

基于周期极化晶体MgO:PPLN的纠缠光子对制备过程的研究

吴杰 王海龙 张雄 陈君 王兆坤 龚华平 赵春柳

Study on preparation process of entangled photon pairs based on periodically polarized crystal MgO:PPLN

WU Jie, WANG Hailong, ZHANG Xiong, CHEN Jun, WANG Zhaokun, GONG Huaping, ZHAO Chunliu

引用本文:

吴杰, 王海龙, 张雄, 等. 基于周期极化晶体MgO:PPLN的纠缠光子对制备过程的研究[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 182–187. DOI: 10.5768/JAO202344.0105001

WU Jie, WANG Hailong, ZHANG Xiong, et al. Study on preparation process of entangled photon pairs based on periodically polarized crystal MgO:PPLN[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 182–187. DOI: 10.5768/JAO202344.0105001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PMMA材料在线偏振和圆偏振光下的超连续光谱特性分析

Analysis of supercontinuum spectra characteristics of PMMA materials in linear polarization and circularly polarized light

应用光学. 2018, 39(1): 146–150 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107005>

离轴非球面零位补偿检验的非线性畸变校正

Nonlinear distortion correction in off-axis aspheric null compensation tests

应用光学. 2019, 40(4): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403002>

高稳定性低噪声的561 nm黄光激光器

561 nm yellow laser with high stability and low noise

应用光学. 2017, 38(3): 499–505 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0307002>

波长可调谐的瓦级连续橙红光激光器

Watt-level continuous wave orange-red laser with wavelength tunable

应用光学. 2017, 38(2): 309–315 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0207001>

非线性光波导中基波和二次谐波的模场分布研究

Analysis of mode field distribution for fundamental and second harmonic light waves in nonlinear optical waveguide

应用光学. 2017, 38(2): 231–236 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202005>

基于矢量光场的TeO₂晶体旋光特性研究

Optical rotation properties of TeO₂ crystal based on vector light field

应用光学. 2021, 42(6): 963–968 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0182-06

基于周期极化晶体 MgO:PPLN 的纠缠光子对制备过程的研究

吴 杰, 王海龙, 张 雄, 陈 君, 王兆坤, 龚华平, 赵春柳

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 基于二阶非线性效应的自发参量转换技术制备纠缠光子对过程中, 以掺 5 mol%MgO:PPLN 周期极化晶体为研究对象, 将光参量变换过程中的动量守恒和能量守恒条件与该晶体的色散方程, 以及晶体极化周期随温度变化的热膨胀方程相联系, 得到了 355 nm、405 nm、532 nm、780 nm 和 1 064 nm 这 5 个实验室常用波长点在制备纠缠光子对时的周期调谐特性和温度调谐特性。研究过程中发现, 出现了晶体极化周期过小和产生两对纠缠光子对问题, 总结并归纳了各波长点在一定极化周期和温度下与非线性晶体作用所产生的纠缠光波段范围。当选用其他非线性周期极化晶体进行实验时, 改变 QPM 动量守恒条件中的极化周期项, 同时根据具体使用的晶体改变色散方程。该研究方案可直接推广到使用不同非线性晶体产生通信光波段或红外光波段的纠缠光子对研究中, 在制备量子光源等领域具有重要研究价值。

关键词: 非线性光学; 纠缠光子对; 周期极化晶体 MgO:PPLN; 量子光源; 调谐

中图分类号: TN201; O437

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0105001

Study on preparation process of entangled photon pairs based on periodically polarized crystal MgO:PPLN

WU Jie, WANG Hailong, ZHANG Xiong, CHEN Jun, WANG Zhaokun,
GONG Huaping, ZHAO Chunliu

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the process of preparing entangled photon pairs by spontaneous parametric conversion technology based on second-order nonlinear effects, the periodically polarized crystals doped with 5 mol%MgO:PPLN were studied. By linking the momentum conservation and energy conservation conditions in the process of optical parametric transformation with the dispersion equation of the crystal and the thermal expansion equation of the crystal polarization period with temperature, the period-tuning and temperature-tuning properties of entangled photon pairs were obtained at the five commonly used wavelength points of 355 nm, 405 nm, 532 nm, 780 nm and 1 064 nm. It was found that the crystal polarization period was too small and two pairs of entangled photon pairs were generated during the research process, and the entangled light band range generated by the interaction of each wavelength point with nonlinear crystals under a certain polarization period and temperature was summarized. When other nonlinear periodical polarized crystals were selected for experiments, the polarized periodic term in the QPM momentum conservation condition was changed, and the dispersion equation was changed according to the specific crystal used. This research scheme can be directly extended to the research of using different nonlinear crystals to generate entangled photon pairs in the communication optical band or infrared optical band, and has important research value in the field of preparing

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFF0217801); 浙江省自然科学基金 (LY22A040007)

作者简介: 吴杰 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事量子测量和计量方面的研究。Email: 1733430781@qq.com

通信作者: 赵春柳 (1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: clzhao@cjlu.edu.cn

quantum light sources.

Key words: nonlinear optics; entangled photon pairs; periodically polarized crystal MgO:PPLN; quantum light sources; tuning

引言

近年来,在量子通信、量子传感等领域蓬勃发展过程中,品质良好的量子光源作为核心部件得到了更多关注。在量子光源的多种应用领域中,纠缠光子对的制备是必不可少的前提,因此对其进行研究就变得尤为重要。基于二阶非线性效应的自发参量下转换(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)技术是产生纠缠光子对的有效方法之一,这种方法产生的纠缠光子对具有纠缠纯度高、检测方便、相干性距离保持长等特点,是当前量子光学研究中最为普遍的方法^[1]。SPDC 常用的相位匹配技术主要有传统的双折射相位匹配技术和准相位匹配(quasi-phase-matching, QPM)技术,由于 QPM 技术具有线性转换效率高,调谐方式方便简单,理论上在非线性晶体的整个透光范围内都可以实现动量守恒等优点^[2],为进一步提高纠缠光子对纯度,产生更稳定的非经典光场提供了可行的方法。QPM 技术产生非经典光场,通常是对量子光学结构中的周期极化非线性晶体进行周期性调制,改变介质的极化方向,此时入射光场在晶体中发生的非线性作用就决定了出射光场的量子特性^[3]。在产生非经典光场实验中,常见的非线性晶体包括周期极化 LiNbO₃(PPLN)、周期极化 KTiOPO₄(PPKTP)和周期极化 LiTaO₃(PPLT)等。其中,PPLN 晶体因其非线性系数最大、透光范围较宽、制备简单且市场价格较低,被大量应用在红外波段光参量变换过程中^[4-12],成为目前 QPM 技术中应用最为广泛的非线性晶体。然而同组分 LiNbO₃ 在低于 150 °C 的温度下容易受到光折变损伤,且制作时所需的极化电压过高,不易获得大尺寸晶体,矫顽电场强度也与击穿电压很接近,制作过程中容易操作失误,破坏晶体结构。为了解决这些缺点,研究人员开始尝试往 LiNbO₃ 晶体中掺入 MgO。仲跻国等人^[13]在 1980 年证实,高掺杂 MgO(4.6%)的 PPLN、晶体的抗光损伤能力约为未掺杂时的 100 倍,在常温下就能够实现光学频率的转换。掺 5 mol% MgO:PPLN 晶体矫顽场约为 4.8 KV/mm,可防止因为温度过低产生的光折变对结构造成破坏,可平稳运行在室温环境下。目前,掺 5 mol% MgO:PPLN 晶体已成为 QPM 技术应用中最为重要的非线性材料^[14-16]。

本文深入分析 QPM 过程中相互联系的动量守恒与能量守恒条件,根据掺 5 mol% MgO:PPLN 晶体的折射率随波长、温度变化的 Sellmeier 方程以及极化周期随温度的热膨胀关系,详细研究了儿种典型波段泵浦激光泵浦条件下,产生纠缠光子对过程中周期调谐特性及温度调谐特性,产生的纠缠光子对可以覆盖光通信及中红外波段。

1 SPDC 过程守恒条件

SPDC 的具体过程为,一束频率为 ω_p 的泵浦光入射到非线性介质上,通过 QPM 技术产生两束频率分别为 ω_s 和 ω_i 的信号光和闲置光,整个过程中满足能量和动量守恒,即:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$k_p = k_s + k_i \quad (2)$$

式中: k_p 、 k_s 、 k_i 分别为泵浦光、信号光和闲置光的波矢。当 $\omega_s = \omega_i$ 时, (1) 式为简并 SPDC, 是经典二次谐波(倍频)的逆过程。当 $\omega_s \neq \omega_i$ 时, (1) 式为非简并 SPDC, 是参量上转换的逆过程^[17]。

在 QPM 过程中,泵浦光、信号光和闲置光也需满足上述守恒条件,且为提高 QPM 过程发生的概率并补偿位相失配,还需考虑倒格矢匹配。倒格矢匹配公式为

$$k_m = \frac{2\pi m}{\Lambda} \quad (3)$$

式中 m 为准相位匹配阶数。

当准相位匹配阶数为 1, 相位失配量为 0 时, 则有^[18]:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (4)$$

$$\frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i} = \frac{1}{\Lambda(T)} \quad (5)$$

式中: λ_p 、 λ_s 、 λ_i 分别为抽运光、信号光、闲置光的波长; n_p 、 n_s 、 n_i 分别为泵浦光、信号光、闲置光的折射率; $\Lambda(T)$ 为晶体的极化周期, 单位为 μm 。

2 非线性周期极化晶体参数

由于掺 5 mol% MgO:PPLN 晶体的性能在众多周期极化晶体中均表现不俗, 本文以其为研究对象进行分析。在实验中, 研究人员为了提高 SPDC

的转换效率,通常选择 $e \rightarrow e+e$ 的匹配方式和 PPLN 最大的二阶非线性极化张量 d_{33} 。该晶体的 Sellmeier 色散方程为^[19]

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f(T) + \frac{a_2 + b_2 f(T)}{\lambda^2 - [a_3 + b_3 f(T)]^2} + \frac{a_4 + b_4 f(T)}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (6)$$

式中: $f(T) = (T - 24.5)(T + 570.82)$; T 为晶体温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; λ 为光波波长,单位为 μm 。式中各相关参量值如表 1 所示。

表 1 掺 5 mol% MgO:PPLN 晶体的色散方程参数

Table 1 Parameters of Sellmeier dispersion equation for MgO:PPLN crystals doped with 5 mol%

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
值	5.756	0.098 3	0.202	189.32	12.52
参数	a_6	b_1	b_2	b_3	b_4
值	1.32×10^{-2}	2.86×10^{-6}	4.7×10^{-8}	6.113×10^{-8}	1.516×10^{-4}

根据(6)式可绘制出在不同温度下, PPLN 晶体折射率随入射光波长的变化曲线,如图 1 所示。从图 1 中可以看出,在不同温度下 PPLN 晶体折射率随入射光波长的变化是相同的,即随着波长增大,晶体折射率降低;在入射光波长相同的情况下,温度高的晶体折射率大于温度低的晶体;在 $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 范围内,改变入射光波长,晶体折射率变化更为明显。

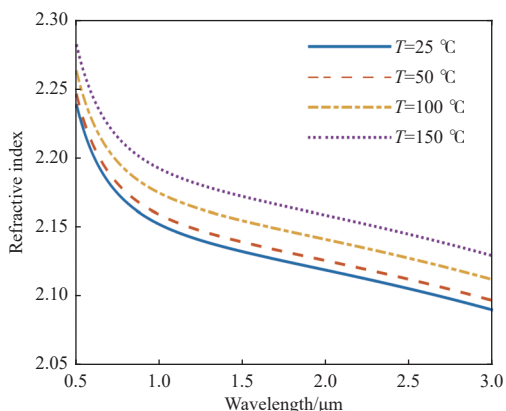


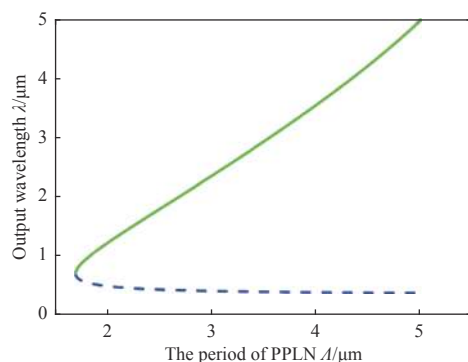
图 1 PPLN 折射率与波长的色散曲线

Fig. 1 Dispersion curves of refractive index and wavelength of PPLN

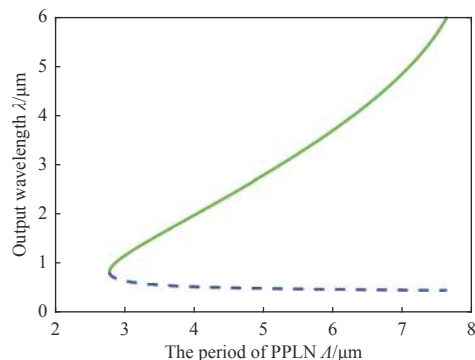
泵浦光的波长、温度 T 和晶体的周期 $\Lambda(T)$ 皆为可变的参量。在一定条件下,改变其中一个变量,就可以实现两束参量光的改变;当 2 个参量都保持不变时,就可以得出晶体的调谐波长与第 3 个参量间的变化关系,即可达成周期调谐与温度调谐。

3 极化周期调谐

改变非线性晶体的极化周期是进行 QPM 波长调谐的方法之一。联立(4)式~(6)式,可得在室温(25°C)情况下,泵浦光波长分别为 355 nm、405 nm、532 nm、780 nm 和 1 064 nm 时, PPLN 晶体极化周期与信号光和闲置光输出波长的变化关系,如图 2 所示。由图 2 可以看出,利用非线性晶体的周期调谐可以获得通信光波段和红外波段的光输出,但同时也要注意选取合适的晶体极化周期来获得所需目标波段的纠缠光。如若想选用波长为 355 nm 或 405 nm 的泵浦光获得通信波段的纠缠光,可分别选取 $2.2 \mu\text{m}$ 和 $3.4 \mu\text{m}$ 晶体极化周期,如图 2(a)和 2(b)所示。但选取的晶体极化周期过小,对制备工艺要求较高,不宜采用。此时可选取较大晶体极化周期,如 $5 \mu\text{m}$ 的晶体极化周期,以获得红外光波段纠缠光。当选用波长为 532 nm 的泵浦光进行纠缠光子对的制备时,可获得通信光波段和红外光波段的纠缠光输出,且晶体极化周期较大,易于制备,如图 2(c)所示。当选用波长为 780 nm 或 1 064 nm 的泵浦光进行纠缠光子对的制备时,可在较大范围的晶体极化周期中获得较宽的红外光波段纠缠光输出,如图 2(d)和 2(e)所示。在选取晶体极化周期时还要注意,不能产生其他波段的纠缠光子对。在泵浦光波长 $\lambda_p=780 \text{ nm}$ 时,若选取的



(a) $\lambda_p=355 \text{ nm}$ 时 PPLN 的周期调谐曲线



(b) $\lambda_p=405 \text{ nm}$ 时 PPLN 的周期调谐曲线

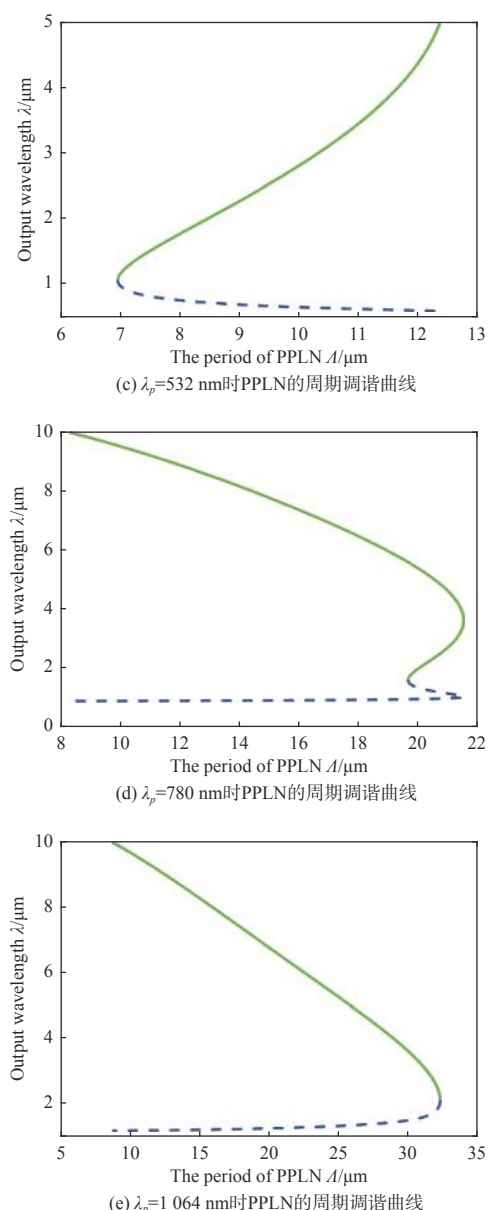


图2 PPLN 的周期调谐曲线

Fig. 2 Periodic tuning curve of PPLN

非线性晶体极化周期超过约 $19.66\text{ }\mu\text{m}$, 将会产生两对纠缠光子, 难以分离出所需波段的纠缠光子对, 如图 2(d) 所示, 此时应注意, 在选取晶体极化周期时要小于 $19.66\text{ }\mu\text{m}$ 。若想获得更为纯净的量子光源, 需要针对不同波段的泵浦光选定合适的晶体极化周期。

4 温度调谐

相较于改变晶体极化周期进行周期调谐, 选取适当的晶体极化周期后, 通过改变晶体温度和其他方法进行波长调谐则更为方便快捷, 且成本较低, 是目前应用最为广泛的方法之一。实现该调

谐方式是, 将 MgO:PPLN 晶体置于温控炉中, 利用晶体温度的改变来控制输出信号光和闲置光波长。温度改变时, 晶体极化周期 $\Lambda(T)$ 表示为温度 T 的函数^[20], 即:

$$\Lambda(T) = \Lambda(25)[1 + \alpha(T - 25) + \beta(T - 25)^2] \quad (7)$$

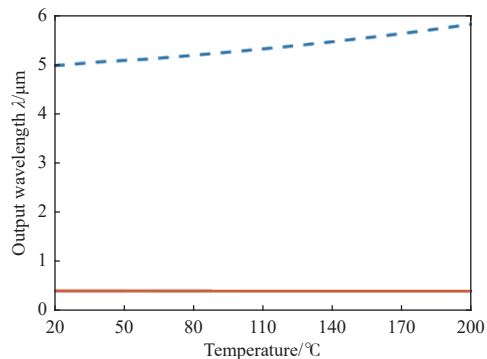
式中: $\Lambda(25)$ 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的极化周期; α 为 1.6×10^{-5} , β 为 7×10^{-9} 。

在分析 QPM 过程中非线性晶体的温度调谐特性时, 需对 (4) 式~(7) 式进行联立, 并最终将所得到的各参数代入 (5) 式中进行求解。首先, 在温度 T 和泵浦光波长给定时, 由 (6) 式计算得出泵浦光折射率 n_p 。然后选定合适的非线性晶体在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的极化周期 $\Lambda(25)$, 即可由 (7) 式确定温度改变时的极化周期 $\Lambda(T)$ 。剩下 2 个未知数, 即信号光和闲置光的波长 λ_s 和 λ_i , 可通过将 (4) 式代入 (5) 式中, 此时 (5) 式为关于 $\lambda_s(\lambda_i)$ 的一元方程, 求解该一元方程可得到 $\lambda_s(\lambda_i)$, 再利用 (4) 式求解出 $\lambda_i(\lambda_s)$ 。按实验要求改变温度, 重复上述步骤, 可获得不同温度下信号光波长和闲置光波长, 即可得到该晶体的温度调谐特性。

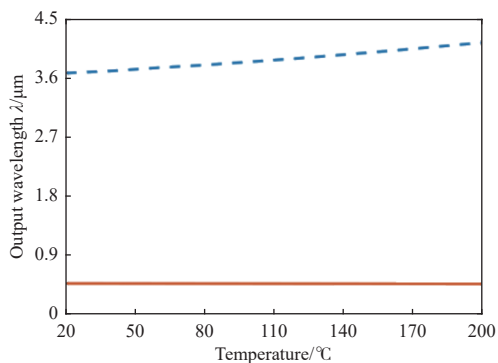
下面分别使用实验室常用的 355 nm 、 405 nm 、 532 nm 、 780 nm 和 1064 nm 激光作为泵浦光, 来分析掺 $5\text{ mol\%}$ MgO:PPLN 晶体的温度调谐特性。

将泵浦光波长为 355 nm 、温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、晶体极化周期为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 及各参量数值分别代入 (4) 式~(7) 式, 得到关于 λ_i 的一元方程, 解得闲置光波长 λ_i 为 378 nm , 对应的信号光波长 λ_s 为 5808 nm 。以温度 T 为参数, 通过提高温度, 扫描更多的温度点, 得到对应的信号光和闲置光波长数据, 即可绘出晶体温度范围在 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度调谐特性, 如图 3(a) 所示。从图 3(a) 可以看出, 当选取适当的晶体极化周期且泵浦光 $\lambda_p=355\text{ nm}$ 时, 输出信号光的波长随着温度升高而增大, 并处于中红外波段内, 而闲置光则相反, 且闲置光波长变化不显著。重复上述步骤, 可得其他 4 个波长点的温度调谐特性, 如图 3(b)~3(e) 所示。若想使一束出射光的波长处于通信波段或红外波段内, 即可选用适当的晶体极化周期在泵浦光波长为 532 nm 的情况下进行温度调谐; 若想使一束出射光的波长处于红外波段内, 即可使用 355 nm 、 405 nm 、 780 nm 、 1064 nm 泵浦光进行温度调谐, 具体结果如表 2 所示。但是, 在通过改变晶体温度对光参量过程进行温度调谐时, 还需要选取合适的温度范围, 如图 3(d) 所示。在温度超过约 $183\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 会产生两

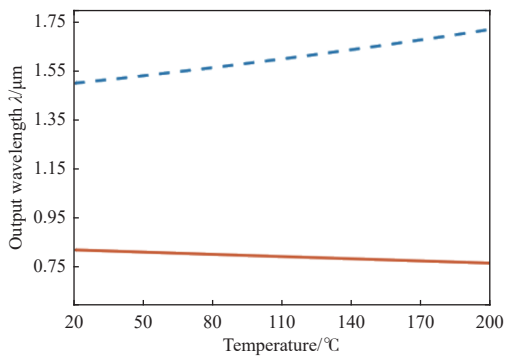
对纠缠光子,难以得到纯净的所需信号光和闲置光。因此,在确定泵浦光波长和晶体极化周期后,需要选取合适的温度调谐范围,以获得更为纯净的量子光源。



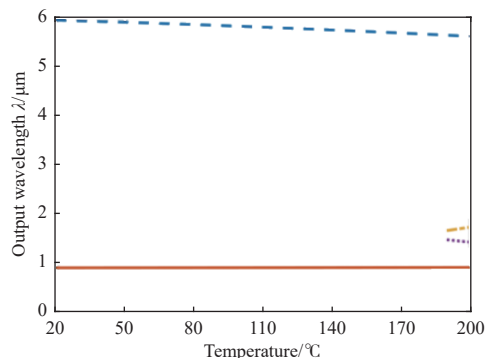
(a) $\lambda_p=355$ nm, $A=5$ μm 时晶体温度调谐曲线



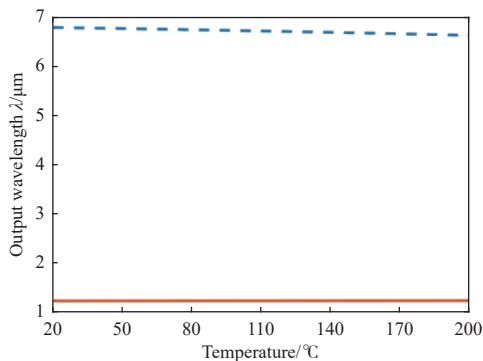
(b) $\lambda_p=405$ nm, $A=6$ μm 时晶体温度调谐曲线



(c) $\lambda_p=532$ nm, $A=7.5$ μm 时晶体温度调谐曲线



(d) $\lambda_p=780$ nm, $A=19$ μm 时晶体温度调谐曲线



(e) $\lambda_p=1\ 064$ nm, $A=20$ μm 时晶体温度调谐曲线

图3 PPLN晶体的温度调谐曲线

Fig. 3 Temperature tuning curve of PPLN crystal

表2 PPLN晶体的温度调谐范围

Table 2 Temperature tuning range of PPLN crystal

泵浦光波长/ μm	晶体极化周期/ μm	闲置光波长范围/ μm	信号光波长范围/ μm
0.355	5	0.378~0.382	5.808~4.959
0.405	6	0.449~0.455	4.137~3.672
0.532	7.5	0.770~0.824	1.721~1.502
0.532	10	0.641~0.656	3.120~2.798
0.780	19	0.897~0.905	5.959~5.627
1.064	20	1.261~1.267	6.793~6.633

5 结论

通过深入分析 SPDC 过程中动量和能量守恒条件,以掺 5 mol% MgO:PPLN 周期极化准相位匹配晶体为例,分析了实验室中常用波长分别为 355 nm、405 nm、532 nm、780 nm 和 1064 nm 泵浦光在 SPDC 过程中的周期调谐特性和温度调谐特性。当泵浦光一定时,为实现对出射光在通信光或红外光波段内波长调谐,产生所需波长条件下的纠缠光子对,通过采取改变晶体极化周期和晶体温度的方法进行实验制备。根据不同实验方案,选定适当的晶体极化周期和温度,并更换晶体的色散方程,该研究方案可直接引用到使用其他非线性晶体制备纠缠光子对研究中,对获得较宽波长范围的量子光源有一定指导意义。

参考文献:

- [1] LEE D, KIM I, LEE K J. Investigation of 1064 nm pumped type II SPDC in potassium niobate for generation of high spectral purity photon pairs[J]. *Crystals*, 2021, 11(6): 599.

- [2] DESCLOUX D, DHERBECOURT J B, MELKONIAN J M, et al. Rapidly tunable optical parametric oscillator based on aperiodic quasi-phase matching.[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 11112-11125.
- [3] GE Licheng, CHEN Yuping, JIANG Haowei, et al. Broadband quasi-phase matching in a MgO: PPLN thin film[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(10): 80-84.
- [4] SHENG Q, DING X, SHI C, et al. Continuous-wave mid-infrared intra-cavity singly resonant PPLN-OPO under 880 nm in-band pumping[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 8041-8046.
- [5] KUMAR S C, WEI J, DEBRAY J, et al. High-power, widely tunable, room-temperature picosecond optical parametric oscillator based on cylindrical 5% MgO: PPLN[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3897-3900.
- [6] KEMLIN V, JEGOUSO D, DEBRAY J, et al. Dual-wavelength source from 5% MgO: PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28886-28891.
- [7] GUO J, HE G, ZHANG B, et al. Compact efficient 2.1 μm intracavity MgO: PPLN OPO with a VBG output coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 27(6): 573-576.
- [8] JIAO Z, GUO J, HE G, et al. Narrowband intracavity MgO: PPLN optical parametric oscillator near degeneracy with a volume Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 230-233.
- [9] XU L, FEEHAN J S, SHEN L, et al. Yb-fiber amplifier pumped idler-resonant PPLN optical parametric oscillator producing 90 femtosecond pulses with high beam quality[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(4): 987-993.
- [10] ISYANOVA Y, TIAN W Y, MOULTON P F. High-repetition rate, picosecond-pulse, tunable, mid-IR PPLN OPG source[J]. *SPIE*, 2016, 9731: 97310W.
- [11] ZHANG Jing, ZHANG Yongchang, DUAN Yanmin, et al. Mid-infrared tunable intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO: PPLN[J]. *International Journal of Optics*, 2017, 2017: 1-5.
- [12] 郝丽云, 苏岑, 漆云凤, 等. 基于PPMgO: LN晶体的连续波全光纤激光器倍频特性[J]. *中国 激光*, 2013, 40(6): 76-81.
- HAO Liyun, SU Cen, QI Yunfeng, et al. Second harmonic generation characteristics of continuous wave all-fiber laser oscillator in PPMgO : LN[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 76-81.
- [13] 张铁犁. 周期极化晶体准相位匹配光学参量产生的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- ZHANG Tieli. The research on quasi-phase-matched optical parametric generation based on periodically poled crystal[D]. Tianjing: Tianjin University, 2005.
- [14] WU B, KONG J, SHEN Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 μm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1118-1120.
- [15] ZHAO J Q, YAO B Q, TIAN Y, et al. High power, continuous wave, singly resonant OPO based on MgO: PPLN[J]. *Laser Physics*, 2010, 20(10): 1902-1906.
- [16] GROB P, LINDSAY I D, LEE C J, et al. Frequency control of a 1163 nm singly resonant OPO based on MgO: PPLN[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 820-822.
- [17] MENG L, PADHYE A, PEDERSEN C, et al. SHG (532 nm)-induced spontaneous parametric downconversion noise in 1064 nm-pumped IR upconversion detectors[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1670-1673.
- [18] LI Z, ZHU A, ZUO N, et al. Theoretical analysis of cascaded optical parametric oscillations generating tunable terahertz waves[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 106103.
- [19] GAYER O, SACKS Z, GALUN E, et al. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94: 367.
- [20] BRUNER A, EGER D, ORON M B, et al. Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(3): 194-196.