

文章编号: 1007-6654(2011)02-0119-05

理论构造周期极化 KTiOPO_4 晶体制备 852 和 1550 nm 双色纠缠光

杨荣国, 孙恒信, 张俊香, 郜江瑞[†]

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

摘要: 利用 KTiOPO_4 (KTP) 材料非线性系数 d_{33} 对应的二阶非线性 0-类准相位匹配, 理论上设计构造了一种周期极化 KTiOPO_4 晶体 (PPKTP), 当晶体温度为 20°C 时, 晶体准相位匹配格子的周期为 $10.70 \mu\text{m}$ 。波长为 550 nm 的激光泵浦由该晶体组成的光学参量振荡器能产生含 852 nm 信号光和 1550 nm 的闲置光的双色纠缠, 其中信号光对应 Cs 原子吸收线, 闲置光 1550 nm 对应光纤通讯波长。该纠缠光对量子信息网络和原子信息存储有非常重要的意义。

关键词: 准相位匹配; 周期极化晶体; 光学参量振荡; 双色纠缠

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

纠缠态光场是一类重要的非经典光场。纠缠源作为量子信息的核心资源, 利用其可以完成量子离物传态 (quantum teleportation)^[1,2], 量子密集编码 (quantum dense coding)^[3,4], 量子计算 (quantum compute)^[5] 和量子保密通信 (quantum cryptography)^[6] 等实验。目前实验上产生连续变量纠缠源大多采用传统的光学参量过程方法, 通过分束器耦合两个由光学参量过程产生的压缩态光场制备纠缠源^[7,8]、或者利用偏振非简并光学参量放大器 (NOPA) 直接产生纠缠光场^[9-12]。一直以来, 由于光学参量过程相位匹配限制了有效利用非线性晶体最大非线性系数。近年来, 人们已经通过周期极化二阶非线性晶体产生高效率的非线性转换, 并应用于非经典光场产生。这种周期极化晶体通过结构的周期变化, 弥补色散引起

的相位差, 实现相互作用波长的准相位匹配。这样既可以利用晶体的最大非线性系数, 又能避免晶体走离效应的限制。这一成果也建立在周期极化晶体生长技术和制作工艺近些年长足的发展, 同时也促进了人们构造和设计更多的周期极化晶体用于产生各种非经典光场。1998 年, Garashi 等人在实验上实现基于 PPKTP 晶体的波长可调谐的连续波光学参量振荡器^[13]。2002 年, V. Pasiskevicius 等人通过同时性准相位匹配周期极化晶体产生二次谐波, 并且在实验上得到了倍频光^[14]。2005 年, Shiming Gao 等人理论上研究了利用周期极化晶体产生多通道纠缠光子对^[15]。2007 年, 日本 Furusawa 小组利用周期极化 KTiOPO_4 晶体 (PPKTP) 产生 9dB 的连续变量压缩态光场^[16]。随着科学技术的发展, 双色或多色纠缠光对于量子信息网络和信息存储变得更为重

*收稿日期: 2011-04-11

基金项目: 国家自然科学基金 (10774096; 60708010; 60978008); 国家重点基础研究发展计划 (2010CB923102); 高等学校博士学科点专项科研基金 (200801080004)

作者简介: 杨荣国 (1978—), 山西介休人, 山西大学光电研究所博士研究生, 从事量子光学, 非线性光学研究。

[†] 通讯作者: E-mail: jrgao@sxu.edu.cn

要^[17,18],尤其是包含碱金属原子吸收线和光纤低损耗窗口波段的纠缠光^[18,19]。此类光源是研究量子信息网络节点、量子信息存储必不可少的前提条件,例如可以应用于原子云^[20]、量子点^[21]、离子俘获^[22]等方面。而利用准相位匹配技术构造周期极化晶体的办法提供了产生这种波长可选择多色纠缠光的可能。

本文基于 KTiOPO_4 (KTP) 材料及其非线性系数 d_{33} 理论上研究设计了极化晶体的周期结构。由波长为 550 nm 的激光泵浦该 PPKTP 晶体组成的光学参量振荡腔,通过光学参量下转换过程可以制备铯原子 852 nm 吸收线和光通讯波段 1550 nm 的连续变量双色纠缠态光场,其实验装置如图 1-a 所示。

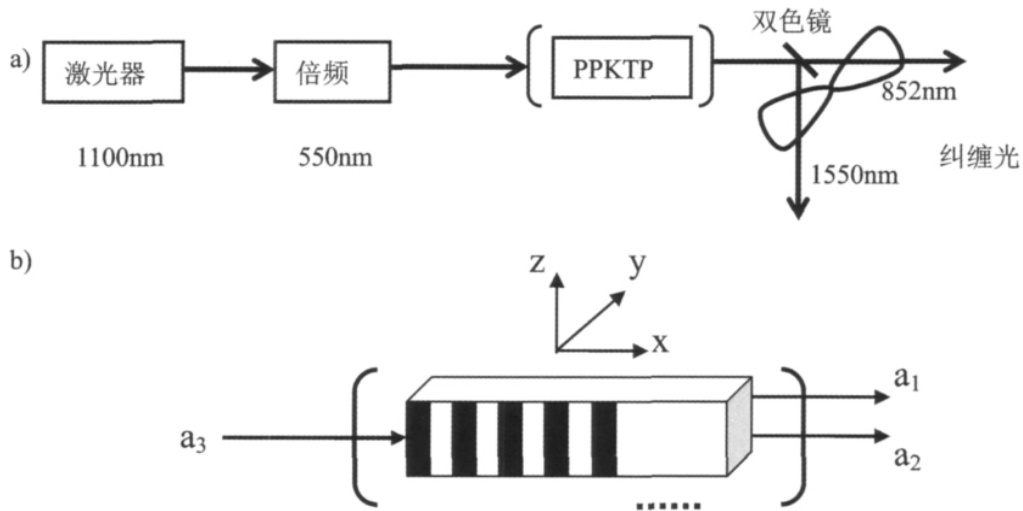


图 1 a) 产生纠缠光实验装置图; b) PPKTP 晶体非简并光学参量振荡器(NOPO)示意图

Fig. 1 a) Schematic of entanglement generation; b) NOPO of PPKTP

系统的核心部分是一个光学参量振荡腔,内置一周极化晶体。波长为 550 nm 的泵浦模 a_3 在光学腔中晶体内部通过参量下转换过程产生 a_1 和 a_2 一对纠缠光,见图 1-b。信号光 a_1 、闲置光 a_2 、泵浦光 a_3 都沿晶体 x 轴方向传播,偏振方向分别是 y 轴和 z 轴方向,三个相互作用光场的偏振关系由 KTP 晶体的三个有效非线性系数 d_{33} 、 d_{24} 和 d_{32} 决定。但利用 KTP 材料的非线性系数 d_{24} 和 d_{32} 所构造的极化晶体周期过大或过小,会造成晶体效率低、生长工艺难度大的缺点,而且 d_{33} 是三个非线性系数中最大的,因此这里只研究利用 KTP 材料非线性系数 d_{33} 的情况。

d_{33} 光学参量过程对应的光学耦合波方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{1z}}{dx} &= -i \frac{2d_{33}}{\lambda_1 n_{1z} m_{33}} A_{3z} A_{2z}^* \exp(-i\Delta k_{33} x) \\ \frac{dA_{2z}}{dx} &= -i \frac{2d_{33}}{\lambda_2 n_{2z} m_{33}} A_{3z} A_{1z}^* \exp(-i\Delta k_{33} x) \end{aligned} \quad (1)$$

这里 A_{ij} ($i = 1, 2, 3, j = y, z$) 是信号模 a_1 、闲置

模 a_2 、泵浦模 a_3 的振幅, j 是指相应模的偏振方向沿着晶体内 y 轴和 z 轴, n_{ij} 是相应 i 模 j 偏振光场的折射率, m_{33} 是对应非线性系数 d_{33} 相互作用长度的阶数, λ_i 是对应各模的波长, Δk_{33} 是非线性系数 d_{33} 作用下的相位失配因子,可以表示为^[23]

$$\Delta k_{33} = k_{3z} - k_{1z} - k_{2z} - \frac{2\pi m_{33}}{\Lambda} \quad (2)$$

这里 Λ 是周期极化晶体准相位匹配格子的周期。 k_{iz} 是 z 偏振 a_i 模的波矢量。

在一般的双折射晶体中,对于特定波长的相互作用光场是很难满足相位匹配的,但对于准相位匹配的周期极化晶体来说相位匹配变为可能。利用 KTP 材料的 Sellmeier 方程^[24] (20°C)

$$\begin{aligned} n_x^2 &= 3.29100 + \frac{0.04140}{\lambda^2 - 0.03978} + \frac{9.35533}{\lambda^2 - 31.45571} \\ n_y^2 &= 3.45018 + \frac{0.04341}{\lambda^2 - 0.04597} + \end{aligned}$$

$$n_z^2 = 4.59423 + \frac{0.06206}{\lambda^2 - 0.04763} + \frac{16.98825}{\lambda^2 - 39.43799} + \frac{110.80762}{\lambda^2 - 86.12171}, \quad (3)$$

这里波长 λ 单位为 μm 。遵守能量守恒和准相位匹配的条件下,得到了利用非线性系数 d_{33} 下转换光学参量过程的一阶准相位匹配曲线,如图 2 所示,这里因晶体效率最大化原则只考虑一阶准相位匹配的情况 $m_{33} = 1$ 。

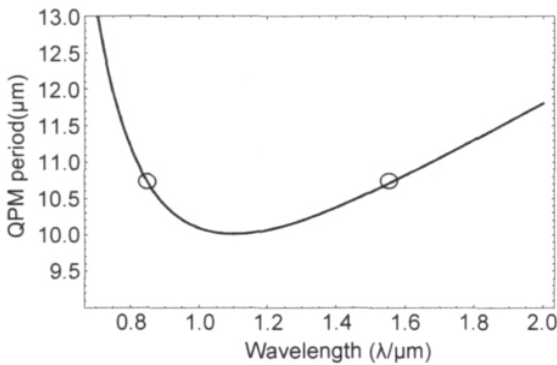


图 2 准相位匹配周期和下转换光波长的关系图
Fig. 2 QPM period vs the wavelength of down conversion beams

由图可以看出铯原子吸收线 852.3 nm 和通讯波长 1550.4 nm 对应的 PPKTP 晶体的准相位匹配格子的周期为 10.70 μm 。

在晶体极化时,晶体的极化周期不可避免地预先设计的理想状态有一定的差距,存在一定的偏差,可能是晶体内极化周期的整体偏大或偏小,也可能是单个反转畴由于引入了随机的扰动造成了极化周期的不均匀。

因此,我们研究了晶体极化周期大小的误差和相位匹配温度点的联系。这里研究极化后实际得到晶体周期较理论设计值整体偏小的情况,即周期为 10.68 μm 时,利用 KTP 材料的折射率温度系数方程^[24]

$$\frac{dn_x}{dT} = \left(\frac{0.1717}{\lambda^3} - \frac{0.5353}{\lambda^2} + \frac{0.8416}{\lambda} + 0.1627 \right) \times 10^5 (^\circ\text{C}^{-1}) (0.43 \leq \lambda \leq 1.58)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_y}{dT} &= \left(\frac{0.1997}{\lambda^3} - \frac{0.4063}{\lambda^2} + \frac{0.5154}{\lambda} + 0.5425 \right) \times 10^5 (^\circ\text{C}^{-1}) (0.43 \leq \lambda \leq 1.58) \\ \frac{dn_z}{dT} &= \left(\frac{0.9221}{\lambda^3} - \frac{2.9220}{\lambda^2} + \frac{3.6677}{\lambda} - 0.1897 \right) \times 10^5 (^\circ\text{C}^{-1}) (0.53 \leq \lambda \leq 1.57) \\ &= \left(\frac{-0.5523}{\lambda} + 3.3920 - 1.7101\lambda + 0.3424\lambda^2 \right) \times 10^5 (^\circ\text{C}^{-1}) (1.32 \leq \lambda \leq 3.53) \end{aligned} \quad (4)$$

可以得到晶体的匹配温度与下转换光场的波长之间的关系,如图 3 所示。

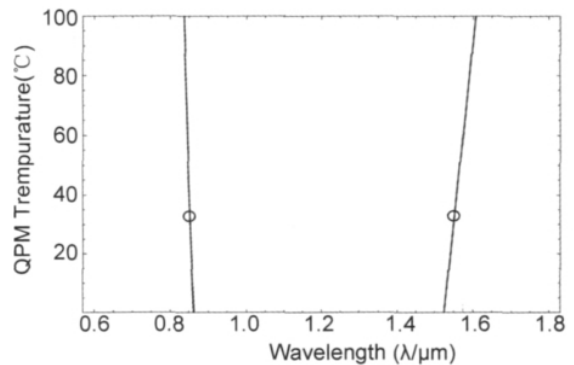


图 3 周期极化晶体准相位匹配温度和下转换光波长关系曲线
Fig. 3 QPM temperature vs the wavelength of down conversion beams

从图可以看出产生 852 nm 和 1550 nm 纠缠光对应的温度匹配点是 32.5 $^\circ\text{C}$,对应于此处温度波长调谐效率大约为 0.35 nm/ $^\circ\text{C}$ 。由此可以看出温度调谐可以弥补周期极化晶体一定范围的周期误差,而且通过调节周期极化晶体的温度,可以实现对信号光和闲置光的波长一定范围内的调谐。

总之,本文理论上研究了一种可用于产生双色纠缠光周期极化晶体的周期结构,550 nm 激光泵浦由该晶体组成的光学参量振荡器通过光学参量下转换可以得到铯原子吸收线 852 nm 和通讯波长 1550 nm 纠缠光。碱金属原子吸收线

和光纤通讯波段的双色纠缠光对于量子信息网的实际意义。
络的信息存储和远距离的量子通讯有着很重要

参考文献:

- [1] BENNETT C H, BRASSARD G, *et al.* Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **70**: 1895.
- [2] 翟泽辉, 李永明, 王少凯, 等. 连续变量量子离物态的实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**: 2710.
- [3] BENNETT C H, WIESNER S J. Communication via One- and Two-particle Operators on Einstein-Podolsky-Rosen States [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**: 2881.
- [4] RALPH T C, HUNTINGTON E H. Unconditional Continuous-variable Dense Coding [J]. *Phys Rev A*, 2002, **66**: 042321.
- [5] DIVINCENZO D P. Quantum Computation [J]. *Science*, 1995, **270**: 255.
- [6] EKERT A K. Quantum Cryptography Based on Bells Theorem [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**: 661.
- [7] HULET D G, KLEPPNER D. Rydberg Atoms in "Circular" States [J]. *Phys Rev Lett*, 1983, **51**: 1430.
- [8] NUSSENZVEIG P, BERNARDOT F, *et al.* Preparation of High-principal-quantum-number "Circular" States of Rubidium [J]. *Phys Rev A*, 1993, **48**: 3991.
- [9] OU Z Y, PEREIRA S F, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**: 3663.
- [10] OU Z Y, PEREIRA S F, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables in Nondegenerate Parametric Amplification [J]. *Appl Phys B*, 1992, **55**: 265-278.
- [11] YUN ZHANG, HAI WANG, *et al.* Experimental Generation of Bright Two-mode Quadrature Squeezed Light from a Narrow-band Nondegenerate Optical Parametric Amplifier [J]. *Phys Rev A*, 2000, **62**: 023813.
- [12] 李小英, 荆杰泰, 等. 由 NOPA 产生高质量明亮压缩光及明亮 EPR 光束 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(5): 966-972.
- [13] GARASHI, A; ARIE, *et al.* Continuous-wave Optical Parametric Oscillator Based on Periodically Poled KTiOPO₄ [J]. *OPTICS LETTERS*, 1998, **23**: 1739.
- [14] PASISKEVICIUS V, *et al.* Simultaneous Second-harmonic Generation with two Orthogonal Polarization States in Periodically Poled KTP [J]. *OPTICS LETTERS*, 2002, **27**: 1628.
- [15] SHIMING GAO¹, CHANGXI YANG. Prediction of Multichannel Polarization-entangled Photon Pairs in a Single Periodically Poled Lithium Niobate with a Monochromatic Pump [J]. *OPTICS LETTERS*, 2007, **32**: 2653.
- [16] YUISHI TAKENO, MITSUYOSHI YUKAWA, *et al.* Observation of -9dB Quadrature Squeezing with Improvement of Phase Stability in Homodyne Measurement [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2007, **15**: 4321.
- [17] SHUQIN ZHAI, RONGGUO YANG, DAIHE FAN, *et al.* Tripartite Entanglement from the Cavity with Second-order Harmonic Generation [J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**: 014302.
- [18] RONGGUO YANG, SHUQIN ZHAI, KUI LIU, *et al.* Generation of Multicolored Tripartite Entanglement by Frequency Doubling in a Two-port Resonator [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, **27**: 2721-2726.
- [19] YONGMIN LI, XIAOMIN GUO, *et al.* Generation of Two-color Continuous Variable Quantum Entanglement at 0.8 and 1.5 μm [J]. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 2010, **97**: 031107.
- [20] CHOU C W, DE RIEDMATTEN H, *et al.* Measurement-induced Entanglement for Excitation Stored in Remote Atomic Ensembles [J]. *Nature*, 2005, **438**: 828.
- [21] METE ATATÜRE, JAN DREISER, *et al.* Quantum-Dot Spin-State Preparation with Near-Unity Fidelity [J]. *Science*, 2006, **312**: 551.
- [22] LEIBFRIED D, KNILL E, *et al.* Creation of a Six-atom 'Schrödinger Cat' State [J]. *Nature*, 2005, **438**: 639.

- [23] BENJAMIN F. JOHNSTON, *et al.* Simultaneous Phase Matching and Internal Interference of two Second-order Nonlinear Parametric Processes [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2006, **14**: 11756.
- [24] KIYOSHI KATO, *et al.* Sellmeier and Thermo-optic Dispersion Formulas for KTP [J]. *Appl Opt*, 2002, **41**: 5040.

Design of the Periodically Poled KTiOPO_4 Generating 852 and 1550 nm Bicolor Entangled Lights

YANG Rong-guo, SUN Heng-xin, ZHANG Jun-xiang, GAO Jiang-rui

(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics,
Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, we theoretically design the second-order nonlinear periodically poled KTiOPO_4 crystal (PPKTP) by the 0-type quasi phase matching of nonlinear coefficients d_{33} . The period of PPKTP is 10.7 microns at 20 centigrade degree. The bicolor entanglement of 852 nm signal light and 1550 nm idle light can be generated when an optical parametric oscillator of the PPKTP is pumped by 550 nm light. One of entangled beams corresponds to Cs atomic transition line, the other corresponds to optical fiber communication wavelength. The entanglement is of importance for the quantum information network and atomic information storage.

Key words: quasi phase matching; periodically poled crystal; optical parametric oscillator; bicolor entanglement