

PPKTP 晶体相位匹配关系分析

霍美如¹,秦际良¹,孙颖榕¹,成家霖¹,闫智辉^{1,2},贾晓军^{1,2*}

(1.山西大学 光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西 太原 030006;

2.山西大学 极端光学协同创新中心,山西 太原 030006)

摘要:压缩态光场和纠缠态光场等非经典光场是进行量子信息研究的基本资源,其中压缩态光场在低于量子噪声极限的量子精密测量中有着重要应用,而纠缠态光场被广泛应用于量子隐形传态,量子计算等领域。利用由不同类型相位匹配的非线性晶体构成的光学参量振荡器是制备不同类型非经典光场的有效手段之一。文章通过分析Ⅱ类周期极化磷酸氧钛钾(periodically poled KTiOPO_4 , PPKTP)的准相位匹配条件,发现在改变其抽运光及注入种子光偏振的情况下,利用一种晶体可以分别实现两种类型的相位匹配,从而可以制备两种不同类型的非经典光场。理论预测的结果与已得到的实验数据基本一致。

关键词:非经典光场;非线性光学;PPKTP 晶体;相位匹配

中图分类号:O437 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2018)02-00356-06

Analysis on Phase-matching Relations in PPKTP Crystal

HUO Meiru¹, QIN Jiliang¹, SUN Yingrong¹, CHENG Jialin¹, YAN Zhihui^{1,2}, JIA Xiaojun^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Non-classical optical states such as squeezed state and entanglement state are basic sources for quantum information researches. For instance, squeezed state plays an important role in quantum measurement below quantum noise limit, and has also been applied in quantum metrology, quantum sensing and quantum imaging. On the other hand, entangled state is widely used in regions of quantum network and quantum computation, such as quantum teleportation, quantum key distribution, quantum cryptography, quantum random number generator and quantum memory and so on. Hence, generation of non-classical optical states is of great importance for quantum optics researches and quantum optical techniques development. Optical parametric processing constructed by nonlinear crystals with different types of phase matching is one of the efficient methods for generating different types of non-classical optical states. After analyzing quasi-phase-matching relations of periodically poled KTiOPO_4 (PPKTP), we discovered that a kind

* 收稿日期:2018-01-30;接受日期:2018-03-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2016YFA0301402);国家自然科学基金(11474190; 61775127;11654002);青年三晋学者和山西省“1331工程”重点学科建设计划经费

作者简介:霍美如(1987-),女,山西汾阳人,博士研究生,主要从事量子光学、量子信息以及量子通信方面的研究。E-mail:shanxidaxuehmr@163.com

* 通信作者:贾晓军(JIA Xiaojun),E-mail: jiaxj@sxu.edu.cn

引文格式:霍美如,秦际良,孙颖榕,等. PPKTP 晶体相位匹配关系分析[J]. 山西大学学报(自然科学版),2018,41(2): 356-361. DOI:10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2018.02.025

of PPKTP crystal could meet two types of phase-matching relations and creates two types of non-classical optical states when varying the polarizations of the pump and the seed light. The result in theoretical calculation is in agreement with the previous experimental demonstration.

Key words: non-classical states of light; nonlinear optics; PPKTP crystal; phase-matching

0 引言

激光对于人们来说已经耳熟能详,我们也称它为相干光,作为一种电磁波,它在量子力学中可以用一对正交共轭分量,振幅和位相分量来表征。根据量子力学测不准原理,如果一个光场的某个正交分量的量子噪声起伏低于相干光的噪声起伏,即散粒噪声极限,此光场被称为非经典光场。非经典光场是量子光学实验中必不可少的基本量子资源。以常用的压缩态光场和纠缠态光场为例,压缩态光场,以其极低的量子噪声被用于提高量子干涉仪灵敏度以探测引力波^[1],或者被用于量子度量、量子传感和量子成像等量子光学技术^[2-4]中,而纠缠态光场由于其两束光之间的量子关联,可以用于量子密钥分发^[5]、量子隐形传态^[6]、量子计算^[7-8]、量子密集编码^[9]、量子随机数产生^[10]、量子存储^[11-12]等重要量子光学协议中。因此,非经典光场的产生具有重要意义,而利用带有非线性晶体的量子光学器件来产生非经典光场是常用的方法之一,其量子特性完全取决于光场在非线性晶体中发生的非线性作用过程。从压缩态光场、纠缠态光场等非经典光场在实验室首次得到至今,人们进行了大量的实验,起初人们使用整块的非线性晶体进行光学参量转化来制备非经典光场,后来人们发现将非线性晶体进行周期极化能有效提高相干光与非线性晶体的非线性相互作用,于是,很多周期极化非线性晶体便应运而生,其中最为常见的是利用周期极化磷酸氧钛钾(periodically poled KTiOPO₄, PPKTP)和周期极化铌酸锂(periodically poled LiNbO₃, PPLN)作为非线性晶体来制备非经典光场,而 PPKTP 晶体由于其具有更大的非线性作用系数和较合适的匹配温度而得到了更广泛地使用。

在一般的实验中,每一种晶体只能满足一种位相匹配关系,制备一种非经典光场,例如正交压缩态光场可以通过四波混频^[13]和满足 0 类或者 I 类相位匹配的光学参量过程^[14-16]等方法产生,而两组份的 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)纠缠态光场需要利用满足 II 类匹配的参量过程非线性晶体^[17-18]直接产生。本文以 II 类 PPKTP 晶体为研究对象,理论分析通过调节注入种子光与泵浦光的偏振与控制 PPKTP 晶体的温度,II 类 PPKTP 晶体可以分别满足 type-0 和 type-II 准相位匹配条件,即通过控制该晶体的工作条件,可以分别输出单模压缩态光场和 EPR 纠缠态光场,实现了利用单个光学腔制备两种类型非经典光场的方法,为今后进行制备更为复杂类型的非经典光场提供参考^[19]。

1 理论分析

光学参量过程普遍地存在于量子光源的制备之中,无论是相干态光源的研制,还是非经典光场的制备都是建立在光学参量过程的基础上实现的。通常我们利用一块非线性晶体完成一种类型的相位匹配过程从而制备一种类型的非经典态光场,例如利用 0 类 PPKTP 晶体完成 type-0 准相位匹配过程来制备压缩态光场,或者利用 II 类 PPKTP 晶体完成 type-II 准相位匹配过程来制备纠缠态光场。随着周期极化技术的不断改进,在一块 PPKTP 晶体中就可以完成两种甚至是多种类型的准相位匹配过程,从而输出多种类型的非经典光场,例如频率简并的压缩态光场和纠缠态光场,以及频率非简并的其他非经典光场^[19-21]。

利用光学参量振荡器控制光场在非线性晶体中发生自发参量下转换产生正交振幅压缩态光场实验方案于 1986 年被美国加州理工大学 Kimble 研究小组首次完成^[14],随后人们进行了大量的关于压缩态和纠缠态光场制备的理论和实验研究,得到量子特性更好的非经典光场,结合 Armstrong 等人提出的准相位匹配^[22]思想,光学参量振荡腔(optical parametric oscillator, OPO)非线性转换效率被大大提高,直到 2016 年,德国马普实验室已经将单模压缩光的压缩度提高到 15 dB^[15]。本文根据 Sellmeier^[23-26]相位匹配理论,结合实验结果理论分析实现 671 nm 光场在 PPKTP 晶体中 type-0 和 type-II 准相位匹配过程,通过调节 PPKTP 晶体温度可以实现, type-0 过程采用二阶非线性系数 d_{33} 的三阶倒格矢,有效非线性系数为 16.9 pm/V; type-II 过程采用 d_{24} 的一阶倒格矢,有效非线性系数为 3.64 pm/V^[27]。

PPKTP 晶体中可以发生三种类型的准相位匹配过程如图 1 所示,根据非线性转化过程中泵浦光的偏振与其产生的参量下转换光的偏振情况,将准相位匹配过程分为 type-0、type-I 和 type-II 准相位匹配过程。 x 、 y 、 z 分别对应 PPKTP 晶体三个轴。当竖直偏振(S 偏)的泵浦光发生光学参量下转换,产生竖直偏振的信号光与闲置光时,该过程为 type-0 准相位匹配过程;当竖直偏振(S 偏)的泵浦光下转换产生水平偏振(P 偏)的信号光与闲置光时,该过程为 type-I 准相位匹配过程;而当水平偏振的泵浦光发生光学参量下转换,产生竖直偏振的信号光与水平偏振的闲置光时,该过程为 type-II 准相位匹配过程。

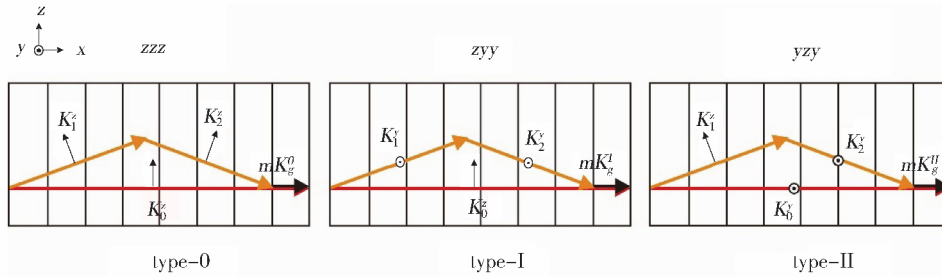


Fig. 1 Three types of phase-matching process in PPKTP crystal

图 1 PPKTP 晶体中三种类型的准相位匹配过程

光场在非线性晶体中发生参量下转换过程要求满足准相位匹配条件:

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2, \quad (1)$$

$$k_0 = k_1 + k_2 + mK_g, \quad (2)$$

$$|k_j| = \frac{2\pi n_j}{\lambda_j}. \quad (3)$$

其中,角标 0,1,2 分别表示泵浦光、信号光、闲置光。(1)式表示能量守恒, ω 为光频率,(2)式表示动量守恒, k 为波矢, K_g 为周期极化矢且 $K_g = \frac{2\pi}{\Lambda}$, Λ 为周期极化长度,实验中使用的 PPKTP 晶体极化周期为 $51.7 \mu\text{m}$, m 取整数,为准相位匹配阶数。(3)式中 $j=0,1,2$,分别对应泵浦光、信号光和闲置光。 n_j 为不同光束在晶体中传播时的折射率随晶体温度、光波长变化的函数表达式,其取值方向与波矢偏振方向一致。相位匹配矢量图如图 1 所示。 λ_j 为对应光束的波长。

对于本实验 type-0 准相位匹配过程,对应的能量守恒和动量守恒表达式可以写为:

$$\frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}, \quad (4)$$

$$k_{0z} = k_{1z} + k_{2z} + 3K_g. \quad (5)$$

其中, z 对应晶体 z 轴方向,该式表示偏振方向沿着 PPKTP 晶体 z 轴方向的三束光晶体中传播时的矢量耦合关系,由于光束在光学腔中傍轴传输,光束之间的夹角很小,故忽略不计。 $m=3$ 表明在相位匹配过程中,发生 3 阶 type-0 准相位匹配,非线性转换效率变为一阶情况的 $1/3$ 。 m 的取值决定了光学参量转换过程的有效非线性转换效率,为对应二阶非线性系数的 $1/m$,对理论分析准相位匹配过程非线性转化效率以及实验制备的非经典光场的压缩度、纠缠度起决定性作用。 m 取值越大,非线性转换效率越低,对应的实验制备的压缩态和纠缠态其压缩度和纠缠度变低。这里 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2\lambda_0 = 1342 \text{ nm}$ 。

对于 type-II 准相位匹配过程,(4)式能量守恒标量式仍然成立,而(5)式动量守恒波矢合成式表示为:

$$k_{0y} = k_{1z} + k_{2y} + K_g, \quad (6)$$

对应沿晶体 y 方向偏振的泵浦光与 z 方向偏振的信号光, y 方向偏振的闲置光在晶体中传播时的矢量合成关系。 $m=1$ 表明在相位匹配过程中,发生 1 阶 type-II 准相位匹配,非线性转化效率不变。

不同光束在 KTP 晶体中传播,各极化方向折射率变化函数^[28-29]为:

$$(n_j^i)^2 = a^i + e^i(T^2 - 400) + \frac{b^i + f^i(T^2 - 400)}{\lambda_j^2 - c^i + g^i(T^2 - 400)} - \lambda_j^2[d^i + h^i(T^2 - 400)], \quad (7)$$

其中, $i=0,1,2$,分别对应晶体三个维度。 $j=0,1,2$,分别对应泵浦光、信号光和闲置光。结合实验结果,我们得到不同波长的光场在 KTP 晶体中传播时沿 y 轴、 z 轴的折射率方程^[28]。将 KTP 晶体折射率方程代入

type-0 和 type-II 类准相位匹配条件中可以得到泵浦光波长与满足两种类型准相位匹配条件的 PPKTP 晶体温度的关系曲线如图 2 所示。

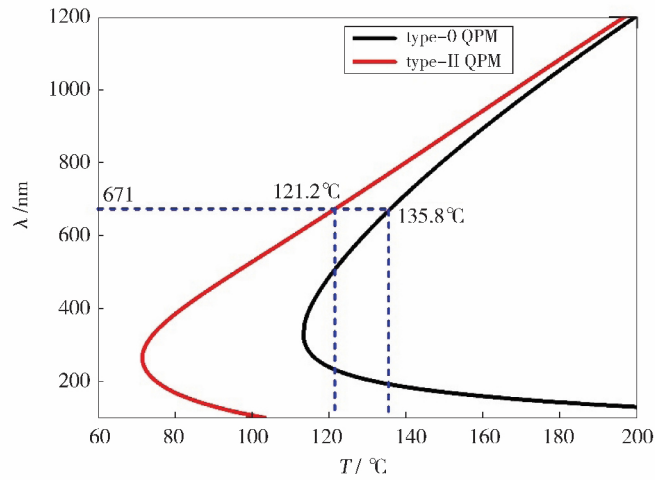


Fig. 2 Dependence on wavelength of the pump and temperature of PPKTP crystal, which meet two types of quasi-phase-matching conditions in optical parametric conversion

图 2 光学参量转化过程中满足两种类型准相位匹配条件的泵浦光波长与 PPKTP 晶体温度的关系曲线

从图 2 可以看出,PPKTP 晶体 type-0 和 type-II 准相位匹配过程是两个相互独立的过程,不同类型相位匹配条件对应不同 PPKTP 晶体工作温度,对应的非线性光学参量转化过程也不相同。type-0 准相位匹配过程对应单模压缩光的制备过程,PPKTP 晶体最佳工作温度理论值为 135.8°C;而 type-II 准相位匹配过程对应 EPR 纠缠光的制备过程,PPKTP 晶体最佳工作温度理论值为 121.2°C。两种类型的准相位匹配条件下,PPKTP 晶体最佳工作温度理论值差值约为 14.6°C。因此可以在较小的温度范围内实现两种类型的准相位匹配过程。

2 实验验证以及分析

根据以上分析的准相位匹配过程,同时在实验上已经得到验证^[30],实验原理简图如图 3 所示,我们利用带有 II 类 PPKTP 晶体的光学参量振荡腔进行参量转化,主要通过控制泵浦光和注入种子光的偏振以及精

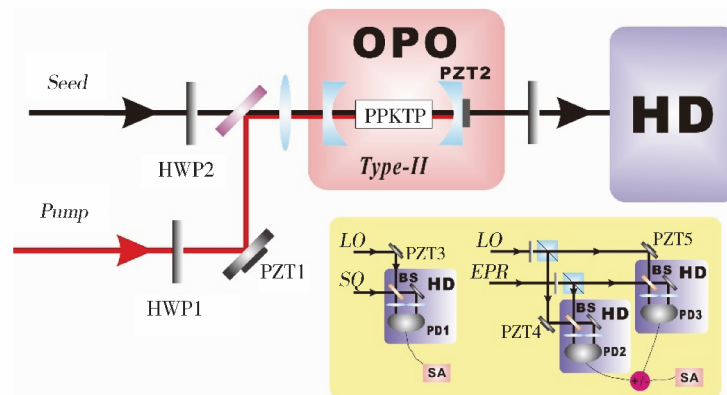


Fig. 3 Brief schematic of experimental mechanism. Seed;seed light;Pump;pump light; LO;local oscillator;SQ;squeezed state;EPR;entangled state;HWP1,2;half-wave plate;PZT1-5; piezoelectric ceramic;PD1-3;photoelectric detector;BS;50:50 beam splitter; OPO;optical parametric oscillator;HD;homodyne detection;SA;spectrum analyzer

图 3 实验原理简图 Seed:种子光;Pump:泵浦光;LO:本地振荡光;SQ:压缩光;EPR:纠缠光; HWP1,2:半波片;PZT1-5:压电陶瓷;PD1-3:光电探测器;BS:50:50 分束器; OPO:光学参量振荡器;HD:平衡零拍探测系统;SA:频谱分析仪

细地调节 PPKTP 晶体工作温度来分别实现 type-0 和 type-II 准相位匹配,并利用平衡零拍系统对两种条件下 OPO 腔输出的非经典光场噪声功率进行测量,得到分析频率 3 MHz 处,低于对应散粒噪声极限 3.17 dB 的正交振幅压缩态光场和正交振幅和与正交位相差关联起伏低于对应散粒噪声极限 2.2 dB 的 EPR 纠缠态光场^[30-31]。实验中通过调节基频光的偏振并结合 PPKTP 晶体倍频过程产生的红光来确定相位匹配过程的发生及其类型与 PPKTP 晶体最佳匹配温度。最后通过对 OPO 腔产生的非经典光场正交分量的噪声功率进行测量,来证明其是压缩态光场以及纠缠态光场,从而与准相位匹配过程结果对应。压缩态光场其正交振幅分量噪声功率低于对应散粒噪声极限,纠缠态光场其偏振相互垂直的两关联光束正交振幅分量具有反关联、正交位相分量具有正关联特性,因此两关联光束正交振幅和和正交位相差关联起伏低于对应散粒噪声极限。

当注入竖直偏振(对应 PPKTP 晶体 z 轴方向)的泵浦光与种子光时,调节 PPKTP 晶体温度为 133.3°C 时,发生 type-0 类准相位匹配过程,OPO 腔输出单模压缩态光场。当注入水平偏振(对应 PPKTP 晶体 y 轴方向)的泵浦光与 45°偏振的种子光时,调节 PPKTP 晶体温度在 116°C 时,发生 type-II 类准相位匹配过程,OPO 腔输出正交分量 EPR 纠缠态光场。实验制备得到的非经典光场输出波长为 1 341.909 5 nm,OPO 线宽为 10 MHz。两种类型的相位匹配过程 PPKTP 晶体最佳工作温度实验值差值约 17.3°C,与理论预期基本吻合。而两种类型准相位匹配过程 PPKTP 晶体温度最佳工作点理论值与实验值的差异,可能是由理论拟合温度曲线时所用的 KTP 晶体各极化方向的折射率方程系数取值有关,文章中取的是经验值,而其实际值很难准确测到,并且由于各 PPKTP 晶体本身存在差异也可能导致相位匹配最佳温度值的偏差。

3 结论

本文对 PPKTP 晶体准相位匹配条件进行了详细分析,得到 II 类 PPKTP 晶体可以满足的 type-0 和 type-II 准相位匹配条件的关系曲线以及对应非线性转化过程最佳匹配的温度区间,理论预期与实验验证结果基本吻合。制备得到的 1.3 μm 通信波段非经典光场^[32-34],为光纤低损耗传输窗口之一,在量子通信方面有很大的应用前景,同时在量子光学研究与量子光学技术发展中也具有重要的作用,因此,关于非经典光场产生机制的准相位匹配条件分析也尤为重要,可以为实验提供一定的理论指引,提高实验制备的效率与精度。

参考文献:

- [1] The LIGO Scientific Collaboration. Enhanced Sensitivity of the LIGO Gravitational Wave Detector by Using Squeezed States of Light[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**:613-619. DOI:10.1038/NPHOTON.2013.177.
- [2] Dowling P J, Seshadreesan P K. Quantum Optical Technologies for Metrology, Sensing, and Imaging[J]. *J Lightwave Technol*, 2015, **33**:2359-2369. DOI: 10.1109/JLT.2014.2386795.
- [3] 闫子华,孙恒信,蔡春晓,等.基于低频压缩光的声频信号测量[J]. *物理学报*, 2017, **66**:114205-6. DOI: 10.7498/aps.66.114205.
- [4] 孙恒信,刘奎,张俊香,等.基于压缩光的量子精密测量[J]. *物理学报*, 2015, **64**:234210-11. DOI: 10.7498/aps.64.234210.
- [5] Madsen L S, Usenko V C, Lassen M, et al. Continuous Variable Quantum Key Distribution with Modulated Entangled States[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**:1083-6. DOI: 10.1038/ncomms2097.
- [6] Furusawa A, Sorensen J L, Braunstein S L, et al. Unconditional Quantum Teleportation[J]. *Science*, 1998, **282**:706-709. DOI:10.1126/science.282.5389.706.
- [7] Braunstein S L, Loock P van. Quantum Information with Continuous Variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**:513-577. DOI:10.1007/978-94-015-1258-9.
- [8] Su X L, Hao S H, Deng X W, et al. Gate Sequence for Continuous Variable One-way Quantum Computation[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**:3828-9. DOI: 10.1038/ncomms3828.
- [9] Ekert A K. Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**:661-663. DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.661.
- [10] Lunghi T, Brask J B, Lim C C W, et al. Self-Testing Quantum Random Number Generator[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, **114**:150501-5. DOI:10.1103/PhysRevLett.114.150501.
- [11] Yan Z H, Wu L, Jia X J, et al. Establishing and Storing of Deterministic Quantum Entanglement among Three Distant A-

- tomic Ensembles[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**:718-8. DOI:10.1038/s41467-017-00809-9.
- [12] 邓瑞婕, 闫智辉, 贾晓军. 基于电磁诱导透明机制的压缩光场量子存储[J]. *物理学报*, 2017, **66**:074201-8. DOI:10.7498/aps.66.074201.
- [13] Slusher R E, Hill Murray, Hollberg L W, *et al.* Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**:2409-2412. DOI:10.1103/PhysRevLett.55.2409.
- [14] Wu L A, Kimble H J, Hall J L, *et al.* Generation of Squeezed States by Parametric Down Conversion[J]. *Phys Rev Lett*, 1986, **57**:2520-2523. DOI:10.1103/PhysRevLett.57.2520.
- [15] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, *et al.* Detection of 15 dB Squeezed States of Light and Their Application for the Absolute Calibration of Photoelectric Quantum Efficiency[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **117**:110801-5. DOI:10.1103/PhysRevLett.117.110801.
- [16] Tian J F, Zuo G H, Zhang Y C, *et al.* Generation of Squeezed Vacuum on Cesium D2 Line Down to Kilohertz Range[J]. *Chin Phys B*, 2017, **26**:124206-5. DOI:10.1088/1674-1056/26/12/124206.
- [17] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**:3663-3666. DOI:10.1103/PhysRevLett.68.3663.
- [18] Zhou Y Y, Jia X J, Li F, *et al.* Experimental Generation of 8.4 dB Entangled State with an Optical Cavity Involving a Wedged Type-II Nonlinear Crystal[J]. *Opt Express*, 2015, **23**:4952-4959. DOI:10.1364/OE.23.004952.
- [19] Pysker M, Bahabad A, Peng P, *et al.* Quasi-phase-matched Concurrent Nonlinearities in Periodically Poled KTiOPO4 for Quantum Computing Over the Optical Frequency Comb[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**:565-567. DOI:10.1364/OL.35.000565.
- [20] Chen J, Pearlman A J, Ling A, *et al.* A Versatile Waveguide Source of Photon Pairs for Chip-scale Quantum Information Processing[J]. *Opt Express*, 2009, **17**:6727-6740. DOI:10.1364/OE.17.006727.
- [21] Lee H J, Kim H, Cha M, *et al.* Simultaneous Type-0 and Type-II Spontaneous Parametric Down-conversions in a Single Periodically Poled KTiOPO4 Crystal[J]. *Appl Phys B*, 2012, **108**:585-589. DOI:10.1007/s00340-012-5088-4.
- [22] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, *et al.* Interactions Between Light Waves in a Nonlinear Dielectric[J]. *Phys Rev*, 1962, **127**:1918-1939. DOI:10.1103/PhysRev.127.1918.
- [23] Fan T Y, Huang C E, Hu B Q, *et al.* Second Harmonic Generation and Accurate Index of Refraction Measurements in Flux-grown KTiOPO4[J]. *Appl Opt*, 1987, **26**:2390-2394. DOI:10.1364/AO.26.002390.
- [24] König F, Wong F N C. Extended Phase Matching of Second-harmonic Generation in Periodically Poled KTiOPO4 with Zero Group-velocity Mismatch[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**:1644-1646. DOI:10.1063/1.1668320.
- [25] Fradkin K, Arie A, Skliar A, *et al.* Tunable Midinfrared Source by Difference Frequency Generation in Bulk Periodically Poled KTiOPO4[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**:914-916. DOI:10.1063/1.123408.
- [26] Wiechmann W, Kubota S, Fukui T, *et al.* Refractive-index Temperature Derivatives of Potassium Titanyl Phosphate[J]. *Opt Lett*, 1993, **18**:1208-1210. DOI:10.1364/OL.18.001208.
- [27] Vanherzeele H, Bierlein J D. Magnitude of the Nonlinear-optical Coefficients of KTiOPO4[J]. *Opt Lett*, 1992, **17**:982-984. DOI:10.1364/OL.17.000982.
- [28] Benoit B, Jean-Philippe F, Yannick G. Thermo-optical Effect and Saturation of Nonlinear Absorption Induced by Gray Tracking in a 532-nm-pumped KTP Optical Parametric Oscillator[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**:484-486. DOI:10.1364/OL.25.000484.
- [29] Anthon D W, Crowder C D. Wavelength Dependent Phase Matching in KTP[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**:2650-2652. DOI:10.1364/AO.27.002650.
- [30] Huo M R, Qin J L, Yan Z H, *et al.* Generation of Two Types of Nonclassical Optical States Using an Optical Parametric Oscillator with a PPKTP Crystal[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, **109**:221101-5. DOI:10.1063/1.4968801.
- [31] 陈力荣, 李淑静, 徐忠孝, 等. 光学腔内两正交偏振模振幅和相位的补偿[J]. *量子光学学报*, 2017, **23**:92-98. DOI:10.3788/JQO20172301.0013.
- [32] Zheng Y H, Wu Z Q, Huo M R, *et al.* Generation of a Continuous-wave Squeezed Vacuum State at 1.3 μm by Employing a Home-made All-solid-state Laser as Pump Source[J]. *Chin Phys B*, 2013, **22**:094206-4. DOI:10.1088/1674-1056/22/9/094206.
- [33] 邬志强, 周海军, 王雅君, 等. 利用自制的单频激光器获得近通讯波段正交振幅压缩态光场[J]. *量子光学学报*, 2013, **19**:1-5. DOI:10.3788/ASQO20131901.0001.
- [34] 马亚云, 冯晋霞, 万振菊, 等. 连续变量 1.34 μm 量子纠缠态光场的实验制备[J]. *物理学报*, 2017, **66**:244205-6. DOI:10.7498/aps.66.244205.