

激光与光电子学进展

多通道 PPLN 波导温度控制方法

衣坤朋, 姚权, 蔺际超, 樊景丽, 魏代营, 高洋, 郑名扬*

济南量子技术研究院量子探测与波导器件实验室, 山东 济南 250101

摘要 转换效率是周期性极化铌酸锂(PPLN)波导的主要性能指标,其与温度具有很强的关联性。受限于工艺问题,波导各个通道之间的一致性很难保证。提出一种多通道波导的温度自动控制方法,该方法通过FPGA芯片获取与多通道波导对应的多个单光子探测器探测到的光子数,并通过相应均衡算法来处理各个通道的光子数,从而确定多通道波导的最佳温度工作点,达到自动调节波导温度的目的。通过FPGA实现半导体制冷片(TEC)驱动控制、具有主动淬灭和快速恢复功能的单光子探测器,并通过均衡算法实现多通道波导温度的自动控制,实现探测效率更均匀的多通道上转换单光子阵列探测器,极大地减少前期人力投入,避免人为因素导致的误差。

关键词 周期性极化铌酸锂(PPLN); 多通道PPLN波导; 单光子阵列相机; FPGA; 单光子探测器

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231469

Temperature Control Method for Multichannel PPLN Waveguides

Yi Kunpeng, Yao Quan, Lin Jichao, Fan Jingli, Wei Daiying, Gao Yang, Zheng Mingyang*

Laboratory of Quantum Detection and Waveguide Device, Jinan Institute of Quantum Technology,

Jinan 250101, Shandong, China

Abstract Conversion efficiency is the primary performance metric of a periodically poled lithium niobate (PPLN) waveguide and strongly correlates with temperature. Multichannel waveguides are limited by process issues; accordingly, ensuring consistency between each waveguide channel is difficult. This paper proposes an automatic temperature control method for multichannel waveguides. In this method, number of photons detected using multiple single photon detectors corresponding to the multichannel waveguide is obtained by field-programmable gate array (FPGA) chips. Thereafter, the photon number data of each channel is processed using equalization algorithms to determine the optimal temperature working point of the multichannel waveguide and achieve automatic adjustment of the waveguide temperature. FPGA chips are used in this study to achieve TEC driving control, construct a single photon detector with active quenching and fast recovery functions, and achieve automatic control of multichannel waveguide temperature using an equalization algorithm. Additionally, we develop a multichannel up-conversion single photon array detector with more uniform detection efficiency, greatly reducing initial manpower investment and avoiding errors caused by human factors.

Key words periodically poled lithium niobate (PPLN); multi-channel PPLN waveguide; single photon array camera; FPGA; single photon detector

1 引言

从1993年Yamada等^[1]第一次使用外加电场极化法在铌酸锂上实现极化之后,周期性极化铌酸锂(PPLN)一经问世久盛不衰,被称为“非线性光学的硅材料”。目前常用的PPLN波导类型有退火质子交换波导^[2-3]、钛扩散波导^[4-6]、脊形波导^[7-10]、反质子交换波导^[11],这其中,反质子交换波导是目前综合性能最优的

波导类型。波导的折射率具有随温度和波长的变化而变化的特性^[12]。

近年来,PPLN波导取得了显著的进步,应用于生物医疗行业的太赫兹光源领域^[13]、重力仪等的倍频激光器领域^[14]、非视域成像领域。在非视域成像领域,济南量子技术研究院与中国科学技术大学合作,在实验中利用PPLN波导实现了皮秒级非视域成像^[15],但是采用单通道波导,采样时间较长。目前,基于单光子阵列探

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-07-11; 录用日期: 2023-07-24; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021LLZ008)

通信作者: *zhengmingyang@jiqt.org

测器的成像已有相关研究^[16],而现有的商用单光子相机主要针对可见光波段,红外波段的单光子相机研制难度大、技术门槛高。此外,红外波段属敏感波段,该波段单光子相机属于禁运高科技产品。研发具有完全自主知识产权的红外波段上转换单光子相机,打破国外技术封锁,可避免将来出现“卡脖子”问题。济南量子技术研究院开创性地研制了多通道量子频率转换芯片,该芯片由 34 通道波导和 34 通道光纤阵列进行双端耦合封装而成^[17],并在此技术基础上研制了 1×64 像素光纤阵列,利用时分复用方案,配合具有高探测效率、低噪声、低后脉冲特性的硅单光子探测器,利用线扫描技术实现 64×32 像素的全光纤上转换阵列相机。

上述阵列相机采用多通道反质子交换 PPLN 波导,铌酸锂晶圆生长的不均匀性、波导加工过程中的周期极化、反质子交换等工艺都可能导致不同通道波导之间的性能不一致。阵列相机的各个通道之间需要较好的探测一致性,否则会对后期成像造成困扰,而应用于阵列相机的多通道 PPLN 波导受限于工艺水平问题,各个通道的转换效率会存在一定的误差,因此在相

机工作前期需要大量的时间和精力来进行校准。针对济南量子技术研究院研制的单光子阵列相机中的多通道波导,本文提出一种相机校准阶段的自检控制方法,可以节省大量的人力物力并减小人为误差。

2 多通道 PPLN 波导控制方法

多通道波导的工艺是:在一片晶圆上放置若干相同设计的波导芯片,每片中包含多个不同宽度模式过滤器的波导。分别对多通道 PPLN 波导的每一个通道进行转换效率测试,由于波导制程过程中的不均性,部分通道效率较低,扣除效率较低通道后波导平均转换效率约 60%^[16]。波导中心波长与温度密切相关^[14],不同温度下各个通道的转换效率是不同的,通过调节温度可找到特定应用场景下的最优工作点。

因为阵列相机对各个通道的计数率均匀性有一定要求,波导作为核心器件,要求其所有通道的转换效率的差值要尽量小。表 1 是阵列相机采用的 8 通道波导在 39 °C 温度下的中心波长和转换效率的测试数据,可见中心波长和转换效率并不一致。

表 1 8 通道波导测试

Table 1 Eight channel waveguide test

Channel	Central wavelength /nm	Transmission loss /($\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Primary and secondary ratio	Conversion efficiency /%
CH1	1549.30	0.13	5:1	61
CH2	1549.21	0.15	6:1	64
CH3	1549.24	0.18	6:1	63
CH4	1549.18	0.19	7:1	61
CH5	1549.23	0.17	5:1	62
CH6	1549.22	0.12	6:1	65
CH7	1549.25	0.15	5:1	60
CH8	1549.20	0.15	8:1	60

PPLN 频率转换波导在特定泵浦波长下所匹配的信号光中心波长是随温度变化的,鉴于工艺一致性问题,目前使用的 8 通道波导中心波长并非严格一致,这就导致在某一特定温度下各个通道之间的转换效率不一致。因此,为了提高阵列相机各个通道的均匀性,有必要对各个通道进行温度调节与适配。

全光纤上转换阵列相机示意图如图 1 所示,其核心是多通道波导,同时为了达到成像的目的,其需要波

导通道数数量一致的单光子探测器。本文提出了一种多通道波导温度自动控制系统,其利用全光纤上转换单光子阵列相机内已经集成的单光子探测器(如图 1 所示),通过 FPGA 芯片来获取与多通道波导对应的多个单光子探测器探测到的光子数,并利用相应均衡算法来处理各个通道的光子数数据,从而确定最佳温度工作点,达到自动调节波导温度的目的。这种方法可实现多通道波导温度的自动控制,且可避免人为因

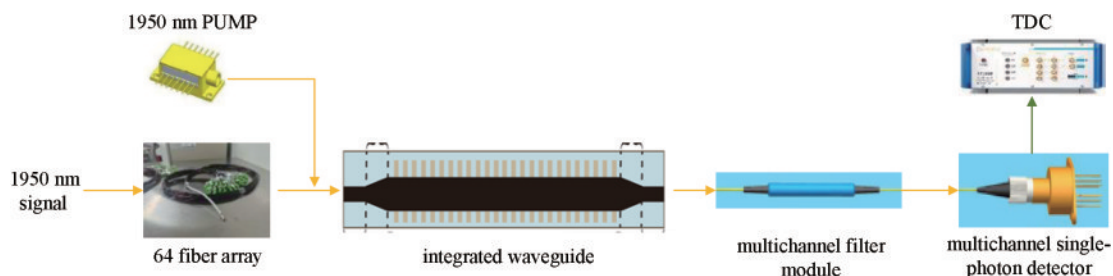


图 1 上转换单光子相机示意图

Fig. 1 Schematic of the upconversion single photon camera

素导致的误差。该方法可应用于阵列相机出厂前设备调试阶段和使用前初始化校准阶段,实现波导温度校准,最终实现了多通道波导保持较高计数率情况下信号光转换效率具有较高一致性的目的。

济南量子技术研究院关于全光纤上转换单光子探测器的研究取得很多成果,比如 1950 nm 光泵浦 1550 nm 信号光,可实现探测效率 28.8%,1550 nm 光泵浦 1064 nm 信号光,可实现探测效率 32.5% 等一系列成果,形成了完整的理论支撑,并推出了多种产品,比如应用于济南党政专网的核心量子通信设备^[18]。上述探测器均为单通道设备,均有一套完整的测试方法,首先进行信号光标定,然后将标定好的光输入到波导,最终使用单光子探测器在波导后级进行探测,对探测到的计数率与标定好的信号光光子数进行对比即可得知波导的性能。所提多通道波导控制系统的测试方法与单通道类似。自动温控系统前级需要使用稳频激光器提供稳定的光源,鉴于单光子级别的稳定性,采用 SANTEC 公司的 TSL-570-A 可调谐激光器,该激光器输出波长为 1550 nm 的信号光。因为是单光子级别,因此需要对光进行衰减,直至单光子级别,使用 EXFO 公司的 LTB-1 双路电调衰减器,其可衰减 50 dB 达到标定需求,从而完成百万或者十万光子数的标定,最后使用阵列相机内自带的单光子探测器完成探测,输出光子计数。

所提多通道波导温度自动控制系统的实验设置如图 2 所示,其主要包含多通道 PPLN 波导、半导体制冷片(TEC)驱动器、单光子探测器阵列、FPGA 及上位机。TEC 驱动电路采用 MAX1978 芯片方案,在实际使用中可根据实际情况调节比例积分微分(PID)参数;单光子探测器采用带有主动淬灭和快速恢复功能的雪崩光电二极管(APD)芯片分立方案,相比其他现有模块,可极大地节省体积空间,单光子相机的体积更小,且参数可根据需求自行优化;FPGA 采用 ALTERA 公司的 EP4CE 系列,内部集成有锁相环(PLL)和各种知识产权(IP)核,性能较好,可有效实现激光器控制、APD 时序约束控制、计数率高速处理等功能。

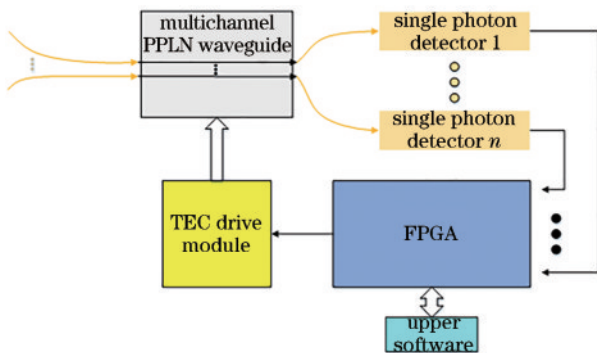


图 2 实验设置

Fig. 2 Experiment setup

2.1 TEC 驱动模块

TEC 驱动模块采用 MAX1978 芯片实现,该芯片是用于 Peltier 热电制冷器模块的最小、最安全、最精确的完全单片温度控制器,其结合一个斩波自稳零仪表放大器和一个高精度的积分放大器组成一个 PID 控制器,可实现精度为 0.001 °C 的稳定性。FPGA 通过模拟数字转换(DAC)芯片给出与温度相关的控制电压,即可实现温度控制,电路设计如图 3 所示。

首先波导采用的热敏电阻与温度的关系为

$$R_t = 10000 \times e^{3950 \times (\frac{1}{T_0} - \frac{1}{298.15})}, \quad (1)$$

式中: R_t 为热敏电阻阻值; T_0 为华氏温度。MAX1978 芯片内置了 1.5 V 的标准电压源,可以为热敏电阻实现电压分压,从而实现检测。波导热敏电阻阻值与实际需要配置的电压的计算关系为

$$V_i = \frac{1.5 \times R_t}{R_t + 10000}. \quad (2)$$

DAC 采用 16 位高精度芯片,其输出电压与内部参数的配置关系为

$$V_{\text{DAC}} = \frac{5 \times D}{2^{16}}, \quad (3)$$

式中: D 为芯片内部需要配置的参量,即 FPGA 通过串行接口配置到 DAC 芯片内的参数。

2.2 单光子探测模块

用硅 APD 芯片实现单光子探测器,单光子探测器的基本工作原理:利用工作于盖革模式(Geiger mode)下的 APD 进行单光子探测,所谓盖革模式是指 APD 工作时要加反向偏压,偏压幅度略微超过雪崩阈值电压;光子入射到 APD 内部引发电子雪崩,产生雪崩电流脉冲;探测器内部处理电路将微弱电流脉冲转换成电压脉冲并放大、整形,再经过甄别、死时间处理后输出电平和宽度固定的数字脉冲。入射光子引发雪崩后,必须尽快将雪崩淬灭,一方面避免 APD 过度放电,更重要的是将 APD 恢复到可用状态,能够及时检测下一个入射光子事件。

单光子探测模块的基本工作原理如图 4 所示,其采用负高压电源供电,其主要功能全部由 FPGA 控制,包括主动淬灭和快速恢复功能、计数信号的处理与输出功能、比较器的电压判决功能等。APD 芯片也需要一套控温电路,一般需要将 APD 制冷到 -20~-40 °C,同样由 FPGA 通过 DAC 芯片给出控制电压,控制 MAX1978 芯片。

针对上转换阵列相机,为了最大化地提升各个通道的探测效果的一致性,除波导外,应尽量减小系统噪声和单光子探测器带来的差异。硅 APD 的本底噪声和后脉冲概率问题可在上述电路中通过施加在硅 APD 上的过压值、温度控制等参数得到可调控,因此在下文算法中不考虑系统的噪声、硅 APD 的本底噪声及后脉冲概率等参数。

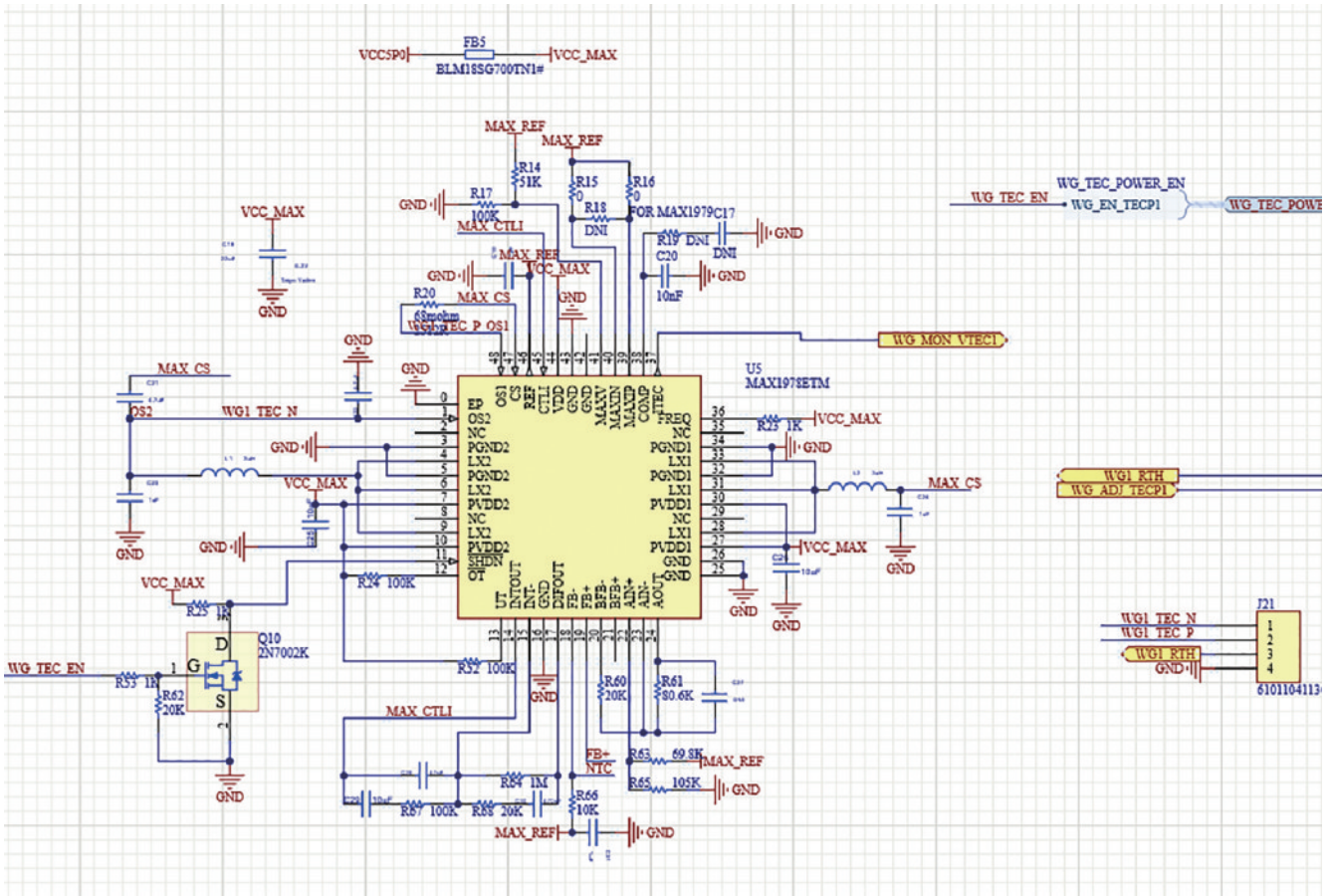


图 3 TEC 驱动模块
Fig. 3 TEC drive module

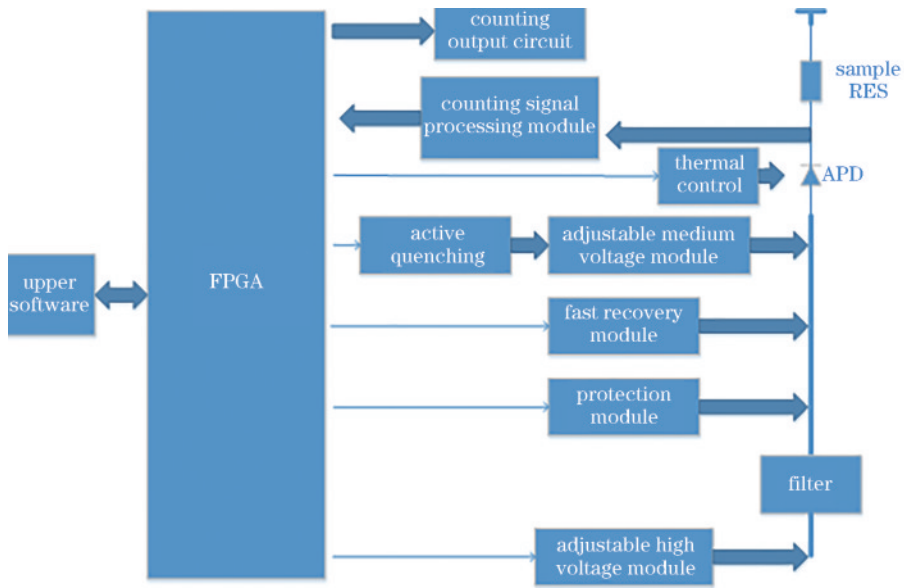


图 4 单光子探测器模块
Fig. 4 Single photon detector module

2.3 波导控制方案

多通道波导各个通道的最佳温度工作点不是严格一致的,因此需要 FPGA 通过算法来均衡各个通道之间的计数率,从而确定最佳温度工作点。本文中的单光子探测器数目与多通道波导中波导数目一致(比如

多通道内包含 8 个通道,则单光子探测器数目也为 8)。波导每个通道的入射光强是稳定的,比如使用稳频激光器,光功率是 10 mW,经过衰减器衰减后经 1:8 分束器产生 8 路相同的信号光进入每个波导,在分束器后标定为十万个光子的信标光。上位机控制 FPGA 进

行程序校准,上位机设定扫描温度范围,比如 39~40 °C(每个波导的最佳温度范围参数是已知的),FPGA 以步进 0.1 °C/s 速度自动扫描,并记录波导每个通道每个温度下的计数率,然后 FPGA 通过均衡算法给出当前波导的最佳工作温度。多通道波导计数率与温度关系的拟合方法根据实际使用场景可以有很多种,比如在不同温度取计数率加和的最大值、取所有计

数率波动情况的均方根最小值等。在本文中,采用在各个温度下采样得到的所有通道计数率的平均值,这样会形成一条平均计数率与温度的关系曲线。利用此种均衡算法,确定多通道波导的最佳工作温度点,可节省大量的人工成本且可避免人为误差,该均衡算法流程如图 5 所示。

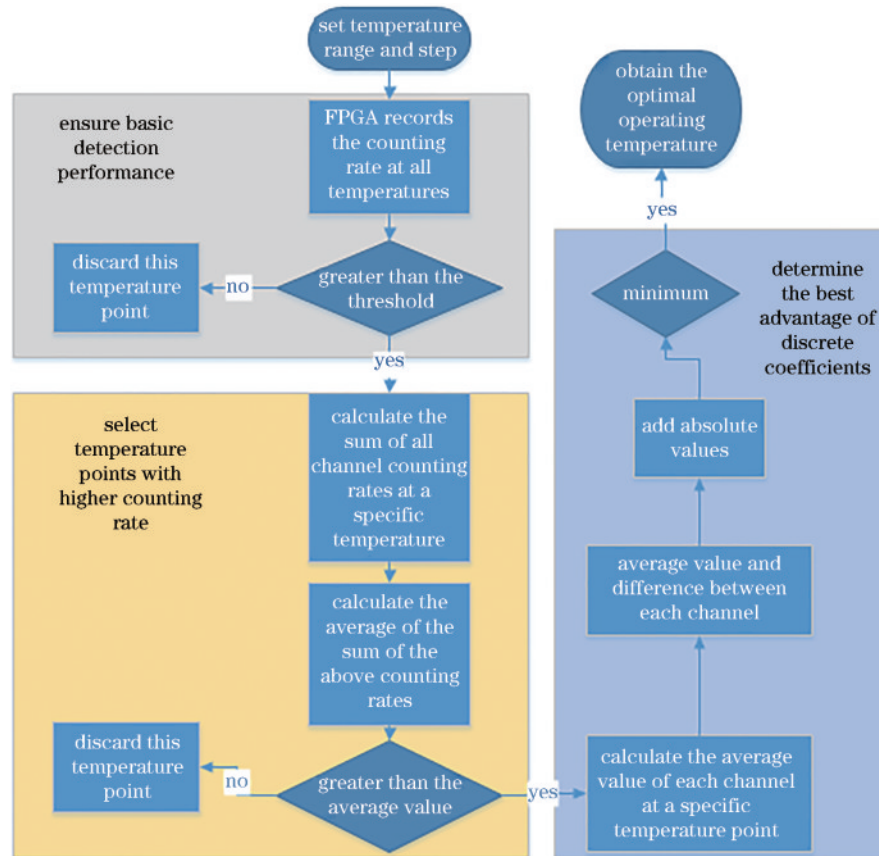


图 5 均衡算法流程

Fig. 5 Flow chart of balancing algorithm

首先,该均衡算法选取有效值。删除不满足探测指标的温度,然后求各个温度下采样得到的所有通道计数率的平均值,这样会形成一条平均计数率与温度的关系曲线,此时取该曲线上计数率最大值与最小值差值的中心作为门限,丢弃低于该门限的温度部分,如此操作主要是为了避免最高以及最低温度下波导性能均较差(计数率都很低,计数率波动反而较小)的情况,保证所选温度下波导的整体透过率处于较高水平。其次,确定最优温度。在剩余的温度范围内,选择计数率相差最小的温度作为最佳温度:某一个特定温度下,对多个通道的计数率取平均值,然后对该平均值与每个通道的计数率进行减法运算,得到的减数取绝对值后进行加和,得到特定温度下波导各通道的离散参数,取离散参数最小值,将其作为最优温度。因为通道数较多,加和得到的最小数有可能存在多个值相同的情况,此时在离散参数相同的温度中选择计数率总和最大的

作为最优温度,如果仍旧存在相同的情况,则在上述范围内选择最靠近室温的温度作为最佳温度工作点,因为实验中发现波导的最佳温度点一般比室温要高,越靠近室温,能量需求越小,对 TEC 驱动的要求越低。以 8 通道波导为例,表 2 为波导温度记录结果,图 6 为各个通道对应的计数率。

首先对上位机设定温度扫描范围,比如此处设定的范围是 39~40 °C,扫描步进设定为 0.1 °C,FPGA 记录特定温度下所有通道的计数率,依次完成温度设定范围的扫描;然后删除不满足设定指标(比如,要求系统转换效率高于 15%,标定 10 万光子数,则计数率需大于 $15 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)的温度,从表 2 可看出 39 °C、39.1 °C、39.2 °C、39.8 °C、39.8 °C 及 40 °C 不满足要求,删除这些温度;再对某一特定温度(39.3 °C、39.4 °C、39.5 °C、39.6 °C、39.7 °C)所有通道计数率进行加和,得到计数率总和与温度的对应关系;挑选出上述计数率总和和

表 2 多通道波导温度记录表
Table 2 multichannel waveguide temperature record

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Count/(10^3 s^{-1})								Discrete value
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	
39	14	14	13	16	16	15	14	13	7.75
39.1	14	14	14	18	17	16	14	15	10.5
39.2	14	15	15	18	17	17	14	16	10
39.3	15	17	17	20	17	18	14	18	10
39.4	19	18	16	17	19	18	15	18	9
39.5	18	19	18	17	18	20	15	18	7.5
39.6	18	20	18	17	18	20	18	17	7
39.7	17	19	18	15	18	18	18	16	8.25
39.8	15	18	17	15	17	18	18	14	11
39.9	14	17	15	14	17	17	16	14	10
40	13	15	15	13	15	15	13	14	7

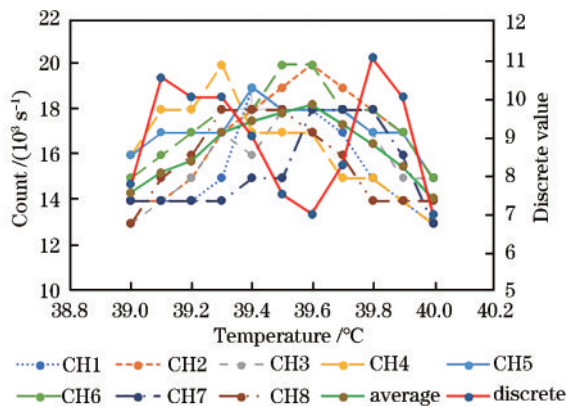


图 6 温度与计数率关系曲线

Fig. 6 Relation curve between temperature and counting rate

的最大值和最小值,取平均数,删除低于该平均数的温度,留下的部分为计数率相对较高的温度;剩余的温度均为计数率较高的,然后取这些温度下各个通道的计数率的平均值,将该平均值与对应温度下各个通道的计数率相减,取绝对值后相加,得到与计数率离散情况相关的参数,如表 2 中离散参数一列;比较离散参数的大小,选用离散参数最小值对应的温度作为最优温度(此时选择 39.6°C 作为最优波导工作温度),然后 FPGA 通过 DAC 控制 TEC 驱动模块完成温度配置。通过对比数据,可发现采用自动模式后各个通道的探测效率的最大差为 3%,而表 1 利用人工模式确定的工作温度的转换效率的最大差为 5%。同时,为了完成对 8 通道波导的单独测试,需要搭建一套测试系统,并需要记录非常多的探测计数率数据,进行最终的计算。

以上方法可以最大化地减小多通道波导各个通道之间的相对差值,并且极大地节省人力物力,并可以减小人为误差。

3 结 论

提出了一种多通道 PPLN 波导自动控制系统,该

系统主要包含多通道 PPLN 波导、FPGA 核心及相应的模数转换芯片、TEC 驱动芯片、多通道具有主动淬灭和快速恢复功能的自由运行的单光子探测器。采用与波导数对应的多通道单光子探测器,同步测试所有的通道,利用 FPGA 获取多个单光子探测器的计数率,通过运行均衡算法,确定多通道波导的最佳工作温度,可节省大量的人工成本且可避免人为误差。

需要指出的是,所提多通道 PPLN 波导控制方法只是实现了控制自动化,减少了大量的人力和减小了人为误差,但最核心性能的提高仍旧依赖波导制程工艺水平的提高、波导耦合技术的提高及探测器性能一致性的提高。

针对多通道 PPLN 波导应用方向,比如介绍的阵列相机,其性能除与波导性能相关外,还与前级扫描透镜以及微透镜光纤阵列、泵浦激光设计等相关,同时为了实现更小的体积,厚结工艺 APD 阵列仍旧有很长的路要走。相信随着国内对量子技术的不断投入,波导设计和工艺制程水平会逐步提高,多通道波导会在量子领域发挥更重要的作用,为人们感知世界、认识世界提供更有力的技术保证。

参 考 文 献

- [1] Yamada M, Nada N, Saitoh M, et al. First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(5): 435-436.
- [2] Chen G Y, Li N X, da Ng J, et al. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives [J]. Advanced Photonics, 2022, 4(3): 034003.
- [3] Suchoski P G, Findakly T K, Leonberger F J. Stable low-loss proton-exchanged LiNbO₃ waveguide devices with no electro-optic degradation[J]. Optics Letters, 1988, 13(11): 1050-1052.
- [4] 张子昌. 通信波段量子纠缠产生与应用研究[D]. 成都:

- 电子科技大学, 2022.
- Zhang Z C. Research on generation and application of quantum entanglement in communication band[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [5] Bava G, Montrosset I, Sohler W, et al. Numerical modeling of Ti: LiNbO₃ integrated optical parametric oscillators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 42-51.
- [6] Hofmann D, Schreiber G, Haase C, et al. Quasi-phase-matched difference-frequency generation in periodically poled Ti: LiNbO₃ channel waveguides[J]. Optics Letters, 1999, 24(13): 896-898.
- [7] 王珂珂, 丹丽智, 沈志强, 等. 铌酸锂薄膜器件脊形波导和光纤耦合特性研究[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(5): 70-76.
- Wang K K, Dan L Z, Shen Z Q, et al. Study on coupling characteristics of ridge waveguide and optical fiber in lithium niobate thin film devices[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(5): 70-76.
- [8] 张娜玲, 井红旗, 袁庆贺, 等. 高功率 1060 nm 锥形激光器[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0514002.
- Zhang N L, Jing H Q, Yuan Q H, et al. High power 1060 nm tapered laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0514002.
- [9] Wang S M, Zhao J H, Gu J J, et al. LiNbO₃ channel and ridge waveguides based on helium ion implantation combined with lithography and precise diamond dicing[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(7): 071301.
- [10] 高琴, 乔石珺, 帅垚, 等. 单晶铌酸锂薄膜光波导的制备研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(1): 44-49.
- Gao Q, Qiao S J, Shuai Y, et al. Fabrication of ridge-waveguide with LiNbO₃ thin films: a methodological study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(1): 44-49.
- [11] Suntsov S, Rüter C E, Brüske D, et al. Watt-level 775 nm SHG with 70% conversion efficiency and 97% pump depletion in annealed/reverse proton exchanged PPLN ridge waveguides[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11386-11393.
- [12] 蔡双双, 吴波, 沈剑威, 等. PPMgLN 光参量振荡器温度和畴周期调谐研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 179-182.
- Cai S S, Wu B, Shen J W, et al. Study on temperature and domain period tuning of PPMgLN optical parametric oscillator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(6): 179-182.
- [13] 吴晓君, 任泽君, 孔德胤, 等. 铌酸锂强场太赫兹光源及其应用[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1914001.
- Wu X J, Ren Z J, Kong D Y, et al. Lithium niobate strong-field terahertz source and its applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1914001.
- [14] 姜振宇, 冯晋霞, 孙婧可, 等. 基于 MgO:PPLN 晶体的 1560 nm 激光外腔谐振倍频器[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1701001.
- Jiang Z Y, Feng J X, Sun J K, et al. 1560 nm laser external cavity resonant frequency doubler based on MgO:PPLN crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1701001.
- [15] Wang B, Zheng M Y, Han J J, et al. Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(5): 053602.
- [16] Wu J Y, Su X Q, Tan J J, et al. Study of theory for transient imaging of hidden object using single-photon array detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(S1): 105-111.
- [17] Zheng M Y, Yao Q A, Wang B, et al. Integrated multichannel lithium niobate waveguides for quantum frequency conversion[J]. Physical Review Applied, 2020, 14(3): 034035.
- [18] 马飞. 基于周期性极化铌酸锂波导的量子通信核心器件的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- Ma F. Research on quantum communication core device based on periodically polarized lithium niobate waveguide [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.