

PPLN 准相位匹配技术在蓝绿激光器及中红外 OPO 中的应用进展

苏少昌^{1,2}, 李德胜^{1,2}, 梁 栋³, 王 军³, 宋文武⁴, 王希军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 广州南沙资产经营有限公司, 广东 广州 511457;

4. 江苏曙光光学电子仪器厂, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 以 PPLN、PPMgLN、PPKTP 等为代表的周期极化工艺的成熟, 极大地促进了准相位匹配技术的发展, 拓宽了非线性晶体应用范围, 大大提高了频率转换效率。周期极化晶体与其它非线性晶体结合, 利用倍频、差频、混频、OPO 等技术是实现激光波长拓宽的一种非常有效的手段。本文阐述了 QPM PPLN 在蓝绿激光器及中红外 OPO 的应用进展, 展望了 PPLN 的应用发展趋势。

关键词: 准相位匹配; PPLN; OPO; 非线性晶体

中图分类号: O734.1

文献标识码: A

Development of Blue, Green Lasers and Mid-infrared OPO on QPM PPLN

SU Shao-chang^{1,2}, LI De-sheng^{1,2}, LIANG Dong³, WANG Jun³, SONG Wen-wu⁴, WANG Xi-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Guangzhou Nansha Assets Operation Co., Ltd. Guangzhou 511457, China;*

4. *Jiangsu Shuguang Optics and Electronic Instrument Plant, Yangzhou 225000, China)*

Abstract: The development of period-polarization technology in PPLN, PPMgLN, PPKTP crystals, which greatly promoted the quasi-phase-matching technology, and broadened the scope of application of nonlinear crystal, greatly improving the efficiency of frequency conversion. Frequency doubling, difference frequency generation and OPO using periodically poled nonlinear crystals combined with other nonlinear crystals was a very effective means to broaden

the wavelength of the laser. The application of QPM PPLN to the blue-green lasers and mid-infrared OPO were introduced, and the development trend of PPLN application was prospected in the paper.

Keywords: quasi-phase-matching; PPLN; OPO; nonlinear crystal

1 引言

现代光学技术的发展,对激光提出了更新更高的要求。拓宽激光输出波长范围,最常用、最有效的方法之一,就是利用非线性晶体的频率变换技术。由于常规的相位匹配(PM)存在着双折射走离效应、转换效率低、运转阈值高等缺点,阻碍了常规相位匹配(PM)在非线性频率变换的应用。基于QPM技术的光学器件,由于能最大限度地利用非线性光学晶体的有效非线性系数,并能实现所选定方向的匹配,使其具有转换效率高、体积小、使用方便等特点^[1]。以PPLN、PPMgLN、PPKTP等为代表的周期极化工艺的成熟,极大地促进了准相位匹配技术的发展,使得倍频、差频、混频、光学参量振荡(OPO)的应用更加广泛;OPO具有波长覆盖范围宽、调谐范围大、调谐方便,且适于小型化和固体化等优点^[2-5],为激光频率变换提供了美好的前景。由于准相位匹配技术有其独特的技术优势,解决了常规相位匹配(PM)难以解决的问题,拓宽了非线性晶体应用范围,极大地提高了频率转换效率,已成为非线性光学材料和固体激光器等诸多领域的研究热点之一。

2 PPLN的制备

实现晶体的周期极化的方法有多种,主要包括:钛扩散法、Cozhearlski提拉法、快速热处理后 Li_2O 外扩散法与质子交换法、电子束扫描法、外加电场极化法等。外加电场极化法是目前被公认为最行之有效的方法之一,而其它方法存在着极化浓度浅或极化时间长等缺点。典型的外加电场制备PPLN装置如图1所示。

外加电场极化法具有3个主要的优点:1.畴反转深度可以贯穿铌酸埋晶片的厚度;2.畴反转边界区域与铌酸埋晶体的Z轴平行;3.畴的宽度可以小

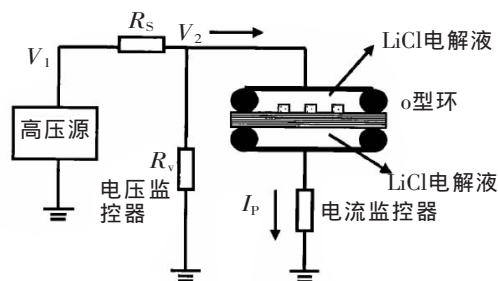


图1 周期极化装置图

到几个微米,甚至可以达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下。另外还具有能够在室温下极化反转、重复性好、工艺简单等优点。

3 PPLN准匹配技术在蓝绿光激光器中的应用

利用周期极化晶体实现全固态激光器的准相位匹配倍频是获得短波长激光输出的一种非常有效的方法。V. Pruneri等最早报道了基于PPLN晶体的 $1\text{ }064\text{ nm}$ Nd:YAG激光器的内腔倍频(ISHG),在 450 mW 的抽运功率下,仅获得了 $400\text{ }\mu\text{W}$ 的连续绿光输出^[6]。这是准相位匹配内腔倍频的首次探索性实验。1997年,Arie等人用厚 0.5 mm 、长 10 mm 、铁电畴极化反转周期 $9.0\text{ }\mu\text{m}$ 的周期性极化KTP(PPKTP),将 225 mW 连续YAG的 $1\text{ }064\text{ nm}$ 激光倍频为 1235 mW 的 530 nm 激光,倍频转换效率为 55% ^[7]。英国Southampton大学在大的模体积的掺铒光纤系统中,用周期性极化 LiNbO_3 (PPLN)对 $180\text{ }\mu\text{J}$ 的基波进行倍频,二倍频效率达 83% ,三倍频效率达 34% ^[8]。同年,Miller等人完善了 $6.5\text{ }\mu\text{m}$ 畴周期、 53 mm 长、 0.5 mm 厚的PPLN的制备过程,在 6.5 W 单通连续 $1\text{ }064\text{ nm}$ Nd:YAG激光泵浦下,产生了 2.7 W 532 nm 的倍频绿光输出,谐波转换效率为 42% ,为抑制光折变的破坏作用,相位匹配的温度选择在

200 °C^[9]。2000 年, S. Wang 等利用 PPKTP 晶体实现了 1 064 nm Nd:YVO₄ 薄盘激光器的内腔倍频, 在 8.65 W 的抽运功率下获得了 1.3 W 的倍频绿光, 光-光转换效率为 15%^[10]。2004 年, S. Greenstein 等利用 PPKTP 晶体实现了 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器的内腔倍频, 抽运功率为 14 W 时获得了最大 2.3 W 的绿光输出, 在抽运功率为 12.3 W 时, 最大光-光转换效率为 17%^[11]。

1999 年, 天津大学采用外加电场极化法实现了 LiNbO₃ 晶体的周期性极化, 并制备出周期为 9.5 μm 的三阶准相位匹配周期性极化 LiNbO₃ 晶体 (PPLN); 用连续钛宝石激光器做基频光源, 对准相位匹配周期性极化 LiNbO₃ 进行了光学倍频实验, 得到了 12 μW 的蓝光输出^[12]。2001 年, 上海交通大学通过高压脉冲电场极化, 制备了周期为 6.5 μm 、长为 12 mm、宽为 10 mm、厚为 0.5 mm 的一阶准相位匹配周期性极化铌酸锂; 由 1.1 W 连续 1.06 μm Nd:YAG 激光器抽运, 在 5 °C 时产生了约 18 mW、0.532 μm 的倍频连续绿光^[13], 其对应的二次谐波转换效率约为 1.6%, 二次谐波的归一化转换效率约为 1.5% $\text{cm}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 相当于 79% 的周期性极化铌酸锂的理想非线性系数。2004 年, 他们又在周期为 14.5 μm 的周期性极化铌酸锂中, 利用一阶 I 型准相位匹配获得了蓝光二次谐波输出。在 150 °C 下, 由 114 μJ 抽运光得到了 52 μJ 、0.473 μm 倍频蓝光, 对应于平均最大转换效率 45.6%^[14]。实验结果表明了在周期性极化铌酸锂中准相位匹配倍频的偏振相关性。2003 年, 南开大学的陈云琳等人在室温下通过外加电场极化法, 首次用较低的极化开关电场~5.5 kV/mm, 在厚为 1 mm、长为 20 mm、宽为 18 mm 的掺镁铌酸锂基片上成功

地制备了周期为 4.8~5.2 μm 的一阶准相位匹配倍频光学微结构; 并在室温下以波长为 980 nm 的半导体激光器为基频光源, 对所研制的微结构样品进行倍频通光实验, 在入射基频光为 800 mW 时, 产生约 40 mW 的 490 nm 的倍频光, 其对应转换效率为 5%^[15]。2004 年, 他们在相同的条件下, 在厚 1 mm、长 10 mm、宽 10 mm 的掺镁铌酸锂基片上成功地制备了周期为 5.8~7.3 μm (间隔 0.3 μm) 的一阶准相位匹配倍频周期性极化光学微结构。将温度控制在 70 °C 左右, 以波长为 1.064 μm 的 Nd:YAG 激光为基频光源, 对该光学微结构样品进行了倍频通光实验。当入射基频光为 920 mW 时, 获得了约 15 mW 的 532 nm 准连续倍频蓝光输出, 其归一化转换效率达 1.77 %/W^[16]。2005 年, 上海光机所的董景星、楼祺洪等利用波导型准相位匹配周期极化反转铌酸锂 (PPLN) 晶体直接倍频波长为 976 nm 的连续半导体激光二极管, 在最佳晶体工作温度(28 °C)下, 获得了波长为 488 nm 的连续蓝光输出, 最大输出功率>20 mW。所用的晶体尺寸为 8 mm×1.4 mm×1 mm, 波导截面为 4.5 μm ×3.5 μm , 极化周期为 5.2 μm ^[17]。

将周期性极化晶体和光纤激光相结合获得倍频激光输出, 是实现高光束质量、全固化、小型化、高效率激光器的一个非常有前途的方向。2003 年, 上海光机所朱晓崢等人, 采用极化周期 6.5 μm 、长 20 mm、宽 5 mm、厚 0.5 mm 的周期性极化铌酸锂晶体 (PPLN) 对种子光注入式掺 Yb 双包层光纤激光器的准连续输出进行了倍频。保持 PPLN 的控制温度为 193.1 °C, 在抽运功率为 650 mW 时, 得到 6.7% 的最高谐波转换效率; 在抽运功率为 970 mW 时, 得到了 59 mW 的最高绿光功率输出^[18]。2005 年, 英国 J.R.Taylor 小组把皮秒光纤脉冲光源和 PPKTP 波导相结合, 获得了 660 nm 的倍频红光^[19]; 法国 A.Bouchier 等用掺镱光纤激光光源, PPMgLN 波导倍频, 得到了 83 mW 的 489 nm 激光, 内部转换效率达 26%^[20]。2006 年, 英帝国大学 J.R.Taylor 小组对 PPKTP 波导倍频皮秒掺镱光纤光源进行了研究, 获

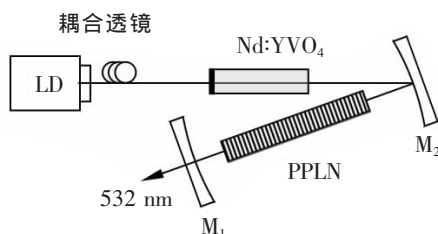


图2 内腔倍频实验装置

得了黄绿光^[21]。2006年,美国Stanford大学用1 150 nm 掺镱光纤光源及PPLN波导倍频得到了黄光^[22]。

4 PPLN 应用于中红外波段 OPO

光学参量振荡器(OPO)作为一种可调谐、高相干光源能实现传统激光所达不到的光波辐射而引起了人们广泛的兴趣。OPO以其宽调谐范围、高效率、高功率、高重复频率及小型固体化等特点在激光雷达、激光测距、大气污染检测及光电对抗等领域显示出越来越广泛的应用前景。

OPO有效运转,不仅取决于泵浦光的光束质量及光谱特性,而且也和非线性晶体材料有关。自从1965年Giordmaine和Miller设计出第一个OPO原型以来^[23],由于缺少合适泵浦光源和良好光学特性及高损伤阈值的非线性晶体材料而阻止了OPO实际应用的发展。高非线性系数的PPLN晶体和长的相互作用长度的出现,使OPO利用传统的连续固体激光源获得了前所未有的功率水平和转换效率。1996年,Bosenberg首次报道了采用环形腔实现高功率中红外PPLN OPO,实验装置如图3所示。高功率LD泵浦的Nd:YAG激光抽运50 mm长的PPLN晶体,在泵浦功率13.5 W时,中红外3.25~3.95 μm CW SRO输出功率达到3.6 W^[24]。Van Herpen也使用环形腔实现了2.6~4.7 μm 可调谐输出,2.9 μm 最大3 W和3.9 μm 的1.2 W输出^[25]。2006年,日本的Saikawa通过使用2块长度为36 mm、通光孔径5 mm×5 mm的周期极化MgO:LiNbO₃,1个用于主参量振荡腔,1个用于参量振荡放大腔,用频率30 Hz、脉宽10 ns的Nd:YAG

激光器泵浦,获得了单脉冲能量最大为74 mJ和107 mJ的输出,斜效率75%,线宽2 nm^[26];2007年,他们又用VBG选频,获得了线宽<1.4 nm、单脉冲能量61 mJ的输出^[27]。2009年,韩国的Dong-Hoon Lee小组使用532 nm的连续半导体泵浦固态激光器泵浦MgO:PPLN晶体,实现了信号光800~920 nm可调、闲频光1 250~1 580 nm可调谐输出^[28]。

1998年,Stothard通过PPLN内腔泵浦设计,利用1 W的LD泵浦Nd:YVO₄,实现了70 mW的中红外输出功率,光谱覆盖范围为3.16~4.02 μm ,LD泵浦功率阈值为310 mW,首次实现了CW SRO低阈值运转^[29]。简单、紧凑、全固态的IC-SRO设计成功得到了验证。基于PPLN的CW OPO也能够PE-SRO设计中实现。LD泵浦单频微型Nd:YAG激光做泵浦源,当泵浦功率为800 mW时,PE-SRO OPO获得140 mW的闲频光输出,其波长覆盖范围为2.29~2.96 μm ,外泵浦功率阈值为250 mW,通过温度和极化周期调谐波长。最近,CW单频Ti:sapphire激光抽运PE-SRO PPLN,OPO调谐范围为4.07~5.26 μm ^[30]。

5 结 论

QPM技术以其独有的技术优势解决了常规PM难以解决的问题,特别是以PPLN、PPMgLN、PPKTP等为代表的周期极化工艺的成熟,极大地促进了准相位匹配技术的发展,拓宽了非线性晶体的应用范围,大大提高了频率转换效率。周期极化晶体与其它非线性晶体结合,利用倍频、差频、混频、OPO等技术是实现激光波长拓宽的一种非常有效的手段。高效便捷的二极管泵浦激光器与具有同样优点的周期极化准相位匹配技术相结合,已成为发展全新紧凑型固体激光器的一种趋势。随着周期极化技术的进一步成熟,大孔径通光周期极化晶体的制备将成为可能,这种制备工艺简单、成本低廉、转换效率高、操作方便的准相位匹配可调谐光子学器件必将开拓出新的应用领域。

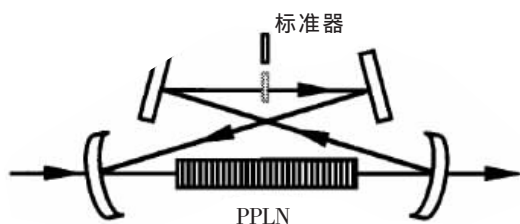


图3 OPO环形腔实验装置

参考文献

- [1] 蔡双双,吴波,徐海斌,等.基于 PPMgLN 晶体的红外光参量振荡器研究 [J].红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 338-34.
- [2] Mayers L E, Eckardt R C, Fejer M M, *et al.* Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, 12(11): 2102-2116.
- [3] Bisson Scote E, Armstrong Karla M, Kulp Thomas J, *et al.* Broadly tunable, mode-hop-tuned cw optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(33):6049-6055.
- [4] Byer Robert L. Quasi-phase-matched nonlinear interaction and devices [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. & Materials*, 1997, 6(4): 549-592.
- [5] 陈云琳,罗勇锋,郭娟,等.准相位匹配 LiNbO₃ 波导全光波长变换的理论研究 [J].红外与毫米波学报, 2004, 23(5):367-370.
- [6] Pruneri V, Webjorn J, Russell P St J, *et al.* Intracavity second harmonic generation of 0.532 μm in bulk periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Commun.*, 1995, 116(13):159-162.
- [7] Arie A, Rosenman G, Korenfeld A, *et al.* Efficient resonant frequency doubling of a cw Nd:YAG laser in bulk periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(1): 28-30.
- [8] Taverner D, Britton P, Smith P G R, *et al.* Highly efficient second-harmonic and sum-frequency generation of nanosecond pulse in a cascaded erbium-doped fiber: Periodically poled lithium niobate source[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(3):162-164.
- [9] Miller G D, Batchko R G, Tulloch W M, *et al.* 42% efficient single pass cw second harmonic generation in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt Lett.*, 1997, 22(24):1834-1836.
- [10] Wang S, Pasiskavecicius V, Laurell E, *et al.* Intracavity frequency doubling of Nd:YVO₄ disk laser with periodically poled KTiOPO₄ [C]//Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest, 2000.
- [11] Greenstein S, Rosenbluh M. Dynamics of cw intra-cavity second harmonic generation by PPKTP [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 238(4-6):319-327.
- [12] 于建,倪文俊,李世忱,等.准相位匹配 LiNbO₃ 蓝光倍频器的研究 [J].光学学报, 2000, 20(3):410-413.
- [13] 陈玉萍,陈险峰,曾祥龙,等.一阶准相位匹配周期性极化铌酸锂倍频产生 18 mW 绿光连续输出 [J].光学学报, 2002, 22(4):399-401.
- [14] 陈玉萍,陈险峰,曾祥龙,等.I 型准相位匹配周期性极化铌酸锂倍频蓝光输出 [J].光学学报, 2004, 24(6):813-816.
- [15] 陈云琳,郭娟,刘晓娟,等.准相位匹配周期极化掺镁铌酸锂 490 nm 倍频连续输出 [J].光子学报, 2005, 33(1): 29-31.
- [16] 陈云琳,罗勇锋,袁建伟,等.准相位匹配周期极化高掺镁铌酸锂 532 nm 倍频连续输出研究 [J].光学学报, 2005, 25(1):63-66.
- [17] 董景星,楼祺洪,成序三,等.半导体激光直接倍频的 488 nm 蓝光激光器 [J].光学学报, 2006, 26(4):567-570.
- [18] 朱晓峥,周军,楼祺洪,等.准连续双包层光纤激光在周期性极化铌酸锂晶体中倍频产生 59 mW 绿光 [J], 中国激光, 2004, 31(7):777-779.
- [19] Chestnut D A, Popov S V, Taylor J R. Red picosecond pulses generated by frequency doubling a Raman amplified widely tunable 1.3 μm fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(20):2769-2771.
- [20] Bouchier A, Lucas Leclin G, Georges P. Frequency doubling of an efficient continuous wave single-mode Yb-doped fiber laser at 978 nm in a periodically-poled MgO:LiNbO₃ waveguide [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(18):

6974-6979.

- [21] Chestnut D A, Popov S V, Taylor J R. Second-harmonic generation to the green and yellow using picosecond fiber pump sources and periodically poled waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:071113.
- [22] Supriyo Sinha, Carsten Langrock, Michel J.F. Digonnet, *et al.* Efficient yellow light generation by frequency doubling a narrow linewidth 150 nm ytterbium fiber oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(3): 347-349.
- [23] Giordmaine J A, Miller R C. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO_3 at optical frequencies [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, 14(24): 973-976.
- [24] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J, *et al.* 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21:1336-1338.
- [25] Van Herpen M M J W, Bison S E, Ngai A K Y, *et al.* Combined wide pump tuning and high power of a continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, 78: 281-286.
- [26] Saikawa J, Fujii M, Ishizuki H. 52 mJ narrow-bandwidth degenerated optical parametric system with a large-aperture periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ device [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31: 3149-3151.
- [27] Saikawa J, Fujii M, Ishizuki H. High-energy, narrow-bandwidth periodically poled Mg-doped LiNbO_3 optical parametric oscillator with a volume Bragg grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32: 2996.
- [28] Dong-Hoon Lee, Seung Kwan Kim, Seung-Nam Park, *et al.* Continuous-wave 532 nm pumped $\text{MgO}:\text{PPLN}$ optical parametric oscillator with external power regulation and spatial mode filtering [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48:37-42.
- [29] Stothard D J M, Ebrahimzadeh M, Dunn M H. Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23: 1895-1897.
- [30] Turnbull G A, McGloin D, Lindsay I D, *et al.* Extended mode-hop-free tuning by use of a dual-cavity, pump-enhanced optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25:341-343.