

二维非线性光子晶体中的高阶准相位匹配谐频^{*}

马博琴[†] 王 霆 盛 艳 倪培根 程丙英 张道中

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2004 年 11 月 11 日收到; 2004 年 12 月 30 日收到修改稿)

在二维正方晶格的周期性极化铌酸锂晶体中, 通过调节基频光波长实现了皮秒光束的高阶共线及非共线准相位匹配谐频过程, 在垂直于入射光束的方向上观察到了多对红、绿、蓝三种颜色的谐频光斑. 同时, 通过改变晶体的入射角度也实现了基频光的高阶谐频过程. 实验与理论符合得很好, 这一结果对光电子集成及紧凑器件的研究发展有重要的指导意义.

关键词: 高阶准相位匹配, 二维非线性光子晶体, 频率转换

PACC: 4265K, 4270, 4262A

1. 引 言

二维非线性光子晶体的概念是由 Berger 在 1998 年提出的, 这意味着人们可以克服以往在一阶非线性光子晶体中仅能在单一方向上进行准相位匹配反应的局限, 充分利用二阶非线性极化率有规律地分布在二维平面内的优势, 实现多个方向上多种波长同时进行准相位匹配频率转换以及环形腔谐频等非线性过程^[1]. 2000 年, 首次在实验上成功地制备了二维非线性铌酸锂(LiNbO_3)光子晶体, 并对该类晶体中的准相位匹配倍频反应进行了研究^[2]. 最近, 彭隆瀚等^[3,4]证实了不同二维周期极化晶格结构中共线及高阶非共线准相位匹配倍频过程的可行性. 然而, 在以上的实验研究中最高阶的准相位匹配过程仅用到了 $(1, \pm 2)$ 阶倒格矢即 $G_{1, \pm 2}$, 二维晶体中倒格矢分布在整个空间的特点依然没有充分体现出来. 我们在二维周期极化铌酸锂非线性光子晶体中, 通过调节入射波长及入射角度实现了更高阶的共线及非共线准相位匹配二倍频及三倍频过程, 测得了一系列输出谐频光点的强度值. 调节入射光束的波长, 利用不同的频率转换过程可实现红、绿、蓝三种颜色的输出. 这些结果有助于更加紧凑结构光电子器件的研制和开发.

2. 实 验

实验中所采用的铁电材料为 z 向切割的光学级铌酸锂晶体, 利用外加高压脉冲电场的方法在室温下进行极化. 极化区内的畴实现二维周期性反转, 即二阶非线性极化率的符号发生改变^[5,6]. 反转极化的晶体厚度为 0.4 mm, 其基本结构单元为正方形, 晶格常数是 $13.64 \mu\text{m}$. 完成极化过程后的晶体在氢氟酸中浸泡约 15 min, 利用酸对晶体 $+z$ 及 $-z$ 面腐蚀速度的不同, 可使极化斑图清晰显现. 图 1 给出了二维非线性光子晶体 $+z$ 面的形貌图, 整个 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ($x-y$) 极化面内极化圆柱直径非常均匀. 极化圆柱直径为 $9.8 \mu\text{m}$, 占比约为 41%. 为了减小晶体表面对光束的损耗, 入射基频光及出射谐频光要垂直于晶体的入射面及出射面, 同时, 两表面要进行抛光达到光学级. 进行准相位匹配频率转换的基频光束由 Nd:YAG 抽运的皮秒光参量放大器生成. 放大器的输出波长可在 $0.782-1.405 \mu\text{m}$ 范围内进行调节, 重复频率和脉冲宽度分别为 10 Hz 和 9 ps. 基频光束通过焦距为 25 cm 的透镜聚焦到二维光子晶体的入射面.

3. 结果与分析

在二维周期性极化的铌酸锂晶体中, 通过调节

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号 2001CB6104)和国家自然科学基金(批准号 60345008)资助的课题.

[†] E-mail: mabq@aphy.iphys.ac.cn

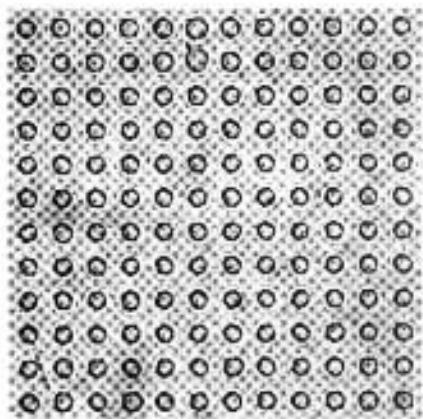


图 1 二维正方晶格周期性极化铌酸锂非线性光子晶体 $x-z$ 面的形貌图

入射基频光波长的大小,使得准相位匹配频率转换条件通过采用不同的倒格矢 $G_{m,n}$ 得以满足,以此来实现有效高阶谱频光的输出.图 2(a)(b)(c), (d)(e)和(f)对应的入射波长分别为 1.358, 1.347, 1.329, 1.306, 1.278 和 1.241 μm .在入射波长的调节过程,其入射方向始终保持不变.图 2(a)中最亮的中心红斑是波长为 1.358 μm 的基频光束通过一阶共线准相位匹配过程所产生的倍频光(波长为 679 nm),其中用到的倒格矢为 $G_{0,1}$.同时,在该中心斑的对称两侧还可清晰地看见一对红光和一对蓝光(图中用短划线标记).红光点是由 $G_{\pm 1,1}$ 阶非共线准相位匹配倍频作用产生的.与中心光斑不同的是,此时准相位匹配倍频条件并未完全得到满足,即 $\Delta k = K_2 - 2K_1 - G_{m,n}$ (K_1 和 K_2 分别为基频和倍频波矢)不为零,因此倍频输出光点较弱.蓝光点是非线性级联过程产生的三倍频输出(波长为 453 nm).级联三倍频过程包括以下两个步骤(1)入射基频光的倍频过程(2)倍频产生光与基频光的和频过程.图 3 给出了倒格矢空间级联三倍频过程的示意图,其中 K_3 为三倍频的光波矢.在以上两步过程中,实验所用到的倒格矢分别为 $G_{0,1}$ 和 $G_{\pm 4,3}$.在基频波长为 1.358 μm 时,两级联过程的准相位匹配条件均得到了满足,因此三倍频得以有效输出.随着入射波长的减小,不论是倍频光束还是三倍频光束都逐渐远离中心向两侧对称分布.图 2(b)–(f)中的准相位匹配倍频通过各自的入射基频光束和倒格矢 $G_{\pm m,1}$ ($m = 1, 2, 3, 4, 5$) 分别实现.对于图 2(b)和(c)中的三倍频过程,基频波长首先要参与 $G_{0,1}$ 阶共线准相位匹配倍频过程,其次再利用 $G_{\pm 5,3}$ 和 $G_{\pm 6,3}$ 来实现和频

过程.与图 2(a)中三倍频不同的是,此时的共线准相位匹配不再完全匹配, Δk 的存在导致较弱的三倍频输出.相应地,增加入射基频光的波长,我们可得到共线准相位三倍频的蓝光输出.我们同时给出了图 2(b)中不同光点的相对强度比(图 2(g)).从整体看,随着准相位匹配谱频过程中采用倒格矢阶数的增加,所产生谱频光的强度逐渐减小.

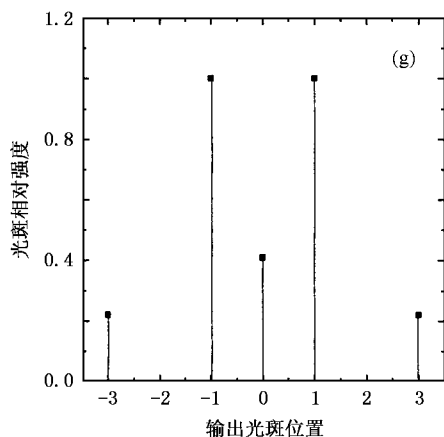
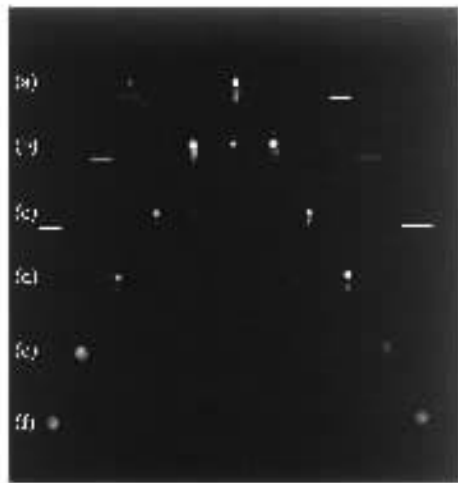


图 2 二维铌酸锂非线性光子晶体中不同波长下高阶倍频红光和级联三倍频蓝光(用短划线标记)的光斑图 (a)(b)(c), (d)(e)和(f)对应的入射波长分别为 1.358, 1.347, 1.329, 1.306, 1.278 和 1.241 μm . (g)图为(b)图中各对光点的相对强度比

继续减小入射波长,当基频波长为 1.069 μm 时,二阶共线准相位匹配倍频的条件满足,实现波长为 534.5 nm 的倍频绿光输出,如图 4(a)所示.与一阶共线准相位匹配倍频红光输出相比,此时有两对对称倍频光同时产生.这是由相位失配量 Δk 决定的, Δk 的值越小,谱频输出能量就越大.我们同时给出了图 4(a)中不同光点的相对强度比(图 4(f)).图 4(b)(c)(d)和(e)对应基频入射波长分别为

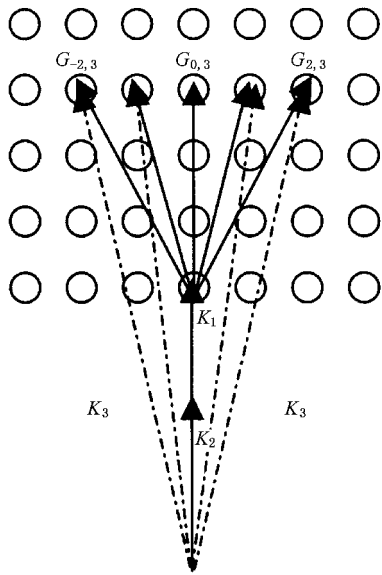


图 3 倒格矢空间中 共线及非共线级联三倍频过程的示意图

1.064, 1.059, 1.053 和 1.044 μm , 相应的倒格矢为 $G_{\pm m, 2}$ ($m = 1, 2, 3, 4$). 图 5 给出了倒格矢空间 $G_{\pm m, 2}$ 阶共线及非共线倍频的示意图. 对于不同高阶非共线谐频过程而言, 各基频波长间最小的间隔仅有几个纳米. 值得注意的是, 在同样的入射功率下, $G_{\pm 1, 2}$ 阶非共线准相位匹配倍频输出的转化效率高于 $G_{0, 2}$ 阶共线效应. 测得两者转换效率比为 1.45:1, 理论计算值为 1.6:1^[7], 可见我们的实验结果与理论计算符合得很好. 产生这一现象的原因主要归因于极化晶体圆柱直径及有效相互作用长度的大小.

在保持入射基频光波长及方向不变的情况下, 旋转晶体一定角度也可使得准相位匹配过程得以实现. 图 6 给出了晶体连续旋转一定角度后的倍频红光输出, 此时入射波长为 1.358 μm , 在调节过程中三倍频蓝光(图中用短划线标记)也同时产生. 图 6(a) 中晶体的旋转角为 0° , 采用倒格矢 $G_{0, 1}$ 实现了共线准相位匹配倍频过程, 各对光点对称地分布在中心红光斑两侧. 图 6(b) (c) 和 (d) 对应的旋转角度分别为 1.3° , 2.5° 和 4.46° , 由此实现了 $G_{\pm 1, 1}$, $G_{\pm 2, 1}$ 和 $G_{\pm 3, 1}$ 阶非共线准相位匹配倍频红光的输出. 理论计算角度分别为 1.53° , 2.88° 和 4.28° , 可见, 实验结果与理论值符合得很好. 继续旋转晶体, 可实现更高阶的倍频光输出. 随着角度的连续调节, $G_{0, 1}$ 阶谐频光斑输出强度变化不大, 这一点可由相位失配量 Δk 较小得以解释. 类似以上过程, 在基频波长为 1.069 μm 时, 旋转晶体也可得到 $G_{\pm m, 2}$ ($m = 1, 2, 3, 4, 5$) 阶

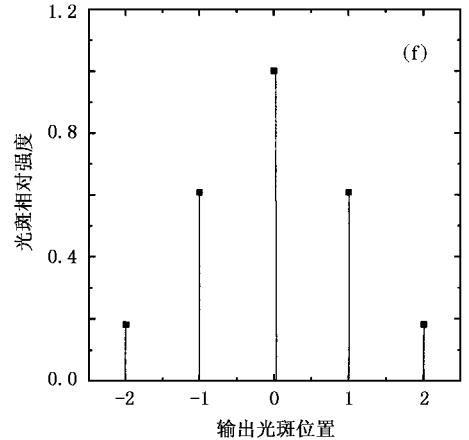
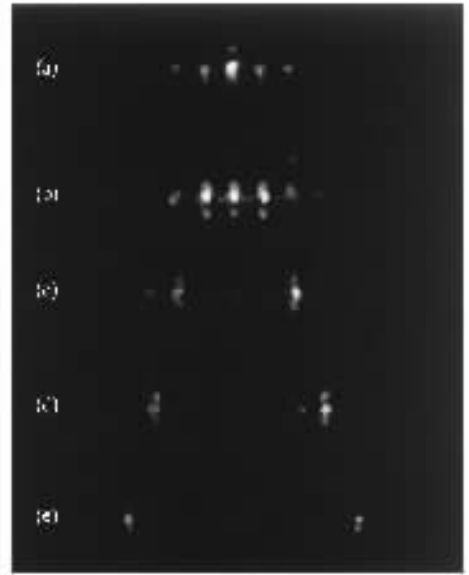


图 4 二维铌酸锂非线性光子晶体中不同波长下的高阶倍频(绿光)光斑图 (a) (b) (c) (d) 和 (e) 对应的入射波长分别为 1.069, 1.064, 1.059, 1.053 和 1.044 μm . (f) 图为 (a) 图中各对光点的相对强度比

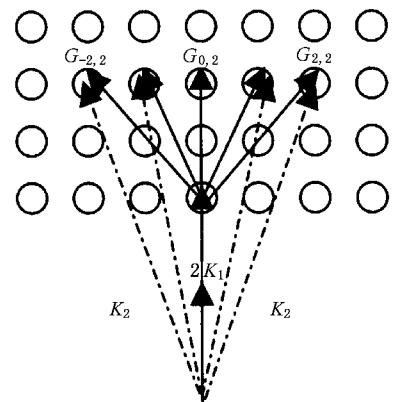


图 5 倒格矢空间中 $G_{\pm m, 2}$ 阶共线及非共线倍频过程的示意图

的一系列倍频光斑输出.

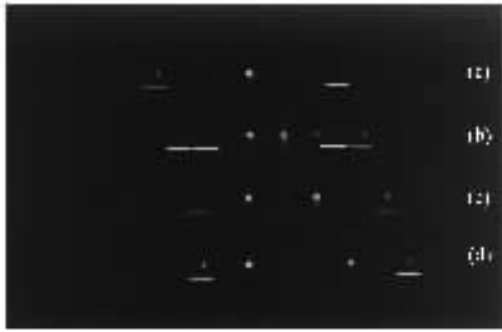


图 6 入射波长为 $1.358 \mu\text{m}$ 时旋转晶体实现高阶准相位匹配谐频过程 (a)(b)(c)和(d)对应的旋转角度分别为 0° 、 1.3° 、 2.5° 和 4.46°

4. 结 论

在二维周期极化铌酸锂非线性光子晶体中,通过调节入射基频波长的大小及其入射角度,实现了高阶共线及非共线准相位匹配倍频及三倍频输出,用到的倒格矢最高可达 $G_{\pm 6,3}$.利用不同阶数的共线匹配过程,在同一方向上实现了红、绿、蓝光的输出;不同阶数的谐频过程中入射基频光波长最小间隔可达几个纳米,且它们之间的谐频转换效率具有可比性,这些均有利于光集成技术及紧凑器件的研究与发展.

感谢中国科学院物理研究所王雪华研究员对本文提出的建议和帮助.

- [1] Berger V 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4136
 [2] Broderick N G R, Ross G W, Offerhaus H L *et al* 2000 *Opt. Lett.* **84** 4345
 [3] Peng L H, Hsu C C, Shih Y C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3447
 [4] Peng L H, Hsu C C, Ng J *et al* 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3250
 [5] Ni P G, Ma B Q, Cheng B Y *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1925

(in Chinese) 倪培根、马博琴、程丙英等 2003 物理学报 **52** 1925]

- [6] Ni P G, Ma B Q, Wang X H *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4230
 [7] Wang X H, Gu B Y 2001 *Eur. Phys. J. B* **24** 323

High-order quasi-phase matching harmonic generation in two-dimensional nonlinear photonic crystal^{*}

Ma Bo-Qin[†] Wang Ting Sheng Yan Ni Pei-Gen Cheng Bing-Ying Zhang Dao-Zhong

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 11 November 2004 ; revised manuscript received 30 December 2004)

Abstract

The high-order collinear and non-collinear quasi-phase matching harmonic generations were realized in a two-dimensional periodically poled LiNbO₃ with square lattice by tuning the input wavelength. The output spots lay at different symmetric positions with respect to the input beam of picosecond pulse, and the relative intensities of spots at certain wavelengths were measured. The high-order nonlinear harmonic processes were also realized by tuning the input angle. The experimental and theoretical results are in good agreement with each other. Our studies might be beneficial to the development of optics integration and compact devices.

Keywords : high-order quasi-phase matching, two-dimensional nonlinear photonic crystal, frequency conversion

PACC : 4265K, 4270, 4262A

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2001CB6104) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60345008).

[†]E-mail : mabq@aphy.iphy.ac.cn