Beating the photon-number-splitting attack in practical quantum cryptography [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(23): 230503.

[3] Wang S, Chen W, Yin Z Q, et al. Practical gigahertz quantum key distribution robust against channel disturbance [J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2030-2033.

[4] Minder M, Pittaluga M, Roberts G L, et al. Experimental quantum key distribution beyond the repeaterless secret key capacity[J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 334-338.

[5] Zhong X, Hu J, Curty M, et al. Proof-of-principle experimental demonstration of twin-field type quantum key distribution [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(10): 100506.

[6] Agnesi C, Avesani M, Calderaro L, et al. Simple quantum key distribution with qubit-based synchronization and a self-compensating polarization encoder [J]. Optica, 2020, 7(4): 284.

[7] Bennett C H, Bessette F, Brassard G, et al. Experimental quantum cryptography [J]. Journal of Cryptology, 1992, 5(1): 3-28.

[8] Wang S, Chen W, Yin Z Q, et al. Field and long-term demonstration of a wide area quantum key distribution network[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21739-21756.

[9] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution [J]. Nature, 2017, 549(7670): 43-47.

[10] Boaron A, Boso G, Rusca D, et al. Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(19): 190502.

[11] Liao S K, Cai W Q, Handsteiner J, et al. Satellite-relayed intercontinental quantum network [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(3): 030501.

[12] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(7): 070501.

[13] Zhou X Y, Ding H J, Sun M S, et al. Reference-frame-independent measurement-device-independent quantum key distribution over 200 km of optical fiber[J]. Physical Review Applied, 2021, 15(6): 064016.

[14] Wang S, Yin Z Q, He D Y, et al. Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 154-161.

[15] Lucamarini M, Patel K A, Dynes J F, et al. Efficient decoy-state quantum key distribution with quantified security [J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24550.

[16] Islam N T, Lim C C W, Cahall C, et al. Provably secure and high-rate quantum key distribution with time-Bin qudits [J]. Science Advances, 2017, 3(11): e1701491.

[17] Yuan Z, Plews A, Takahashi R, et al. 10-mb/s quantum key distribution [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3427-3433.

[18] Grünenfelder F, Boaron A, Rusca D, et al. Simple and high-speed polarization-based QKD [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(5): 051108.

[19] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F, et al. Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters[J]. Nature, 2018, 557(7705): 400-403.

[20] 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.

[21] Bedington R, Arrazola J M, Ling A. Progress in satellite quantum key distribution [J]. npj Quantum Information, 2017, 3: 30.

[22] Vallone G, Bacco D, Dequal D, et al. Experimental satellite quantum communications [J]. Physical Review Letters,

2015, 115(4): 040502.

[23] Feng Z, Li S, Xu Z. Experimental underwater quantum key distribution[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 8725-8736.

[24] Hu C Q, Yan Z Q, Gao J, et al. Transmission of photonic polarization states through 55-m water: towards air-to-sea quantum communication [J]. Photonics Research, 2019, 7(8): A40.

[25] Pirandola S, Eisert J, Weedbrook C, et al. Advances in quantum teleportation[J]. Nature Photonics, 2015, 9(10): 641-652.

[26] Xu F, Ma X, Zhang Q, et al. Secure quantum key distribution with realistic devices [J]. Reviews of Modern Physics, 2020, 92(2): 025002.

[27] Zhang Q, Xu F, Chen Y A, et al. Large scale quantum key distribution: challenges and solutions [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 24260-24273.

[28] Xu H X, Wang S H, Wang C L, et al. Anti-interference high-speed modulation decoder for quantum key distribution [J]. Chinese Physics Letters, 2025, 42(1): 010303.

[29] Mo X F, Zhu B, Han Z F, et al. Faraday-Michelson system for quantum cryptography[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2632-2634.

作者简介：

王少华(1989—)，女，河北省人，博士，高级工程师，主要研究方向为量子通信光芯片；

许华醒(1987—)，男，安徽省人，博士，研究员级高级工程师，主要研究方向为实用化量子通信。