

利用光强分布设计多波长频率转换器件

任 坤¹ 刘亚丽¹ 任晓斌² 范景洋¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

²天津科技大学理学院, 天津 300222

摘要 对获得多波长同时产生的可调控的频率转换器件进行了研究。通过分析非线性晶体中耦合光强随传播距离的变化,提出了一种基于晶体中光强分布获得非线性结构的方法。针对和频过程,利用 MATLAB 软件进行仿真,设计出了6个和频过程同时发生的非周期结构。为灵活调控各个非线性过程的输出强度,得到任意形状的目标功率谱,提出在设计过程中引入权重系数。对和频及倍频产生的研究表明,获得的非线性结构不仅实现了多波长的同时输出,而且可以任意调节输出光功率谱。该设计方法速度快、效率高,可以为实际制作非线性光学器件提供理论指导。

关键词 非线性光学; 多波长产生; 和频产生; 光学超晶格; 非周期结构

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0519002

Design of Multiple-Wavelength Frequency Conversion Device Based on Intensity Distribution

Ren Kun¹ Liu Yali¹ Ren Xiaobin² Fan Jingyang¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²College of Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

Abstract Controllable frequency conversion devices, with the generation of multiple-wavelength, are designed. We analyze the variation of light intensity in nonlinear crystal with propagation distance. A method is proposed to design nonlinear structure based on the distribution of light intensity. MATLAB software is used to simulate sum frequency generation. An aperiodic structure is obtained to achieve simultaneous six sum-frequency-generations. The weighting coefficient is introduced to flexibly modify output intensity and obtain objective spectrum with arbitrary shape. By analyzing sum-frequency-generation and second-harmonic-generation, the obtained structure can not only generate multiple-wavelength, but also arbitrarily adjust the optical power of output wavelength. Our proposed method has advantages of fast speed and high efficiency. It can provide a good guidance for the fabrication of nonlinear optical devices.

Key words nonlinear optics; multiple-wavelength generation; sum-frequency generation; optical superlattice; aperiodic structure

OCIS codes 190.4360; 190.2620; 190.7220

1 引 言

随着计算机和互联网的快速发展,全光通信成为下一代通信技术的发展目标,其中光源器件的重要性不言而喻。为拓展激光光源,人们利用准相位匹配技术在频率变换方面做了大量的工作。准相位匹配结构的设计从最初的周期结构发展到准周期结构、啁啾结构、分形等多种结构^[1-6]。近年来,利用单一器件同时实现多波长频率转换的研究引起了人们关注,对此研究人员提出了多种方法^[7-15]来设计相应的非线性结构。Mizuuchi等^[7]通过把周期结构串联起来形成序列级联结构,得到了多波长;准周期和非周期结构被用来实

收稿日期: 2015-12-07; 收到修改稿日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11104200)

作者简介: 任 坤(1976—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体和非线性光学方面的研究。E-mail: renkun@tju.edu.cn

现二次谐波的多波长输出^[12-13];通过遗传算法、模拟退火算法或二者的有效结合,得到了输出二次谐波的优化的非周期结构^[14-16];此外,利用啁啾极化铌酸锂非线性光子晶体,从实验上得到了高阶宽谱带的三原色输出^[17-18]。

本文进行了多波长频率转换的非线性结构的设计工作。从非线性晶体中的光强分布变化出发,提出了一种简便快捷的设计方法,以此获得了多重准相位匹配的非周期超晶格结构。在实现多个信号光同时频率变换的同时,还能够对多波长输出的相对强度进行灵活调控。

2 单波长频率变换的结构设计

以单波长的和频产生(SFG)为例,假定抽运光和信号光同时入射到磷酸钛氧钾(KTP)晶体中。在小信号近似条件下,根据非线性介质中三波混频的耦合波方程,若调整入射光方向使晶体的最大非线性系数得到利用,此时和频光 I_3 的光强表达式为

$$I_3 = \frac{8\omega_3^2 I_1 I_2 |d_{\max}|^2 L^2}{c^3 \epsilon_0 n_1 n_2 n_3} \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right), \quad (1)$$

式中 c 是真空中光速, ϵ_0 是真空中介电常数, d_{\max} 是晶体的最大非线性系数。 I_1 和 I_2 表示抽运光和信号光的光强, ω_3 为和频光的频率。 n_j 和 k_j ($j=1, 2, 3$) 分别是三光波在 KTP 晶体中的折射率和波矢, 下标 1、2、3 分别代表抽运光、信号光、和频光。相位失配因子 $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ 。 $\text{sinc}\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\Delta k L}{2}\right)}{\frac{\Delta k L}{2}}$ 。 L 为晶体总长度, 取值范围为 $[0, L]$, 光沿 z 方向传播。

均匀介质中和频光强 I_3 随传输距离 z 的变化如图 1 中的蓝线所示。可以看出, 蓝色曲线呈周期性振荡, 这是由于相位因子 $\exp(i\Delta k z)$ 的存在, 使得耦合光波能量在抽运光、信号光与和频光之间周期性转换。在图 1 中的灰色区域内, 光强逐渐减小。如果引入相位差 π 来补偿该区域的相位失配, 从(1) 式可知, 在该区域内可以扭转光强的下降趋势^[19]。相位差的引入可以通过改变非线性系数符号来实现, 实际应用中可以通过对铁电畴结构的调制以实现相关区域的极化反转。

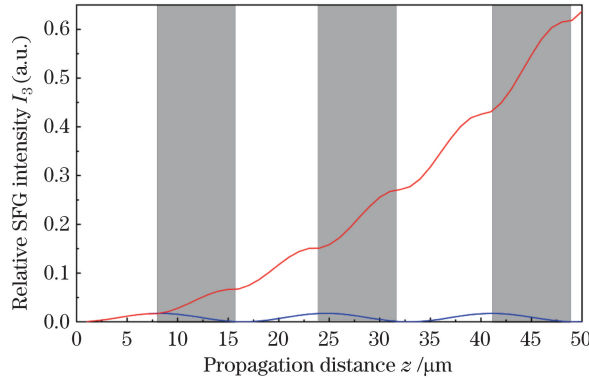


图 1 非线性介质中和频光强随传播距离的变化曲线。蓝色曲线表示在均匀介质中, 红色曲线表示在非线性系数调制的介质中
Fig. 1 Curves of sum-frequency intensity versus propagation distance in nonlinear medium. The blue curve shows intensity in homogeneous medium, and the red curve shows intensity in the medium modulated by nonlinear coefficient

于是, 判断非线性系数符号需要改变的区域, 就成为结构设计面临的首要问题。通过各区域和频光的光强变化来决定非线性系数符号, 在光强增强的区域, 非线性系数符号保持不变, 而在光强衰减的区域改变非线性系数符号。调制的非线性系数分布 $\chi^{(2)}(z)$ 可表示为

$$\chi^{(2)}(z) = |\chi^{(2)}| \text{sgn}[I_3'(z)], \quad (2)$$

式中 $I_3'(z)$ 表示和频光光强在 z 处的一阶导数, 体现了光强在该位置的升降。sgn 为符号函数, 可表示为

$$\text{sgn}[I_3'(z)] = \begin{cases} 1 & I_3'(z) > 0 \\ -1 & I_3'(z) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

图 2 为设计出的可实现单个波长和频过程的准相位匹配结构示意图, 蓝色代表非线性系数符号为 +1

的部分,而白色代表非线性系数符号为-1的部分。晶体的极化畴分布呈周期性,设计出的结构和理论分析结果一致。

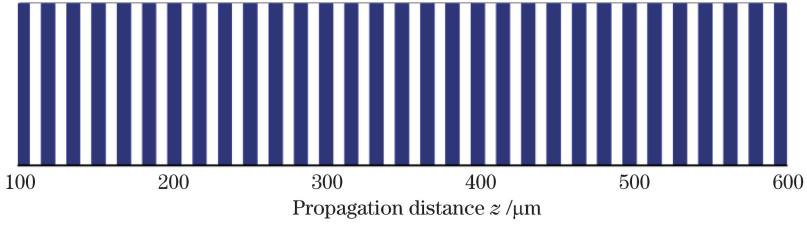


图 2 实现单波长和频的准相位匹配结构的部分畴分布

Fig. 2 Part of domain distribution of quasi-phase-matched structure which achieves single wavelength sum-frequency

和频光强在调制结构中的变化如图 1 中的红色曲线所示。可以看到,调制结构使 I_3 在原本衰减的灰色区域继续增强,获得了更高效率的和频光输出。若抽运光源为 Nd: YAG 激光器发出的波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 的激光,光强 I_1 为 $2 \times 10^7 \text{ W/m}^2$,信号光波长为 $1.65 \mu\text{m}$,入射到 30 mm 长的晶体上,由和频转换效率 $\eta =$

$$\frac{8\omega_3^2 |d_{33}^2| I_1 L^2}{c^3 \epsilon_0 n_3 n_2 n_1} \left| \frac{1}{L} \int_0^L \chi^{(2)}(z) \exp(i\Delta k z) dz \right|^2$$

可知,此时单波长和频过程的转换效率为 7.378% 。

3 多波长同时产生的结构设计

利用上述思路设计可以同时发生多波长频率转换的准相位匹配器件。仍以和频为例来研究多个波长的同时和频产生。

此时,准相位匹配结构的非线性系数分布 $\chi^{(2)}(z)$ 可以表示为 $\chi^{(2)}(z) = |\chi^{(2)}| \text{sgn}[I'_s(z)]$, 其中, $I_s(z)$ 是多个目标波长的和频光强之和,上标表示一阶导数。若有 N 个信号波长,总光强 $I_s(z)$ 可由下式给出:

$$I_s(z) = \sum_{j=1}^N I_{3j} = \sum_{j=1}^N \frac{8\omega_{3j}^2 I_{1j} I_{2j}}{c^3 \epsilon_0 n_{1j} n_{2j} n_{3j}} \cdot \left| \int_0^L \chi^{(2)}(z) \exp(i\Delta k_j z) dz \right|^2. \quad (4)$$

仿真实验中,抽运波长仍为 $1.064 \mu\text{m}$,选取在 $1.620 \sim 1.670 \mu\text{m}$ 之间等间隔的 6 个信号波长,相邻波长间隔为 10 nm 。通过计算可知,和频光波长在 $640 \sim 650 \text{ nm}$ 之间,实现这些和频过程对应的晶体极化周期 $\Delta_j = 2\pi/\Delta k_j$ 介于 $16.0 \sim 16.7 \mu\text{m}$ 。下面对总长度为 30 mm 的晶体中的畴结构进行设计,以实现 6 个不同信号光在单块晶体中的同时和频过程。

在均匀介质中,6 个和频光强之和随传播距离不断变化。图 3 为晶体内部 $0 \sim 500 \mu\text{m}$ 范围内总光强随传输距离的变化,右上角的内插图为更长晶体 ($0 \sim 4000 \mu\text{m}$) 内总光强的变化规律。可以看出,总光强时增时减,随传输距离呈振荡分布。

根据各个区域中总光强的减弱和增强趋势,利用 (3) 式的符号函数调制非线性系数的正负,可得到相应的晶体极化畴分布。图 4 为设计的部分极化畴结构 ($200 \sim 500 \mu\text{m}$),白色表示畴反转部分。图中可以看出畴分布呈宽窄不一的非周期性。

非线性结构的设计可以理解为通过对晶体非线性系数的调制,在倒格矢空间 Δk 域中,补偿非线性过程中的相位失配。要在同一晶体中实现多个非线性过程,比如上述 6 个波长的和频产生,由于每个非线性过程都有相位失配 Δk_j ,所以都应有相应的倒格矢来补偿。晶体中非线性系数的分布 $\chi^{(2)}(z)$ 可由下式表示:

$$\chi^{(2)}(z) = \frac{L}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(2)}(\Delta k) \exp(-i\Delta k z) d(\Delta k), \quad (5)$$

式中 $\chi^{(2)}(\Delta k)$ 是倒格矢空间 Δk 域的傅里叶分量。各信号波长的傅里叶分量为

$$\chi_j^{(2)}(\Delta k_j) = \frac{1}{L} \int_0^L \chi^{(2)}(z) \exp(i\Delta k_j z) d(z). \quad (6)$$

根据前面设计的 $\chi^{(2)}(z)$ 分布和 (6) 式计算了傅里叶分量与信号波长的关系,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,对前面设计出的非周期结构取傅里叶变换,得到的倒格矢光谱中有 6 个明显的高峰。进一步研究

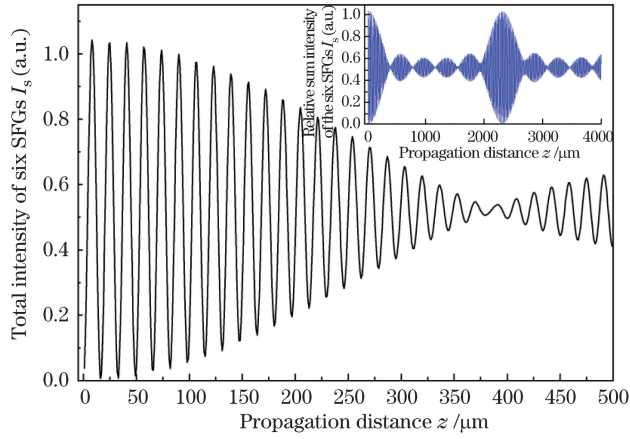


图 3 0~500 μm 范围内总光强随传输距离的变化曲线。插图为 0~4000 μm 范围的强度变化曲线

Fig. 3 Curve of total intensity versus propagation distance in the range of 0~500 μm .

The inset shows the curve of intensity variation in the range of 0~4000 μm

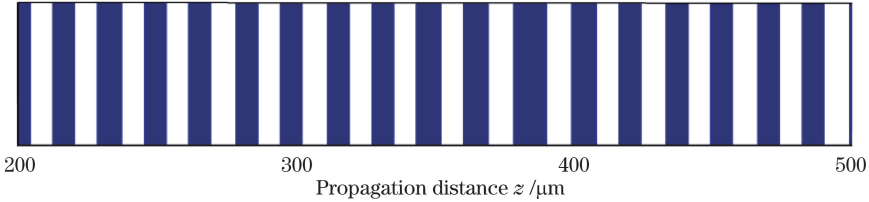


图 4 实现 6 个和频产生的非周期超晶格结构

Fig. 4 Aperiodic superlattice structure achieving six SFGs

了该结构的和频光强输出与信号波长的关系,如图 6 所示。图中红色星形表示目标波长位置,可以看到仅在 6 个目标波长处有较高的强度峰,其他波长处的强度很低。这证明该结构的确可以补偿多个相位失配,能够实现 6 个和频过程的有效输出。

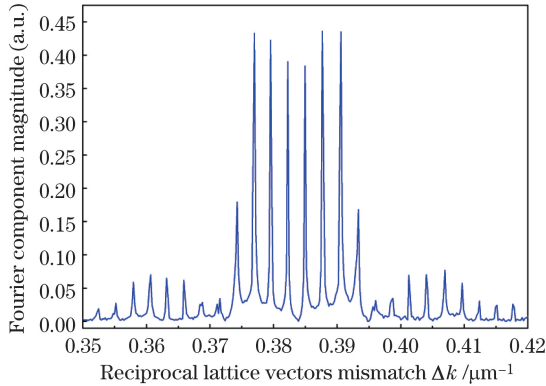


图 5 可实现 6 个和频产生的非周期结构的倒格矢光谱图

Fig. 5 Reciprocal lattice vector spectrum of aperiodic structure which achieves six SFGs

从图 6 可以看出,6 个目标波长的输出光强不等,相互间差异明显。为了调控各个和频过程的输出,引入权重系数 C_j ,使每个和频过程的光强 I_{3j} 对总输出光强具有不同贡献,下标 j 对应各个非线性过程。此时总光强可表达为: $I_s(z) = \sum_{j=1}^N C_j I_{3j}$ 。初始化光强权重系数 $C_j = 1 (j = 1, 2, \dots, N)$,得出多波长输出的总光强分布 $I_s(z)$ 。根据各个区域光强的变化调制相应区域的非线性系数符号。利用得到的新结构,重新计算各波长的输出光强 I_{3j} ,并将其与目标光谱进行比较,利用反馈来调节权重系数:如果某波长的光强偏高,就降低它的权重系数 C_j ;反之,就增大权重系数 C_j 。然后用新的权重系数再计算 $I_s(z)$,根据新的光强变化

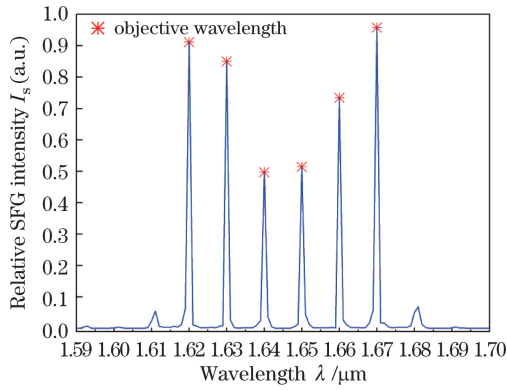


图 6 非周期结构的输出光谱图

Fig. 6 Output spectrum of aperiodic structure

获得新的畴分布 $\chi^{(2)}(z)$ 。对上述过程进行多次迭代,直到达到目标谱的要求。

以上述 6 个和频过程为例,设定目标光谱为 6 个相等的和频输出。利用总光强分布,调制相应区域的非线性系数符号,第一次得到的 6 个和频的输出光强即为图 6 所示。经过多次调整可得到新的非周期结构,此时输出和频光强与信号波长的关系如图 7(a)所示。对比图 6 和图 7(a)发现,经过反馈优化调节,输出得到了改善,6 个和频光强趋于一致,达到了目标光谱的要求。图 7(b)给出了各目标波长的输出光强随传播距离的变化曲线,可以看到各和频光强在传播过程中虽有起伏,但整体都呈上升趋势,最终实现了等强度的有效光输出。在抽运光强为 10^8 V/m 时,6 个目标波长所对应的和频转换效率为 4.8%。

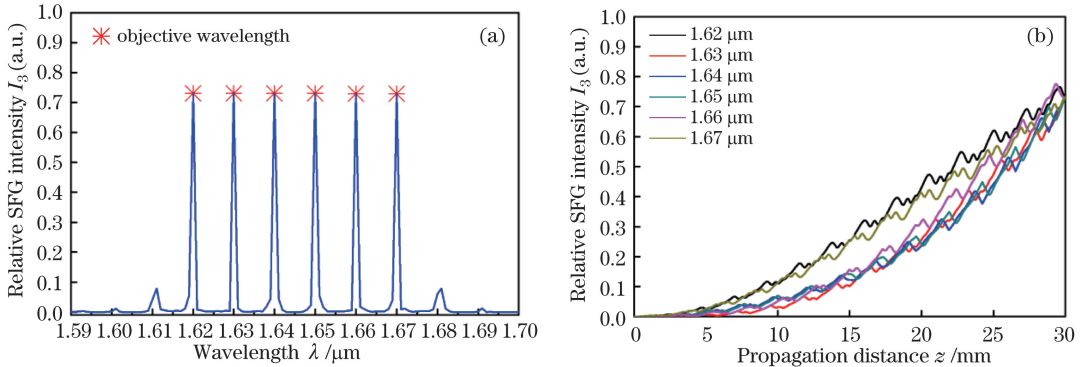


图 7 优化调整后非周期结构的输出光强。(a)输出和频光强与波长的关系;(b)目标波长的和频光强随传播距离的变化

Fig. 7 Output intensity of the adjusted aperiodic structure. (a) Output intensity of sum-frequency versus wavelength; (b) sum-frequency intensity of objective wavelengths versus propagation distance

进一步研究了目标光强比为 1:1:1:2:2:2 的不等光强输出的情况,信号光波长分别为 1.620、1.630、1.640、1.650、1.660、1.670 μm 。利用上述研究方法,从分析晶体中的总光强分布出发,调节非线性系数正负,利用权重系数合理反馈,经过迭代设计出非周期晶体结构。图 8(a)给出从该非周期结构出射的和频光强随入射信号波长的变化曲线,图中红色星形表示目标波长。可以看到出射光只在 6 个目标波长处有比较大的强度输出。图 8(b)显示了各目标波长的和频光强随晶体长度的变化曲线,可以看到各光强在整个非线性结构内持续增强。仔细分析数据发现,图中峰值的相对大小符合目标光强比,说明利用所提出的方法获得的结构,不仅可以同时实现多个非线性频率变换,而且还可以调控各个过程的输出强度,实现强度不同的目标谱输出。

以上研究的是等间隔的多波长产生,可以看到,利用所提方法设计出的结构可以实现不同形状的目标谱输出。下面进一步研究不等间隔且彼此相距较远的多个目标波长,参数和参考文献[20]相同。选择目标波长为 0.97200、1.08200、1.28300、1.36400、1.56870 μm ,用长度为 8298.8 μm 的 LiTaO_3 晶体设计等光强的多波长倍频产生。设计时选取单位畴长度为 3 μm ,得到的非线性结构简称为“结构 I”,其输出光谱如图 9(a)所示。可以看到光谱和参考文献[20]采用模拟退火算法的结果一致,这说明利用光强变化设计极化结构的

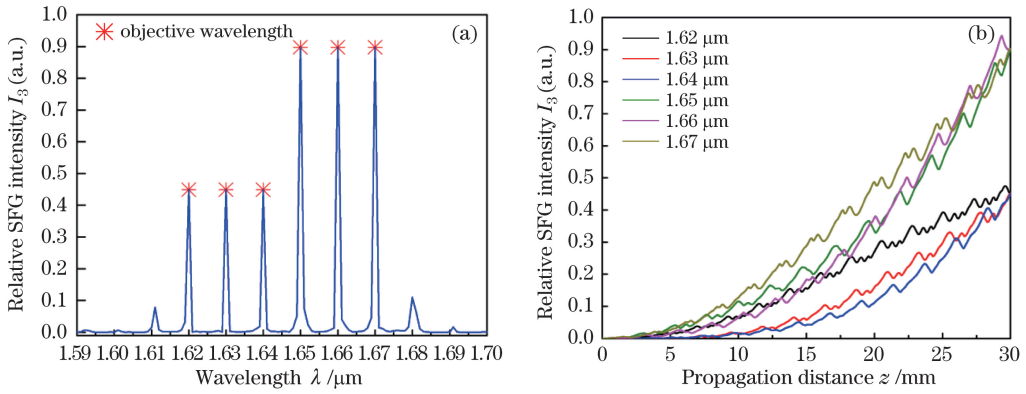


图 8 非周期结构的输出光强,目标输出光强比为 1:1:1:2:2:2。(a)输出和频光强与波长的关系;(b)目标波长的和频光强随传输距离的变化

Fig. 8 Output intensity of the aperiodic structure, the objective intensity is set as 1:1:1:2:2:2. (a) Output intensity of sum-frequency versus wavelength; (b) sum-frequency intensity of objective wavelengths versus propagation distance

方法可以同时实现多波长频率变换。注意到在图 9(a)和参考文献[20]中,除了在目标波长位置处出现了 5 个峰,同时也出现了杂峰,这是由于最小畴选取太大,引入了额外的倒格矢所致。当选定的单位畴长度为 $1 \mu\text{m}$,得到的非线性结构简称为“结构 II”,其输出光谱如图 9(b)所示。此时仅在 5 个目标波长位置处出现了峰,先前的杂峰被抑制,且输出和频光强相等。这说明选取较短的单位长度进行设计,可以抑制额外的杂峰出现。

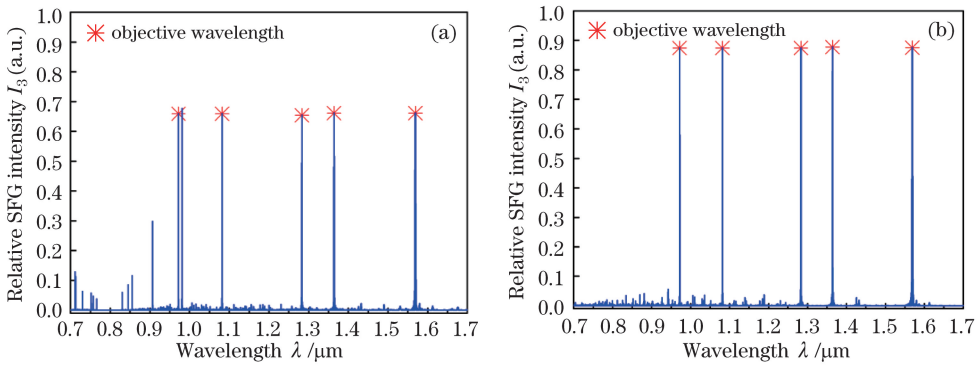


图 9 选取不同单位长度设计出的两个非线性结构的输出光谱。(a)结构 I;(b)结构 II

Fig. 9 Output spectrum of two nonlinear structures designed with different unit lengths. (a) Structure I; (b) structure II

然而,由于选取了较小的单位长度进行设计,获得的非线性结构中可能会出现较短的极化畴,实际极化技术会限制短畴的制备。为了解决这个问题,考虑到加工工艺,将长度小于 $3 \mu\text{m}$ 的负畴变成正畴和两侧的正畴合并,对小于 $3 \mu\text{m}$ 的正畴,保持其极性不变。由此得到的新结构简称为“结构 III”,其输出光谱如图 10 所示,与图 9(a)相比,目标波长之外的杂峰消失。这说明通过对短畴进行处理,依然可以得到具有较高保真度的光谱输出。需要说明的是,在前面对多波长和频产生的研究中,对出现的小于加工工艺的负畴也采用了同样的方法处理。整个仿真计算耗时只有数十秒,且获得的结构可以满足实际极化的制备要求,证明了所提出的方法是一种有效的晶体结构设计方法。

4 结 论

从非线性晶体中光强分布的角度出发,提出了一种设计多重准相位匹配晶格结构的方法。相比于一般的遗传算法、模拟退火算法等晶体结构设计方法,该方法大大节省了计算时间。研究结果表明,这种基于光强变化方法设计出的非周期结构,在多个目标波长(等间隔和不等间隔)的情况下,都能很好地补偿相位失配,得到较高的强度输出。通过研究不同单位畴长度对输出光谱的影响,发现用较小的单位长度进行设计,得到的结构可以很大程度上抑制杂峰的出现。在此基础上,对设计中出现的短畴进行合乎极化工艺限制的

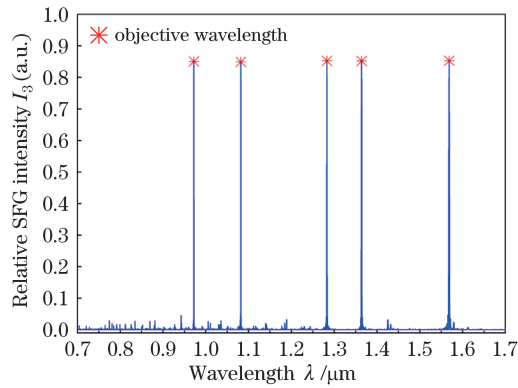


图 10 非线性结构 III 的输出光谱

Fig. 10 Output spectrum of nonlinear structure III

处理,可以获得高保真度的光谱输出。此外,设计出的非周期结构不仅可以同时实现多个非线性过程,而且通过引入权重系数,还能够实现对能量谱的灵活调控。

参 考 文 献

- Meenakshisundaram N, Pandiyan K, Kashyap R. A systematic approach for designing quasi-periodic optical superlattices using the Hadamard matrix[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(1): 015204.
- Tehranchi A, Morandotti R, Kashyap R. Efficient flattop ultra-wideband wavelength converters based on double-pass cascaded sum and difference frequency generation using engineered chirped gratings[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 22528-22534.
- Gui Shixin, Chang Jianhua, Yan Na, *et al.*. A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser based on periodically poled lithium niobate[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1102002.
桂诗信, 常建华, 严娜, 等. 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1102002.
- Sheng Y, Ma D, Ren M, *et al.*. Broadband second harmonic generation in one-dimensional randomized nonlinear photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(3): 031108.
- Liao J, He J L, Liu H, *et al.*. Simultaneous generation of red, green, and blue quasi-continuous-wave coherent radiation based on multiple quasi-phase-matched interactions from a single, aperiodically-poled LiTaO₃ [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3159-3161.
- Ma B Q, Ren M L, Ma D L, *et al.*. Multiple second-harmonic waves in a nonlinear photonic crystal with fractal structure [J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(2): 183-187.
- Mizuuchi K, Yamamoto K. Waveguide second-harmonic generation device with broadened flat quasi-phase-matching response by use of a grating structure with located phase shifts[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(24): 1880-1882.
- Li Zhi, Tan Huiming, Tian Yubing, *et al.*. All-solid-state multi-wavelength yellow laser intra-cavity SHG/SFG[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0214001.
李智, 檀慧明, 田玉冰, 等. 全固态腔内 SHG/SFG 多波长黄光激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0214001.
- Ren K, Ren X, Liu Y, *et al.*. An efficient method for analyzing second harmonic generation with the consideration of pump depletion[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(19): 1577-1582.
- Zhao Gang, Jiang Xudong, Lv Xinjie, *et al.*. Four-wavelength near and mid-infrared optical parameter oscillator based on superlattice[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0502004.
赵刚, 蒋旭东, 吕新杰, 等. 基于光学超晶格的四波长近-中红外光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502004.
- Ren F F, Ye J, Lu H, *et al.*. Spectrum broadening of high-efficiency second harmonic generation in cascaded photonic crystal microcavities[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 756-763.
- Yang J, Hu X P, Xu P, *et al.*. Chirped-quasi-periodic structure for quasi-phase-matching[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14717-14723.
- Liu H, Zhu S N, Zhu Y Y, *et al.*. Multiple-wavelength second-harmonic generation in aperiodic optical superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(18): 3326-3328.
- Chen X, Wu F, Zeng X, *et al.*. Multiple quasi-phase-matching in a nonperiodic domain-inverted optical superlattice[J].

- Physical Review A, 2004, 69(1): 013818.
- 15 Lu M, Chen X F, Chen Y P, *et al.*. Algorithm to design aperiodic optical superlattice for multiple quasi-phase matching [J]. Applied optics, 2007, 46(19): 4138-4143.
 - 16 Zhao L M, Zhou Y S, Zhao J. Tunable output of second harmonic generations in photonic quantum well structures made of nonlinear material[J]. International Journal of Modern Physics B, 2012, 26(31): 3847-3856.
 - 17 Chen B Q, Ren M L, Liu R J, *et al.*. Simultaneous broadband generation of second and third harmonics from chirped nonlinear photonic crystals[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(7): e189.
 - 18 Chen B Q, Zhang C, Hu C Y, *et al.*. High-efficiency broadband high-harmonic generation from a single quasi-phase-matching nonlinear crystal[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(8): 083902.
 - 19 Fejer M M, Magel G A, Jundt D H, *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(11): 2631-2654.
 - 20 Gu B Y, Zhang Y, Dong B Z. Investigations of harmonic generations in aperiodic optical superlattices [J]. Journal of Applied physics, 2000, 87(11): 7629-7637.