

# 高对称超晶格非线性光子晶体中的非共线准相位匹配倍频

马博琴<sup>1</sup> 刘荣娟<sup>2</sup> 陈宝琴<sup>2</sup> 李志远<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国传媒大学理工学部, 北京 100024; <sup>2</sup> 中国科学院物理研究所, 北京 100190)

**摘要** 利用准相位匹配技术, 在一块具有二维高对称性超晶格的铌酸锂非线性光子晶体中, 实现了 930~1307 nm 激光波长区间中红、橙、黄、绿、蓝等至少 5 个波段的非共线准相位匹配倍频光斑对。入射基频波长由 1118.8 nm 下降约 52 nm 的过程中, 除了在波长为 1081.4 nm 时产生的一个共线倍频光斑, 其他波长均为一对非共线倍频绿光斑。入射光波长为 1234.5 nm 时, 屏幕上至少有三对黄色光斑。当基频波长由 1306.1 nm 减小为 1302.6 nm 时, 非共线倍频红色光斑对之间的间距由 3.5 mm 增加为 5.5 mm, 且非共线光斑呈现三角形形状。

**关键词** 非线性光学; 非线性光子晶体; 准周期极化铌酸锂; 非共线准相位匹配倍频

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s106004

## Non-Collinear Quasi-Phase Matching Harmonics in Nonlinear Photonic Crystals with Highly Symmetrical Superlattices

Ma Boqin<sup>1</sup> Liu Rongjuan<sup>2</sup> Chen Baoqin<sup>2</sup> Li Zhiyuan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Faculty of Science and Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China)  
(<sup>2</sup> Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** By using quasi-phase matching technology, series of non-collinear harmonic pairs in more than five laser wave bands are realized in one piece of LiNbO<sub>3</sub> nonlinear photonic crystal with two-dimensional dodecagonal superlattices when the laser wavelengths vary from 930 nm to 1307 nm. With the input fundamental wavelength decreasing from 1118.8 nm by nearly 52 nm, a pair of non-collinear green harmonics always exist except for one collinear harmonic for 1081.4 nm. More than three pairs of yellow harmonics appear on the screen at the input wavelength 1234.5 nm. The distance between pairs of red harmonics increases from 3.5 mm to 5.5 mm with input beam changing from 1306.1 nm to 1302.6 nm and the non-collinear harmonic spots look like triangles.

**Key words** nonlinear optics; nonlinear photonic crystal; quasi-periodically poled lithium niobate; non-collinear quasi-phase matching harmonics

**OCIS codes** 190.2620; 190.4400; 140.3515

## 1 引 言

光子晶体是光与物质相互作用的一个新兴领域, 制备并研究二阶非线性极化率按一定规律变化的非线性光子晶体成为目前研究的热点, 用非线性光子晶体拓宽光学频段、制作紧凑光学器件是非线性光子晶体研究的重要方向。非线性光子晶体中准相位匹配技术的应用可使得非线性系数较大、透光范围较宽而又无法实现常规相位匹配的晶体所能实

现的高效频率转换。基于一维超晶格结构非线性光子晶体在二维平面内多角度上的同时谐频受到很大的限制, 人们逐渐将此类研究延伸到了二维超晶格结构晶体中。1998 年, Berger<sup>[1]</sup> 首次提出了利用二维周期结构实现了准相位匹配谐频转换的构想, 该结构具有比一维周期超晶格结构更丰富多样的倒易矢量, 从而可以更加方便地实现多种波长的同时倍频及多个方向的输出。南安普顿大学等研究小组在

收稿日期: 2013-09-23; 收到修改稿日期: 2013-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(11004175)、中国传媒大学理科规划项目(3132013XNL1307)

作者简介: 马博琴(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非线性光子晶体方面的研究。E-mail: maboqin@cuc.edu.cn

实验上对二维超晶格非线性光子晶体进行了研究,首次利用二维周期性极化的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体实现了波长为 1.531 μm 的光学二倍频,同时还观测到三倍频和四倍频现象<sup>[2]</sup>。近期,研究人员还在光子晶体波导的基础上,加入克尔型非线性介质柱,得到了非线性光子晶体全光开关结构<sup>[3]</sup>。同时,还对与光子晶体相关的各种光学器件进行了研究,包括对光子光纤等的研发<sup>[4-7]</sup>。在准相位匹配谐频过程中,若入射波矢和倒易矢量共线,则该过程称为共线准相位匹配谐频。否则,称之为非共线准相位匹配谐频。非共线准相位匹配谐频可以产生多个不受入射光干扰的清洁谐频光,有助于集成光电子学的发展和紧凑光学元件的研发。具有高对称性的超晶格结构的倒空间中,其衍射强点分布更加丰富,这有利于多个非共线准相位匹配谐频光斑的产生。本文主要对二维十二重准周期极化铌酸锂非线性光子晶体中的非共线准相位匹配倍频实验进行了研究。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

十二重准周期结构可以由不同的基本单元进行组合而成,采用等边三角形和正方形作为基本构成单元。其中,等边三角形和正方形的边长是相等的,采用的单元边长为 23 μm。将堆积过程重复 4 次,即可获得大小约为 1.5 cm×1.5 cm 的高对称性超晶格图案。本实验采用以三角形和正方形的顶点为中心的圆作为极化电极,用外加高压脉冲电压极化的方法,制备二维准周期超晶格结构的铌酸锂非线性光子晶体。图 1 给出了极化铌酸锂晶体 +z 和 -z 面的形貌图,其极化反转畴清晰可见,整个二维平面内分布均匀。其中,-z 面中反转畴呈现六边形的形状,这是由铌酸锂晶体内部原子的分布引起的。经过抛光等加工,最终实验样品的大小为 10 mm×10 mm,厚度为 0.4 mm。

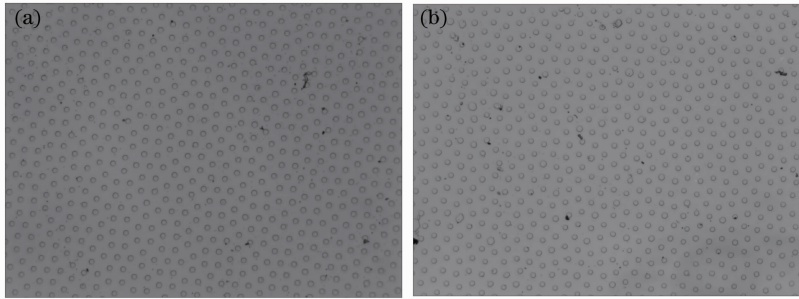


图 1 十二重准周期超晶格结构铌酸锂非线性光子晶体的形貌图。(a) +z 面;(b) -z 面  
Fig. 1 Optical micrographs of LiNbO<sub>3</sub> nonlinear photonic crystals with dodecagonal superlattice.

(a) +z plane; (b) -z plane

### 2.2 理论分析

根据准相位匹配谐频过程中的能量守恒  $\omega_2 = 2\omega_1$  和动量守恒  $2\mathbf{k}_1 + \mathbf{G} = \mathbf{k}_2$ , 可得共线准相位匹配过程时,

$$\frac{4\pi n(\lambda)}{\lambda} + G = \frac{4\pi n(\lambda/2)}{\lambda}, \quad (1)$$

式中

$$n(\lambda) = \sqrt{4.582 + \left(\frac{0.09921}{\lambda^2 - 0.2109^2}\right) - 0.02194 \times \lambda^2},$$

$\lambda$  为入射基频波长, $\mathbf{G}$  为倒易矢量, $G$  为倒易矢量的大小。由此可知,当入射波长减小时,倒易矢量则逐渐增加。这就意味着,在二维倒空间中离散分布的衍射点只能实现几种断续激光束的共线准相位匹配倍频过程。但是在相邻的两激光束之间,可以通过横向分布的衍射点实现中间波段激光束的非共线准相位匹配倍频过程。在此非共线过程中,可得

$$\left[\frac{4\pi n(\lambda/2)}{\lambda}\right]^2 = \left[\frac{4\pi n(\lambda)}{\lambda}\right]^2 + G^2 + \frac{8\pi n(\lambda)}{\lambda} G \cos \theta, \quad (5)$$

式中  $\theta$  为入射波矢和倒易矢量之间的夹角。随着入射波长的减小,倒易矢量和夹角都随之增加。这些结果在二维周期和八重准周期超晶格结构的晶体中已经得到验证<sup>[8-9]</sup>。本文将对具有二维十二重结构的高对称超晶格晶体进行研究,重点考虑其中的非共线过程。

### 2.3 非共线准相位匹配实验

图 2 中给出了二维十二重高对称超晶格结构的衍射图,其中衍射点与倒空间中倒易矢量的分布对应。较强的衍射点越多,意味着能够有效准相位匹配过程的倒易矢量也就越多。图 2 中还给出了一种非共线准相位匹配过程的示意图,其中倒易矢量与入射波矢之间有一定夹角  $\theta$ 。图 3 是进行非共

线过程测量的实验装置示意图。实验中作为基频光的入射激光束来源于光学参量振荡器(OPO),波长可在 915~1681 nm 之间进行调谐,脉宽和频率分别为 3 ns 和 10 Hz。实际的实验中,当倍频光束从晶体出射时,由于折射率的变化,向上或下传输的光束会向上或下分别偏折。另外,将晶体中心作为非共线过程测量的参考点,其距离屏幕的间距为 5.1 cm。在不同入射激光光束下,测量了对称分布的两倍频光点之间的间距  $a$ 。整个激光束的调谐范围内,实现了多种波长的共线和非共线准相位匹配倍频。

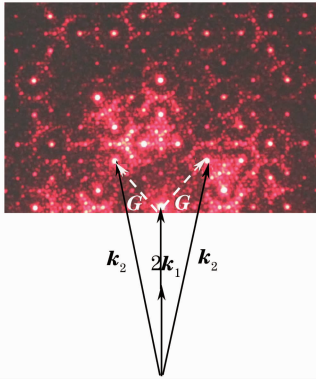


图 2 二维十二重高对称超晶格结构的衍射图

Fig. 2 Diffraction pattern of two-dimensional dodecagonal superlattice structure

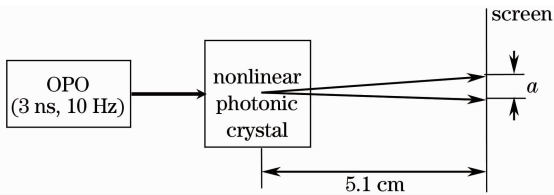


图 3 非共线过程测量的实验装置示意图(俯视)

Fig. 3 Illustration of the measurement devices for non-collinear processes

对于高对称结构的铌酸锂晶体中,能够实现入射基频光束 1238.8 nm 最高效率的共线准相位匹配倍频,波长为 619.4 nm。该倍频输出光为橙色,其转换效率约为 7%。图 4 给出了波长逐渐减小时的非共线倍频实验结果。其中,白色圆圈区域为实验晶体。当入射光为 1237.5 nm 时,非共线准相位匹配倍频占据优势,在入射光的对称两侧至少有两对光斑,如图 4(a)所示。其转换效率均低于 0.5%,这主要由非共线准相位匹配过程中所采用的倒易矢量的重复次数较低而引起的。测量最靠近中心的两对,间距分别为 9 mm 和 18.5 mm。继续减小入射光波长,当入射光波长为 1234.5 nm 时,屏幕上至少有三对光斑,其中最靠近中心的三对,间距分别

为 5, 11, 19.5 mm。多对倍频光斑的同时并存归因于十二重准周期超晶格结构的高度对称性。如图 4(b)所示,最靠近中心的那对倍频光呈现三角形,其他为线状。这可能是由激光脉宽、激光束的发散角和非共线准相位匹配的可调谐角度等因素共同作用产生的。在对二维八重准周期结构的研究中,发现皮秒激光束的非共线准相位匹配过程比纳秒激光束的非共线过程所产生的倍频光斑质量要优良<sup>[9]</sup>。另外,图 4(a)中最靠近中心的倍频光斑对与图 4(b)中位于中间倍频光斑的生成采用的是同一对倒易矢量,不同之处在于不同入射激光束下非共线准相位匹配过程中  $\theta$  不同,准相位匹配的失配量  $\Delta k = k_2 - 2k_1 - G$  不同而已。

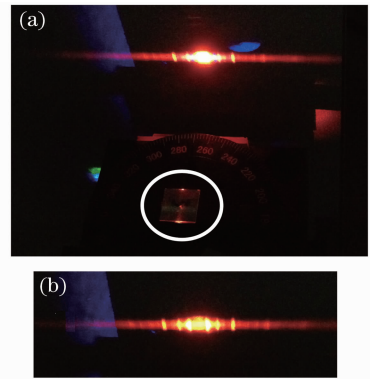


图 4 不同基频入射波长下的非共线准相位匹配倍频橙光。(a) 1237.5 nm;(b) 1234.5 nm

Fig. 4 Non-collinear orange harmonics at different incident wavelengths. (a) 1237.5 nm; (b) 1234.5 nm

同时,利用 OPO 激光束可连续调谐的特性,对不同波段出现的共线和非共线准相位匹配进行了全程扫描。当入射基频波长在 1162.8~1148.6 nm 光波段进行变化时,在入射光束两侧对称分布着多个倍频光斑。图 5(a)和(b)分别给出了入射波长为 1162.8 nm 和 1159.8 nm 时的倍频黄光图片。这两种波长的倍频结果类似,屏幕上至少有三对光斑,其中靠近中心的三对倍频光斑间距分别为 12, 21.5, 29 mm。不同之处在于波长为 1162.8 nm 时最靠近中心的那对倍频光斑强度较强,而波长为 1159.8 nm 的中心倍频光斑强度较强,这与入射波长减小时倒易矢量向横向扩展吻合。接下来,入射基频波长由 1118.8 nm 下降约 52 nm 的过程中,除了在波长为 1081.4 nm 时产生的一个共线倍频光斑,其他波段均为一对非共线倍频绿光斑。图 5(c)给出了入射基频波长为 1067 nm 时的倍频光斑对,两光斑间距为 11.5 mm。此后,当入射波长继续减小为 936.8 nm 时,实现了共线准相位匹配倍频过

程,其倍频输出波长为 468.4 nm。当入射波长再减小 0.2 nm 时,刚好形成一对倍频蓝光斑。随着入射波长的继续减小,非共线倍频过程采用的倒易矢量逐渐向横向开展,倍频光斑对之间的间距逐渐变大。当入射波长为 930.5 nm,两倍频光斑间距为 10 mm,如图 5(d)所示。当入射波长再减小 2.7 nm 时,两倍频光斑间距增加了 3 mm。

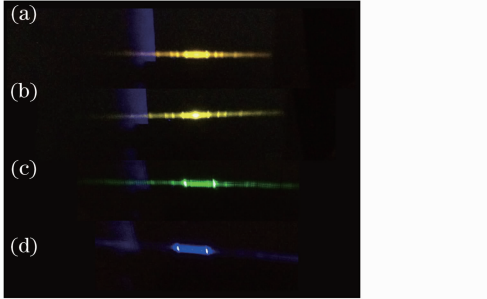


图 5 不同波长下的非共线准相位匹配倍频。  
(a) 1162.8 nm; (b) 1159.8 nm; (c) 1067 nm;  
(d) 930.5 nm

Fig. 5 Non-collinear harmonics at different incident wavelengths. (a) 1162.8 nm; (b) 1159.8 nm; (c) 1067 nm; (d) 930.5 nm

在激光入射波段 1307.6~1302.6 nm 中,从共线倍频光斑向非共线倍频光斑的转换清晰可见。该波段中的非共线准相位匹配倍频光斑不再是线状,而是呈现三角形形状。如图 6(a)给出了入射波长为 1307.6 nm 的共线倍频光斑,以及入射波长为 1306.1 nm 和 1302.6 nm 的非共线倍频光斑。其中,非共线倍频光斑对之间的间距增加了 2 mm,即由 3.5 mm 变为了 5.5 mm。值得一提的是,将晶体围绕其  $z$  轴旋转  $15^\circ$ ,也可以得到倍频输出光斑。图 6(b)给出了入射波长 1344.2 nm 下的旋转输出倍频光。其中,白色圆圈区域为旋转后的实验晶体。

### 3 结 论

在二维十二重准周期高对称性超晶格的铌酸锂非线性光子晶体中,实现红、橙、黄、绿、蓝等至少 5 个波段的非共线准相位匹配倍频光斑对。其中,最小波长的间隔仅几个纳米。上述结果对于光集成器件的发展有一定的借鉴意义。

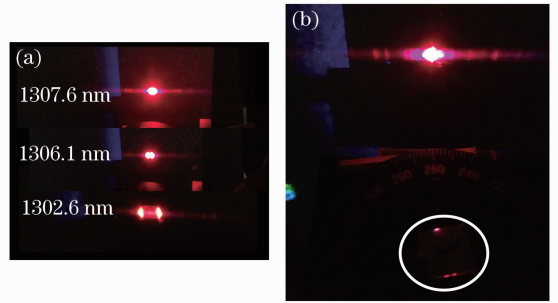


图 6 共线和非共线红光倍频输出。

(a) 1307.6, 1306.1, 1302.6 nm; (b) 1344.2 nm  
Fig. 6 Collinear and non-collinear red harmonics.  
(a) 1307.6, 1306.1, 1302.6 nm; (b) 1344.2 nm

### 参 考 文 献

- 1 V Berger. Nonlinear photonic crystals[J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(19): 4136-4139.
- 2 N G R Broderick, G W Ross, H L Offerhaus, *et al.*. Hexagonally poled lithium niobate: a two-dimensional nonlinear photonic crystal[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(19): 4345-4348.
- 3 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei, *et al.*. Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016003.
- 4 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062304.
- 5 Hongliang Ren, Jianping Ma, Hao Wen, *et al.*. Compact triplexer in two-dimensional hexagonal lattice photonic crystals [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4): 042501.
- 6 Li Xin, Yang Ming, Guo Shiliang, *et al.*. Characteristics of photonic-crystal waveguides with random media[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1006001.
- 7 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao, *et al.*. Investigation on wideband slow light based on photonic-crystal coupled waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0213001.
- 8 Ma Boqin, Wang Ting, Ni Peigen, *et al.*. High-order quasi-phase-matching harmonic generation in two-dimensional orthorhombic lattice[J]. Europhys Lett, 2004, 68(6): 804-810.
- 9 Ma Boqin, Wang Ting, Sheng Yan, *et al.*. Quasiphase matched harmonic generation in a two-dimensional octagonal photonic superlattice[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(25): 251103.

栏目编辑:王晓琰