

基于 MgO:QPLN 的多光参量振荡器电场调谐特性理论与实验研究

于永吉 陈薪羽 成丽波 王超 吴春婷 董渊 李述涛 金光勇

Electric field tuning characteristic of multiple optical parametric oscillator based on MgO:QPLN

Yu Yong-Ji Chen Xin-Yu Cheng Li-Bo Wang Chao Wu Chun-Ting Dong Yuan Li Shu-Tao Jin Guang-Yong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[高效率内腔式 2 \$\mu\text{m}\$ 简并光学参量振荡器](#)

[High-efficiency intracavity 2 \$\mu\text{m}\$ degenerate optical parametric oscillator](#)

物理学报.2015, 64(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084207>

[基于 MgO:APLN 的多光参量振荡器实验研究及其逆转换过程演化分析](#)

[Experimental study of multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN and its evolution analysis of back conversion](#)

物理学报.2015, 64(4): 044203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044203>

[高功率红光至中红外可调谐腔内和频光学参量振荡器](#)

[High power red to mid-infrared laser source from intracavity sum frequency optical parametric oscillator pumped by femtosecond fiber laser](#)

物理学报.2014, 63(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054205>

[光纤参量放大增益谱边带快慢光特性研究](#)

[Characteristics of the slow and fast light in the band-edge of gain spectrum of the fiber-optic parametric amplification](#)

物理学报.2014, 63(4): 044203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044203>

[级联参量振荡产生太赫兹辐射的理论研究](#)

[Theoretical research on terahertz wave generation based on cascaded parametric oscillation](#)

物理学报.2013, 62(8): 084212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084212>

基于MgO:QPLN的多光参量振荡器 电场调谐特性理论与实验研究*

于永吉¹⁾ 陈薪羽¹⁾ 成丽波²⁾ 王超¹⁾ 吴春婷¹⁾ 董渊¹⁾
李述涛¹⁾ 金光勇^{1)†}

1)(长春理工大学理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)

2)(长春理工大学理学院, 工科数学基础教学部, 长春 130022)

(2015年1月23日收到; 2015年3月28日收到修改稿)

报道了基于掺氧化镁准周期极化铌酸锂 (MgO:QPLN) 的多光参量振荡器电场调谐特性理论与实验研究. 通过对电场调谐能力与极化结构参数间关联性的理论分析, 确定了高正负晶畴比 MgO:QPLN 电场调谐的可行性, 并模拟得到跨周期参量光输出波长与加载电压的关系曲线. 实验中通过对 MgO:QPLN 有效的电场加载, 实现了 3.84 μm 波段参量光的电场调谐, 频谱调谐带宽约 6 nm, 调谐速率接近 1 nm/kV, 进一步结合温度调谐, 实现了参量光谱段高精度的连续调谐. 所获得实验结果与理论模拟结果基本符合, 电场调谐在精度控制、快速响应方面相比于传统温度调谐更具技术优势.

关键词: 准相位匹配, 多光参量振荡器, MgO:QPLN, 电场调谐

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Lm, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.64.164208

1 引言

波长位于 1.5 μm 附近人眼安全波段及 3—5 μm 中红外波段的可调谐红外相干光源在军事、医疗、通信等领域均有着重要应用. 目前, 基于准相位匹配技术 (quasi-phase matching, QPM), 以极化型晶体作为变频介质的光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 是获得这两个波段可调谐激光的主要技术手段^[1-4], 尤其近年来通过将极化结构形式由周期拓展至准周期、非周期, 形成多个倒格矢补偿多重相位失配的多光参量振荡器 (multi optical parametric oscillator, MOPO), 更是成为 QPM-OPO 的新兴研究热点, 这种新体制 OPO 能够实现同谱区以及跨周期多波长可调谐激光输出.

频谱调谐性能作为衡量光学参量振荡器的重

要指标之一, 是 QPM-OPO 除在运转体制外另一被广泛关注的研究热点. 目前针对 QPM-OPO 的调谐手段无外乎抽运波长调谐、周期调谐、温度调谐和角度调谐^[5-8], 这四种调谐原理上都是通过改变三波在极化晶体内的折射率实现的, 虽然在调谐方式上相比于传统 OPO 腔内插入选频元件 (闪耀光栅^[9]、标准具等^[10]) 的机械调谐更加简单、灵活, 但在频谱调谐的快速响应、高精度控制方面却仍未得到有效改善. 以最为广泛应用的 MgO:PPLN 温度调谐为例, 通常很难在室温条件下实现恒温控制, 而由高温返回低温的过程中又需要很长的降温时间. 针对上述问题, 本文基于 LiNbO₃ 材料的线性电光效应, 理论分析了通过对极化 LiNbO₃ 外部施加特定方向的电场进而实现参量光波长调谐的可行性, 根据理论分析结果及掺氧化镁准周期极化铌酸锂 (MgO:QPLN) 的极化结构特点, 提出电场调

* 国家自然科学基金 (批准号: 61240004)、吉林省中青年科技领军人才及优秀创新团队培育计划 (批准号: 20121815) 和吉林省青年科研基金 (批准号: 20150520103JH) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yyjcust@163.com

谐 MgO:QPLN-MOPO, 实验在获得跨周期参量光输出的同时, 实现了闲频光带宽约为 6 nm 的频谱调谐, 调谐速率接近 1 nm/kV, 进一步结合温度调谐, 实现了闲频光宽谱段高精度的连续调谐, 实验结果所得结论与理论分析结果基本符合.

2 MgO:QPLN 电场调谐理论分析

LiNbO₃ 作为极化晶体的基质材料, 除了具有优异的非线性光学性能外, 还具有优秀的电光性能. 当在 LiNbO₃ 晶体 z 向 (晶体上、下表面) 加载电场时, 其折射率椭球方程为^[11]

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E\right)(x^2 + y^2) + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E\right)z^2 = 1, \quad (1)$$

式中 n_o , n_e 分别为未加载电场前的 o 光与 e 光折射率, 电光系数 $r_{13} = 9.6$, $r_{33} = 30.9$ (单位 10^{-12} m/V) 推导得到 o 光及 e 光折射率与外加电场 E 的关系可近似表示为

$$n_o(E) \approx n_o - \frac{1}{2}n_o^3 r_{13}E, \quad (2)$$

$$n_e(E) \approx n_e - \frac{1}{2}n_e^3 r_{33}E. \quad (3)$$

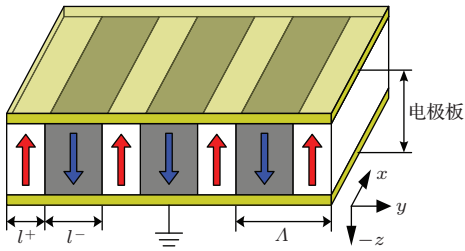


图1 (网刊彩色) 极化 LiNbO₃ 晶体外加 z 向电场结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the polarization LiNbO₃ with z -direction electric field.

根据上述 LiNbO₃ 材料的线性电光效应, 将该电光效应应用于极化 LiNbO₃ 晶体中, 如图 1 所示, 由于极化 LiNbO₃ 晶畴极化方向为正 z 与负 z 向交替排列, 此时对其 z 向施加电场, 不同极化方向晶畴所感应的电场方向正好相反, 与施加电场同向晶畴的折射率随施加电场变小, 等效光程缩短, 反之则增加, 最终产生高、低折射率等比交替排列结构. 根据 (3) 式, 该正、负晶畴内 e 光折射率变化可表示如下:

$$n_{\omega_i}^+(E) = n_{\omega_i} - \frac{1}{2}n_{\omega_i}^3 r_{33}E, \quad (4)$$

$$n_{\omega_i}^-(E) = n_{\omega_i} + \frac{1}{2}n_{\omega_i}^3 r_{33}E, \quad (5)$$

式中 $n^+(E)$ 为正晶畴施加 z 方向电场 E 后 e 光折射率, $n^-(E)$ 为负晶畴施加 z 方向电场 E 后 e 光折射率, n_{ω_i} 为未施加 z 方向电场前 e 光折射率, $i = 1, 2, 3$, 分别对应信号光 λ_1 、闲频光 λ_2 以及抽运光 λ_3 . 令 l^+ 为正晶畴长度, l^- 为负晶畴长度, 由准相位匹配条件:

$$\Delta k = k_{\omega_3} - k_{\omega_1} - k_{\omega_2} - \frac{2m\pi}{(l^+ + l^-)} = 0, \quad (6)$$

式中 Δk 为相位失配量; k_{ω_1} , k_{ω_2} , k_{ω_3} 为信号光 λ_1 、闲频光 λ_2 以及抽运光 λ_3 的波数; m 为非线性光学频率变换阶数. 当施加 z 向电场后, 相位失配量变为

$$\begin{aligned} \Delta k' &= \left(k_{\omega_3}^+ - k_{\omega_1}^+ - k_{\omega_2}^+ - \frac{2m\pi}{l^+ + l^-}\right) \times \frac{l^+}{l^+ + l^-} \\ &+ \left(k_{\omega_3}^- - k_{\omega_1}^- - k_{\omega_2}^- - \frac{2m\pi}{l^+ + l^-}\right) \times \frac{l^-}{l^+ + l^-}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 +, - 上角标代表正、负晶畴. 根据波数定义式, (7) 式展开为

$$\begin{aligned} \Delta k' &= \left(\frac{2\pi}{\lambda_3}n_{\omega_3}^+(E) - \frac{2\pi}{\lambda_1}n_{\omega_1}^+(E) - \frac{2\pi}{\lambda_2}n_{\omega_2}^+(E) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2m\pi}{l^+ + l^-}\right) \times \frac{l^+}{l^+ + l^-} + \left(\frac{2\pi}{\lambda_3}n_{\omega_3}^-(E) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\pi}{\lambda_1}n_{\omega_1}^-(E) - \frac{2\pi}{\lambda_2}n_{\omega_2}^-(E) - \frac{2m\pi}{l^+ + l^-}\right) \\ &\quad \times \frac{l^-}{l^+ + l^-}. \end{aligned} \quad (8)$$

将 (4) 和 (5) 式引入 (8) 式中, 整理得

$$\begin{aligned} \Delta k' &= \left[\frac{2\pi}{\lambda_3}n_{\omega_3} - \frac{2\pi}{\lambda_1}n_{\omega_1} - \frac{2\pi}{\lambda_2}n_{\omega_2} - \frac{2m\pi}{(l^+ + l^-)}\right] \\ &\quad - \frac{1}{2}r_{33}E \left(\frac{l^+ - l^-}{l^+ + l^-}\right) \left(\frac{2\pi}{\lambda_3}n_{\omega_3}^3 \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\pi}{\lambda_1}n_{\omega_1}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_2}n_{\omega_2}^3\right). \end{aligned} \quad (9)$$

将 (6) 式代入 (9) 式中, 可得

$$\begin{aligned} \Delta k' &= \Delta k - \frac{1}{2}r_{33}E \left(\frac{l^+ - l^-}{l^+ + l^-}\right) \\ &\quad \left(\frac{2\pi}{\lambda_3}n_{\omega_3}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_1}n_{\omega_1}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_2}n_{\omega_2}^3\right) \\ &= 0 - \frac{1}{2}r_{33}E \left(\frac{l^+ - l^-}{l^+ + l^-}\right) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_3} n_{\omega_3}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_1} n_{\omega_1}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_2} n_{\omega_2}^3 \right) \neq 0. \quad (10)$$

由于抽运光 λ_3 以及正、负晶畴长度为固定值, 故满足(6)式相位匹配条件的信号光 λ_1 以及闲频光 λ_2 波长无法满足施加 z 方向电场后的相位匹配条件(10)式, 这就使得原有光参量产生机理由动量不守恒, 无法实现参量变频.

由于参量振荡过程对于给定的极化结构只有惟一一种混频组合会同时满足能量守恒以及准相位匹配条件, 所以极化晶体在外加 z 向电场后, 会使得原相位匹配条件增加电场相关项, 该机理所输出的信号光及闲频光波长必然已满足加载电场后的相位匹配条件, 所以相比未加载电场时, 波长也必然发生了改变, 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta k' = & \left[\frac{2\pi}{\lambda_3} n_{\omega_3} - \frac{2\pi}{\lambda_1'} n_{\omega_1} - \frac{2\pi}{\lambda_2'} n_{\omega_2} - \frac{2m\pi}{(l^+ + l^-)} \right] \\ & - \frac{1}{2} r_{33} E \left(\frac{l^+ - l^-}{l^+ + l^-} \right) \left(\frac{2\pi}{\lambda_3} n_{\omega_3}^3 \right. \\ & \left. - \frac{2\pi}{\lambda_1'} n_{\omega_1}^3 - \frac{2\pi}{\lambda_2'} n_{\omega_2}^3 \right) = 0, \quad (11) \end{aligned}$$

式中 λ_1' , λ_2' 分别为加载 z 向电场后, 同时满足能量守恒及相位匹配条件的输出信号光和闲频光波长. 由(11)式可以看出, 不同的电场强度 E 对应着不同的相位匹配条件, 输出参量光波长随相位匹配条件改变而变化, 达到了电场调谐参量光输出波长的目的.

值得注意的是, 当正、负晶畴的占空比 D 为 50% 时, 也即传统的周期极化结构, 由(11)式可知, 此时 $(l^+ - l^-)/(l^+ + l^-) = 0$, 电光效应引起的正、负晶畴折射率改变量刚好相互抵消, 使得相位匹配条件未发生改变, 对应的输出参量光波长保持不变. 由此可见, 若想实现有效电场调谐, 正、负晶畴长度必须保证一定的差异化. 假定极化 LiNbO_3 厚度为 1 mm, 当温度设定为室温 25 °C, 极化周期 $\Lambda = 29.5 \mu\text{m}$, 抽运波长为 1064 nm 时, 根据(11)式, 模拟得到了占空比 D 为 1/2, 1/3, 1/5, 1/7 时参量光波长电场调谐曲线, 如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 加载电压与参量光的波长调谐曲线近似为线性关系, 当加载电压值控制在 $-4 \sim 4$ kV, 正、负晶畴占空比取 1/2 时, 参量光输出波长始终保持不变, 这与前文分析相符. 除此以外, 加载电场引起的参量光输出波长调谐带宽随占空比取值的减小而增大, 也就是说, 降低极化晶

体正、负晶畴占空比可以有效实现参量光的宽谱电场调谐, 但根据准相位匹配原理^[12], 晶畴占空比相差越大, 转换效率越低, 所以对于加载电场的周期极化结构, 高效率与宽谱段调谐不可兼得. 而对于能够形成双“倒格矢”的准周期, 由于该类极化结构多采用 Fibonacci 序列排布形式^[13], 这种极化结构由两个基本正负畴单元 A 和 B 相互迭代拼砌组成, 如图 3 所示, 其中 A, B 单元的正畴长度相同 $l_A^+ = l_B^+ = l$, 负畴长度 $l_A^- = l(1 - \tau\eta)$, $l_B^- = l(1 + \eta)$, l 和 η 为可调整的准周期结构参数. 差异化的正、负晶畴分布是这种准周期极化结构的特点, 相比高效率低占空比的周期极化结构, 显然更适于电场调谐.

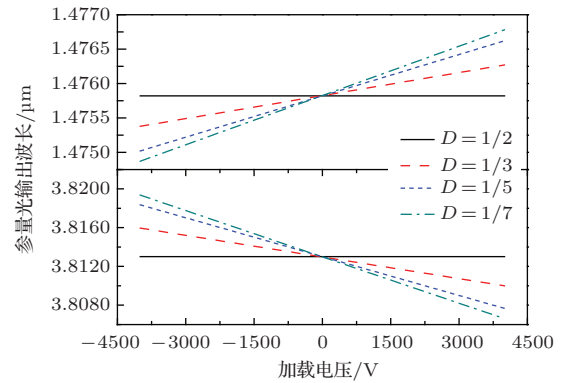


图 2 (网刊彩色) 不同占空比极化 LiNbO_3 的电场调谐曲线
Fig. 2. (color online) The electric field tuning curve of polarization LiNbO_3 with different duty cycle.

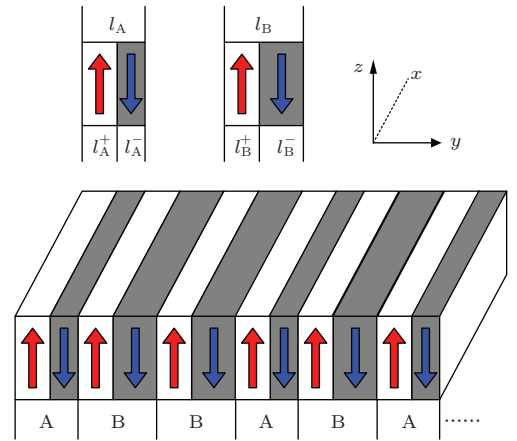


图 3 (网刊彩色) 准周期极化结构示意图
Fig. 3. (color online) Schematic diagram of quasi-periodic polarization structure.

本文以掺杂 5 mol% MgO 的 LiNbO_3 为基质, 以形成能够提供 $1.57 \mu\text{m}$ 信号光、 $3.3 \mu\text{m}$ 闲频光 (Δk_{OPO1}) 和 $1.47 \mu\text{m}$ 信号光、 $3.84 \mu\text{m}$ 闲频光 (Δk_{OPO2}) 的两个倒格矢为设计目标, 采用文献^[14]

中的Fibonacci二组元投影法对晶畴组合进行优化, 最终得到的优化结构及对应的相位失配补偿如图4所示, 相应单元正畴长度 $l = 9 \mu\text{m}$, 单元负畴长度 $l_A^- = 21 \mu\text{m}$, $l_B^- = 22.98 \mu\text{m}$, 两对参量光的相位失配量 Δk 所对应的傅里叶系数分别达到了0.32和0.22, 表明两个光参量振荡过程的相位失配得到了有效补偿. 按照确定的结构参数, 在室温条件下, 计算加载电场后造成每个晶畴畴长的变化, 进而推导出不同加载电压值对两个相位失配量 Δk_{OPO1} 和 Δk_{OPO2} 的影响, 基于此, 模拟得到室温条件下 MgO:QPLN 的参量光输出波长电场调谐曲线, 如图5所示.

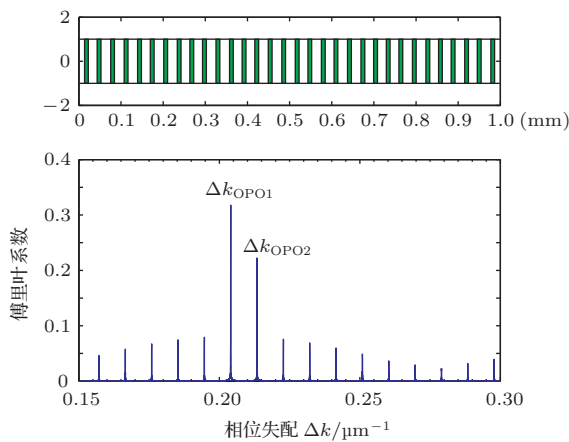


图4 (网刊彩色) 优化后 MgO:QPLN 的极化结构及相位失配补偿

Fig. 4. (color online) Fourier transform and polarization structure of the designed MgO:QPLN crystal.

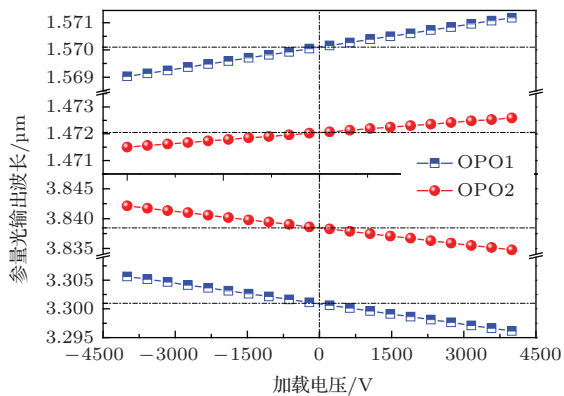


图5 (网刊彩色) 室温条件下 MgO:QPLN 电场调谐曲线
Fig. 5. (color online) The electric field tuning curve of MgO:QPLN at room temperature.

定义电场调谐速率为调谐带宽与对应加载电压值之比, 由图5可知, MgO:QPLN 拟输出的 $1.57 \mu\text{m}$ 波段信号光的调谐速率约为 0.27 nm/kV , $3.84 \mu\text{m}$ 波段闲频光约为 0.93 nm/kV . 显然, 应用

电场调谐 MgO:QPLN 在调谐精度和速度上要明显优于现阶段的传统调谐方式, 但在调谐带宽方面并不能一味提高加载电压来拓宽调谐范围. 为了使 MOPO 既能够保证局部的高精度控制, 又能够实现宽范围的频谱调谐, 拟采用电场与温度联合调谐的技术手段. 图6为模拟得到的 MgO:QPLN 电场和温度联合调谐曲线. 由图6的模拟结果可以看出, 通过 MgO:QPLN 晶体温度的合理控制, 能够实现参量光电场调谐区间的有序链接, 进而获得宽谱段参量光输出波长的连续可调, 极大地拓展了电场调谐的频谱带宽.

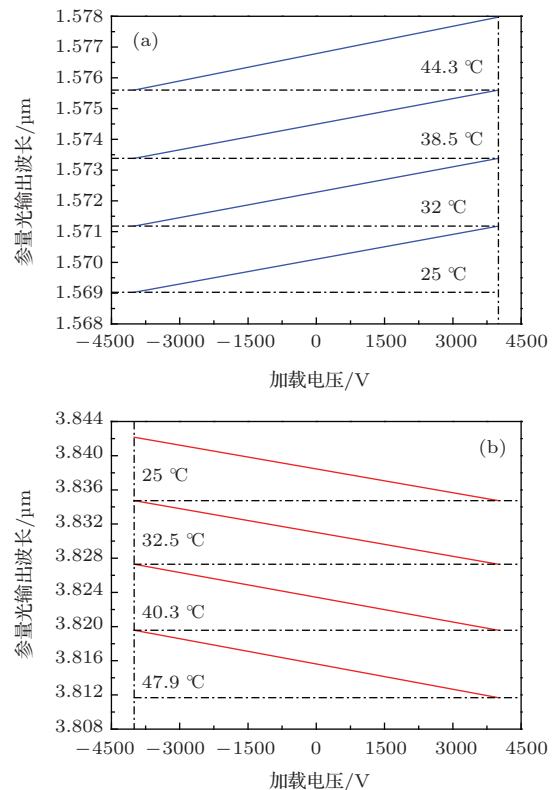


图6 (网刊彩色) MgO:QPLN 电场与温度联合调谐曲线
Fig. 6. (color online) The electric field and temperature joint tuning curve of MgO:QPLN crystal.

3 实验装置

MgO:QPLN-MOPO 电场调谐实验装置如图7所示. 采用 880 nm 抽运 Nd:YVO₄ 声光调 Q 的 1064 nm 激光器作为脉冲抽运源, 200 kHz 重频下 1064 nm 激光最高输出平均功率为 22.8 W , 对应脉冲宽度为 9.756 ns , 光谱线宽为 0.32 nm . 偏振片 P 与 $1/4$ 波片 QWP 组成偏振控制系统, 用于 MgO:QPLN 相位匹配的偏振调节. 焦距分别为 $200, 150 \text{ mm}$ 的聚焦透镜 F1 和 F2 组成压束

耦合系统, 用于将1064 nm抽运光聚焦耦合到M3与M4组成的MOPO腔内. M3镜曲率半径为150 mm, 镀有1064 nm增透、1.4—1.7 μm和3.2—4.0 μm高反膜系, 输出镜M4曲率半径为100 mm, 镀有1064 nm, 1.4—1.5 μm, 3.1—3.4 μm高反, 1.5—1.7 μm增透和3.7—4.2 μm高透膜系, 两镜的基质均为氟化钙. 腔内的MgO:QPLN晶体尺寸为1 mm × 6 mm × 50 mm, 两个端面分别镀有1.064 μm/1.4—1.7 μm/3.3—4.2 μm多色增透膜, 将MgO:QPLN晶体放置于可加载电场的温控器中, 该装置以块状黄铜作为基底热沉, 在黄铜外

部包裹有聚四氟乙烯绝缘材料, 经绝缘处理的黄铜基底既可以很好地传热又可作为MgO:QPLN的负z面电极. 在黄铜基底顶部用两块长条形聚四氟乙烯卡具固定MgO:QPLN位置, 上表面上方覆盖有与MgO:QPLN尺寸匹配的铜质电极片, 电极片外部通过一金属弹簧与电场压板相连, 目的是避免温度变化带来的晶体应力损伤. 加压装置一端与电场压板连接实现对MgO:QPLN正z面的电压加载, 另一端与黄铜基底相连, 并作为电压接地端, 目的是电场加载的同时不干扰底部的温度控制.

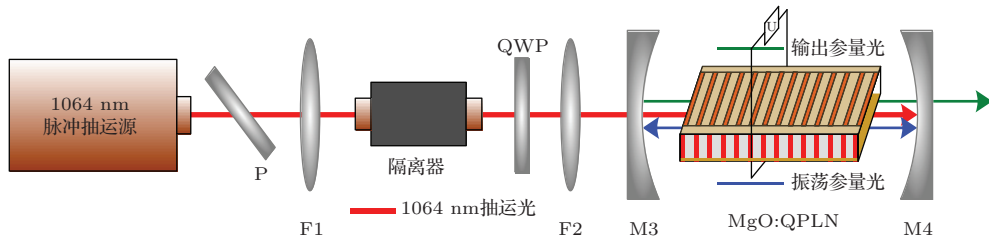


图7 (网刊彩色) MgO:QPLN-MOPO 电场调谐实验装置示意图

Fig. 7. (color online) Schematic diagram of the experimental setup.

4 实验结果

上述实验装置调整到最佳工作状态, 声光Q开关重频设置为200 kHz, 晶体温度设置在20 °C不变, 通过改变加载电场电压值, 测量不同电压值所对应的参量光输出波长. 由理论模拟可知长波闲频光的调谐速率要明显大于短波信号光. 针对闲频段, 以-3000, 0, 3000 V电压值作为测量点, 得到3.84 μm波段参量光的输出光谱如图8所示. 从图8中可以看出, 三个加载电压值对应得到的输出

光谱中心波长分别为3842.1, 3839.7 和3836.2 nm, 频谱调谐带宽约6 nm, 调谐速率接近1 nm/kV, 略高于0.93 nm/kV的模拟值, 可见实现了有效的电场调谐. 同时测得输出参量光光谱线宽约为7 nm, 这表明经过多光参量振荡过程光谱宽度被一定程度展宽, 所以在输出不稳定情况下, 光谱极易出现中心波长漂移.

在确定电场调谐MOPO的可行性之后, 使用以色列OPHIR公司生产的F150 A-BB-26-PPS型功率探头, 测量得到跨周期1.57 μm信号光和3.84 μm闲频光输出平均功率分别为1.7和0.72 W,

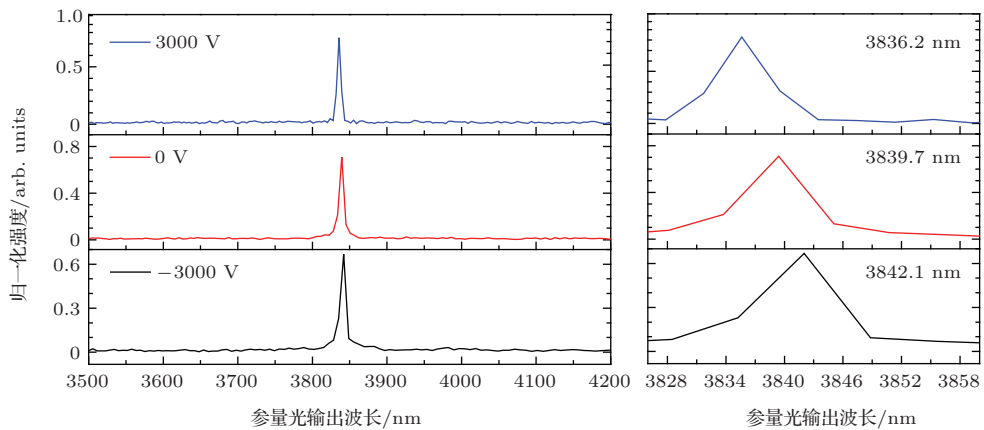


图8 (网刊彩色) MgO:QPLN-MOPO 电场调谐光谱 (加载电压 -3000, 0, 3000 V)

Fig. 8. (color online) The electric field tuning spectrum of MgO:QPLN-MOPO (On-load voltage: -3000, 0, 3000 V).

同时使用美国Thorlabs公司生产的DET01 CFC/M型脉宽探测器和波兰VIGO公司生产的PVMI-2 TE-10.6型红外探测器对两路参量光输出脉宽进行监测,测得相应脉冲宽度分别为9.132和8.463 ns,脉冲波形如图9所示.由于极化结构的限制,输出功率及提取效率均低于文献[15]中所使用的掺氧化镁非周期极化铌酸锂(MgO:APLN),但相比于APLN,显然所设计的QPLN具有更大的正、负晶畴比,更易于实现电场调谐.为了验证这一点,仍然以长波闲频光输出光谱作为监测对象,分别对两块晶体加载z向电压,测量得到不同电压值所对应的输出波长结果与理论模拟结果的对比如图10所示.由图10可以看出,QPLN实际电场调谐获得的输出波长要略低于理论模拟值,但趋势基本一致,而APLN输出波长随加载电压的改变未发生明显调谐变化,根据理论分析,这与APLN正、负晶畴总体长度比比较接近有关.

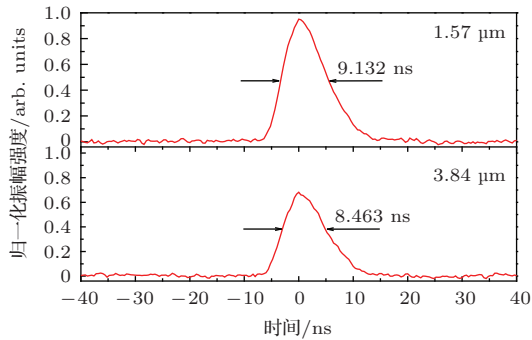


图9 (网刊彩色) MgO:QPLN-MOPO 输出参量光脉冲波形

Fig. 9. (color online) Temporal profile of 1.57 and 3.84 μm laser pulse.

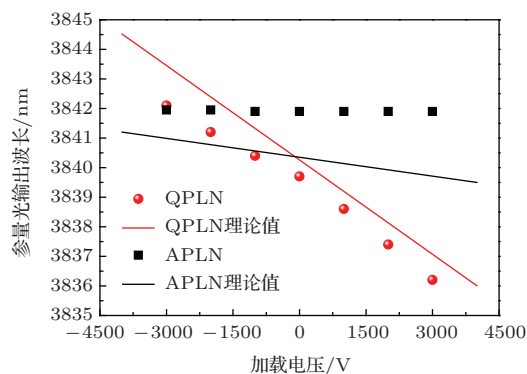


图10 (网刊彩色) MgO:QPLN/APLN 电场调谐实验值与理论值对比

Fig. 10. (color online) Comparison of the electric field tuning wavelengths calculated theoretically and observed experimentally by MgO:QPLN/APLN crystal.

在固定温度不变单纯电场调谐的基础上,进一步开展了不同温控点条件下MgO:QPLN的电场调

谐性能测试.根据图6的理论模拟结果,同时为了避免温度漂移的干扰,将MgO:QPLN的控制温度提高到40 °C以上,以40.3 °C和47.9 °C为例,测量得到的电场和温度联合调谐下参量光输出谱线变化如图11所示.由图11可以看出,实际联合调谐获得的输出波长变化与理论调谐曲线基本符合,通过细化温度和电压的控制值,可以实现参量光输出波长的连续调谐.实验中还进行了单纯温度控制调谐精度和调谐速度的测试,综合测试结果及与电场调谐的性能对比列于表1.

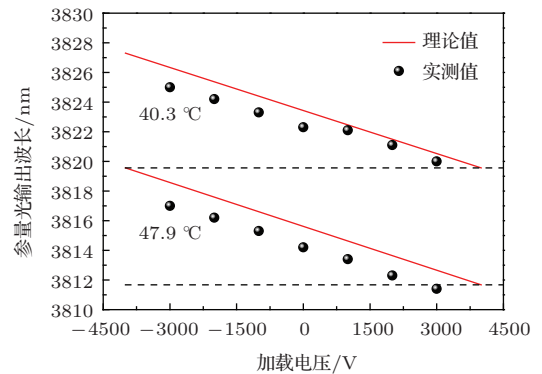


图11 (网刊彩色) MgO:QPLN 电场、温度联合调谐实验值与理论值对比

Fig. 11. (color online) Comparison of the electric field and temperature joint tuning wavelengths calculated theoretically and observed experimentally by MgO:QPLN crystal.

表1 MgO:QPLN 电场调谐与温度调谐实验测试结果对比
Table 1. Comparison of the electric field tuning and temperature tuning experimental results.

	电场调谐	温度调谐
调谐速率	1 nm/kV	1.54 nm/°C
调谐精度	±0.01 V	<40 °C: ±2 °C; >40 °C: ±0.2 °C
调谐速度	800 V/ns	升温: 0.43 °C/s; 降温: 0.075 °C/s
调谐范围	-3000—3000 V	15—200 °C

测试结果显示,温度在40 °C以上时温漂幅度较小,但在低温时温漂最高可达±2 °C,这主要与低温时激光抽运产热造成的温差过大有关.在调谐速度方面,温度由室温升至200 °C用时7 min,而由高温200 °C降回室温则用时近40 min.实验结果表明,电场调谐相比传统温度调谐,在调谐可控性和实时性具体体现的调谐精度、调谐速度方面具有绝对的技术优势,在具体体现高效性的调谐速率方面,由于电场调谐频谱带宽较窄,要差于温度调

谐, 但通过二者的联合作用, 充分发挥各自的技术优势, 可以实现宽谱段高精度的连续调谐.

5 结 论

本文针对OPO传统温度调谐响应速度慢、调谐精度低的问题, 结合所设计的双倒格矢MgO:QPLN极化晶畴分布特点, 提出电场调谐MOPO的新理念, 在理论分析基础上通过实验验证, 实现了频谱调谐带宽约6 nm、调谐速率接近1 nm/kV的MOPO电场调谐, 进一步结合温度调谐, 实现了参量光宽谱段高精度的连续调谐. 实验结果表明, 电场调谐技术的引入, 对于MgO:QPLN-MOPO而言, 能够更充分发挥非规则晶畴排布的技术特点, 并对多波长参量光频谱调谐的精度控制、快速响应等方面有着极强的技术借鉴性.

参考文献

- [1] Kumar S C, Das R, Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M 2011 *Appl. Phys. B* **102** 31
- [2] Sheng Q, Ding X, Shi C P, Yin S J, Li B, Shang C, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2012 *Opt. Express* **20** 8041
- [3] Li B, Ding X, Sheng Q, Yin S J, Shi C P, Li X, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 014207
- [4] Ding X, Sheng Q, Chen N, Yu X Y, Wang R, Zhang H, Wen W Q, Wang P, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4314
- [5] Mikael S, Markku V, Lauri H 2010 *Opt. Express* **18** 14087
- [6] Lin H Y, Tan H M, Miao J G, Cui T C, Su S C, Guo J 2009 *Opt. Mater.* **32** 257
- [7] Peng Y F, Wei X B, Wang W M, Li D M 2010 *Opt. Commun.* **283** 4032
- [8] Vincent K, David J, Jerome D, Patricia S, Benoit B, Bertand M, Hideki I, Takunori T 2013 *Opt. Lett.* **38** 860
- [9] Powers P E, Kulp T J, Bisson S E 1998 *Opt. Lett.* **23** 159
- [10] Yu C S, Kung A H 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 2233
- [11] Kong Y F, Xu J J, Zhang G Y, Liu S M, Lu Y 2005 *Multifunctional Photoelectric Material: Lithium Niobate Crystal* (Beijing: Science Press) p135 (in Chinese) [孔勇发, 许京军, 张光寅, 刘思敏, 陆猗 2005 多功能光电材料——铌酸锂晶体 (北京: 科学出版社) 第135页]
- [12] Yao J Q, Xu D G 2007 *All Solid Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology* (Beijing: Science Press) p724 (in Chinese) [姚建铨, 徐德刚 2007 全固态激光及非线性光学频率变换技术 (北京: 科学出版社) 第724页]
- [13] Zhu S N, Zhu Y Y, Ming N B 1997 *Science* **278** 843
- [14] Zia R K P, Dallas W J 1985 *J. Phys. A: Math. Gen.* **18** L341
- [15] Yu Y J, Chen X Y, Wang C, Wu C T, Dong Y, Li S T, Jin G Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 044203 (in Chinese) [于永吉, 陈薪羽, 王超, 吴春婷, 董渊, 李述涛, 金光勇 2015 物理学报 **64** 044203]

Electric field tuning characteristic of multiple optical parametric oscillator based on MgO:QPLN*

Yu Yong-Ji¹⁾ Chen Xin-Yu¹⁾ Cheng Li-Bo²⁾ Wang Chao¹⁾ Wu Chun-Ting¹⁾
Dong Yuan¹⁾ Li Shu-Tao¹⁾ Jin Guang-Yong^{1)†}

1) (*Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

2) (*Department of Engineering Mathematics Basic Teaching, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(Received 23 January 2015; revised manuscript received 28 March 2015)

Abstract

The quasi-phase matching optical parametric oscillator tuning methods, i.e. grating period tuning, temperature tuning, pumping wavelength tuning, and angle tuning are more simple and convenient than the traditional mechanical tuning which requires inserting the frequency selective element into the cavity. However, it need to be improved for wavelength tuning in quick response and high-accuracy control. In this paper, the tunability of multiple optical parametric oscillator (MOPO) based on MgO:QPLN has been studied under an applied electric field. Based on the linear electro-optic effect of LiNbO₃, we theoretically analyze the feasibility of achieving parametric light wavelengths tuning by applying electric field of particular direction on the *z*-direction of LiNbO₃. We study the relationships between the ability of electric field tuning and the polarization structure parameters, and analyze the feasibility of MgO:QPLN with high positive and negative superlattice domain ratio for electric field tuning. The relationship of output wavelength and loading voltage is achieved by simulation. Simulation results show that the tuning rates of 1.57 μm signal light and 3.84 μm idler light are about 0.27 and 0.93 nm/kV, respectively. By reasonably controlling the temperature of MgO:QPLN crystal, tuning sections of the parametric light electric field could be linked orderly, and the output wavelength of parametric lights could be turned continuously in a wide range, which greatly expands the spectral bandwidth of the electric field tuning. In the experiment, a high-repetition-rate acousto-optic *Q*-switched Nd:YVO₄ laser at 1064 nm is applied as the pumping source. The laser works at 200 kHz with a pulse width of 9.756 ns and its maximum output power is 22.8 W on average. When the temperature of MgO:QPLN is stable at 20°C, the average output power of 1.57 μm signal light and 3.84 μm idler light are 1.7 and 0.72 W, respectively, and the corresponding pulse width of the two parametric lights is 9.132 and 8.463 ns. By loading proper electric field on MgO:QPLN (on-load voltage: -3000 V~+3000 V), we achieve the electric tuning of the parametric light at 3.84 μm range, and the bandwidth of spectral tuning is about 6 nm with the tuning rate approaching 1 nm/kV. Combining the temperature tuning with the electric field tuning, we further achieved high-precision continuous tuning of the parametric light in a wide spectrum range. All the final experimental results agree basically with the theoretical analysis one. In addition, results show that the electric field tuning performs better than the temperature tuning in accuracy control and quick response. For MgO:QPLN-MOPO, its irregular domain configuration could work adequately by introducing the electric tuning.

Keywords: quasi-phase matching, multiple optical parametric oscillator, MgO:QPLN, electric field tuning

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Lm, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.64.164208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61240004), the Science and Technology Department Project of Jilin Province, China (Grant No. 20121815), and the Natural Science Foundation for Young Scientists of Jilin Province, China (Grant No. 20150520103JH).

† Corresponding author. E-mail: yyjcust@163.com