

面向量子通信的时间相位编码 集成硅光芯片设计

陈召远, 刘延飞, 高 旸, 郑 浩, 陈 诚
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为满足集成化量子密钥分发系统中降低集成光芯片电光调制器半波电压的需求, 采用有限时域差分算法对量子态编码硅光芯片调制器进行了建模和仿真。通过优化调制器的设计参数和调制方式, 实现了一种低半波电压的量子密钥分发编码集成光芯片。根据仿真结果进行芯片设计和流片, 并对其关键调制性能进行了实验测试。测试结果表明: 调制器的半波电压为 0.85 V, 消光比为 36 dB。该调制器能够在极低的半波电压下实现高消光比的量子态制备和比特编码。

关键词: 量子通信; 集成光芯片; 时间相位编码; 量子密钥分发

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-099-06

Design of Time-Phase Encoded Silicon Photonics Integrated Chip for Quantum Communication

CHEN Zhaoyuan, LIU Yanfei, GAO Yang,
ZHENG Hao, CHEN Cheng

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To effectively reduce half-wave voltage on the integrated photonics chip for integrated quantum key distribution (QKD), the quantum state encoding silicon photonic chip was modeled and simulated by finite-difference time-domain (FDTD) algorithm. By optimizing the design parameters and modulation method of the modulator, a low half-wave voltage QKD encoding integrated photonic chip was developed. Based on the simulation results, the chip was designed and fabricated. Furthermore, the key modulation performance of the chip was tested by experiments. Results showed that the modulator has a half-wave voltage of 0.85 V and an extinction ratio of 36 dB. The proposed modulator can achieve high extinction ratio quantum state preparation and bit encoding at extremely low half-wave voltages.

KEYWORDS: quantum communication; photonics integrated chip; time-phase encoding; quantum key distribution

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (62274182); 陕西省自然科学基金 (2022JM-341)

第一作者: 陈召远 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统研究。E-mail: fl130472@mail.ustc.edu.cn

引用格式: 陈召远, 刘延飞, 高旸, 等. 面向量子通信的时间相位编码集成硅光芯片设计[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(6): 99-104.

近几年,国内外在量子计算机领域的研究取得了长足进展,基于超导架构的量子计算机和光子计算机均已证明了在某些特定问题的求解上,量子计算机的计算速度比经典计算机快了十几个数量级^[1-4]。量子计算机取得的突破性进展直接威胁了当前的密钥加密体系。为应对这一风险,研究人员提出了量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)技术。QKD是通过量子力学的基本原理建立一套安全的密钥分发体系,这一体系并不依赖任何计算问题,其安全性是由量子力学的基本原理保证的。

从1984年第一个QKD协议^[5]提出到现在已经过去了40年时间,在这40年中,QKD领域的研究取得了丰硕的成果。量子通信距离从最开始只有几十cm^[6],到现在上千km^[7-9];通信速率也从MHz^[10-11]提高到了GHz量级^[12];通信信道兼容自由空间信道^[13-14]和光纤信道^[8-9];通信环境从可控实验室环境发展到城际光纤网络^[15-18]甚至星地链路^[19-22]。量子通信技术也逐渐从科研技术走向实际应用。集成系统具有集成度高、稳定性好等优势,并且在产业发展中集成器件更有利于产业研发和技术迭代。因此,集成的QKD系统是当前研究的热门,也是产业化发展的必由之路。

2016年,多伦多大学发表了第一个硅集成光子(Photonics Integrated Chip, PIC) QKD芯片^[23],这一研究将光通信中广泛应用的集成硅光子技术运用到了QKD系统中,设计了QKD编码的PIC,开启了QKD领域集成光子技术应用的大门。之后,各国研究机构开展了各种集成光芯片的QKD研究,实现了BB84协议^[24-25]、测量设备无关(Measurement Device Independent, MDI)协议^[26]、偏振编码^[27]、时间相位编码^[24]等多种QKD集成光芯片,并且在光纤信道^[28]、自由空间信道^[29]上进行了实验验证研究。这些工作从各个方面验证了集成光芯片QKD系统的可行性以及性能指标,充分论证了集成光芯片QKD系统的优势。特别是近几年,东芝欧洲公司及中国科学技术大学分别在集成量子通信系统^[30-31]、小型集成量子通信模块^[32]和高速量子通信系统^[33-34]等方面的研究上取得了长足的进展。

在量子态编码的过程中需要用到电光调制器对光脉冲进行调制,上述集成光芯片中的电光调制器半波电压在3~5 V左右^[24-25, 33-34]。较高的半波电压对调制器前端的驱动电路要求较高,特别是

在高速通信应用场景下,实现高带宽、低噪声、高电压的高速驱动电路较为困难。为解决这一问题,本文提出了低半波电压的时间相位编码的量子密钥分发光芯片方案,用时域有限差分算法对调制器进行仿真优化,通过改进调制器的设计和调制方式,降低光芯片的半波电压,从而降低驱动电路的设计难度。

1 时间相位编码原理

相位编码是经典光通信中所用的常用编码方式,在QKD中同样有时间相位编码方式。这种编码方式可以同时兼容QKD系统和经典光通信系统,因此可以利用同一套编码硬件实现两种功能,从而将经典光通信与QKD系统融合实现集成化更高的量子通信系统。

时间相位编码原理如图1所示。激光器以一定的频率发送脉冲光。将相邻的2个光脉冲看作一组,将一组光脉冲当作1个编码所用的比特(bit)。这1个比特中时间前后的2个脉冲分别是这个比特中的2个时间窗口(time-bin)。通过在前后的2个time-bin的光脉冲上调制相对相位0和 π 来对比特进行0和1编码,称之为相位编码方式。而时间编码则是将前后2个time-bin的光脉冲消灭1个,只保留1个脉冲。保留第1个光脉冲记为0,保留第2个光脉冲记为1,从而实现时间编码。

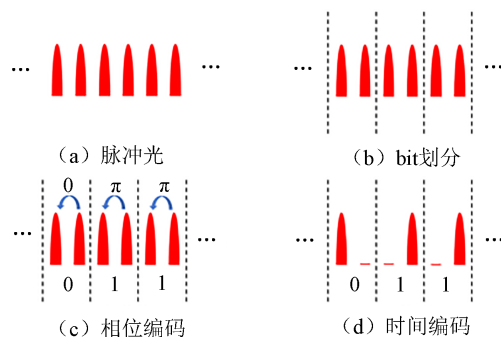


图1 时间相位编码原理

Fig. 1 Principle of time-phase encoding

时间相位编码是一种较容易实现的编码方式。相比较QKD中另一常用的偏振编码,时间相位编码将信息编码在时间和相位维度上。光在光纤内传输的过程中,其相对的时间相位关系不随外界光纤的温度、震动等扰动而改变;相反,光的偏振态则会由光纤材料的双折射效应引起变化。因此,在光纤网络中,时间相位编码是首选编码方

式, 可以避免外界环境影响, 增加系统稳定性。

2 时间相位编码光芯片设计

时间相位编码光芯片结构如图 2 所示, 其中光的输入和输出通过光栅耦合器 (Grating Coupler, GC) 实现。光脉冲输入到光芯片后, 首先经过 1 个多模干涉仪 (Multi-mode Interferometer, MMI) 干涉后分为 2 束光进入到 1 个马赫曾德干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 中。MZI 的两臂上分别设计有 1 个热相移器 (Phase Shifter, PS) 和 1 个载流子耗尽型电光调制器 (Carrier Depletion Modulator, CDM)。经过 MZI 调制和干涉后, 再通过 1 个 MMI 进行合束。通过 MZI 干涉结构即可实现时间编码功能。

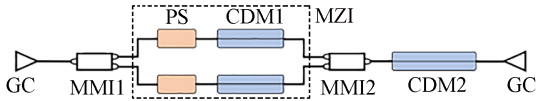


图 2 时间相位编码光芯片结构

Fig. 2 Structure of a time-phase encoded photonics chip

这一过程的数学描述如下。在输入端 GC 处, 将输入的光记为 E_{in} , 那么, 在经过第一个后分束上臂和下臂的光场 E_{up} 和 E_{down} 分别为:

$$E_{up} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in}$$

$$E_{down} = \frac{i\sqrt{2}}{2} E_{in}$$

式中: i 为虚数单位。经过 MZI 调制后, 上下两臂的光脉冲中引入了 1 个调制相位 φ_m 和传播相位 φ_p , 得到

$$E_{up} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \exp(i(\varphi_m + \varphi_p))$$

$$E_{down} = \frac{i\sqrt{2}}{2} E_{in} \exp(i\varphi_p)$$

最后由 MMI2 处干涉输出光场 E_{out} 为

$$E_{out} = E_{in} \cos(\varphi_m/2)$$

即当调制相位为 0 时, 这一个脉冲不做任何操作; 当调制相位为 π 时, 这一个脉冲被消光, 从而实现不同 time-bin 上的时间编码。

最后再经过一个 CDM 对前后两个脉冲进行相对相位调制来实现相位编码功能, 调制编码后的光脉冲再通过输出端的 GC 输出芯片。通过这样一个结构的芯片可以实现 QKD 的编码功能, 同时可以兼容经典光通信编码。采用时分复用的方案就可以在同一套硬件系统中, 分别进行量子密钥分

发和通信, 从而完成完整的量子通信功能。

3 低半波电压的时间相位编码调制器设计仿真

芯片是由各部分器件组合而成, 因此, 判断芯片功能和性能首先需要对各个器件进行建模仿真。本文光芯片的光路结构中主要由 MMI 和 CDM 构成, 芯片的性能参数也主要由这 2 个器件决定。

3.1 MMI 设计仿真

用有限时域差分算法对 MMI 的结构进行建模, 计算器件的增益 S21 参数。MMI 结构的耦合区域长度为 $14.15 \mu\text{m}$, 耦合区域宽度为 $4 \mu\text{m}$, 过渡区长度为 $27 \mu\text{m}$, 过渡区宽度为 $1.6 \mu\text{m}$, 过渡区间距为 $2 \mu\text{m}$ 。

光的透过参数增益 S21 仿真结果如图 3 所示。

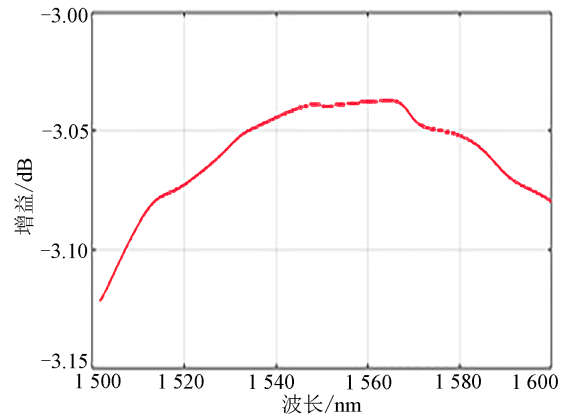


图 3 MMI 的 S21 参数仿真结果

Fig. 3 Simulation results of multi-mode interferometer S21 parameter

因为该 MMI 是 1×2 端口结构, 主要功能是完成光的 $1:1$ 分束。仿真结果表明: S21 约为 -3 dB , 即分光比为 50%, 与预期相符; 1540 nm 到 1570 nm 较宽的波长范围内 S21 参数没有明显变化, 说明该器件可以在这一较宽的光谱范围内正常工作, 能够满足设计需求。

然后对 CDM 的结构进行建模仿真, CDM 采用载流子色散效应进行电光调制, 其折射率与载流子浓度关系为

$$\Delta n = -[8.8 \times 10^{22} \times \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} \times (\Delta N_h)^{0.8}]$$

$$\Delta \alpha = -[8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \times \Delta N_h]$$

式中: Δn 和 $\Delta \alpha$ 分别为折射率的实部和虚部, 分别对应色散和损耗; ΔN_e 和 ΔN_h 分别表示掺杂的电子

和空穴浓度。

可以看出：当改变调制器中的载流子浓度时，折射率的实部和虚部都会发生变化，这也导致调制器在调制光的相位时必然伴随着损耗的变化，这一现象被称为调制器的相位相关损耗（Phase Dependent Loss, PDL）。这一现象不仅导致光的相位调制伴随着强度的波动，还会降低调制效率，使得调制器的半波电压较高。

为解决 PDL 带来的问题，本文提出两种措施：一是优化调制器的载流子掺杂区域，降低 PDL 对调制效率的影响程度；二是采用注入型调制方案，用正向偏置电压将载流子注入到调制器区域中来提高调制效率，从而降低调制器半波电压。

3.2 CDM 设计仿真

CDM 由一个脊型波导和掺杂区域构成，在一个脊型波导两侧分别进行 N 型载流子掺杂和 P 型载流子掺杂，通过控制掺杂区域和掺杂浓度设计出不同性能的调制器。表 1 为 CDM 设计优化后的参数值，图 4 为设计结构对应的侧视图。

表 1 CDM 结构设计参数

Tab. 1 Design parameters of CDM sturcture

参数	取值
脊型波导宽度/nm	500
刻蚀深度/nm	150
重度 P 型掺杂浓度 PP	1E+20
重度 N 型掺杂浓度 NP	1E+20
中度 P 型掺杂浓度 PW	5.5E+18
中度 N 型掺杂浓度 NW	7E+18
轻度 P 型掺杂浓度 PLD	9E+17
轻度 N 型掺杂浓度 NLD	1E+18
掺杂区域 PP/ μm	(-14.5, -2.0)
掺杂区域 NP/ μm	(14.5, 2.0)
掺杂区域 PW/ μm	(-14.5, -1.0)
掺杂区域 NW/ μm	(14.5, 1.0)
掺杂区域 PLD/ μm	(-14.5, 0.0)
掺杂区域 NLD/ μm	(14.5, 0.0)
电极宽度/ μm	13
电极厚度/nm	450

采用表 1 参数对 CDM 调制器进行建模仿真，计算调制器不同电压下调制的相位，仿真结果如图 5 所示。



图 4 CDM 结构侧视图

Fig. 4 Side view of CDM structure

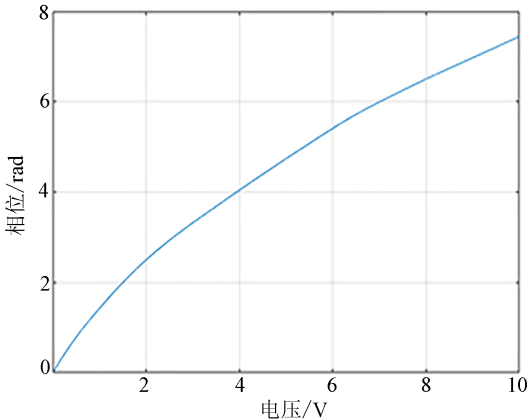


图 5 CDM 调制相位与电压关系仿真结果

Fig. 5 Simulation result of relationship between modulation phase and voltage

仿真结果表明，该 CDM 调制器调制的相位随着电压增大而增大，当调制器长度为 4 mm 时，调制器的半波电压为 2.8 V。如果此时采用正向偏置电压，其半波电压仿真结果只有 0.7 V。在量子态编码过程中，一般会用到 0、 $\pi/2$ 、 π 及 $3\pi/2$ 这几个相位，因此，调制器的半波电压越低越有利于物理上实现各个量子态的高对比度制备，对驱动电路的电压需求也就越低，更容易实现高带宽的系统。

4 芯片实验测试结果与分析

根据各个器件的设计仿真结果绘制芯片流片的版图，并在商用硅光流片上进行了芯片流片。芯片采用制程 180 nm 的 Cu 互联加工工艺。整个芯片面积只有 5 mm×3 mm，片上集成了图 2 所示的时间相位编码光路结构以及滤波器、衰减器等多个器件，能够支持在同一颗芯片上同时实现量子密钥分发和激光通信两个功能。芯片实物如图 6 所示。

对流片芯片进行了 MZI 的调制性能测试，在 MZI 调制器的一臂上施加正向偏置电压，观测记录 MZI 输出的光功率结果，绘制 MZI 的输出光功

率-电压关系曲线, 如图 7 所示。

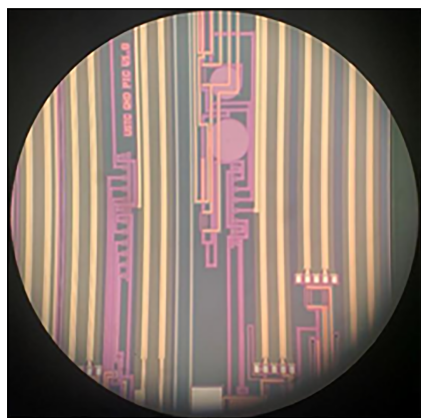


图 6 芯片实物显微镜照片

Fig. 6 Microscopic image of the chip

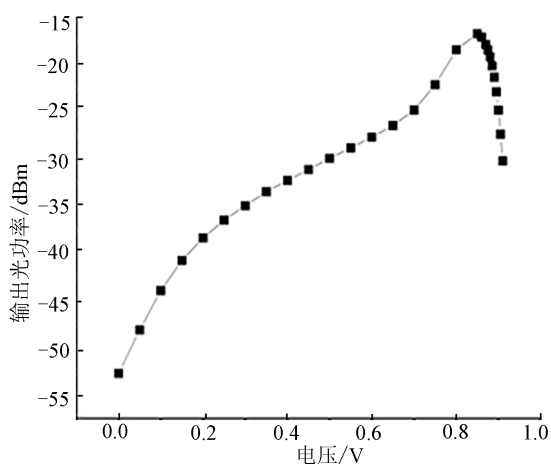


图 7 MZI 输出光功率与电压关系测试结果

Fig. 7 Simulation result of relationship between output power and voltage

可以看出: 随着电压增大, 输出光功率先增大后减小, 在电压 0 V 时输出光功率只有 -52.7 dBm, 当电压增大到 0.85 V 时输出光功率达到最大值 -16.62 dBm, 即调制器的半波电压为 0.85 V。实测半波电压比仿真结果还要低, 性能更加优异, 能够在较低的半波电压下实现 36 dB 的消光比。

5 结论

本文从 QKD 系统集成化的应用需求出发, 提出了低半波电压的时间相位编码光芯片方案, 通过优化光芯片中的调制器来降低光芯片的半波电压。根据这一方案设计仿真了芯片的关键器件并绘制版图且成功流片。实验结果表明该芯片的 MZI 调制器半波电压仅为 0.85 V, 这一指标比近

期 QKD 实验文献中报道的半波电压更低, 对进一步实现 QKD 系统的集成和产业化发展具有重要意义。同时, 该调制器在较低的半波电压下仍然能够满足高达 36 dB 的调制消光比, 这在 QKD 系统和经典光通信系统中都有重要意义。

接下来需要进一步对这一方案中其他的功能模块进行探究, 比如高速调制性能、编码效果等。

参考文献

- [1] ARUTE F, ARYA K, BABBUSH R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. Nature, 2019, 574(7779): 505-510.
- [2] DENG Y H, GU Y C, LIU H L, et al. Gaussian boson sampling with pseudo-Photon-number-resolving detectors and quantum computational advantage[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(15): 150601.
- [3] ZHONG H S, DENG Y H, QIN J, et al. Phase-programmable Gaussian Boson sampling using stimulated squeezed light[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(18): 180502.
- [4] WU Y L, BAO W S, CAO S R, et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(18): 180501.
- [5] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing[J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560: 7-11.
- [6] BENNETT C H, BESSETTE F, BRASSARD G, et al. Experimental quantum cryptography[J]. Journal of Cryptology, 1992, 5(1): 3-28.
- [7] LIU Y, ZHANG W J, JIANG C, et al. Experimental twin-field quantum key distribution over 1000 km fiber distance[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(21): 210801.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] PENG C Z, ZHANG J, YANG D, et al. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding[J].

- Physical Review Letters, 2007, 98(1): 010505.
- [11] ROSENBERG D, HARRINGTON J W, RICE P R, et al. Long-distance decoy-state quantum key distribution in optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(1): 010503.
- [12] GRÜNENFELDER F, BOARON A, RUSCA D, et al. Performance and security of 5 GHz repetition rate polarization-based quantum key distribution[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(14): 144003.
- [13] CAO Y, LI Y H, YANG K X, et al. Long-distance free-space measurement-device-independent quantum key distribution[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(26): 260503.
- [14] LIAO S K, YONG H L, LIU C, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication[J]. Nature Photonics, 2017, 11(8): 509-513.
- [15] 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.
- [16] BUNANDAR D, LENTINE A, LEE C, et al. Metropolitan quantum key distribution with silicon photonics[J]. Physical Review X, 2018, 8(2): 021009.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] LIAO S K, CAI W Q, HANDSTEINER J, et al. Satellite-relayed intercontinental quantum network[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(3): 30501.
- [20] YIN J, CAO Y, LI Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 2017, 356(6343): 1140-1144.
- [21] YIN J, CAO Y, LI Y H, et al. Satellite-to-ground entanglement-based quantum key distribution[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(20): 200501.
- [22] LIAO S K, CAI W Q, LIU W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature, 2017, 549(7670): 43-47.
- [23] MA C X, SACHER W D, TANG Z Y, et al. Silicon photonic transmitter for polarization-encoded quantum key distribution[J]. Optica, 2016, 3(11): 1274.
- [24] SIBSON P, ERVEN C, GODFREY M, et al. Chip-based quantum key distribution[J]. Nature Communications, 2017, 8: 13984.
- [25] KENNARD J E, SIBSON P, STANISIC S, et al. Integrated silicon photonics for high-speed quantum key distribution[J]. Optica, 2017, 4(2): 1-2.
- [26] SAX R, BOARON A, BOSO G, et al. High-speed integrated QKD system[J]. Photonics Research, 2023, 11(6): 1007.
- [27] ZHANG G L, ZHAO Z Z, DAI J C, et al. Polarization-based quantum key distribution encoder and decoder on silicon photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(7): 2052-2059.
- [28] 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.
- [29] AVESANI M, CALDERARO L, SCHIAVON M, et al. Full daylight quantum-key-distribution at 1550 nm enabled by integrated silicon photonics[J]. NPJ Quantum Information, 2021, 7: 93.
- [30] 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.
- [31] DOLPHIN J A, PARAÍSO T K, DU H, et al. A hybrid integrated quantum key distribution transceiver chip[J]. NPJ Quantum Information, 2023, 9(1): 1-8.
- [32] 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(1): 2-7.
- [33] LI W, ZHANG L K, TAN H, et al. High-rate quantum key distribution exceeding 110 Mbs⁻¹[J]. Nature Photonics, 2023, 17(5): 416-421.
- [34] 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.