

# 基于 MgO:PPLN 啁啾结构和频的 宽谱黄-橙激光输出

郭磊<sup>1,2</sup>, 陈怀熹<sup>1,2</sup>, 张新彬<sup>1</sup>, 郭玮<sup>1,2</sup>, D.K. Choge<sup>1</sup>, 李广伟<sup>1</sup>, 冯新凯<sup>1</sup>, 梁万国<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 宽谱黄-橙激光是生物医学领域中重要的荧光光源。基于周期极化掺氧化镁铌酸锂晶体(MgO:PPLN)的宽带准相位匹配技术,提出了一种基于变迹步进啁啾 MgO:PPLN 的建模方案。在啁啾 MgO:PPLN 中实现了 C 波段(1525~1565 nm)和波长为 980 nm 激光的宽带和频,通过遗传算法对变迹率和啁啾周期范围增量进行了数值优化,在波长为 600 nm 附近获得了转换效率约为-11 dB、带顶波动为 0.047 dB、带宽为 6 nm 的光谱输出,提供了一种高转换效率、小带顶波动的宽谱黄-橙全固态激光输出方案。

**关键词** 非线性光学频率; 宽带和频; 周期极化晶体; 黄-橙全固态激光

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.091901

## Broadband Yellow-Orange Laser Output Based on Chirp Structure MgO:PPLN Sum-Frequency

Guo Lei<sup>1,2</sup>, Chen Huaixi<sup>1,2</sup>, Zhang Xinbin<sup>1</sup>, Guo Wei<sup>1,2</sup>,

D. K. Choge<sup>1</sup>, Li Guangwei<sup>1</sup>, Feng Xinkai<sup>1</sup>, Liang Wanguo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences,

Fuzhou, Fujian 350002, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The broadband yellow-orange laser is an important fluorescent source in the fields of biomedicine. Based on broadband quasi-phase matching technology of periodically polarized lithium niobate (MgO:PPLN) crystal, a modeling scheme based on apodization step chirped MgO:PPLN is proposed. In the chirped MgO:PPLN, broadband sum frequency of C-band (1525–1565 nm) and 980nm laser is realized. The genetic algorithm is used to optimize the tracking rate and the increment of chirp period range. The spectral output with conversion efficiency of -11 dB, band top fluctuation of 0.047 dB and band width of 6 nm is obtained near the wavelength of 600 nm. This work provides a broadband yellow-orange all-solid-state laser output design with high conversion efficiency and low band top ripple.

**Key words** nonlinear optical frequency; broadband sum-frequency; periodically polarized crystal; yellow-orange all-solid-state laser

**OCIS codes** 190.7220; 190.4400; 220.1230

## 1 引言

宽谱黄-橙色激光的波长约为 600 nm,是一种重要的荧光激发光源,可通过实时扫描目标对象的

吸收光谱,获得相关信息,广泛应用于光谱学、光遗传学、生命科学、原子科学等领域<sup>[1-5]</sup>。由于缺乏合适的直接带隙材料,并未生产出该波段的半导体激光器<sup>[6]</sup>。由非线性光学频率获得紧凑、稳定和高效

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-09-02; 录用日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51890862)、中科院 STS 行动计划(Y8f6k71cad)

\* E-mail: wgl@fjirsm.ac.cn

的全固态黄-橙激光是目前的最佳方案,主要方法是在非线性晶体中通过混合两种基波使其和频产生波长为 600 nm 左右的黄-橙激光<sup>[7]</sup>。常规的双折射晶体是利用单轴或双轴非线性晶体的双折射特性和色散特性,采用角度匹配的方式受波矢方向和偏振方向的限制,只能在晶体的特定切割方向或特定温度下才能实现特定波长的转换,难以获得光谱带宽较宽的激光输出。

周期极化掺氧化镁铌酸锂晶体(MgO:PPLN)是一种重要的非线性频率转换晶体,主要通过外加脉冲电压极化的方式进行器件制备,可以通过周期计算实现透光范围内的任意波长输出,也可以通过设计啁啾、扇形等多种超晶格结构,实现宽光谱激光输出。其中啁啾超晶格结构是在晶体通光方向上设计多种周期,以实现宽谱光源的频率转换。常见的啁啾结构包括线性、步进啁啾周期结构以及非周期结构等。要实现宽谱准相位匹配,可以采用单块的晶体方案,也可以采用级联均匀极化周期和步进啁啾极化周期两块晶体的方案<sup>[8-15]</sup>。线性啁啾接近连续的周期变量对制造工艺要求较高,且步进啁啾和线性啁啾的宽带响应谱线容易出现波动,不利于产生宽谱脉冲光源,非周期方案虽然能很好地实现宽

带转换和平坦的带顶,但在数值优化过程中,宽带和频过程的参数搜索空间极大、耗时长,且难以收敛,对环境变化比较敏感,稳定性不高。

本文在 MgO:PPLN 中将 C 波段(1525 ~ 1565 nm)激光和波长为 980 nm 的激光进行和频处理,实现了宽谱黄-橙激光的输出。为获得高效、平坦的黄-橙激光,采用布拉格光纤光栅中常用的变迹模拟方法<sup>[16-17]</sup>,结合准相位匹配技术,建立了变迹步进啁啾 MgO:PPLN 宽带和频的数学模型,确定了变迹率  $r$  和啁啾周期范围增量  $d\rho$  两个自变量,利用遗传算法<sup>[18]</sup>对自变量进行迭代优化,能在较小的搜索空间中找到最优值,从而确定变迹步进啁啾 MgO:PPLN 的结构设计参数,最终获得波长为 600 nm 附近宽谱激光输出的最优光谱转换。

## 2 变迹步进啁啾 MgO:PPLN 宽带和频理论分析

为获得高效、平坦的宽谱黄-橙激光,需要建立变迹步进啁啾 MgO:PPLN 宽带和频的数学模型。在小信号、慢变振幅的近似条件下,MgO:PPLN 和频的转换效率  $\eta$  可表示为<sup>[19]</sup>

$$\eta = \frac{P_{\omega_3}}{\sqrt{P_{\omega_1}} \times P_{\omega_2}} = \frac{8\pi^2 |d_{33}|^2 \sqrt{I_{\omega_1} I_{\omega_2}} L^2}{c\epsilon_0 \lambda_{\omega_3}^2 n_{\omega_1} n_{\omega_2} n_{\omega_3}} \left| \frac{1}{L} \int_0^L d(z) \exp(i\Delta k z) dz \right|^2, \quad (1)$$

式中, $P_{\omega_1}$ 、 $P_{\omega_2}$ 、 $P_{\omega_3}$  分别为泵浦光、信号光、和频光的功率, $\omega$  为光频率, $d_{33}$  为晶体的非线性系数, $I_{\omega_1}$  和  $I_{\omega_2}$  分别为泵浦光和信号光的光强, $L$  为光波在晶体内相互作用的长度, $c$  为真空中的光速, $\epsilon_0$  为真空介电常量, $\lambda_{\omega_3}$  为和频光的波长, $n_{\omega_r}$  ( $r=1,2,3$ ) 为光波在晶体中的折射率,可由 Sellmeier 公式<sup>[20]</sup>求得, $d(z)$  为畴反转结构的归一化常数,取值为  $\pm 1$ , $d(z)=1$  表示极化方向向上, $d(z)=-1$  表示极化方向向下。相位失配量  $\Delta k$  可表示为

$$\Delta k = k_{\omega_3} - k_{\omega_2} - k_{\omega_1} = 2\pi \left( \frac{n_{\omega_3}}{\lambda_{\omega_3}} - \frac{n_{\omega_2}}{\lambda_{\omega_2}} - \frac{n_{\omega_1}}{\lambda_{\omega_1}} \right), \quad (2)$$

式中, $k_{\omega_1}$ 、 $k_{\omega_2}$ 、 $k_{\omega_3}$  分别为泵浦光、信号光、和频光的波数。相对的有效非线性系数  $d_{\text{reff}}(\Delta k) = \left| \frac{1}{L} \int_0^L d(z) \exp(i\Delta k z) dz \right|$ , 该系数只与晶体中的非线性系数空间分布有关。设每个单元畴的长度为  $L_i$ , 且极化方向相同,晶体由  $N$  个长度不同的单元

畴组成,总长度  $L = \sum_{i=1}^N L_i$ , 可将  $d_{\text{reff}}(\Delta k)$  表示为

$$\begin{aligned} d_{\text{reff}}(\Delta k) &= \left| \frac{1}{L} \int_0^L d(z) \exp(i\Delta k z) dz \right| = \\ &= \frac{1}{L} \left| \sum_{q=0}^{N-1} d(z) \int_{z_q}^{z_{q+1}} \exp(i\Delta k z) dz \right| = \\ &= \frac{1}{L} \left| \sum_{q=0}^{N-1} d(z) \frac{\exp(i\Delta k z_{q+1}) - \exp(i\Delta k z_q)}{i\Delta k} \right| = \\ &= \frac{1}{L\Delta k} \left| \sum_{q=0}^{N-1} d(z) [\exp(i\Delta k z_{q+1}) - \exp(i\Delta k z_q)] \right|, \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $q=0,1,2,3,\dots,N-1$ , $z_q$  为单元畴壁的位置,每个单元畴位于  $z_q \sim z_{q+1}$  内,长度为  $z_{q+1} - z_q$ ,通过设计单元畴的长度可得到极化晶体的超晶格结构。

如图 1 所示,变迹步进啁啾周期性极化晶体是介于周期性极化晶体和非周期性极化晶体间的一种极化模式。总长度为  $L$  的晶体被分成  $N$  个部分,每

个部分都是均匀光栅结构,包含  $n$  段,每段单个周期长度为  $\Delta_i$ ,相邻部分之间有一个很小的周期增量  $\Delta\Delta$ ,即啁啾步长,满足  $\Delta_i = \Delta_1 + \Delta\Delta(i-1)$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ )。在晶体光栅结构的两侧引入变迹部分,每部分的单个周期占空比  $d = l/\Delta$  ( $l$  为反转畴,即负畴的长度,  $\Delta$  为每个部分的极化周期)分别按照变

迹函数对称地递增和递减,每侧都有  $N_a$  个变迹部分,没有变迹的部分  $N_u$  位于光栅中间,每个  $\Delta$  的占空比都为 0.5。变迹率  $r$  定义为变迹部分数与晶体总部分数  $N$  的比值,即  $r = 2N_a/N$ 。变迹率  $r$ 、变迹函数以及周期长度  $\Delta_i$  会影响每个单元畴的长度,最终反映在宽带和频转换效率的响应曲线上。

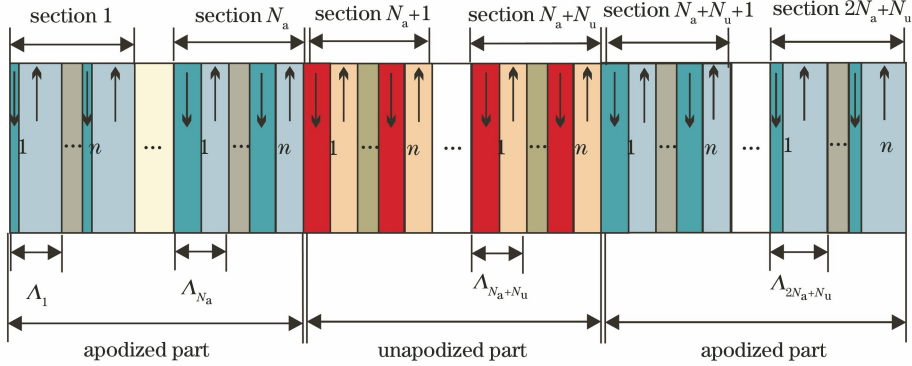


图 1 变迹步进啁啾 MgO:PPLN 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of apodization step chirped MgO:PPLN

### 3 C 波段宽带和频优化设计

#### 3.1 实验装置与基本原理

图 2 为 MgO:PPLN 单通宽带和频黄-橙激光器的实装置图,用中心波长为 980 nm,线宽为 0.2 nm 的二极管激光器(LD)作泵浦光  $P_{\omega_1}$ ,用 C 波段自发辐射(ASE)激光器作信号光源  $P_{\omega_2}$ 。通过 980/1550 nm 波分复用器(WDM)混合泵浦光和信

号光,在波长为 980 nm 和 1550 nm 处分别有 0.26 dB 和 0.28 dB 的损耗。经准直镜(C-lens)和聚焦镜后光波在长度为 50 mm 的 MgO:PPLN 晶体中实现了准直单通和频,通过温控炉(TCS-100, CTL Photonics, Fuzhou, China)调节温度,获得最佳准相位匹配温度,输出光功率和带宽通过激光功率计(PM100D, Thorlabs, Newton, NJ, USA)和光纤光谱仪(OSA,型号为 BIM-6001)测定。

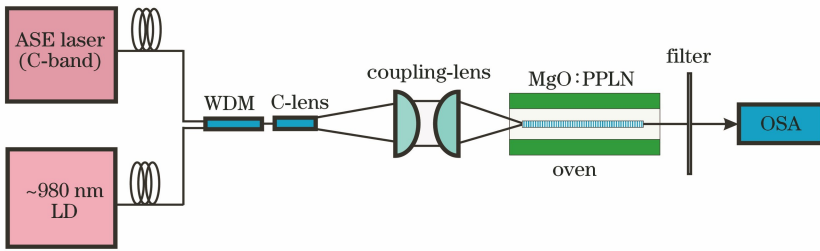


图 2 单通宽带和频实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device based on single-pass broadband sum-frequency generation

设进入晶体前  $P_{\omega_1} = 290$  mW,  $P_{\omega_2} = 200$  mW,使用晶体长度为 50 mm 的 MgO:PPLN,在室温下,对变迹步进啁啾晶体的超晶格结构进行数值优化,目标是在给定的波段范围(C 波段)内,获得高转换效率、小带顶波动的宽谱黄-橙激光输出。

线性变迹函数和正双曲正切变迹函数对和频转换带宽和带顶波动的影响如图 3 所示,图 3(a)和图 3(b)给出了两种不同的变迹函数和不同的变迹率下的占空比空间分布情况,对应的和频转换效率响应图如图 3(c)和图 3(d)所示。可以发现,增加变迹

率后,和频转换带宽和带顶波动都会减小,相比线性变迹函数,正双曲正切变迹函数在减小带顶波动的同时,降低了带宽下降幅度,在带宽上具有明显的优势,因此实验将变迹函数确定为正双曲正切函数。

啁啾周期的范围会影响转换带宽和转换效率,实验中的啁啾步长使用实验条件能达到的最小空间分辨率 5 nm,为了获得  $P_{\omega_1} = 290$  mW,  $P_{\omega_2} = 200$  mW 时的最优和频响应曲线,将晶体起点周期长度  $\Delta'_1$  和终点周期长度  $\Delta'_N$  分别初始化为 1525 nm 和 1565 nm 处的和频准相位匹配周期,在温度为

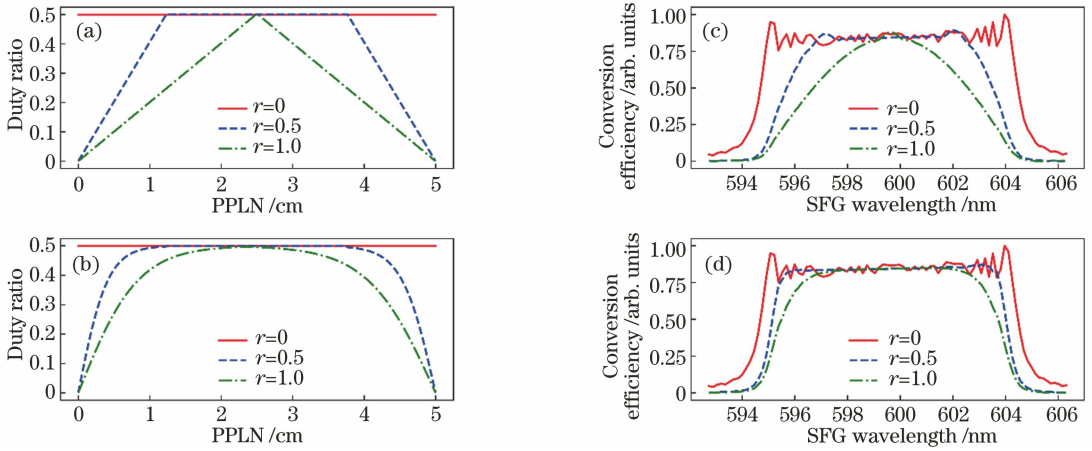


图 3 变迹函数对和频转换带宽和带顶波动的影响。(a)线性变迹函数的占空比;(b)正双曲正切变迹函数的占空比;(c)线性变迹函数的和频转换效率;(d)正双曲正切变迹函数的和频转换效率

Fig. 3 Effect of apodization function on bandwidth and band-top ripple of sum-frequency conversion. (a) Duty ratio of linear apodization function; (b) duty ratio of the positive hyperbolic tangent apodization function; (c) sum-frequency conversion efficiency graph of linear apodization function; (d) sum-frequency conversion efficiency diagram of positive hyperbolic tangent apodization function

25 °C时,通过 Sellmeier 方程和相位匹配公式求得  $\Lambda_1' = 9.98 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_N' = 10.33 \mu\text{m}$ ,通过调节啁啾周期范围增量  $d\rho$ ,得到起点周期  $\Lambda_1 = \Lambda_1' - d\rho$  和终点周期  $\Lambda_N = \Lambda_N' + d\rho$ 。

图 4 为  $r$ 、 $d\rho$  与带宽、带顶波动、转换效率的关

系。其中带宽为 3 dB,带顶波动用 1 dB 带宽内转换效率的均方差度量。从图 4(a)中发现,变迹率  $r$  越大,带宽越窄,带顶波动越平缓;从图 4(b)中发现,啁啾周期范围增量  $d\rho$  越大,带宽越宽,转换效率越低。

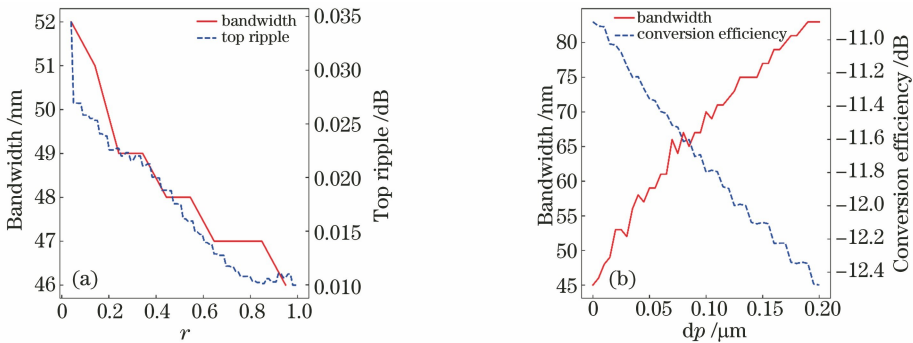


图 4  $r$  和  $d\rho$  与带宽、带顶波动、转换效率关系。(a) $r$  与带宽、带顶波动的关系;(b) $d\rho$  与带宽、转换效率的关系

Fig. 4 Relationship between  $r$ ,  $d\rho$  and bandwidth, top ripple, conversion efficiency.

(a) Relationship between  $r$  and bandwidth, top ripple; (b) relationship between  $d\rho$  and bandwidth, conversion efficiency

### 3.2 变迹啁啾结构数值优化

为了在 C 波段获得转换率和带顶波动的最优解,将优化目标函数定义为

$$F(r, d\rho) = \text{mean}[\eta_c(r, d\rho)] - \omega \times S[\eta_c(r, d\rho)], \quad (4)$$

式中,  $\text{mean}[\ ]$  为求均值,  $S[\ ]$  为求均方差,  $\omega$  为方差的权重系数,为了分析均值和方差的比例关系,权重系数取值为 10。

为了获得目标值的最优值,采用遗传算法在给

定的搜索空间中进行迭代计算,算法流程如图 5 所示,其中  $r$  的取值范围为  $0 \sim 1$ ,步长间隔为 0.01,  $d\rho$  的取值范围为  $0 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ,步长间隔为  $0.01 \mu\text{m}$ ,在较小的搜索空间中可以获得较稳定的收敛值。

如图 6(a)所示,设初始种群数为 50,经过 100 次左右的迭代得到最优值,求得最优参数为:  $r = 0.5$ ,  $d\rho = 0.03 \mu\text{m}$ ,和频转换效率为  $-11.2 \text{ dB}$ ,带顶波动为  $0.047 \text{ dB}$ 。图 6(b)为本方法和步进啁啾超晶格结构下的和频转换效率。

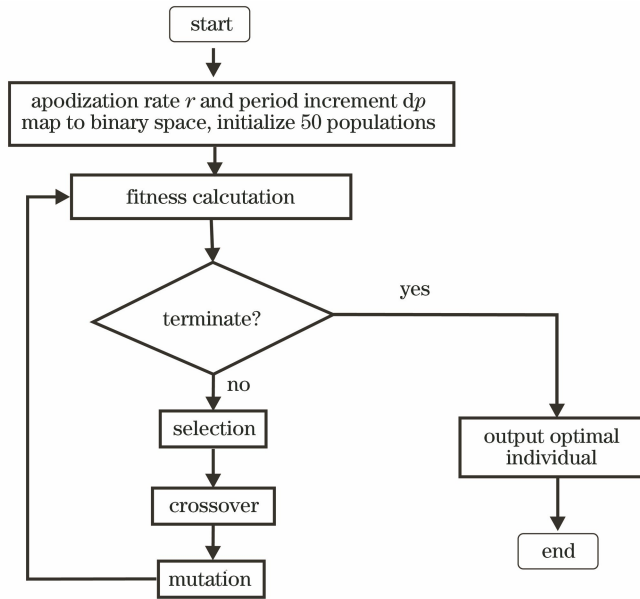


图5 遗传算法的流程图

Fig. 5 Flow chart of genetic algorithm

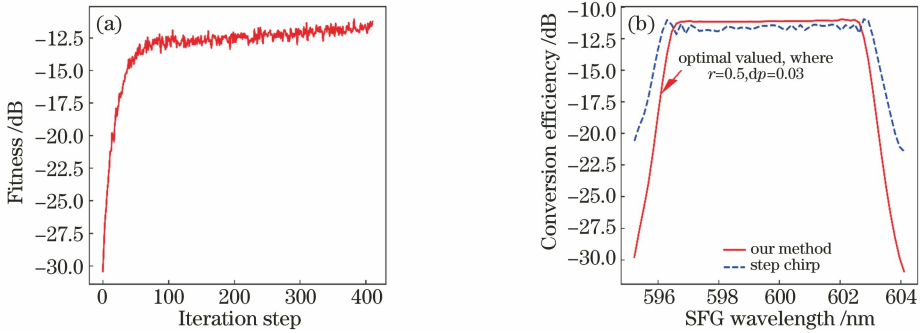


图6 遗传算法优化结果图。(a)迭代过程;(b)和频转换效率

Fig. 6 Optimization results of genetic algorithm. (a) Iteration process; (b) sum-frequency conversion efficiency

## 4 结 论

围绕宽谱黄-橙激光的制备需求,基于准相位匹配理论,利用和频效应,计算出最佳的晶体模型结构。提出了变迹步进啁啾 MgO:PPLN 的建模方案,在室温条件下,用功率为 290 mW 的 C 波段宽带光源和功率为 200 mW 的 980 nm 的光源分别作为泵浦光和信号光;选择不同的变迹函数,通过控制变迹率  $r$  和啁啾周期范围增量  $dp$  等参数,实现对和频输出光谱的带宽、带顶波动及转换效率的动态调控;最后利用遗传算法,在较小的搜索空间内,对参数  $r$  和  $dp$  进行数值优化,在  $r = 0.5$ 、 $dp = 0.03 \mu\text{m}$  时,获得了最优结果,实现了高效、均匀的黄-橙激光宽谱输出,转换效率为  $-11 \text{ dB}$ 、带顶波动达  $0.047 \text{ dB}$ ,为基于准相位匹配技术的和频效应产生宽谱激光提供了理论指导和可行方案。

## 参 考 文 献

- [1] Karrer S, Bäuml W, Abels C, et al. Long-pulse dye laser for photodynamic therapy: investigations in vitro and in vivo[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1999, 25(1): 51-59.
- [2] Kapoor V, Subach F V, Kozlov V G, et al. New lasers for flow cytometry: filling the gaps[J]. *Nature Methods*, 2007, 4(9): 678-679.
- [3] Marzahl D T, Metz P W, Kränkel C, et al. Spectroscopy and laser operation of  $\text{Sm}^{3+}$ -doped lithium lutetium tetrafluoride ( $\text{LiLuF}_4$ ) and strontium hexaaluminate ( $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$ ) [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 21118-21127.
- [4] Chang W K, Chen Y H, Chang J W. Pulsed orange generation optimized in a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser using monolithic dual PPLN electro-optic Q switches[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2687-

- 2689.
- [5] Calu D J, Kawa A B, Marchant N J, et al. Optogenetic inhibition of dorsal medial prefrontal cortex attenuates stress-induced reinstatement of palatable food seeking in female rats [J]. *Journal of Neuroscience*, 2013, 33(1): 214-226.
- [6] Fedorova K A, Cataluna M A, Battle P R, et al. Orange light generation from a PPKTP waveguide end pumped by a cw quantum-dot tunable laser diode [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2011, 103(1): 41-43.
- [7] Li G Z, Chen Y P, Jiang H W, et al. Broadband sum-frequency generation using  $d_{33}$  in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> thin film in the telecommunications band [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 939-942.
- [8] Lee Y L, Noh Y C, Jung C, et al. Broadening of the second-harmonic phase-matching bandwidth in a temperature-gradient-controlled periodically poled Ti:LiNbO<sub>3</sub> channel waveguide [J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2813-2819.
- [9] Suhara T, Nishihara H. Theoretical analysis of waveguide second-harmonic generation phase matched with uniform and chirped gratings [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(7): 1265-1276.
- [10] Gao S M, Yang C X, Xiao X S, et al. Broadband and multiple-channel visible laser generation by use of segmented quasi-phase-matching gratings [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1/2/3): 205-209.
- [11] Jiang J, Zhang J D, Wang K, et al. Theoretical study on broadband frequency doubling in aperiodically poled lithium niobate crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041901.  
蒋建, 张建东, 王凯, 等. 非周期极化铌酸锂晶体宽带倍频的理论研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041901.
- [12] Kumar S C, Samanta G K, Devi K, et al. High-efficiency, multicrystal, single-pass, continuous-wave second harmonic generation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11152 - 11169.
- [13] Xing S, Yu Y J, Wang Y H, et al. Wide tunable continuous-wave mid infrared intro-cavity optical parametric oscillator based on multi-period MgO:PPLN [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0619002.  
邢爽, 于永吉, 王宇恒, 等. 基于多周期 MgO:PPLN 的内腔宽调谐连续中红外光参量振荡器 [J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0619002.
- [14] Zhang Y C, Zhu H Y, Zhang J, et al. Compact widely tunable continuous-wave MgO:PPLN optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105008.  
张永昶, 朱海永, 张静, 等. 紧凑型 MgO:PPLN 宽波段可调谐连续光参量振荡器 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1105008.
- [15] Li K, Yang S H, Wang X, et al. Highly efficient intensity-modulated 532 nm laser based on second harmonic generation with MgO:PPLN cascade [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0614003.  
李坤, 杨苏辉, 王欣, 等. MgO:PPLN 级联倍频实现高转换效率强度调制 532 nm 激光 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0614003.
- [16] Phillips C, Langrock C, Chang D, et al. Apodization of chirped quasi-phases-matching devices [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(6): 1551-1568.
- [17] Tehranchi A, Kashyap R. Engineered gratings for flat broadening of second-harmonic phase-matching bandwidth in MgO-doped lithium niobate waveguides [J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18970-18975.
- [18] Back T. *Evolutionary algorithms in theory and practice* [M]. New York: Oxford University Press, 1996.
- [19] Chen X F, Wu F, Zeng X L, et al. Multiple quasi-phase-matching in a nonperiodic domain-inverted optical superlattice [J]. *Physical Review A*, 2004, 69(1): 013818.
- [20] Edwards G J, Lawrence M. A temperature-dependent dispersion equation for congruently grown lithium niobate [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1984, 16(4): 373-375.