

RESEARCHES ON  
NONLINEAR PHOTONIC CRYSTALS

# 非线性 光子晶体的研究

RESEARCHES ON NONLINEAR PHOTONIC CRYSTALS

马博琴 王 霆 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013056951

07  
30

# 非线性光子晶体的研究

马博琴 王 霆 著



北航

C1664495



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

07  
30

## 内 容 简 介

非线性光子晶体的研究是近年来的一个新兴课题,本书主要对一维和二维非线性光子晶体的制备和光学特性进行介绍。在非线性光子晶体中,利用准相位匹配技术,使得非线性系数较大、透光范围较宽而无法实现常规相位匹配的晶体能高效转换。并且,通过人为合理地控制畴反转周期,该技术可以实现理想的非线性相位匹配,使变频输出光的能量达到实际应用要求。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

非线性光子晶体的研究/马博琴,王霆著. —北京:北京理工大学出版社,2013. 5

ISBN 978-7-5640-7558-3

I. ①非… II. ①马…②王… III. ①非线性光学晶体-研究  
IV. ①O7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 061194 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心)  
68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通州皇家印刷厂

开 本 / 850 毫米×1168 毫米 1/32

印 张 / 7

字 数 / 169 千字

责任编辑 / 王玲玲

版 次 / 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷 责任校对 / 周瑞红

定 价 / 69.00 元

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

## 序 言

光子晶体是近十几年发展起来的一个新兴领域,制备并研究二阶非线性极化率周期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域、制作光学器件是非线性光子晶体研究的重要方向。本书对二维周期及准周期极化铌酸锂非线性光子晶体进行了系统的研究。

本书通过外加高压电场极化法制备出了二维方形及矩形周期极化铌酸锂非线性光子晶体。首先,在方形晶格晶体中,实现了纳秒脉冲下的一阶及二阶共线准相位匹配倍频。为了比较纳秒及皮秒脉冲对倍频过程的影响,还测量了皮秒脉冲下的二阶倍频过程。其次,在二维矩形晶格晶体中的两正交及对角线方向上进行不同波长的共线准相位匹配实验,实现了七种不同波长的有效倍频输出。另外,在二维方形晶体中,通过调节入射波长及入射角度实现了高阶非共线准相位匹配倍频及三倍频过程,实现了红、绿、蓝三种颜色的输出。同时,对于矩形周期晶体而言,通过调节入射基频波长的大小实现了两正交方向上的高阶非共线谐频转换。对于利用不同倒格矢的共线及非共线准相位匹配倍频输出而言,两相邻入射基频波长的最小间隔仅有几个纳米。

我们首次制备了二维八重准周期结构的铌酸锂非线性光子晶体,在该晶体的同一个方向上得到了两种波长的有效共线倍频输出,在偏离该方向  $22.5^\circ$  时,实现了另外三种波长的倍频输出。同时,在入射光束对称两侧观察到了不同种波长的非共线倍频光点。在约 460 nm 的入射波长范围内实现了十几种波长的共线及

非共线倍频输出,两邻近非共线倍频输出之间最小的波长间隔仅有 3 nm,这意味着准连续波长频率转换的实现。当晶体旋转  $45^\circ$  的整数倍时,可以得到相同的结果。

近十年来,由于外加电场极化铁电材料技术的成熟,使得准相位匹配技术成为非线性光学领域中的研究热点。目前在实验上已经成功地实现了高效率的二倍频转换,并在实验中观察到三倍频的产生,另外,非线性光子晶体还大量应用于参量振荡器中,并且在电光器件和全光开关领域崭露头角。

本书对一维非线性光子晶体的制备进行了深入的研究。针对利用液体电极极化非掺杂的  $\text{LiNbO}_3$  晶体时反转畴的侧向扩展问题,分别研究了三种不同方式布置的极化电极对非掺杂  $\text{LiNbO}_3$  晶体极化反转畴扩张的影响。实验结果表明,在相同极化条件下,当极化电极长度方向与六边形反转畴一对边呈  $90^\circ$  和  $0^\circ$  时,极化扩张速度分别为  $0.089 \mu\text{m/ms}$  和  $0.011 \mu\text{m/ms}$ 。实验结果揭示,在制备一维准相位匹配  $\text{LiNbO}_3$  晶体时,应避免极化电极与六边形畴壁中一对边呈  $90^\circ$  的情况。

针对在一维非线性光子晶体倍频实验中,基频光入射角允许范围极小的问题,本文中设计了一种半圆形的周期畴结构,若基频光从圆心入射到晶体中,则在垂直于晶体光轴的平面里,各个方向上的倒格矢都是一样的,这样就避免了由于入射基频光的偏转造成相位失配从而导致倍频转化效率的降低。在实验中,利用  $1064 \text{ nm}$  激光泵浦的可调谐光参量振荡器作为激光光源,测量了半圆形畴结构和条形畴结构在基频光波长为  $1.34 \mu\text{m}$  的倍频输出,半圆形畴结构的入射光角度允许度为  $\pm 15^\circ$ ,是条形畴结构的 11.5 倍,这种结构对于在需要多路多向的光集成器件有重要的意义。

本书还对二维非线性光子晶体进行了研究。设计了一种具有双重周期结构的二维非线性光子晶体,这种结构具有簇状的倒

格矢分布,因此可以比一般周期二维非线性光子晶体产生更多的非共线的倍频输出,并且在共线倍频中,这种结构可以扩展入射光的波长可调谐范围,实验证明其波长可调谐范围是一般周期二维结构的 5 倍。

# 目 录

## 第 1 篇 二维超晶格结构非线性光子晶体的研究

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 非线性光子晶体概论 .....         | 1  |
| 1.1 非线性光子晶体的提出及其应用 .....      | 1  |
| 1.2 非线性光子晶体的发展现状 .....        | 7  |
| 1.3 非线性光子晶体的主要制备方法 .....      | 11 |
| 第 2 章 周期非线性光子晶体理论 .....       | 14 |
| 2.1 相位匹配简介 .....              | 14 |
| 2.2 一维准相位匹配基本原理 .....         | 16 |
| 2.3 二维准相位匹配理论 .....           | 20 |
| 第 3 章 二维周期光子晶体中的共线频率转换 .....  | 24 |
| 3.1 周期非线性光子晶体的制备 .....        | 24 |
| 3.2 方形晶格光子晶体中频率转换的特性测量 .....  | 32 |
| 3.3 矩形晶格光子晶体中频率转换的特性测量 .....  | 38 |
| 第 4 章 二维周期光子晶体中的非共线频率转换 ..... | 44 |
| 4.1 方形晶格中的非共线频率转换 .....       | 44 |
| 4.2 矩形晶格中的非共线频率转换 .....       | 51 |
| 第 5 章 准周期非线性光子晶体理论 .....      | 62 |
| 5.1 准周期结构简介 .....             | 63 |
| 5.2 准周期结构中倒格矢的表示 .....        | 65 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 5.3 准周期结构中的准相位匹配倍频转换 .....                | 73  |
| 第6章 二维准周期非线性光子晶体的制备及频率转换 .....            | 76  |
| 6.1 二维八重准周期结构非线性光子晶体的制备 .....             | 76  |
| 6.2 准周期非线性光子晶体中的共线及非共线倍频转换<br>.....       | 78  |
| 第7章 二维十重和十二重准周期非线性光子晶体的研究<br>.....        | 85  |
| 7.1 二维十重准周期结构非线性光子晶体中“纯光源”<br>序列的产生 ..... | 85  |
| 7.2 二维十二重准周期结构非线性光子晶体中的光波<br>导研究 .....    | 91  |
| 第8章 二维分形非线性光子晶体的研究 .....                  | 101 |
| 8.1 二维 H 型分形超晶格结构非线性光子晶体 .....            | 101 |
| 8.2 二维谢尔宾斯基分形超晶格结构非线性光子晶体<br>.....        | 117 |
| 第9章 小结 .....                              | 123 |
| 参考文献 .....                                | 126 |

## 第2篇 准相位匹配非线性光子晶体的研究

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第10章 绪论 .....                | 141 |
| 10.1 光学非线性频率转换简介 .....       | 141 |
| 10.2 准相位匹配非线性光子晶体概念的提出 ..... | 143 |
| 10.3 准相位匹配技术及极化技术的应用 .....   | 145 |
| 10.4 非线性光子晶体的新进展 .....       | 153 |



|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 10.5 准相位匹配晶体制备方法简介 .....                                   | 156        |
| <b>第 11 章 准相位匹配光子晶体的理论 .....</b>                           | <b>158</b> |
| 11.1 一维准相位匹配基本原理 .....                                     | 158        |
| 11.2 准相位匹配技术容差分析 .....                                     | 160        |
| 11.3 二维准相位匹配理论 .....                                       | 162        |
| 11.4 准相位匹配非线性系数的傅立叶分析 .....                                | 165        |
| <b>第 12 章 非线性光子晶体的制备 .....</b>                             | <b>170</b> |
| 12.1 外加电场极化法介绍 .....                                       | 170        |
| 12.2 畴壁侧向扩张模型 .....                                        | 172        |
| 12.3 外加电场极化方法的改进 .....                                     | 175        |
| 12.4 极化电极与 $\text{LiNbO}_3$ 晶体 $x$ - $y$ 轴角度关系的研究<br>..... | 180        |
| <b>第 13 章 大角度可调谐周期极化铌酸锂晶体倍频晶体的设计<br/>.....</b>             | <b>186</b> |
| 13.1 理论分析及方案的提出 .....                                      | 186        |
| 13.2 实验实现 .....                                            | 188        |
| 13.3 实验结论 .....                                            | 190        |
| <b>第 14 章 二维双重周期非线性光子晶体的研究 .....</b>                       | <b>193</b> |
| 14.1 二维非线性光子晶体的特点 .....                                    | 193        |
| 14.2 簇状倒格矢的提出 .....                                        | 195        |
| <b>第 15 章 小结 .....</b>                                     | <b>201</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                                          | <b>203</b> |

## 第 1 篇

# 二维超晶格结构非线性光子晶体的研究

## 第 1 章 非线性光子晶体概论

为使更宽波长范围的激光都能用非线性晶体实现频率转换,除常规的相位匹配技术外,另一种方法就是准相位匹配技术,使得那些已有的非线性系数较大(如铌酸锂晶体的  $d_{33}$ ),透光范围较宽而又无法实现常规相位匹配的晶体(如铌酸锂透光范围可到  $5\text{ }\mu\text{m}$ )能实现高效频率转换。本章将介绍准相位匹配非线性光子晶体的提出、制备以及目前的发展现状。

### 1.1 非线性光子晶体的提出及其应用

在光学倍频、混频和光学参量振荡等非线性光学过程中,通常由于材料的色散关系使得基波与谐波在晶体里有着不同的相速度,从而导致能流在两波之间交替变化。能流符号的改变导致谐波强度在相互作用距离上发生周期性的增强和减弱。这就是人们通常所说的“相干长度” $L_c$ :

$$L_c = \lambda(\omega)/2[n(2\omega) - n(\omega)] \quad (1-1)$$

其中,  $n(\omega)$ ,  $n(2\omega)$  分别为基频光和倍频光的折射率;  $\lambda(\omega)$  为基频光的波长。如果能使基频光和倍频光的折射率相等,即  $n(\omega) = n(2\omega)$ , 由上述公式可知相干长度  $L_c \rightarrow \infty$ , 就能保持谐波在这个晶体里以指数方式增长, 这就是通常所说的相位匹配。

过去人们主要利用各向异性晶体的双折射,通过调节晶体的温度和入射光的取向,使得基频光和倍频光满足Ⅰ类相位匹配条件:  $n_e(2\omega) = n_o(\omega)$ , 或者满足Ⅱ类相位匹配条件:  $n_e(2\omega) = 1/2[n_o(\omega) + n_e(\omega)]$ 。但是这种利用各向异性晶体双折射特性来实现相位匹配的方法存在许多难以克服的困难,极大地限制了所用晶体范围和能量转换效率。

准相位匹配概念是在 1962 年非线性光学发展初期由 Armstrong<sup>[1]</sup> 和 Franken<sup>[2]</sup> 等人提出的一种实现激光频率转换的方法。非线性光子晶体就是利用一定的方法,将铁电晶体的非线性极化率实现周期性反转制备而成的一种晶体。它可使倍频光在晶体中传播时相位发生周期性反转,实现准相位匹配,从而使得基频光在整个晶体中保持高效率的非线性转换。激光在普通晶体里实现频率转换时,如果未满足相位匹配条件,当传播距离超过该光波的相干长度时,转换效率不能连续增加;而在准相位匹配晶体中,当传播距离达到该光波的相干长度,这时非线性极化率正好反转,使相位变化了  $\pi$ ,基本满足相位匹配条件,这样转换效率就会继续增加,从而实现高效率的变频输出。

在实现准相位匹配的条件下,二次谐波的波矢关系为

$$\Delta \vec{k} = \vec{k}_{2\omega} - 2\vec{k}_{\omega} - \vec{G}_m = 0 \quad (1-2)$$

其中,  $\vec{k}_{2\omega}$  为二次谐波的波矢;  $\vec{k}_{\omega}$  为基频光的波矢;  $\vec{G}_m$  为准相位匹配晶体的倒格矢;  $m$  为准相位匹配的阶数。在相位匹配、准相位匹配、非相位匹配三种情况下,晶体的非线性转换效率随晶体长度的变化曲线如图 1-1 所示。从图中可见,如果能在  $L_c \sim 2L_c$ 、 $3L_c \sim 4L_c$  等区间内使基波和谐波之间的相对相位反转(能流改变符号),而使谐频强度  $I_{2\omega}$  在这些本该衰减的区域得以继续增加,从而使基波更有效地转换为谐波,这就是准相位匹配技术。

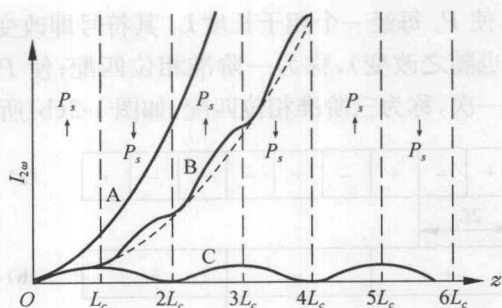


图 1-1 二次谐波强度随相互作用长度的变化曲线

A—理想的相位匹配; B—准相位匹配; C—相位不匹配

与传统的相位匹配晶体相比,准相位匹配非线性光子晶体具有如下优点:

(1) 通过人为合理控制畴反转周期,可以实现理想的非线性相位匹配,使变频输出光的能量达到实际应用要求。

(2) 准相位匹配不再要求正交光束,这意味着非线性系数不再必须是非对角线张量元,可以充分利用非线性介质的最大非线性系数,使得非线性效应得以显著提高。

(3) 准相位匹配是非临界相位匹配,不存在光走离效应,对入射角要求降低,因而可以使用较长的晶体,以获得较大的转换效率。

(4) 只需要在非线性晶体中设计出不同周期的畴反转结构,通过改变畴结构的周期和晶体温度就能方便地实现输出光波长的调谐,对透光区内任意波长的光波都不存在相位匹配的限制。

使相位反转的一个方法是改变非线性系数的符号,比如可以用非线性系数交变的薄片堆来实现,或者,在一些电致二阶非线性材料(如聚合物)中,可以利用外加电场沿相互作用方向周期性地反转来实现。在铁电晶体如铌酸锂中,一种更实用的方法是形成使自发极化率  $P_s$  呈周期性反转的区域(称为“畴”)。如图

1-2(a)所示,使  $P_s$  每经一个相干长度  $L_c$  其符号即改变一次(从而非线性系数也随之改变),称为一阶准相位匹配;使  $P_s$  的符号每隔  $3L_c$  改变一次,称为三阶准相位匹配,如图 1-2(b)所示。

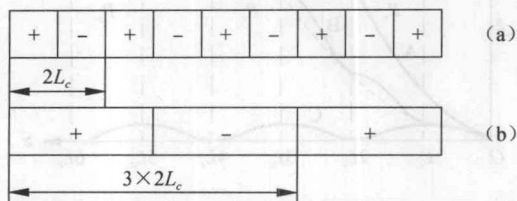


图 1-2 周期极化示意图

(a) 一阶准相位匹配; (b) 三阶准相位匹配

正是因为非线性光子晶体具有相位匹配晶体无法比拟的优点,所以在光学领域受到广泛的重视。其在光学频域的拓宽等方面有着广泛的应用,主要有光学混频<sup>[3-7]</sup>、多波长输出<sup>[8,9]</sup>、参量振荡<sup>[10-13]</sup>、激光脉冲压缩<sup>[14-16]</sup>、制作二次谐波透镜<sup>[17]</sup>等。目前许多产品已经商品化。

非线性光子晶体可应用于多波长频率转换。准周期或者非周期非线性光子晶体能够提供多个倒格矢,可以在一块晶体中实现多个波长的准相位匹配。图 1-3 为具有非周期超晶格的铌酸锂晶体

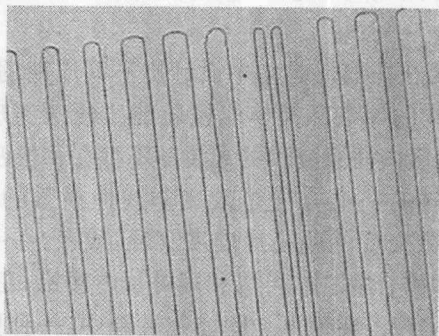


图 1-3 非周期超晶格铌酸锂晶体

晶体,图 1-4 是非周期超晶格中的倍频输出转换效率,其中,(a)为两种波长的输出,(b)为三种波长的输出<sup>[8]</sup>。

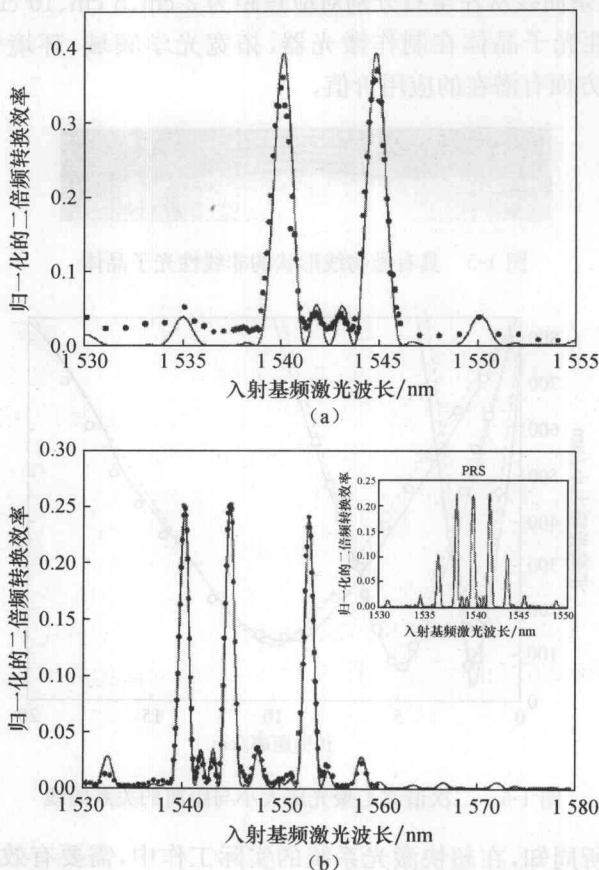


图 1-4 非周期超晶格中的两种波长及三种波长的倍频输出

非线性光子晶体还可以用于制作二次谐波透镜<sup>[17]</sup>。通过设计成抛物线形状,并且每一列之间有一定的相位差,使产生的二次谐波相互干涉,最终实现二次谐波的汇聚,使该晶体等效于一

个凸透镜,如图 1-5 所示。调整各项设计参数,可以制作出具有不同焦距的透镜,汇聚光斑大小与至晶体距离的关系曲线如图 1-6 所示(三条曲线从左至右分别对应焦距为 2 cm、5 cm、10 cm)。这种非线性光子晶体在制作激光器、拓宽光学频域、环境气体探测<sup>[18]</sup>等方面有潜在的应用价值。

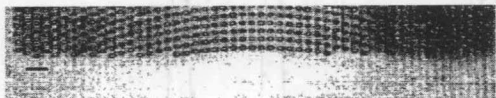


图 1-5 具有抛物线形状的非线性光子晶体

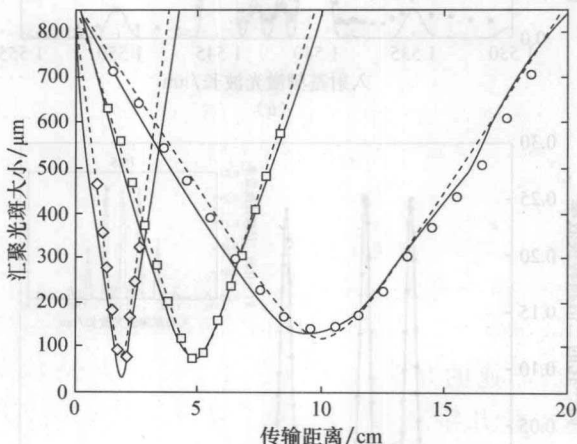


图 1-6 二次谐波汇聚光斑大小与距离的关系曲线

众所周知,在超快激光系统的实际工作中,需要有效控制啁啾超短脉冲传输过程中的色散,光脉冲压缩技术已广泛应用在超快激光系统中。以往人们普遍使用线性色散体系和 $\chi^{(3)}$ 非线性效应来实现光脉冲压缩,随着人们对准相位匹配技术认识的深入和制备工艺的成熟,理论研究和实验结果都表明只要设计啁啾准相位匹配周期与输入脉冲相位匹配,超快脉冲激光通过简单的啁啾

准相位匹配晶体,就能在完成频率转换的同时实现光脉冲的压缩和放大。同传统的衍射光栅和棱镜实现超快脉冲分离压缩相比,啁啾准相位匹配晶体不仅能使光脉冲压缩器更紧凑、轻巧,操作更方便,而且能完成高能量光脉冲处理,这是一个全新的飞跃。

## 1.2 非线性光子晶体的发展现状

虽然准相位匹配概念在 1962 年就已经提出,但是由于当时技术的限制,准相位匹配技术一直没有得到发展。到 80 年代末期,随着高压极化制备技术的成熟,开始成功制备周期反转的准相位匹配铁电光子晶体,并且在 90 年代得到了迅速发展。周期性极化的铌酸锂晶体(PPLN)<sup>[19,20]</sup>、周期性极化的钽酸锂晶体(PPLT)<sup>[21,22]</sup>、周期极化的磷酸钛氧钾晶体(PPKTP)<sup>[23,24]</sup>以及周期性极化的铌酸钾晶体(PPKN)<sup>[25]</sup>相继出现,后来又发展到掺金属氧化物的 PPLN<sup>[26,27]</sup>等。在超晶格的设计上也是从周期性逐步向准周期以至于非周期发展<sup>[9]</sup>。光学变频也从产生二次谐波向产生三次谐波<sup>[6]</sup>,从产生一个频率转换向多频率转换发展。其中,发展最迅速的是利用非线性光子晶体产生光参量振荡(OPO)<sup>[28]</sup>。十几年来,非线性光子晶体主要向如下几个方向发展:

(1) 寻找新的铁电晶体极化材料,以降低极化电压,提高转换效率,提高损伤阈值,延长晶体的使用寿命。

(2) 极化制作更厚、更长的非线性光子晶体,提高晶体的通光孔径,提高变频功率。

(3) 完备和发展极化技术,极化更短的极化周期,向蓝光和紫光方向发展,拓宽光学频域。

(4) 极化周期从周期性向准周期和非周期方向发展,设计合



适的晶格周期,在一块晶体上实现多波长的有效倍频输出。

(5) 从一维准相位匹配向二维准相位匹配发展,利用二维极化晶格提供更丰富的倒格矢,实现多波长、多方向的倍频。

(6) 推动非线性光子晶体向实用化、商品化发展。

(7) 探索一定结构的光子晶体,实现更宽波长范围内准连续及连续波长的谐频输出。

目前极化的铁电晶体的内部矫顽场强都比较高(21 kV/mm),在极化时需要加较高反转电压才能实现畴反转。这给极化技术带来困难,在高压下晶体易被击穿或者出现高压放电现象。对极化晶体进行加热极化虽然能够降低极化电压,但是这给晶体的极化装置以及极化技术带来诸多不便。掺杂少量金属氧化物的铁电晶体是目前较好的研究目标,如掺氧化镁的铌酸锂晶体以及掺氧化锌的铌酸锂晶体<sup>[29]</sup>,其极化电压要比普通铌酸锂晶体低约一个量级,并且这些晶体的损伤阈值比纯的晶体高得多。

由于受晶体矫顽电场的限制,晶体极化厚度被限制在0.5 mm内。日本一家公司通过改善极化技术,极化成功了厚度为1 mm的普通铌酸锂晶体<sup>[30]</sup>。另外,可通过在晶体生长过程中改变晶体成分比例,生长出具有理想配比的铌酸锂晶体(Stoichiometric,  $\text{LiNbO}_3$ )。这种晶体的极化电压要比普通铌酸锂晶体低20倍,目前最大极化厚度可达3 mm<sup>[27,31]</sup>。

准相位匹配的重要用途就是拓宽光学频域,理论上能够实现晶体所允许的通光范围内任意波长的光。但是受极化技术限制,目前极化更短周期非常困难。科研工作者正在努力提高极化技术,向极化最短周期的极限挑战。目前获得的最短周期约为1.5  $\mu\text{m}$ ,所产生的二次谐波波长为342 nm<sup>[32,33]</sup>。简便轻巧的短波段激光器如能实现商品化,必将在高密度光存储、生物医学等方面做出重大贡献。极化晶体的长度也越来越长,目前极化的长度为6.45 cm,在该晶体中观测到了99%的泵浦能量