文章编号:1674-2869(2025)06-0670-07

利用PPLT光学参量振荡器产生1.7 μm高能脉冲光源的设计

刘 阔[1,2],陟海豫[1,2],邹 凡[1,2],刘泽川[1,2],姚 瑶[1,2],吴浩煜*[1,2]
1. 武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院,湖北 武汉 430205;
2. 光学信息与模式识别湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:为提升激光频率可调谐性、脉冲功率等关键指标,本文提出一种周期极化钽酸锂(PPLT)晶体型光学参量振荡器(OPO)产生1.7 μm高能脉冲光源的有效设计。通过使用非线性包络方程仿真技术,研究了包括色散、非线性、损耗以及滤波等多种效应协同作用的超短脉冲光参量振荡过程,结果表明1.7 μm高能脉冲光源的产生主要受光参量变频和自相位调制作用,与相位失配量、非线性作用长度密切相关。在此基础上,使用控制变量技术,分别研究晶体周期、通光长度以及控制温度对OPO增益特性的影响,寻找最佳的系统结构与参数配置。最终选取PPLT晶体周期为31.68 μm、通光长度为950 μm,以及控制温度为70 ℃,能够有效平衡相位失配量与有效非线性作用长度之间的影响,获得光谱半高全宽为48 nm、平均功率达到14.39 W的1.7 μm高能脉冲光源。该光源设计适用于红外光谱分析、生物荧光成像、含烃的聚合物和材料加工以及甲烷气体检测等众多重要应用领域。

关键词:光学参量振荡器;非线性包络方程;PPLT晶体;高能脉冲光源
中图分类号:TN248 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202412018

Design of a 1.7 μm high-energy pulsed laser source utilizing a PPLT-based optical parametric oscillator

***LIU Kuo*[1,2], *ZHI Haiyu*[1,2], *ZOU Fan*[1,2], *LIU Zechuan*[1,2], *YAO Yao*[1,2], *WU Haoyu*[*1,2]**
1. School of Optical Information and Energy Engineering, School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: To enhance key indicators such as laser frequency tunability and pulse power, in this paper, an effective design for generating a 1.7 μm high-energy pulsed laser source was proposed utilizing a periodically polarized $L_iT_aO_3$ (PPLT) crystal type optical parametric oscillator (OPO). By employing the nonlinear envelope equation simulation method, the ultra-short-pulse optical parametric oscillation process involving the combined effects of dispersion, nonlinearity, loss, and filtering was studied. The results indicated that the generation of the 1.7 μm high-energy pulsed laser source was mainly affected by optical parametric frequency conversion and self-phase modulation, which were closely related to the phase-mismatch amount and the nonlinear-interaction length. On this basis, using the control variable technique, the effects of the crystal period, the light-passing length, and the control temperature on the OPO gain characteristics were respectively investigated to find the optimal system structure and parameter configuration. Eventually, by

收稿日期:2024-12-20
基金项目:国家自然科学基金(11904112);湖北省自然科学基金(2024AFB609);武汉工程大学科学研究基金(K202255)
作者简介:刘 阔,硕士研究生。Email: 17513365784@163.com
***通信作者**:吴浩煜,博士,特聘副教授。Email: haoyuwu@wit.edu.cn
引文格式:刘阔,陟海豫,邹凡,等. 利用PPLT光学参量振荡器产生1.7 μm高能脉冲光源的设计[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(6):670-676.

choosing a PPLT crystal with a period of 31.68 μm, a light-passing length of 950 μm, and a control temperature of 70 ℃, the influence between the phase-mismatch amount and the effective nonlinear-interaction length can be effectively balanced, generating a 1.7 μm high-energy pulsed laser source with a full-width-at-half-maximum spectrum of 48 nm and an average power of 14.39 W. This laser source development is applicable to various fields such as infrared spectral analysis, biofluorescence imaging, hydrocarbon-containing polymer and material processing, and methane gas detection.

Keywords: optical parametric oscillator; nonlinear envelope equation; PPLT crystal; high-energy pulsed laser source

1.7 μm波段脉冲激光一直被视为一种很有发展潜力的光谱分析光源，其优势包括：(1)该波段位于水分子吸收峰间的低谷区域，相较于0.8和1.3 μm等常用于生物成像的超短激光波段，能显著降低瑞利散射效应[1-3]。这意味着在穿透含有水分子的生物组织时，可实现更低的能量损耗与更深的穿透深度，对于多光子荧光显微成像、深层大脑成像及无创医疗诊断等领域具有深远影响[4-6]。(2)1.7 μm波段恰好对应碳氢共价键的吸收峰[7]，能有效实现含烃的聚合物与分子的强烈吸收，从而有望应用于皮脂腺激光手术、塑料材料精密加工以及甲烷等天然气体的检测[8-10]。(3)该波段脉冲激光还具备泵浦掺镝光纤的能力，为产生中红外光谱光源提供了新途径[11-12]。

然而，随着需求的拓展深入，要求脉冲功率/能量增加(平均功率达到瓦量级、脉冲能量数十纳焦、飞秒脉冲宽度在100 fs左右)。尽管已发展出掺铥、掺铋光纤激光以及基于光纤孤子自频移结构[13-15]产生1.7 μm脉冲激光[16]，但这些光源目前在瓦量级功率尺度、脉冲持续宽度、波段覆盖以及波长调谐等方面仍不如光学参量振荡器(optical parametric oscillator，OPO)或光参量放大(optical parametric amplifier，OPA)技术获取的非线性变频光源[17-19]。特别是OPO系统，只需一束脉冲激光作为泵浦源，通过引入谐振腔提高腔内振荡光的强度，就能够获得非常可观的转换效率和输出功率，成为产生1.7 μm高能脉冲光源的理想选择。

通过OPO系统产生1.7 μm高能脉冲光源的典型方案是利用高功率光纤脉冲同步泵浦准相位匹配的非线性晶体型OPO。在当前的准相位匹配晶体中，周期极化磷酸氧钛钾(periodically poled $KTiOPO_4$，PPKTP)晶体、周期极化钽酸锂(periodically poled $LiTaO_3$，PPLT)晶体以及周期极化铌酸锂(periodically poled $LiNbO_3$，PPLN)晶体最为常见[20-22]。特别是PPLT晶体，凭借其更高的光损伤阈值、宽广的红外透光范围以及较高的非线性系数，成为产生1.7 μm高能脉冲光源的理想选择。然而，因为OPO内禀的调谐属性，腔内相位失配量与非线性作用长度都会直接影响OPO输出波长、脉冲能量以及脉冲脉宽，与此同时，由于脉冲型OPO需要严格满足腔内模式自洽、三波相位匹配以及同步泵浦条件，导致获取高达瓦量级水平的1.7 μm高能脉冲光源仍是一项具有挑战性的工作。色散、非线性、损耗以及滤波等多种作用将共同影响输出结果，研究多效应协同作用物理机制，寻找合适的工作区间，进而实现高增益非线性变频的脉冲输出，将是必须考虑到的一个重要科学问题。

同时，在宽调谐高能脉冲能量的OPO研究中，以往常用的理论分析模型为三波耦合方程组[23-24]，由于该模型建立在单色平面波假设上，使得难以处理宽谱超短脉冲的非线性变频演化行为。即使通过扩展方程，考虑群速度色散、高阶色散等因素作用，仍存在局限性。因此，选择更为合理的理论模型，并以此研究相关的1.7 μm波段脉冲演化行为十分必要。

基于上述研究背景，本文通过使用1.04 μm高功率掺镱光纤脉冲激光同步泵浦PPLT晶体型OPO，开展1.7 μm高能脉冲光源调控与优化设计。基于非线性包络方程(nonlinear envelope equation，NEE)理论，考虑包括色散、非线性、损耗以及滤波等多种协同作用的影响，数值仿真宽谱脉冲频率变换机制和脉冲演化行为，评估OPO输出脉冲特性。以此为基础，使用控制变量技术，分别研究非线性晶体周期、通光长度以及晶体温度对于OPO增益特性的影响，寻找最佳的系统结构与参数配置，最终提出了一种PPLT型OPO产生1.7 μm高能脉冲光源的有效设计方案。

1　数值仿真模型

1.1　NEE

OPO腔内脉冲的传输过程，主要包括在PPLT

晶体中色散非线性传输和经OPO腔镜的滤波、延时。针对上述多种协同作用物理机制研究，本文基于NEE仿真技术，数值仿真OPO腔内晶体中脉冲传输演化行为和增益动态特性。NEE形式如下[25]：

$$\frac{\partial A}{\partial z}+\mathrm{i}DA=-\mathrm{i}\frac{\chi^{(2)}\omega_0^2}{4\beta_0 c^2}\left(1-\frac{\mathrm{i}}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial\tau}\right)\left[A^2\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_0\tau-\mathrm{i}\left(\beta_0-\beta_1\omega_0\right)z}+2|A|^2\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega_0\tau-\mathrm{i}\left(\beta_0-\beta_1\omega_0\right)z}\right] \tag{1}$$

式(1)中：A 和 ω_0 分别表示复电场包络和载波频率；z 表示脉冲传输距离；τ 表示时间；c 为真空中的光速；β_0 和 β_1 分别为波数与群速度倒数；$D=\sum_{m\geqslant 2}^{\infty}\frac{\mathrm{i}^{m+1}}{m!}\beta_m\frac{\partial^m}{\partial\tau^m}$，其中 $\beta_m=\frac{\partial^m k}{\partial\tau^m}\Big|\omega_0$，表征色散作用；$\chi^{(2)}$ 为二阶非线性极化率，由于所用的PPLT晶体是周期极化准相位匹配特征晶体，其在数值仿真时还满足[26]：

$$\chi^{(2)}=\chi_{\mathrm{eff}}^{(2)}\sin\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right)\Big/\left|\sin\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right)\right| \tag{2}$$

式(2)中：$\chi_{\mathrm{eff}}^{(2)}$ 为PPLT晶体的二阶有效非线性极化率，等于二阶有效非线性系数的2倍[25-26]；Λ 表示非线性晶体周期。

相对于三波耦合方程组，NEE不再区分相互作用的各个光波，而是将所有的光频成分作为一个整体的光波场在非线性晶体中进行推演。因此，NEE能够预测宽谱超短脉冲演变的动态行为。

OPO腔镜的滤波与延时作用，用超高斯函数 $H(\omega)$ 表示[26]：

$$H(\omega)=\sqrt{R}\exp\left(-\ln 2\left[\frac{2\left(\omega-\omega_0\right)}{\Delta\omega}\right]^{10}-\mathrm{i}\left(\omega-\omega_0\right)T\right) \tag{3}$$

其中：R 为腔镜反射率；$\Delta\omega$ 表示滤波函数频率域的半高全宽；T 为OPO腔镜引入的延时作用，该延时用于模拟调谐OPO腔长。

1.2 OPO腔的循环模拟

为研究方便且不失一般性，本文采用图1所示OPO装置结构。通过采用高功率掺镱光纤激光作为泵浦光源以提升OPO系统的非线性作用量，腔体采用六面环形单谐振腔结构提升紧凑性。泵浦脉冲为高斯型，选取中心波长1.04 μm、脉宽100 fs、重复频率100 MHz、平均功率约7 W。OPO腔体包括6面反射镜和1块PPLT非线性晶体，构成紧凑的焦点环形腔。其中M1、M2是曲率为150 mm的平凹镜，M3~M6为平面镜。腔内平凹镜和平面镜对于0.82~1.07 μm(泵浦光)和2.10~5.00 μm(闲频光)的波长均具有99.5%以上的高透射率，而对于1.60~1.90 μm(信号光)的波长，除了M3存在约10%的输出耦合比率，其他腔镜均具有99.5%的高反射率，从而确保信号光脉冲单谐振。PPLT晶体置于M1和M2构成的焦点位置，并被有效温控以避免光折变效应。此外，OPO整体腔长约3 m，对应泵浦脉冲重复频率，从而满足同步泵浦条件。

OPO谐振光脉冲经晶体色散非线性传输和腔镜滤波延时作用，在腔内循环多次最终达到平衡状态。整个数值仿真过程将分为以下步骤：(a)输入脉冲参数初始化，时域、频域分步窗口假设准备；(b)基于NEE，利用分步傅里叶算法[27]，仿真脉冲在非线性晶体的色散非线性传输过程；(c)脉冲从晶体输出后，引入滤波和腔延迟作用环节，即脉冲频域上电场函数乘以上述超高斯函数；(d)经过滤波和腔延迟后，剩余在腔内谐振的脉冲电场函数，叠加新的泵浦脉冲电场函数；(e)循环重复步骤(b)~步骤(d)；(f)判断脉冲电场强度是否达到稳定条件(相邻两次循环的信号光脉冲的光强相对误差小于10^{-8})，若未稳定，则继续重复步骤(e)，否则，停止循环，获取稳定谐振状态电场结果。

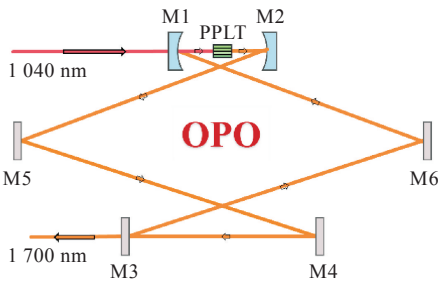

图1 OPO装置示意图

Fig. 1 Schematic of the OPO setup

2 优化设计与讨论分析

2.1 OPO腔内脉冲演化行为

基于图1所示结构研究OPO脉冲演化行为。设定初始仿真条件：PPLT晶体长度为1 mm，晶体周期 Λ=31.4 μm，二阶非线性系数为30×10^{-12} m/V，晶体温度控制在80 ℃，输入泵浦脉冲为高斯型，中心波长为1.04 μm、脉宽为100 fs，基于谐振腔理论以及OPO的同步泵浦条件，估算聚焦光斑半径约为65 μm，对应此处的峰值强度密度约为5.32×10^9 W/cm^2。如图2(a)所示，OPO腔内谐振脉冲经晶体光循环参量放大约200次后，脉冲能量

由微弱的噪声逐渐达到稳定状态；图2(b)和图2(c)分别表示OPO脉冲经过PPLT晶体输出的脉冲频谱及其演化过程。从光谱演化过程可见，中心波长1.04 μm泵浦脉冲在非线性晶体中传输到0.2 mm晶体通光长度前，发生了微弱的光参量过程，分别产生了1.7 μm波段信号光和2.7 μm波段闲频光。随着脉冲继续色散非线性传输，由于色散影响，泵浦光脉冲与信号光脉冲、闲频光脉冲时域上部分相互重叠，相位失配量减小，从而发生剧烈的光参量变频，使得泵浦光脉冲能量高效转换至参量光，导致信号光脉冲和闲频光脉冲强度得到大幅增强；当晶体通光长度超过0.4 mm，因为脉冲峰值功率的提升，其受到的自相位调制作用增强，因此，能观察到泵浦光、光参量脉冲的光谱均持续展宽，展宽所产生的新频谱成分在相位匹配条件下，继续参与光参量变频过程，从而进一步生成不同频谱成分的光参量光。促使光谱持续增宽，最终测得从晶体输出的信号光和闲频光脉冲谱宽，分别达到112和273 nm(−20 dB带宽)。此外在晶体输出端，还存在一些非相位匹配光谱结果[28]，包括泵浦和信号光和频(638 nm)、信号光倍频(850 nm)以及泵浦光倍频(520 nm)等多种变频方式产生的寄生光。

综上，1.7 μm高能脉冲光源产生主要受光参量变频和自相位调制作用，与相位失配量、非线性作用长度密切相关。由于泵浦脉冲条件确定，根据PPLT晶体的Sellmeier方程[29-30]可知，相位失配量由晶体周期、晶体温度决定，而非线性作用长度则取决于晶体通光长度[31]。

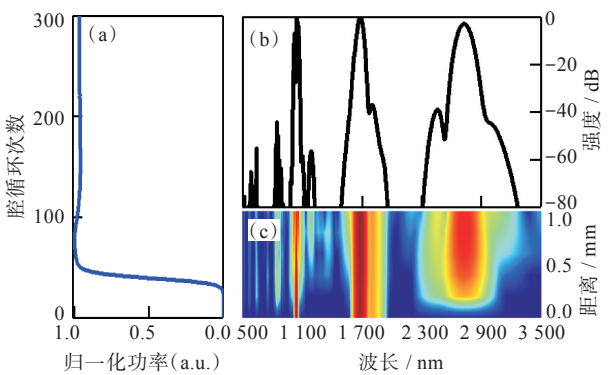

图2　OPO脉冲从弱噪声信号至稳定状态的参量增益演化过程(a)；OPO脉冲经过PPLT晶体输出的脉冲频谱(b)及其演化过程(c)

Fig. 2　The parametric gain evolution of the OPO pulses as it builds up from a weak noise signal to the steady state(a); The output pulse spectrum (b) and the evolution (c) of the OPO pulses going through the nonlinear crystal

2.2　晶体的优化设计

基于初始仿真条件，仅改变非线性晶体周期，即分别以0.1 μm为步长，仿真处于31.1~31.9 μm不同晶体周期下的OPO脉冲演化动态行为，以及记录该周期下最高能量输出脉冲的平均功率和脉冲光谱，结果如图3所示。可见，由于晶体周期的调控引起相位失配量变化，导致输出脉冲光谱调谐。当调控晶体周期从31.1 μm增加至31.7 μm时，光谱中心波长从1 665 nm调谐至1 700 nm，光谱半高全宽从83 nm降低至39 nm。如图3(b)所示，在晶体周期31.3~31.7 μm区间，输出脉冲平均功率基本维持在10.00 W以上，晶体周期为31.6 μm时，获得了最高输出平均功率14.10 W，这是因为此时三波脉冲之间的相位失配量最小，促使泵浦脉冲更为高效的变频转换效率。然而，当晶体周期继续增加并超过31.7 μm后，三波相位失配量会急剧增高，导致腔内光参量转换效率骤降，即测得31.8和31.9 μm周期下的信号光脉冲平均功率只有3.98和1.86 W；再继续增加晶体周期，将导致OPO无法正常谐振。从仿真结果观察，晶体周期的调控对应相位失配量变化，直接影响腔内光参量转换效率，从而改变输出脉冲波长以及平均功率，而1.7 μm高能脉冲光源最佳输出功率仅存在于相位失配量最小的晶体周期条件下。通过比较不同极化周期下OPO的输出功率结果，可以得出最佳的晶体周期处于31.6~31.7 μm之间。

同样基于初始仿真条件，但固定晶体周期为31.6 μm，仅调控晶体通光长度，从0.75 mm增加至1.15 mm，仿真不同通光长度下OPO脉冲演化行为，以及记录该晶体长度下最高能量输出脉冲的平均功率与脉冲光谱，结果如图4所示。调控晶体通光长度对应于改变非线性作用长度，会直接影响OPO稳定谐振时的增益结果。当调控晶体通光长度从750 μm增长至950 μm时，可以观察到输出脉冲光谱中心波长从1 705 nm转移至1 696 nm，光谱半高全宽从78 nm减小至50 nm，而平均功率则从13.50 W提升至14.20 W。在此过程中，增加非线性作用长度促使OPO增益得到提升。但当晶体通光长度超过950 μm，并继续增长至1 150 μm时，观察到OPO输出脉冲的平均功率从14.19 W降低到13.50 W，对应脉冲光谱中心波长从1 696 nm转移至1 688 nm，光谱半高全宽从50 nm减小至45 nm。根据以上OPO演化结果，三波脉冲在晶体中色散非线性传输距离超过980 μm时，泵浦脉冲与光参量脉冲将会发生时域走离，选取更长的晶

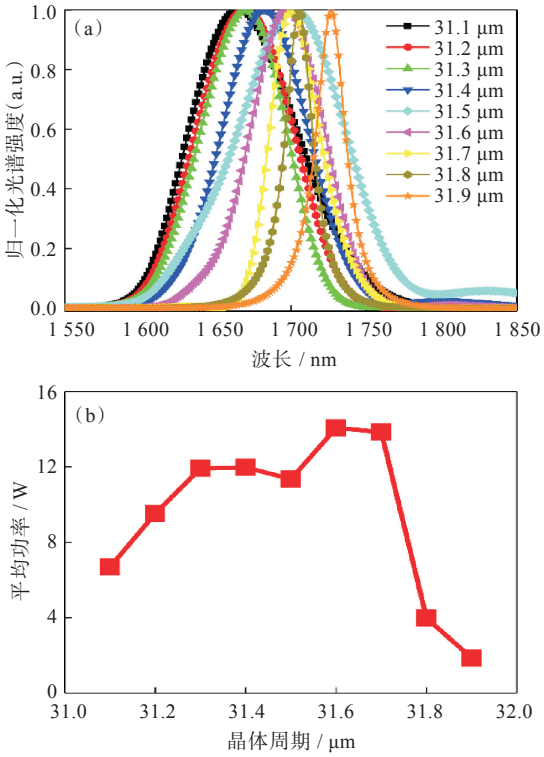

图3 不同晶体周期下OPO输出信号光脉冲光谱(a)和平均功率(b)

Fig. 3 The optical pulse spectra (a) and average power (b) of the OPO output signal at various crystal polarization periods

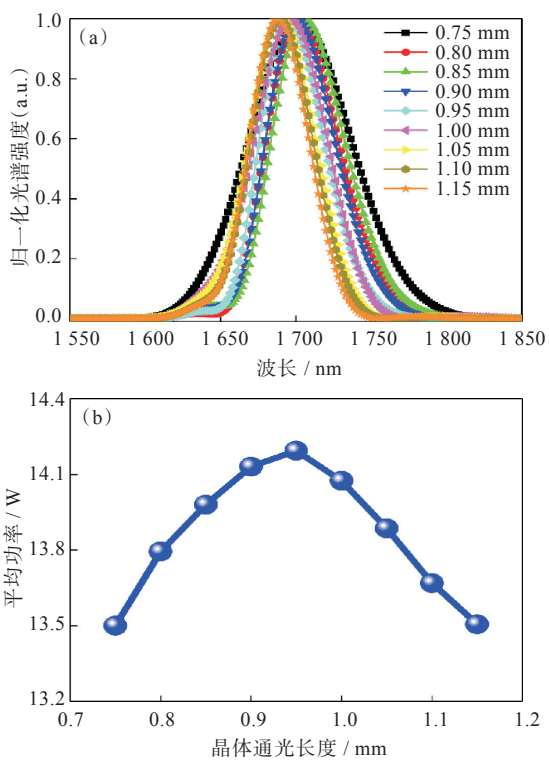

图4 不同晶体通光长度下OPO输出信号光脉冲光谱(a)和平均功率(b)

Fig. 4 The optical pulse spectra (a) and average power (b) of the OPO output signal at various crystal optical path lengths

体长度并不能提升非线性长度,而是因为更强的走离效应导致脉冲经过OPO腔长多次循环后,增益不断下降,从而使得输出脉冲的平均功率不断降低。因此,为了获取最佳1.7 μm高能脉冲光源输出功率,晶体通光长度应小于时域走离长度。

固定晶体周期31.6 μm以及通光长度950 μm,在初始仿真条件基础上,仅调控晶体温度从40 ℃增加至120 ℃,仿真不同晶体温度下OPO脉冲演化行为,以及记录该晶体温度下最高能量输出脉冲的平均功率与脉冲光谱,结果如图5所示。当调控晶体温度从40 ℃提升至60 ℃时,可以观察到OPO输出脉冲平均功率从12.50 W增加到14.10 W,光谱中心波长从1 684 nm变成1 690 nm,对应的光谱半高全宽从72 nm变成62 nm。继续提升晶体温度至100 ℃,OPO输出脉冲光谱的中心波长从1 690 nm增加至1 702 nm,光谱半高全宽从62 nm减小到43 nm,但在此温度区间,OPO输出脉冲平均功率基本维持在14.00 W以上。当晶体温度继续提升,可以明显观察到OPO输出脉冲平均功率从14.10 W骤降到11.50 W。此时因为晶体温度的调控改变了晶体折射率,从而影响三波脉冲的群速度。在晶体温度从40 ℃提升至60 ℃时,三波脉冲的相位失配量逐渐减小,促使腔内光参量变频的转换效率提升;同时,当晶体温度处于60~100 ℃之间,三波脉冲的相位失配量基本维持在一个较小数值,确保了OPO较高的变频转换效率以及高功率脉冲输出;但当晶体温度提升至100 ℃以上时,三波脉冲的相位失配量逐渐增加,会降低光参量变频转换效率,导致输出脉冲的平均功率骤降。由此可见,为了获取最佳1.7 μm高能脉冲光源输出功率,非线性晶体温度应控制在60~100 ℃之间。

基于上述仿真结果,在晶体周期31.6~31.7 μm、晶体温度60~100 ℃以及通光长度950 μm情况下,进一步精细调控晶体周期和晶体温度组合,从而平衡相位失配量与有效非线性作用长度之间的影响,检验此OPO系统在不同晶体温度下输出最佳1.7 μm高能脉冲光源的功率极限,结果如图6(a)所示。对应晶体温度60、70、80、90以及100 ℃,获得1.7 μm脉冲的最高平均功率分别为14.16、14.39、14.38、14.32以及14.11 W,相应的最佳晶体周期分别为31.70、31.68、31.66、31.60、31.60 μm。晶体温度70 ℃下,在晶体周期为31.68 μm时获得最高平均功率,对应的光谱结果如图6(b)所示,测得1.7 μm脉冲光谱的半高全宽达到48 nm。

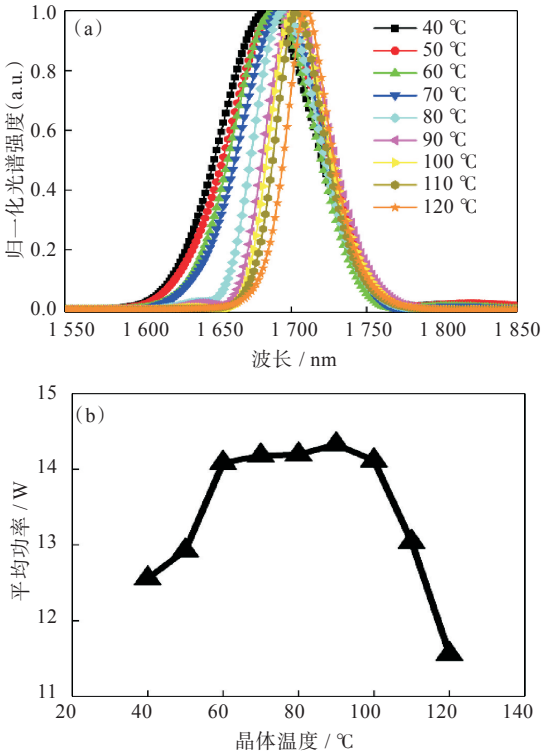

图5　不同晶体温度下OPO输出信号光脉冲光谱(a)和平均功率(b)

Fig. 5　The optical pulse spectra (a) and average power (b) of the OPO output signal at various crystal temperatures

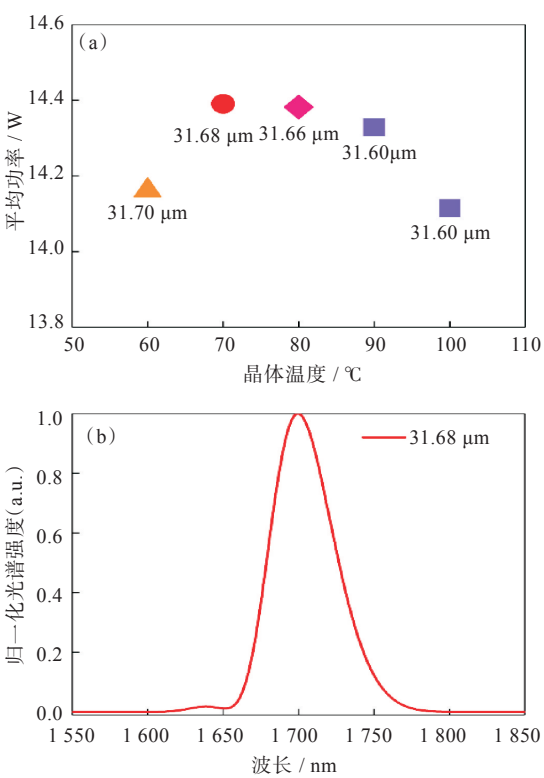

图6　不同晶体温度下OPO输出信号光的最佳平均功率结果(a)及在最高平均功率下的光谱(b)

Fig. 6　The optimal average power results (a) of OPO output signal at various crystal temperatures and the spectrum (b) at the highest average power

3　结　论

本文提出了一种基于PPLT晶体型OPO产生1.7 μm高能脉冲光源的设计方案。基于NEE仿真技术，研究了多种效应协同作用的光参量变频过程，结果表明1.7 μm高能脉冲光源的生成主要受光参量变频和自相位调制作用，与相位失配量、非线性作用长度密切相关。当调控非线性晶体周期和晶体温度来减少相位失配量，以及选取合适的晶体通光长度增强非线性作用长度时，能够大幅提升1.7 μm高能脉冲光源的平均功率。最终，通过平衡相位失配量与有效非线性作用长度之间的影响，在PPLT晶体周期为31.68 μm、通光长度为950 μm，以及控制温度为70 ℃时，获得了光谱半高全宽达到48 nm、平均功率达到14.39 W的1.7 μm高能脉冲光源。该光源设计适合用于红外光谱分析、生物荧光成像、含烃的聚合物和材料加工、日常的塑料材料精密加工以及甲烷气体检测等众多重要应用领域。

参考文献

[1] BASHKATOV A N, GENINA E A, KOCHUBEY V I, et al. Optical properties of the subcutaneous adipose tissue in the spectral range 400–2 500 nm [J]. Optics and Spectroscopy, 2005, 99(5): 836–842.

[2] SORDILLO L A, PU Y, PRATAVIEIRA S, et al. Deep optical imaging of tissue using the second and third near-infrared spectral windows [J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(5): 056004.

[3] 仝申，钟金成，陈新林，等. 1 700 nm波段超快光纤光源开发及其在多光子成像中的应用 [J]. 激光与光电子学进展，2024，61(12)：1200001.

[4] ZIPFEL W R, WILLIAMS R M, WEBB W W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences [J]. Nature Biotechnology, 2003, 21(11): 1369–1377.

[5] 张岩，张鹏，刘鹏，等. 1.7 μm波段光纤光源研究进展及其应用 [J]. 激光与光电子学进展，2016，53(9)：090002.

[6] NOMURA Y, MURAKOSHI H, FUJI T. Short-wavelength, ultrafast thulium-doped fiber laser system for three-photon microscopy [J]. OSA Continuum, 2020, 3(6): 1428–1435.

[7] WU M, JANSEN K, van der STEEN A F W, et al. Specific imaging of atherosclerotic plaque lipids with two-wavelength intravascular photoacoustics [J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(9): 3276–3286.

[8] ALEXANDER V V, KE K, XU Z, et al.

Photothermolysis of sebaceous glands in human skin ex vivo with a 1 708 nm Raman fiber laser and contact cooling [J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2011, 43(6): 470-480.

[9] 战泽宇, 陈吉祥, 刘萌, 等. 1.7 μm 超快光纤激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210850.

[10] DANIEL J M O, SIMAKOV N, TOKURAKAWA M, et al. Ultra-short wavelength operation of a thulium fibre laser in the 1 660-1 750 nm wavelength band [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18269-18276.

[11] LI L J, MA C Y, ZHAO N, et al. Numerical study of a bi-directional in-band pumped dysprosium-doped fluoride fiber laser at 3.2 μm [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(7): 1017-1204.

[12] QUIMBY R S, SHAW L B, SANGHERA J S, et al. Modeling of cascade lasing in Dy: chalcogenide glass fiber laser with efficient output at 4.5 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 123-125.

[13] 韩凯, 马阎星, 王小林, 等. 高功率掺铥光纤激光的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(10): 101406.

[14] XIAO X S, GUO H T, YAN Z J, et al. 3 W narrow-linewidth ultra-short wavelength operation near 1 707 nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping [J]. Applied Physics B Lasers and Optics, 2017, 123(4): 135.

[15] FIRSTOV S V, ALYSHEV S V, R IUMKIN K E, et al. Watt-level, continuous-wave bismuth-doped all-fiber laser operating at 1.7 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(18): 4360-4363.

[16] NGUYEN T N, KIEU K, CHURIN D, et al. High power soliton self-frequency shift with improved flatness ranging from 1.6 to 1.78 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(19): 1893-1896.

[17] BECHEKER R, TANG M, HANZARD P H, et al. High-energy dissipative soliton-driven fiber optical parametric oscillator emitting at 1.7 μm [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(11): 115103.

[18] KELLER K R, BUDWEG A, ALLERBECK J, et al. Sub-three-cycle pulses at 2 μm from a degenerate optical parametric amplifier [J]. Optics Letters, 2022, 47(7): 1594-1597.

[19] ZHOU Y, CHEUNG K K Y, YANG S G, et al. Widely tunable picosecond optical parametric oscillator using highly nonlinear fiber [J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 989-991.

[20] KLEIN M E, ROBERTSON A, TREMONT M A, et al. Rapid infrared wavelength access with a picosecond PPLN OPO synchronously pumped by a mode-locked diode laser [J]. Applied Physics B Lasers and Optics, 2001, 73(1): 1-10.

[21] 王海龙, 杨慧琦, 苏静, 等. 基于单共振光学参量振荡器实现近红外到中红外激光输出的实验研究 [J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1801005.

[22] LIU Z Y, TE X L, ZHANG S, et al. High-efficiency broad-linewidth widely-tunable mid-infrared OPO based on fan-out PPLT [J]. Laser Physics, 2023, 33(8): 085001.

[23] ARMSTRONG J A, BLOEMBERGEN N, DUCUING J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectri [J]. Physical Review, 1962, 127(6): 1918-1939.

[24] ZHENG Z H, TANG Z W, WEI Z Y, et al. Consideration of non-phase-matched nonlinear effects in the design of quasi-phase-matching crystals for optical parametric oscillators [J]. Optics Express, 2024, 32(7): 11534-11547.

[25] CONFORTI M, BARONIO F, DE ANGELIS C. Nonlinear envelope equation for broadband optical pulses in quadratic media [J]. Physical Review A, 2010, 81(5): 053841.

[26] REID D T. Ultra-broadband pulse evolution in optical parametric oscillators [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 17979-17984.

[27] FISHER R A, BISCHEL W K. Numerical studies of the interplay between selfphase modulation and dispersion for intense planewave laser pulses [J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(11): 4921-4934.

[28] CHENG Y S, McCRACKEN R A, REID D T. Dither-free stabilization of a femtosecond doubly resonant OPO using parasitic sum-frequency mixing [J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 768-771.

[29] BARBOZA N A, CUDNEY R S. Improved Sellmeier equation for congruently grown lithium tantalate [J]. Applied Physics BLasers and Optics, 2009, 95(3): 453-458.

[30] MINOR C E, CUDNEY R S. Mirrorless optical parametric oscillation in bulk PPLN and PPLT: a feasibility study [J]. Applied Physics B Lasers and Optics, 2017, 123(1): 38.

[31] 于文兵, 夏守之. 级联二阶非线性全光波长转换技术 [J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(1): 113-116.

本文编辑:霍淑利