

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.06.007

# 应用于高速MDI-QKD系统的脉冲激光器研制

何宗武<sup>1,2</sup>, 黄思诚<sup>1,3</sup>, 温昕澄<sup>1,3</sup>, 马庆力<sup>4\*</sup>, 阴泽杰<sup>1,2</sup>

(1 中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2 中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026;

3 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

4 国防科技大学电子对抗学院, 安徽 合肥 230038)

**摘要:** 在高速测量设备无关量子密钥分发(MDI-QKD)系统中, 高成码率是实现远距离量子通信的关键。为实现更高的成码率, 系统各环节对光源有着更多的要求。针对这些要求设计了应用于高速MDI-QKD系统的脉冲激光器电路。通过对外部或内部触发信号的模拟调理及驱动设计, 实现了脉冲激光的产生; 通过模拟PID控制与双向TEC电流控制, 实现了温度的稳定。最终获得的脉冲光能够实现最高1.25 GHz重复频率、24.2 ps脉冲半高宽、30 dB消光比、0.95 pm波长抖动以及2.014 nm波长调谐范围的输出, 有利于成码率的提高, 满足高速MDI-QKD系统的要求。

**关键词:** 激光技术; 量子密钥分发; 脉冲激光; 高重复频率; 窄脉冲宽度

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)06-00868-11

## Design of a pulse laser applied to high-speed MDI-QKD system

HE Zongwu<sup>1,2</sup>, HUANG Sicheng<sup>1,3</sup>, WEN Xincheng<sup>1,3</sup>, MA Qingli<sup>4\*</sup>, YIN Zejie<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

4 Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230038, China)

**Abstract:** In high-speed machine device independent quantum key distribution (MDI-QKD) systems, high code rate is crucial to realize long-distance quantum communication. To achieve a higher code rate, each link of the system has more requirements on the light source. To meet the requirements, a pulse laser circuit for the high-speed MDI-QKD system is designed. According to the designed pulse laser circuit, by analog processing and driving the external or internal trigger signal, the pulse laser can be generated, and by using analog PID control and bidirectional TEC current control, the internal working temperature of the laser can be stabilized. The outgoing pulse laser can achieve an output with a repetition of up to 1.25 GHz, a full width at half maximum of 24.2 ps, an extinction ratio of 30 dB, a wavelength jitter of 0.95 pm

基金项目: 国家自然科学基金 (11975307, 11575184)

作者简介: 何宗武 (1997 -), 安徽合肥人, 研究生, 主要从事量子密钥分发中高重复频率窄脉冲激光器的研究。E-mail: zwhe1@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 阴泽杰 (1956 -), 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 主要从事核电子学与核信息处理方面的研究工作。E-mail: zjyin@ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-01-18; 修改日期: 2022-03-11

\*通信作者。E-mail: maql@ustc.edu.cn

and a wavelength tuning range of 2.014 nm, which is beneficial to the improvement of the code rate and meets the requirements of the high-speed MDI-QKD system.

**Key words:** laser techniques; quantum key distribution; pulse laser; high repetition rate; narrow pulse width

## 0 引言

随着通信技术的发展,数据传输的安全性越发重要。量子通信是利用量子力学的基本原理进行的加密通信,理论上可以实现“绝对安全”。目前在量子通信领域中量子密钥分发(QKD)发展最为成熟<sup>[1]</sup>。QKD为Alice和Bob提供了不被第三方窃听的安全密钥<sup>[2]</sup>。

对于常用的1550 nm通信波段,光纤损耗约为0.2 dB/km。随着光纤长度的增加,QKD系统的成码率显著降低,从而限制了QKD通信距离的增加<sup>[3]</sup>。在实验方法不变的前提下,通过提高系统重复频率可以使系统成码率增加,高速QKD系统对于系统重复频率要求已到达GHz量级<sup>[4]</sup>。单光子探测器作为QKD系统的核心探测仪器,极高的灵敏性使得仪器固有暗计数的影响不可忽略,同时使用过程中相邻周期的光子也可能对本周期的测量造成干扰<sup>[5]</sup>。更窄的光脉冲宽度可以有效减小上述干扰,高速QKD系统对于脉冲宽度的要求为半高宽50 ps左右;更高的消光比也可以有效减小上述干扰,高速QKD系统对于脉冲光消光比的要求为大于20 dB<sup>[6]</sup>。

为了解决QKD测量端的漏洞,2012年加拿大多伦多大学的Lo等<sup>[7]</sup>提出了基于时间反演EPR分发的测量设备无关量子密钥分发协议(MDI-QKD)。在MDI-QKD中,Alice和Bob准备随机弱相干态脉冲光<sup>[8]</sup>,然后它们在一个不可信的第三方Charlie中通过Hong-Ou-Mandel(HOM)型双光子干涉实现Bell态测量。根据测量的结果,Alice和Bob可以得到安全密钥<sup>[9]</sup>。通过直接调制脉冲电流产生的脉冲光会出现光谱的展宽,这是傅里叶变化脉冲光所包含的光谱展宽以及直接调制脉冲电流时激光器载流子变化所导致的<sup>[3]</sup>。输入光的光谱展宽会降低HOM型双光子干涉的干涉对比度<sup>[10]</sup>,从而降低成码率。2016年,东芝的Comandar等<sup>[10]</sup>将注入锁定方法应用于MDI-QKD中,压窄了光脉冲的光谱并进而增加了干涉对比度。图1是注入锁定方法的原理框图,光谱较窄的主激光注入到从激光器的谐振腔中,使得从激光波长被锁定到主激光的波长,最终使得出射光光谱宽度被压窄。要成功实现注入锁定,注入锁定前从激光与主激光频率差 $\Delta\omega$ 需要在一定范围内<sup>[11]</sup>,因此为了更好地实现注入锁定,从激光器需要更高的波长稳定性和更宽的波长可调谐性,而波长主要受到温度影响<sup>[12]</sup>,所以对脉冲激光器的温度控制部分要求更高。

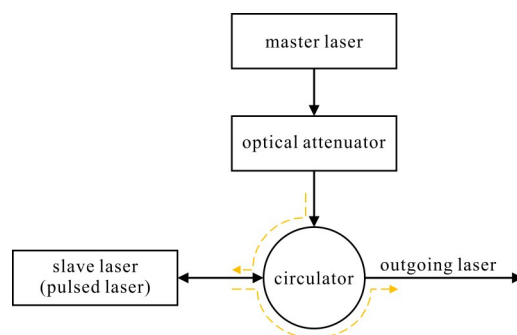


图1 注入锁定方法的原理框图

Fig. 1 Block diagram of injection locking method

在当前应用于 QKD 实验的脉冲激光器领域, 德国 PicoQuant 公司的脉冲激光器能做到 80 MHz 重复频率和 50 ps 脉冲半高宽; 瑞士 IDQ 公司的脉冲激光器能做到 500 MHz 重复频率和 300 ps 脉冲宽度; 科大国盾量子技术股份有限公司的脉冲激光器能做到 1 GHz 重复频率和 50 ps 脉冲宽度。高速 MDI-QKD 系统的实验需求对脉冲光源重复频率、半高宽、消光比、波长抖动及波长调谐范围等提出了更高的指标要求<sup>[13,14]</sup>, 具体指标见表 1。为了实现上述指标, 本系统采用了分布式反馈(DFB)激光器。DFB 激光器内置了布拉格光栅, 具有较好的波长选择性。激光器封装中还内置了半导体制冷器(TEC)、热敏电阻与光电二极管, 便于精确地温度控制与光功率监测。

表 1 脉冲激光器设计指标要求

Table 1 Design requirements of pulse laser

Design specifications	Value
Repeat frequency/GHz	$\geq 1$
Full width at half maximum/ps	$\leq 50$
Pulse laser extinction ratio/dB	$\geq 20$
Wavelength jitter/pm	$\leq 2$
Wavelength tuning range/nm	$\geq 2$

## 1 方案设计

可调谐的高重复频率窄脉冲激光器硬件方案框图及实物图如图 2 所示。方案包括脉冲电流产生、偏置电流产生、温度控制、FPGA 模块以及电源模块五个部分。脉冲电流产生主要实现高重复频率窄脉冲的产生, 高重复频率的信号在系统中有内部和外部两种来源, 触发输入后经模拟调理得到窄脉冲, 窄脉冲信号在增加驱动能力后驱动激光器发出脉冲光; 偏置电流产生的目的是通过在激光器上叠加直流偏置电流来提高探测器的探测效率, 从而提高 QKD 系统成码率; 温度控制主要实现激光器内部工作温度的稳定与调节; FPGA 主要功能是对脉冲电流、偏置电流、温度进行控制及监测, 通过高速收发器产生高重复频率矩形波用作内部触发源, 并通过串口与上位机进行通讯; 电源模块是根据以上模块中各个芯片的电压、电流、纹波要求进行相应的电路设计, 使各部分能够稳定工作。

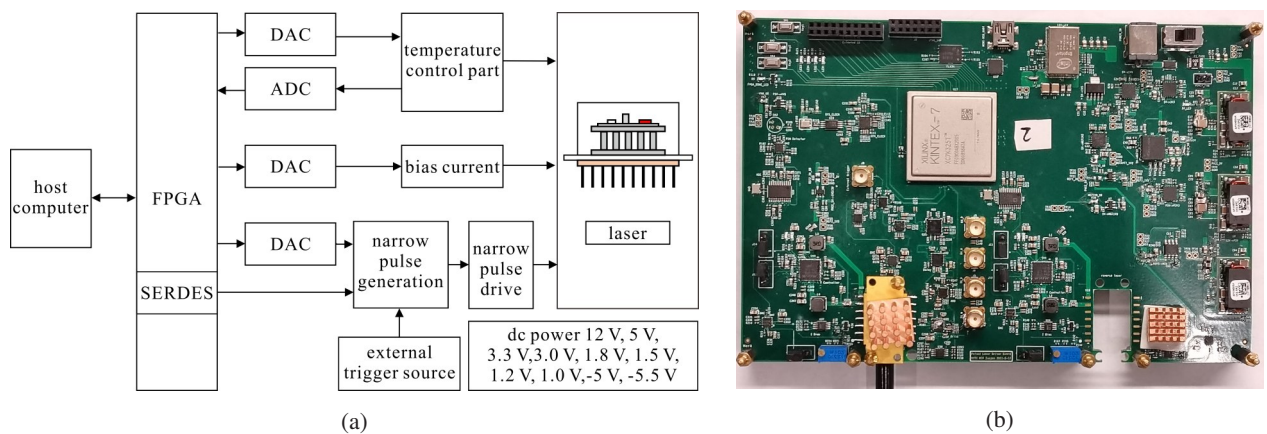


图 2 可调谐的高重复频率窄脉冲激光器。(a) 硬件方案框图; (b) 实物图

Fig. 2 The tunable high repetition rate narrow pulse laser. (a) Hardware scheme block diagram; (b) Physical diagram

## 2 电路设计

### 2.1 脉冲电流驱动模块

光脉冲重复频率由注入电流脉冲的重复频率决定; 光脉冲半高宽影响因素包括注入电流脉冲的带宽、幅度和持续时间, 以及直流偏置电流的幅度。脉冲电流驱动电路的原理框图如图 3 所示, 高重复频率的矩形波经模拟调理后生成窄脉冲信号, 窄脉冲信号在增加驱动能力后驱动激光器发出高重复频率窄脉冲光。高重复频率的矩形波有内部和外部两种触发来源。通常情况下, 系统使用内部触发直接驱动激光器发光; 当需要同步触发输入时, 可以采用外部触发。

内部触发源通过 Xilinx 公司的 XC7K325T 型号的 FPGA 高速收发器(SERDES)产生, 高速收发器把需要发送的并行数据经编码后跨时钟域传输到并串转换模块, 转换后的数据将根据设定的电平标准从高速 IO 口输出。高速收发器的线速率最高可达 12.5 Gb/s, 充分满足输入触发信号重复频率大于 1 GHz 的要求。外部触发源通过信号源产生, 信号源的输出信号频率应大于 1 GHz。由于外部触发信号在经过模拟调理前需要经过甄别阈值可调的高速比较器整形, 所以对信号源输出波形的限制更少, 方波、正弦波或三角波等均可作为外部触发源信号波形。

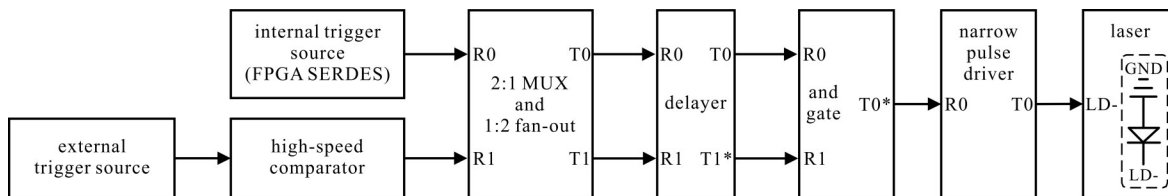


图 3 脉冲电流驱动电路原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse current drive circuit

内部触发信号和外部触发信号经 2:1 选通(MUX)后又经过 1:2 扇出, 这里选择了一款可以同时实现选通和扇出功能的高速模拟芯片, 芯片原理如图 4 所示。该芯片输入时钟频率最高可达 6 GHz, 满足系统对触发信号的要求。

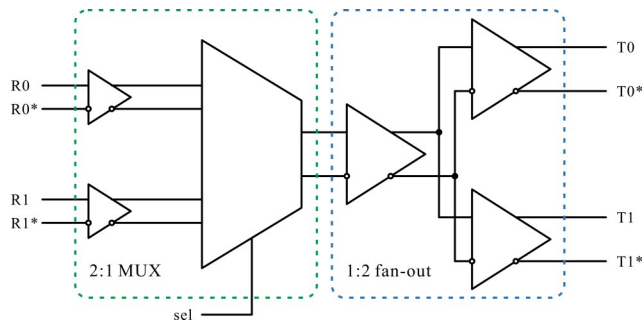


图 4 选通和扇出芯片原理图

Fig. 4 Schematic of the chip implementing the select and fan-out functions

扇出后的两路信号需经过延时芯片实现各通道的独立延时调节, 延时芯片调节精度为 11 ps。延迟后两路信号通过高速与门进行与逻辑操作, 为了产生的脉冲宽度等于延时的宽度  $t_d$ , 其中一路输入信号需要先进行反向处理。逻辑操作后输出的信号虽然已经是窄脉冲信号, 但输出的驱动电流最大不过 20 mA, 不满足激光器正常工作 80 mA 左右驱动电流的要求, 所以后续需要通过增加驱动能力满足系统对于驱动电流的要求,

输出电流实际可在 40~120 mA 区间调节。功率驱动芯片输出驱动信号的上升时间典型值为 23 ps, 信号带宽约为 15.2 GHz。功率驱动芯片输出电流脉冲幅度较大且带宽较宽, 不会对系统带宽及响应时间造成负面影响, 11 ps 的延时调节精度可以满足光脉冲小于 50 ps 的要求。模拟调理及驱动电路的时序如图 5 所示。

模拟调理电路的电源电压为 3.3 V, 信号电平为差分 CML 电平, 采用了直流耦合的方式连接, 窄脉冲驱动芯片电源电压为 -5 V, 所以模拟调理电路的输出需要通过交流耦合连接到窄脉冲驱动电路的输入。为了正极接地的激光器发出脉冲光, 需要在负极加入负脉冲信号, 所以模拟调理电路输出的正脉冲信号在输入到窄脉冲驱动电路前需要反向处理。

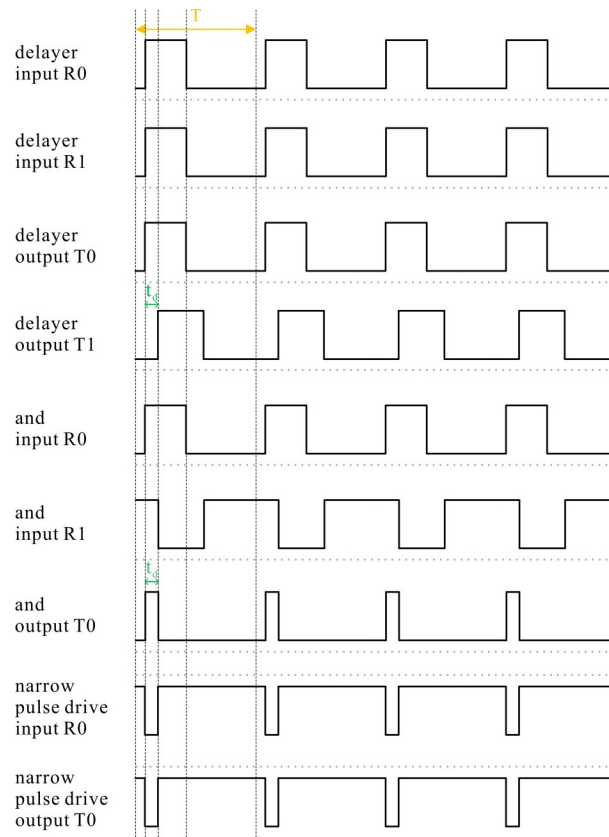


图 5 模拟调理及驱动电路时序图

Fig. 5 Timing diagram of analog processing and driving circuit part

## 2.2 偏置电流驱动模块

在直流偏置电流为零时, 脉冲光的性能指标较差, 会影响单光子探测效率, 进而影响系统成码率<sup>[15]</sup>; 而在直流偏置电流较大, 超过其阈值电流时, 激光器在脉冲电流为零时仍会发光, 进而影响 QKD 系统的安全性。为了避免上述情况发生, 激光器上施加的直流偏置电流应小于其阈值电流<sup>[3]</sup>。系统所用的 DFB 激光器阈值电流在 15 mA 左右。

偏置电流驱动电路原理如图 6 所示, DAC 输入的电压经过反向放大后送入压控电流源产生直流偏置电流叠加在激光器上。直流偏置电流与 DAC 输入电压的关系为

$$I_{\text{Bias}} = \begin{cases} 5 - 2V_{\text{DAC}} & , 0 \leq V_{\text{DAC}} \leq 2.5 \\ 0 & , 2.5 < V_{\text{DAC}} \leq 3 \end{cases} \quad (1)$$

直流偏置电流需要满足小于阈值电流的要求。

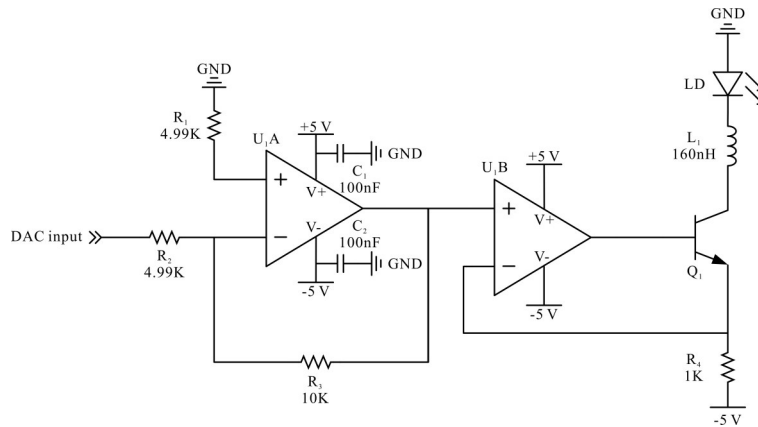


图 6 偏置电流驱动电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of bias current drive part

### 2.3 温度控制模块

为了精确控制激光器的内部工作温度, 需要通过器件内置的热敏电阻和TEC制冷器进行温度反馈与调节。温度控制的原理框图如图7所示, 模拟比例-积分-微分(PID)控制器在获取设定温度与实时温度的偏差量后进行处理并输出至温度控制芯片内部的压控恒流源, 控制TEC驱动电流的增加或减少, 从而实现温度的闭环控制。温度控制电路使用单电源实现双向TEC的电流驱动, 和电压驱动相比减小了因电流突变对温度控制精度的影响。温度设定由DAC控制输入, 激光器温度与DAC设定电压的对应关系如图8所示。

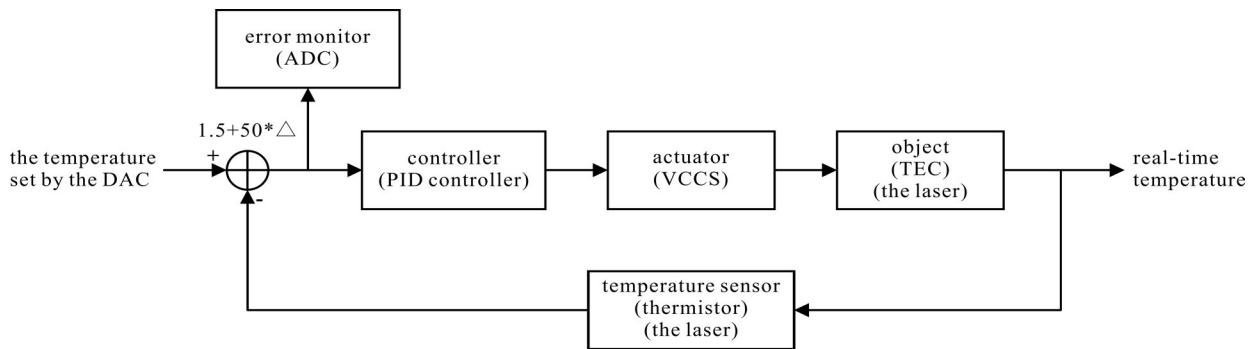


图 7 温度控制的原理框图

Fig. 7 Block diagram of the temperature control

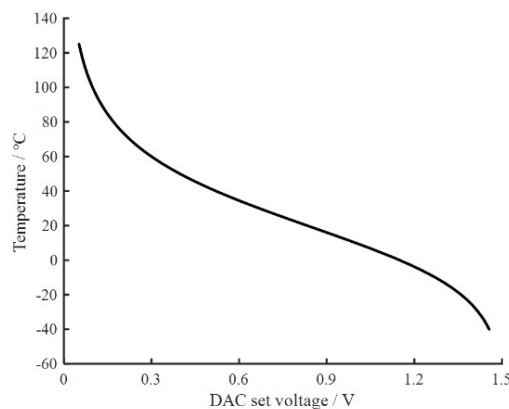


图 8 激光器温度与 DAC 设定电压的关系

Fig. 8 Relationship between laser temperature and the set voltage of DAC

温度偏差获取、放大及模拟PID控制器处理如图9所示,为了获得更高的温度控制精度,  $V_{FB-}$  和  $V_{FB+}$  信号经过50倍的仪表放大器后再送入模拟PID控制器处理。50倍误差放大后的信号DIFOUT可以表示为  $V_{DIFOUT} = V_{REF2} + 50 \times (V_{FB+} - V_{FB-})$ , 通过ADC采集后可用于温度偏移的分析。

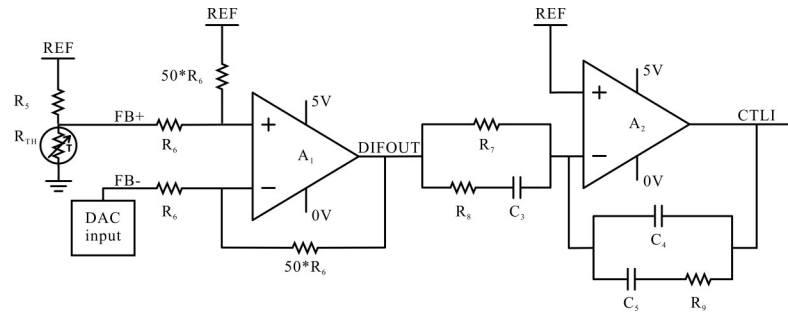


图9 温度偏差信号获取、放大及模拟PID控制器处理

Fig. 9 Temperature error acquisition, amplification and analog PID controller processing

模拟PID控制器输出的CTLI信号输入至温度控制芯片内的压控恒流源电路。压控恒流源电路原理图如图10所示,输出电流  $I_{TEC}$  与输入电压  $V_{CTLI}$  的关系为  $I_{TEC} = \frac{V_{CTLI} - 1.5}{10R_{sense}}$ 。

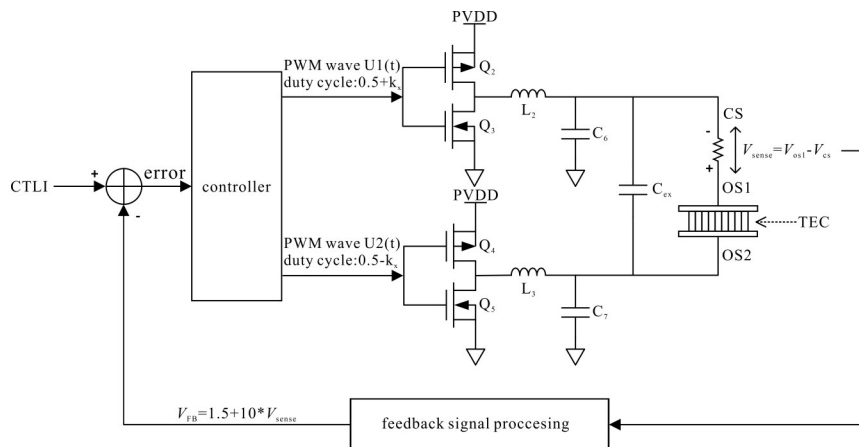


图10 压控恒流源电路原理图

Fig. 10 Schematic diagram of the voltage controlled constant current source circuit

## 2.4 FPGA 模块

FPGA 模块负责各个部分的控制及监控,并通过串口与上位机进行通讯。在脉冲电流驱动电路中, FPGA 负责产生内部触发信号、控制选通输入切换、延时大小、甄别阈值电压和脉冲驱动电流大小;在偏置电流驱动电路中, FPGA 负责控制 DAC 设定偏置电流;在温度控制部分, FPGA 负责控制 DAC 设定温度以及通过 ADC 采集温度偏差。上位机可以通过串口与 FPGA 通讯,完成控制信息的下达与数据的上传。

## 2.5 电源模块

系统各模块的电源分配情况如图11所示,该模块主要根据以上每个模块中各芯片的电压、电流以及纹波等要求综合考虑设计,以实现各部分能够稳定工作。这里需要注意的是,温度控制芯片由于采用开关电源的工作原理,会有脉冲调制波产生。为了避免对其他部分的干扰,采用独立的5V供电芯片对其供电。同

时, 为了使温度参考更加准确, 避免使用温度控制芯片内置+1.5 V参考源, 应使用外部参考源对热敏电阻和DAC进行电压参考。

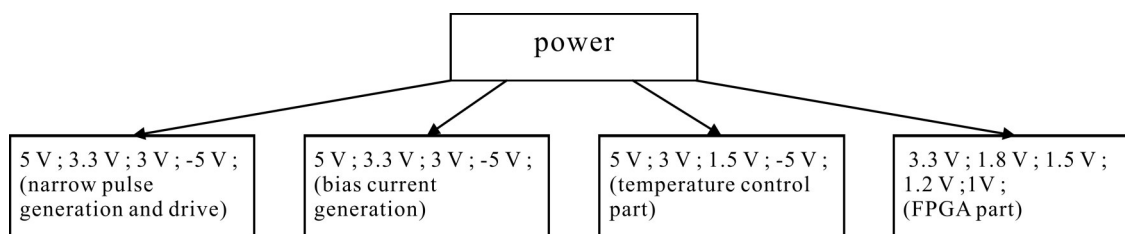


图 11 各模块电源分配图

Fig. 11 Power distribution of each part

### 3 实验测试

利用 33 GHz 带宽的光电探头和示波器对输出脉冲光时域波形进行测试, 内部触发和外部触发时的脉冲光波形如图 12 和图 13 所示。内部触发时, 光脉冲的重复频率可以达到 1.25 GHz, 窄脉冲的半高宽能稳定到 24.2 ps, 满足高速 MDI-QKD 系统需求; 外部触发时, 光脉冲的重复频率可以达到 1.25 GHz, 窄脉冲的半高宽能稳定到 27.0 ps, 满足高速 MDI-QKD 系统需求。内部触发时, 选通与扇出芯片接收到来自 FPGA SERDES 的信号, 信号上升时间 40 ps; 而外部触发时, 选通与扇出芯片接收到来自高速比较器芯片整形的信号, 信号上升时间 45 ps。因此, 内部触发时的信号带宽大于外部触发时的信号带宽, 这是造成两种触发模式下窄脉冲光半高宽存在差异的原因。

在实际测试过程中, 重复频率可以通过外部或内部触发输入信号重复频率的改变进行调节, 调节范围为 30 kHz~1.25 GHz; 脉冲半高宽可以通过延时时间的改变进行调节, 调节范围 24.2 ps~6 ns。可调节的重复频率及脉冲半高宽可满足更多种类 QKD 实验对窄脉冲激光的需求。

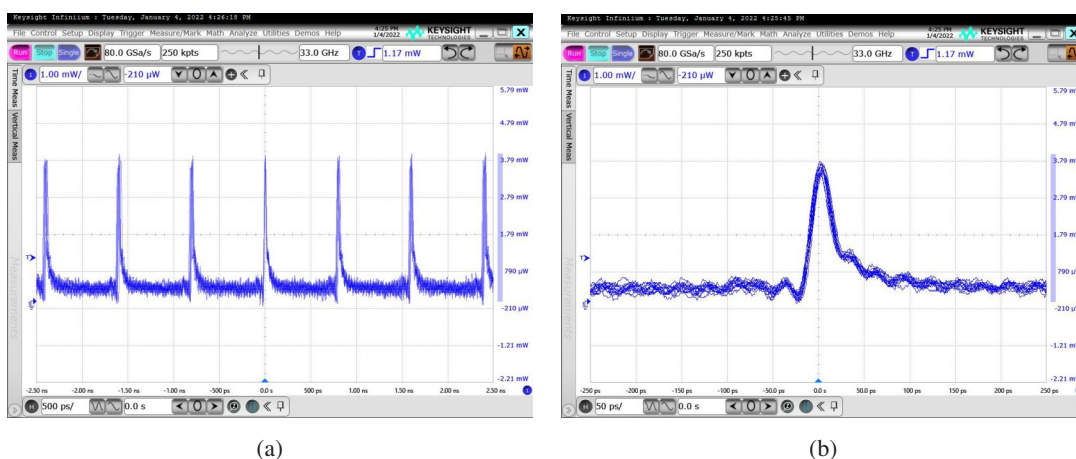


图 12 内部触发时的输出脉冲光波形。(a) 时间轴分度 500 ps; (b) 时间轴分度 50 ps

Fig. 12 Output pulse laser waveform when internally triggered. (a) Time axis division 500 ps; (b) Time axis division 50 ps



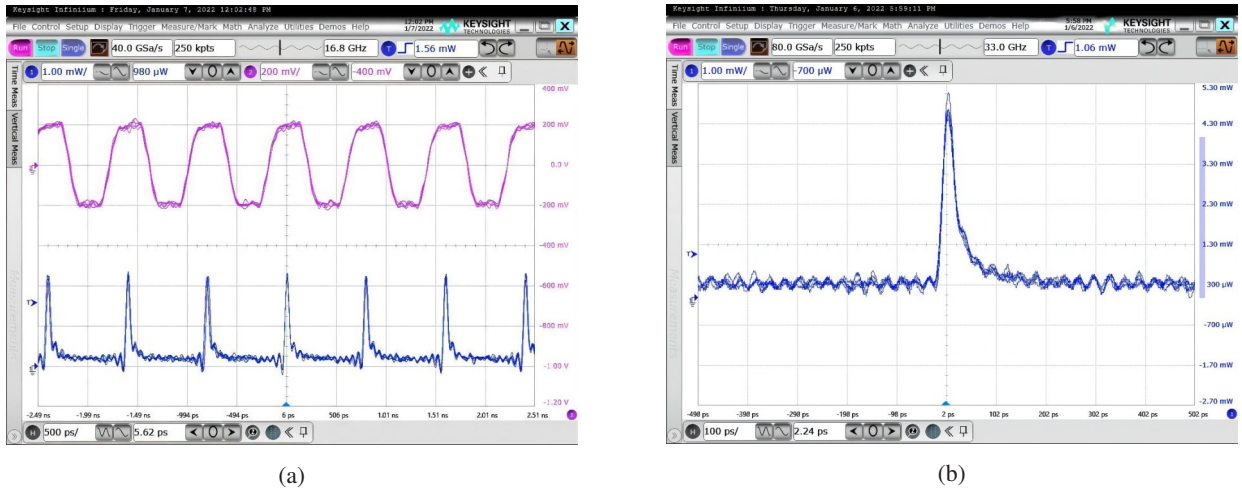


图 13 外部触发时的输出脉冲光波形。(a) 时间轴分度 500 ps, 包括外部触发信号与输出光脉冲; (b) 时间轴分度 100 ps  
 Fig. 13 Output pulse laser waveform when externally triggered. (a) Time axis division 500 ps, including external trigger signal and output optical pulse; (b) Time axis division 100 ps

利用超导纳米线单光子探测器与高精度 TDC 测量输出脉冲光的计数, 在 1.25 GHz 重复频率和 24.2 ps 脉冲半高宽情况下, 脉冲光的计数如图 14 所示。消光比可以达到 30 dB, 强于外部调制时使用强度调制器的参数, 满足高速 MDI-QKD 系统需求。

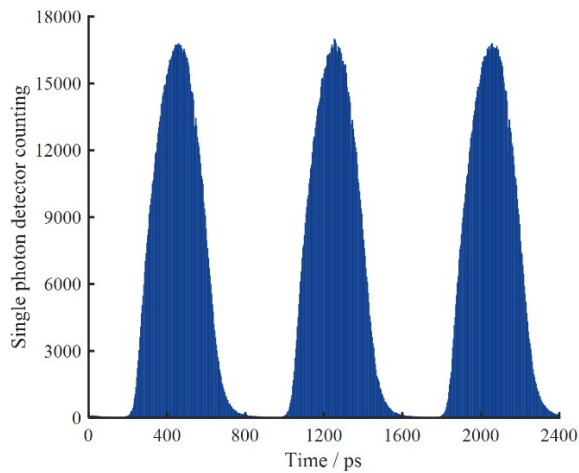


图 14 单光子探测器测量脉冲光的计数  
 Fig. 14 Counts of pulse laser measured with single-photon detector

利用 0.02 nm 波长分辨率的光谱仪对输出脉冲光的光谱进行测试, 测试结果如图 15 所示。在 1.25 GHz 重复频率和 24.2 ps 脉冲半高宽情况下, 脉冲光光谱见图 15(a), -3 dB 带宽为 0.2599 nm; 相同条件下的脉冲光在经过注入锁定后的脉冲光光谱见图 15(b), -3 dB 带宽为 0.0559 nm。注入锁定可以明显压窄脉冲光的光谱线, 使 MDI-QKD 实验中的 HOM 型双光子干涉对比度提高, 进而可提高系统成码率。

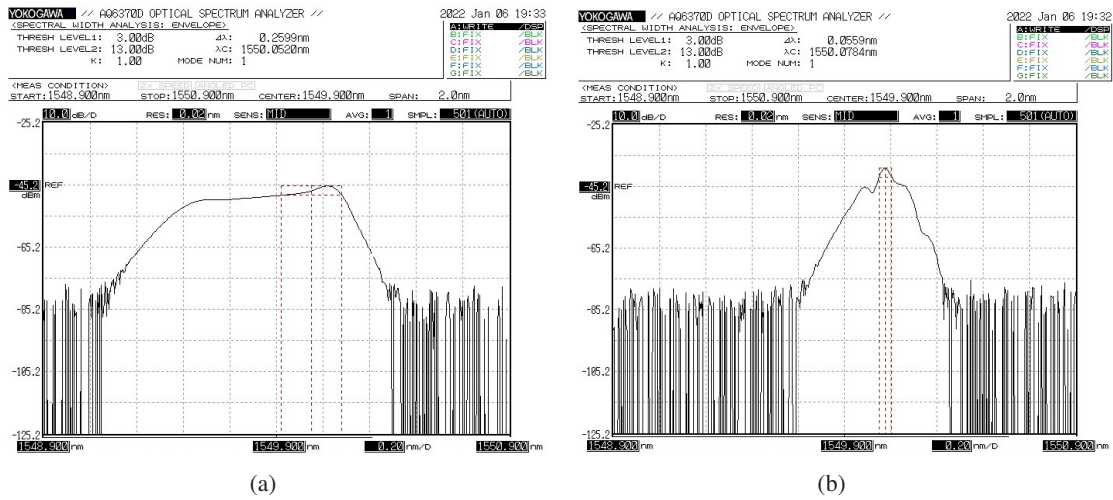


图 15 注入锁定前后脉冲光的光谱。(a) 注入锁定前; (b) 注入锁定后

Fig. 15 Spectra of pulse laser before and after injection locking, (a) Before injection locking; (b) After injection locking

利用± 0.3 pm精度的波长计对输出脉冲光的波长进行测试, 在 1.25 GHz 重复频率、24.2 ps 脉冲半高宽下, 波长随时间的变化曲线如图 16 所示。波长抖动为 0.95 pm; 激光器的正常工作温度范围为 15~35 ℃, 通过 DAC 设定不同的温度得到脉冲光的波长范围为 1548.636~1550.650 nm, 波长调谐范围为 2.014 nm。因此, 波长抖动和波长调谐范围均满足系统对脉冲激光器的指标要求。

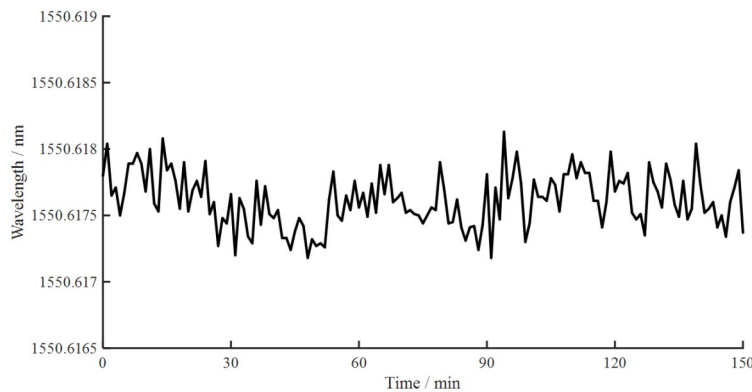


图 16 脉冲光波长随时间的变化曲线

Fig. 16 Variation curve of pulse laser wavelength with time

### 4 结 论

在高速MDI-QKD系统中, 为提升系统成码率, 在光源阶段, 可以通过提高脉冲光重复频率实现; 在双光子干涉环节, 通过注入锁定方式增加干涉对比度实现, 并通过脉冲激光波长的稳定与可调谐使得注入锁定稳定工作; 在单光子探测环节, 通过降低暗计数干扰和相邻周期光子干扰实现, 具体实现方式包括压窄脉冲光宽度和提高脉冲光消光比。结合系统指标要求, 设计了包括窄脉冲电流驱动模块、直流偏置电流驱动模块、高精度温度控制模块、FPGA 模块以及电源模块的脉冲激光器硬件电路。该电路通过内外两种触发模式, 最终实现了最高 1.25 GHz 重复频率、24.2 ps 脉冲半高宽、30 dB 消光比、0.95 pm 波长抖动以及 2.014 nm 波长

调谐范围的脉冲光, 指标上完全符合高速MDI-QKD系统对脉冲光源的要求; 同时, 该系统还降低了对外部触发信号波形的要求, 实现了多种波形的触发信号输入; 本系统还可以对脉冲光重复频率和脉冲半高宽进行灵活调节, 以适应不同类型QKD对窄脉冲激光的要求。

### 参考文献:

- [1] Takagi T. Recent developments in post-quantum cryptography [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2018, E101, A(1): 3-11.
- [2] Fu Y, Yin H L, Chen T Y, *et al.* Long-distance measurement-device-independent multiparty quantum communication [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(9): 090501.
- [3] Min H. *Research on Light Source and Data Acquisition System in High-speed Quantum Key Distribution* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 10-40.  
闵浩. 高速量子密钥分发中的光源和数据采集系统研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 10-40.
- [4] Xu F, Ma X, Zhang Q, *et al.* Secure quantum key distribution with realistic devices [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2020, 92 (2): 025002.
- [5] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 696-705.
- [6] Tang Y L, Yin H L, Ma X, *et al.* Source attack of decoy-state quantum key distribution using phase information [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(2): 022308.
- [7] Lo H K, Curty M, Qi B. Measurement-device-independent quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108 (13): 130503.
- [8] Zhong X Q, Hu J Y, Curty M, *et al.* Proof-of-principle experimental demonstration of twin-field type quantum key distribution [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(10): 100506.
- [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] 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.
- [11] Lau E K, Wong L J, Wu M C. Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: A tutorial [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 618-633.
- [12] Liu J W, Du Z H, Li J Y, *et al.* Analytical model for the tuning characteristics of static, dynamic, and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 353-357.  
刘景旺, 杜振辉, 李金义, 等. DFB激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型 [J]. 物理学报, 2011, 60(7): 353-357.
- [13] Liu Y, Lyu L Y, Miao C H, *et al.* Design of near infrared high-speed picosecond lasers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(1): 32-35.  
刘云, 吕利影, 苗春华, 等. 近红外高速皮秒激光器的研制 [J]. 量子电子学报, 2017, 34(1): 32-35.
- [14] Liu Y, Wu M, Zhu X B, *et al.* Design of a gigahertz picosecond pulse laser module based on domestic chips [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 643-646.  
刘云, 吴敏, 朱向冰, 等. 基于国产芯片的千兆皮秒脉冲激光器模块研制 [J]. 激光技术, 2020, 44(5): 643-646.
- [15] Wu M. *Design of the Laser Module of High Speed QKD System Based on Domestic Chips* [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2020: 18.  
吴敏. 基于国产芯片的高速QKD系统中激光器模块的研制 [D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2020: 18.