

ZnGeP₂ OPO 产生 4.3 μm 波段窄线宽激光实验研究*

卞进田, 叶庆, 孙晓泉

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:为了设计 4.3 μm 波段大功率窄线宽中红外激光器,开展了 2.7 μm 激光抽运 ZnGeP₂ 晶体光参量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO)技术产生 4.3 μm 波段窄线宽激光实验研究,对实验结果开展了详细的分析。抽运源为 1064 nm 抽运的 KTiOPO₄ OPO 激光器输出的 2.7 μm 波段参量激光,KTiOPO₄ OPO 采用单谐振结构,将两块相同的 KTiOPO₄ 晶体光轴相向放置以补偿走离效应,KTiOPO₄ 晶体按 $\phi = 0^\circ$ 、 $\theta = 62^\circ$ 切割以获得波长 2.7 μm 波段激光输出,采用 II(B) 类相位匹配($o \rightarrow o + e$)以利用较大的非线性系数。ZnGeP₂ OPO 采用单谐振结构,采用 II(B) 类相位匹配($o \rightarrow o + e$)以获得窄线宽输出,ZnGeP₂ 晶体按 $\phi = 0^\circ$ 、 $\theta = 68^\circ$ 切割以获得波长 4.3 μm 波段激光输出。在抽运光波长 2.7 μm,脉冲能量为 7.5 mJ,脉宽 8.6 ns 的条件下,获得脉冲能量 2.12 mJ,线宽 30 nm,脉宽 8.7 ns 的 4.26 μm 激光输出,光-光转换效率约为 28.3%,斜效率约为 32.6%,水平和垂直方向的光束质量 M^2 分别为 6.2 和 13.5。

关键词:激光器;4.3 μm 激光;单谐振光参量振荡器;ZnGeP₂ 晶体

中图分类号:TN 248.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)04-009-06

ZnGeP₂ optical parametric oscillator 4.3 μm laser with narrow line-width

BIAN Jintian, YE Qing, SUN Xiaquan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to design high-power narrow line-width 4.3 μm laser, the narrow line-width 4.3 μm laser was obtained by ZnGeP₂ OPO (optical parametric oscillation) pumped by a 2.7 μm laser. Experimental results were analyzed in detail. The pump source was a 2.7 μm KTiOPO₄ OPO laser pumped by a 1064 nm Nd:YAG laser, and the KTiOPO₄ OPO was singly resonated. Two identical KTiOPO₄ crystals were placed with opposite optical axis to compensate the walk off effect. The KTiOPO₄ crystals were cut as $\phi = 0^\circ$, $\theta = 62^\circ$ to generate 2.7 μm wave band laser. To utilize the large effective nonlinear coefficient, the phase matching was based on type II(B) ($o \rightarrow o + e$). The ZnGeP₂ OPO was singly resonated too. To output narrow line-width laser, the phase matching is based on type II(B) ($o \rightarrow o + e$). The ZnGeP₂ crystal was cut as $\phi = 0^\circ$, $\theta = 68^\circ$ to generate 4.3 μm laser. The energy of the 2.7 μm laser is 7.5 mJ with a pulse of 8.6 ns and line-width 12 nm. The pulse energy of 2.12 mJ at 4.26 μm with an optical-optical conversion efficiency of 28.3% and a slop efficiency of 32.6% is obtained, and the pulse width is 8.7 ns, the line-width is 30 nm. The beam qualities M^2 of horizontal and vertical directions are 6.2 and 13.5, respectively.

Key words: lasers; 4.3 μm laser; the single-resonant optical parametric oscillation; ZnGeP₂ crystal

中红外 3~5 μm 波段处于大气红外窗口,该波段激光在光谱学、遥感、医疗、环保等领域具有重要的应用价值和前景^[1-3],尤其是在军事领域的应用潜力,使得该波段激光成为目前各国研究的热点^[4-5]。由于光参量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO)技术可提供宽的连续调谐,结构小巧紧凑,可连续或高重频脉冲输出数瓦(至几十瓦)级功率的中红外激光。OPO 技术实现中红外激光输出成了现阶段的最佳选择。可用于中红外 OPO 激光输出的晶体有 ZnGeP₂、KTiOPO₄、KTiOAsO₄、LiIO₃、LiNbO₃、周期极化铌酸锂

(Periodically Poled LiNbO₃, PPLN)、周期极化钽酸锂(Periodically Poled LiTaO₃, PPLT)、AgGaSe₂ 与 AgGaS₂ 等。PPLN、PPLT 晶体采用准相位匹配,无须考虑走离效应,非线性系数较大,可采用 1 μm 激光泵浦,适合于产生波长短于 4 μm 的中红外激光,波长长于 4 μm 后,由于晶体吸收严重将导致输出激光功率(能量)急剧下降。ZnGeP₂ 晶体具有非常高的非线性系数(75 pm/V)、在 2~12 μm 波段良好的透过性以及导热性等^[6-7],使其成为获取中红外激光输出的首选。ZnGeP₂ 对波长短于 2 μm 的激光吸收较强,目前国内外

* 收稿日期:2018-01-14

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金资助项目(KY13C162)

作者简介:卞进田(1979—),男,湖南华容人,副研究员,博士,E-mail:bianjt@126.com

绝大部分的报道集中在利用 $2.1 \mu\text{m}$ 激光泵浦 ZnGeP_2 OPO 产生中红外激光输出^[8-10]。 $2.1 \mu\text{m}$ 激光来源大致分成两类:一类是利用 $1.9 \mu\text{m}$ 掺 Tm 激光泵浦掺 Ho 激光得到或直接利用掺 Tm、Ho 的激光得到;另一类是利用 $1.06 \mu\text{m}$ 激光泵浦 KTiOPO_4 OPO 或周期性极化晶体(周期极化磷酸钛氧钾(Periodically Poled KTiOPO_4 , PPKTP)或 PPLN)OPO 得到。但上述方法存在的主要缺点是,不论采用哪种方式得到 $2.1 \mu\text{m}$ 激光,若用其泵浦 ZnGeP_2 OPO 输出 $4.3 \mu\text{m}$ 激光, ZnGeP_2 OPO 此时只能采用 I 类匹配方式(II 类匹配时 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段无相位匹配角),而 $4.3 \mu\text{m}$ 恰处于简并点附近,输出线宽很宽,达到 $200 \sim 300 \text{ nm}$ ^[11-13],不适用于窄线宽输出要求。所以,报道的利用 $2.1 \mu\text{m}$ 激光泵浦 ZnGeP_2 OPO 输出 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外激光的峰值波长多在 $3.8 \mu\text{m}$ 、 $4.6 \mu\text{m}$ 附近,避开了简并点^[14-15]。

本文利用 $2.7 \mu\text{m}$ 波段可调谐激光泵浦 II 类匹配方式 ZnGeP_2 OPO 得到波长 $4.3 \mu\text{m}$ 波段窄线宽可调谐激光输出,其中 $2.7 \mu\text{m}$ 波段激光由 $1.064 \mu\text{m}$ 泵浦的 KTiOPO_4 OPO 产生。在泵浦波长 $2.7 \mu\text{m}$ 、泵浦能量 7.5 mJ 时,参量信号光 $4.26 \mu\text{m}$ 处能量 2.12 mJ 、线宽约为 30 nm (半高宽),较利用 $2.1 \mu\text{m}$ 激光泵浦输出线宽约 $200 \sim 300 \text{ nm}$ 大为压缩。

1 理论分析

1.1 调谐曲线

ZnGeP_2 晶体为正单轴晶体,单轴晶体 o 光折射率不随光线方向与光轴方向的夹角 θ 的变化而变化,仅与波长相关,表示为 $n_o(\lambda)$ 。而 e 光折射率不仅与波长有关还和 θ 有关,表示为 $n_e(\lambda, \theta)$ 。对于确定的波长有:

$$n_e(\lambda, \theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

式中, $n_e = n_e(\lambda, 90^\circ)$, $n_o = n_o(\lambda)$, 由晶体的 Sellmeier 方程给出。本文计算中使用的方程为^[7]:

$$n_o^2 = 5.67491 + \frac{4.077926}{1 - 0.159328/\lambda^2} + \frac{1.896005}{1 - 900/\lambda^2} \quad (2)$$

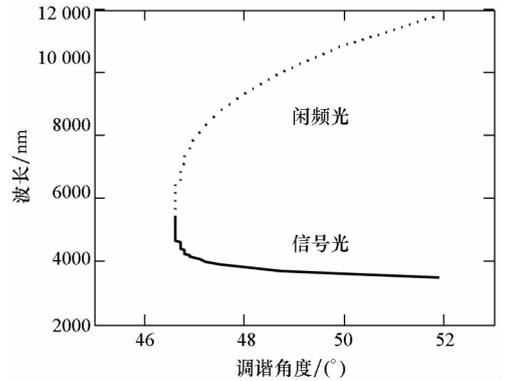
$$n_e^2 = 3.65014 + \frac{6.310153}{1 - 0.125099/\lambda^2} + \frac{1.731381}{1 - 900/\lambda^2} \quad (3)$$

参量作用过程中,互作用三波需满足能量守恒和动量守恒,即需要满足泵浦光子能量等于信号光和闲频光能量之和,还需要满足方程:

$$n_p \omega_p = n_i \omega_i + n_s \omega_s \quad (4)$$

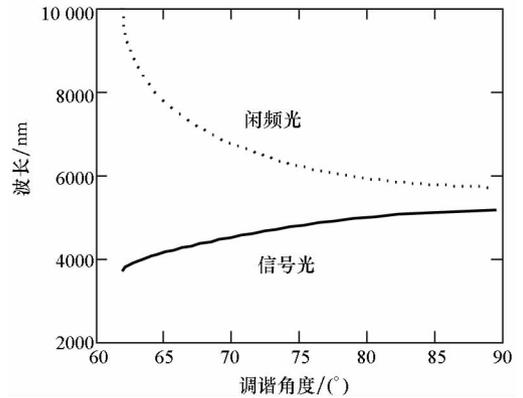
即相位匹配。其中, ω_s 、 ω_i 分别为信号光及闲频光角频率, n_s 、 n_i 、 n_p 分别为信号光、闲频光、泵浦光折射率。I 类相位匹配方式信号光和闲频光都为 e 光, II 类相位匹配方式信号光和闲频光一个为 o 光,一个为 e 光。

据此分别计算 $2.7 \mu\text{m}$ 激光泵浦 ZnGeP_2 OPO 输出 $4.3 \mu\text{m}$ 波段中红外激光在 I 类和 II 类相位匹配方式下的调谐曲线,如图 1 所示。



(a) I 型相位匹配

(a) Type I



(b) II 型相位匹配

(b) Type II

图 1 ZnGeP_2 OPO 调谐特性

Fig. 1 ZnGeP_2 OPO tuning characteristics

由图可见,采用 $2.7 \mu\text{m}$ 激光泵浦的两种匹配方式输出波长均可覆盖 $3 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,并充分利用了 ZnGeP_2 晶体的透光波段,相比之下, $2.7 \mu\text{m}$ 泵浦 II 类匹配方式 ZnGeP_2 OPO 的调谐曲线在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段较平坦,有利于窄线宽输出。

1.2 单谐振光参量振荡器振荡阈值

ZnGeP_2 OPO 阈值的分析主要应用 Brosnan 及 Byer 的经典理论模型^[16]。在该模型中,定义单谐振 OPO 信号光能量 $100 \mu\text{J}$ 时泵浦光的输入能量密度作为 OPO 的振荡阈值(信号光功率为初始噪声功率的 e^{33} 倍),其阈值能量密度可表示为:

$$J_{th} = \frac{2.25}{\kappa g_s L_{eff}^2 (1 + \gamma)^2} \left[\frac{33L}{2\tau c} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right]^2 \quad (5)$$

式中, τ 为泵浦光脉冲半高宽; γ 为泵浦光场后向与前向振幅之比; L 为 OPO 腔光学长度; c 为光速; α 为晶体对信号光吸收系数; l 为晶体长度; R 为 OPO 腔镜对信号光一次往返反射率; g_s 为模式耦合系数; κ 为增益系数, 可表示为:

$$\kappa = \frac{2\omega_s \omega_p d_{eff}^2}{n_s n_i n_p \epsilon_0 c^3} \quad (6)$$

其中, d_{eff} 为有效非线性系数, ϵ_0 为真空介电常数。

模式耦合系数为:

$$g_s = \frac{w_p^2}{w_p^2 + w_s^2} \quad (7)$$

其中, w_p 和 w_s 分别为泵浦光和信号光半径, 对于高斯光束有:

$$\left(\frac{\pi}{2L\lambda} \right)^2 w_s^6 + w_s^2 - \frac{w_p^2}{2} = 0 \quad (8)$$

则有效增益长度为:

$$L_{eff} = l_w \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\pi} l}{2 l_w} \right) \quad (9)$$

其中, erf 为误差函数, l_w 为走离距离, 则

$$l_w = \frac{\sqrt{\pi} w_p}{2 \rho} \sqrt{\frac{w_p^2 + w_s^2}{w_p^2 + w_s^2/2}} \quad (10)$$

其中, ρ 为走离角。

阈值公式的物理意义可解释为在阈值条件下增益等于损耗。其中, 式(5)中括号内第一项对应脉冲建立过程中的损耗, 第二项和第三项分别对应晶体吸收损耗和腔结构的耦合输出损耗, 最后一项对应于双通泵浦过程的损耗。

2 实验装置

实验采取双 OPO 结构, 第一级 OPO 为 Nd:YAG 调 Q 输出 1.064 μm 激光(10 Hz, 10 ns) 泵浦 KTiOPO₄ OPO 产生的 2.7 μm 波段激光; 第二级 OPO 为 2.7 μm 波段激光泵浦 ZnGeP₂ OPO 产生 4.3 μm 波段激光, 实验装置如图 2 所示。

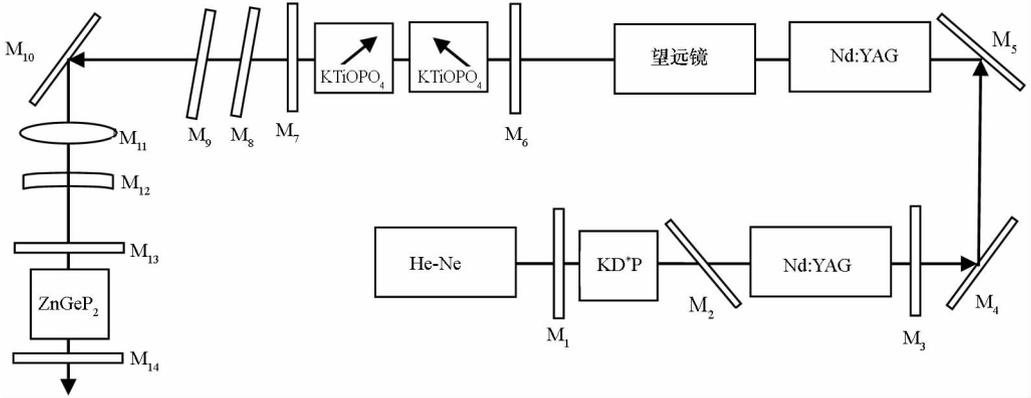


图 2 KTiOPO₄ OPO 泵浦 ZnGeP₂ OPO 实验装置

Fig. 2 Experimental setup of ZnGeP₂ OPO pumped by KTiOPO₄ OPO laser

振荡级 1.06 μm 激光经过一级 Nd:YAG 放大后, 由望远镜聚焦系统将光斑直径从 7 mm 压缩至 3 mm; M₆ 为 KTiOPO₄ OPO 输入镜, 基质为 K9 玻璃, $T = 94\% @ 1.06 \mu\text{m}$, $R = 97\% @ 1.7 \sim 1.8 \mu\text{m}$; M₇ 为 KTiOPO₄ OPO 输出镜, 基质为 CaF₂ 玻璃, $T = 99\% @ 1.06 \mu\text{m}$, $R = 90\% @ 1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$, $T = 90\% @ 2.7 \mu\text{m}$, $T = 60\% \sim 90\% @ 2.4 \sim 2.9 \mu\text{m}$; OPO 腔长为 50 mm, 2 块 KTiOPO₄ 晶体实现走离补偿, 尺寸为 $7 \times 7 \times 20 \text{ mm}^3$, 切割角 $\phi = 0^\circ$, $\theta = 62^\circ$, 两端面镀膜对泵浦光和信号光增透的增透膜。

从 KTiOPO₄ OPO 输出的激光经白宝石镀膜镜片 M₈ (对 1.06 μm 和 1.5 ~ 2.0 μm 高反) 滤光后, 再经过对 1.06 μm 激光高反的 M₉ 镜滤光, 保证只有 2.7 μm 波段激光输出。M₁₀ 为 2.7 μm 45° 全反镜, 用来改变 2.7 μm 泵浦光路; CaF₂ 双凸透镜 M₁₁ 与平凹

透镜 M₁₂ 一起构成压缩光组, 将 2.7 μm 波段激光聚焦至 ZnGeP₂ 晶体中; M₁₃ 及 M₁₄ 分别为 ZnGeP₂ OPO 输入镜及输出镜, 设计成使 4.3 μm 信号光谐振, 使泵浦光双程通过, 输入镜 M₁₃, 其 $T > 95\% @ 2.7 \mu\text{m}$, $R > 99\% @ 4.3 \mu\text{m}$, $T = 70\% @ 7.106 \mu\text{m}$, 输出镜 M₁₄, 其 $R = 99\% @ 2.7 \mu\text{m}$, $R = 70\% @ 4.3 \mu\text{m}$, $T = 70\% @ 7.106 \mu\text{m}$; ZnGeP₂ 晶体尺寸为 $6 \times 6 \times 10 \text{ mm}^3$, 切割角 $\phi = 45^\circ$, $\theta = 68^\circ$, 两端面镀中红外增透膜, $R < 3\% @ 2 \sim 5 \mu\text{m}$; OPO 腔长 15 mm。

3 实验结果与分析

3.1 输出能量与效率

从 KTiOPO₄ OPO 输出的 2.7 μm 激光经过白宝石片及 M₉ 镜滤光后, 再由 CaF₂ 透镜组 M₁₁ 和 M₁₂ 压缩至 ZnGeP₂ 晶体中, 以保证 ZnGeP₂ OPO 较

高的转换效率。压缩光斑半径水平方向约为 0.5 mm,垂直方向约为 1.1 mm,在相纸上打出的光斑如图 3 所示。

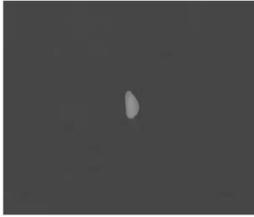


图 3 2.7 μm 泵浦激光光斑

Fig. 3 Shape of spot size 2.7 μm pumping laser on printing paper

准确测量从 ZnGeP₂ OPO 输出的 4 ~ 5 μm 波段激光能量是个难题。根据 SNLO 软件模拟计算的结果及腔镜透过率分析,4.26 μm 信号光能量占 ZnGeP₂ OPO 输出激光能量的主要部分(约 70%);其次为 7.373 μm 闲频光,而 2.7 μm 泵浦光成分相对较少(被消耗且输出镜对其反射率为 99%),故也可以将 ZnGeP₂ OPO 输出的总能量作为信号光与闲频光输出总能量的一种度量,国内外的类似研究工作也大多采用此法^[17-18]。

实验中发现,当输入 2.7 μm 泵浦光能量约为 7.5 mJ 时,将 ZnGeP₂ 晶体从 OPO 腔中取出,测得从 OPO 输出镜输出的泵浦光能量约为 60 μJ;放入 ZnGeP₂ 晶体后,调整腔镜使参量输出最大,测得最大输出约 3 mJ。1 小时内测得的激光输出能量不稳定性为 5.3%(均方根)。将二者能量值相减,可粗略判断信号光与闲频光输出能量约 2.94 mJ,但实际上输出能量应比此值稍大,因为简单的相减并未考虑泵浦光在向参量光转换过程中的消耗。

调节 Nd:YAG 激光电源电压实现 KTiOPO₄ OPO 输出激光能量调节,实验测量了 ZnGeP₂ OPO 输出能量随 2.7 μm 波段泵浦光输入能量曲线如图 4 所示。

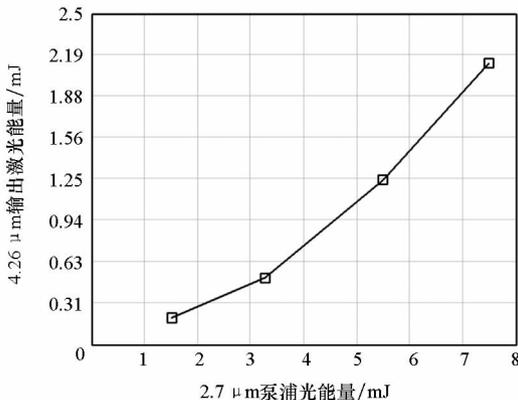


图 4 ZnGeP₂ OPO 输出能量随 2.7 μm 泵浦光输入能量曲线

Fig. 4 ZnGeP₂ OPO output energy versus 2.7 μm laserpump energy

由图可见,在 2.7 μm 激光输入能量 7.5 mJ 时得到 ZnGeP₂ OPO 信号光最大输出能量约 2.12 mJ,光-光转换效率约为 28.3%,斜效率约为 32.6%,阈值泵浦能量约为 1 mJ。根据式(4)对 ZnGeP₂ OPO 阈值的计算(ZnGeP₂ 晶体对信号光的吸收系数 α 为 0.05 cm⁻¹,泵浦光尺寸为 2w_p = 1.6 mm,有效非线性系数为 d_{eff} = 74 pm/V),其理论阈值约 86 mJ/cm²,换算成 2.7 μm 泵浦激光能量约 0.95 mJ,这与实验结果基本相符。信号光能量随着抽运光能量的增加不断增加,没有能量饱和现象。

3.2 输出光谱

实验中利用 Omni-λ3007 型光谱仪,使用光栅刻线为 300 g/mm、闪耀波长为 3000 nm 的光栅(中红外波段测量精度 1 nm)对输出光谱进行了测量。由于激光重复频率较低,光谱仪不能自动扫描波长范围并给出光谱分布,本文是这样做的:将液氮制冷的 InSb 探测器接在光谱仪出光狭缝处,由计算机控制光谱仪光栅的转动,此时激光能通过光谱仪的波长值可在计算机上直接显示。若入射光中含有此波长的激光,则能通过光谱仪,并被 InSb 探测器探测到,产生的电流信号经过放大器后转变成电压信号,同时被放大,接在示波器上得到一个脉冲波形;否则,入射激光不能通过光谱仪,InSb 探测器无信号输出,示波器亦无脉冲波形。据此,逐步改变光谱仪通光波长值,按上述方法进行测量,即可实现对入射激光光谱分布的扫描。

根据示波器在不同波长处显示的脉冲波形的幅度值,确定光谱分布的相对强弱。每个波长处脉冲波形幅度值取多次平均,将不同波长处的幅度值归一化,即可得出光谱分布曲线。实验测得在峰值波长 4.26 μm 处的光谱如图 5 所示。

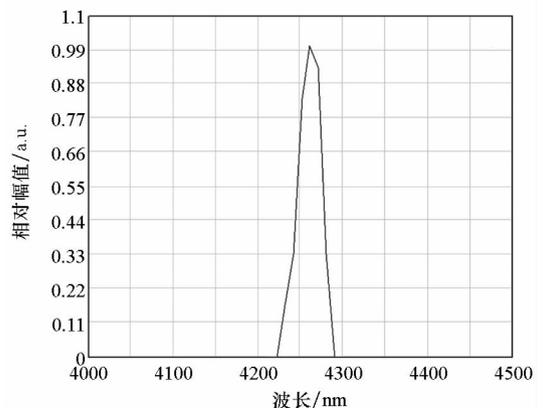


图 5 4.26 μm 处光谱分布图

Fig. 5 Spectrum distribution of 4.26 μm laser

由图可见,4.26 μm 处线宽约为 30 nm(半高宽),较报道的利用 2.1 μm 激光泵浦输出 200 ~ 300 nm 线宽大为压缩,这充分证明了本文所提方案的优势,也验证了理论分析的结果。

对于光参量振荡器来说,整个器件的运转包括泵浦源、谐振腔、非线性晶体等,因此,若要进一步压缩 OPO 的谱线宽度,需要综合各方面因素的影响。由于纳秒级 OPO 的输出参量线宽几乎正比于泵浦源线宽、泵浦光发散角、相位失配等^[16],所以可考虑采用如下措施得到更窄的线宽:

1)采用窄线宽、发散角小的泵浦源:这主要取决于 KTiOPO₄ OPO 输出 2.7 μm 激光的性能。若能提高泵浦源能量,可不必将其光斑聚焦至很小,则发散角可进一步减小,同样也可采用相同的措施压缩 KTiOPO₄ OPO 的线宽;

2)尽量减小相位失配 Δk;

3)采用装有标准具、衍射光栅或谐振反射器的强色散谐振腔来控制线宽;

4)采用种籽注入的 OPO 结构:即将窄线宽的种籽信号注入 OPO 腔内,精密调整谐振腔的长度,使注入种籽信号的频率振荡。如果注入种籽的能量足够高,种籽信号将首先建立起振荡,消耗泵浦光,进而抑制其他频率起振。

3.3 输出波长的调谐

对 ZnGeP₂ OPO 输出波长的调谐,既可以通过改变 ZnGeP₂ 晶体放置角度实现,又可以通过 KTiOPO₄ OPO 输出波长的调谐来实现,还可二者结合,故此双 OPO 结构可达到很宽的调谐范围。

实验中仅通过改变 ZnGeP₂ 晶体角度约 6°(晶体内匹配角约为 2°),实现了信号光峰值波长 4.18 ~ 4.32 μm 调谐输出,如图 6 所示。

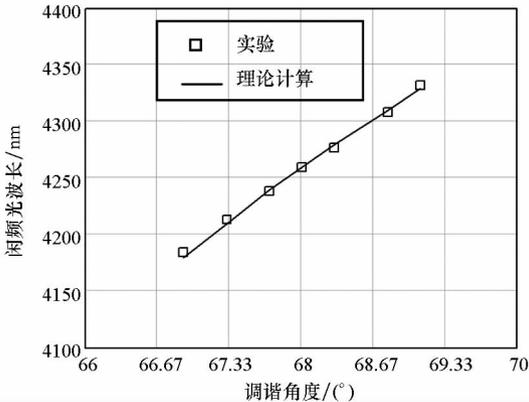
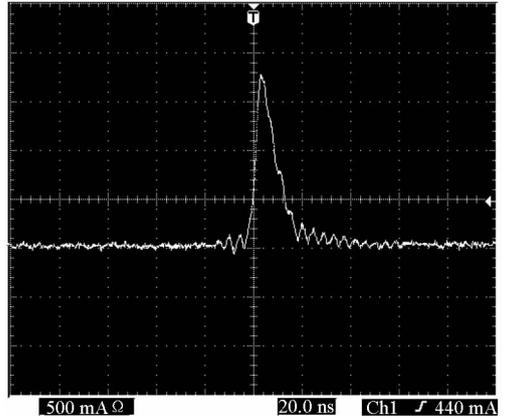


图6 ZnGeP₂ OPO 输出信号光波长调谐曲线
Fig.6 ZnGeP₂ OPO signal output wavelength tuning characteristics

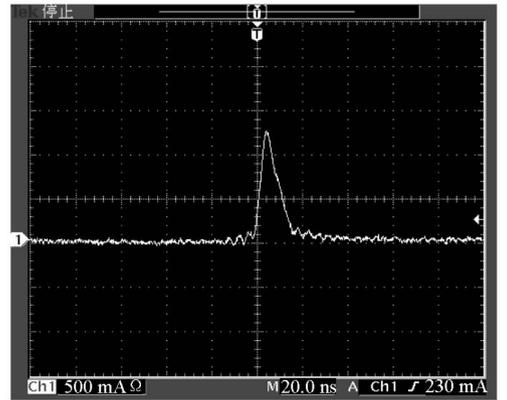
根据图 1 中 ZnGeP₂ 晶体波长调谐曲线可知,更大范围的输出亦可实现,但由于实际 ZnGeP₂ OPO 的短腔长限制了晶体旋转角度,未做实验验证。

3.4 输出脉冲时间特性

在 2.7 μm 激光输入能量 7.5 mJ,激光脉冲宽度 8.6 ns 时,光谱仪波长设定为 4.26 μm 时,使用波兰 VIGO - 10.6 红外探测器测量闲频光 4.26 μm 处脉冲波形,激光脉冲宽度为 8.7 ns,泵浦光脉冲波形和参量光信号光脉冲波形如图 7 所示。



(a) 泵浦光脉冲波形
(a) Pump pulse



(b) 4-5 μm 波段脉冲波形
(b) 4~5 μm signal pulse

图 7 脉冲小型

Fig.7 Temporal shape

由于 ZnGeP₂ 晶体非线性系数大,OPO 工作在 7.5 倍阈值的强泵浦状态,导致参量光脉冲宽度约比泵浦光脉冲宽度宽。

3.5 输出激光光束质量

通过一个聚焦透镜将输出激光进行聚焦,采用刀口法测量了变换后激光束束腰前后不同位置处的光斑尺寸,对光束质量进行了检测。如图 8

所示,激光光束在水平和垂直方向的光束质量参数 M^2 分别为 6.2 和 13.5。

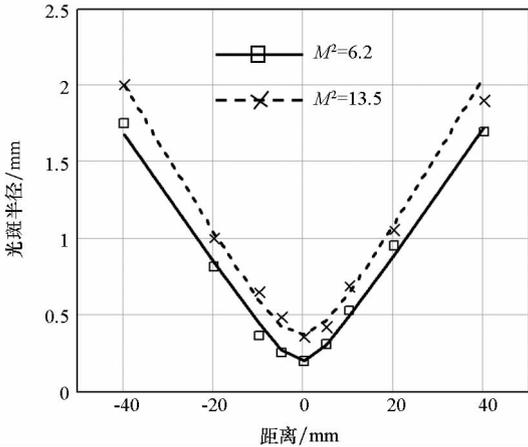


图 8 光束质量测量结果

Fig. 8 Measurement results of beam quality

4 结论

大功率可调谐窄线宽中红外激光在军事领域具有广阔的应用前景,目前采用 $2.1 \mu\text{m}$ 左右波长激光泵浦 ZnGeP_2 OPO 输出 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 激光的线宽较宽,功效比不好。本文采用 KTiOPO_4 OPO 泵浦 ZnGeP_2 OPO 的双 OPO 结构,调整 ZnGeP_2 晶体角度实现了 $4.18 \sim 4.32 \mu\text{m}$ 可调谐窄线宽激光输出。在 KTiOPO_4 OPO 输出 $2.7 \mu\text{m}$ 激光 7.5 mJ 情况下,得到了 2.12 mJ 的 $4.26 \mu\text{m}$ 激光输出,激光线宽约为 30 nm ,脉冲宽度 8.7 ns ,斜效率约为 32.6% 。还可通过 KTiOPO_4 晶体角度对 $2.7 \mu\text{m}$ 波段激光进行调谐,从而实现 $4.3 \mu\text{m}$ 波段更宽范围的调谐输出。通过提高泵浦光重复频率,改变泵浦光波长,将 ZnGeP_2 OPO 腔改为环型腔结构,并在腔内插入选纵模元件等措施,有望实现 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 大功率可调谐窄线宽激光输出。同时,随着 $2.7 \mu\text{m}$ 波段固体激光技术的发展,通过提高泵浦光单脉冲能量,可以实现 $4.3 \mu\text{m}$ 波段高能激光脉冲输出。

参考文献 (References)

[1] Xiong H, Xu H, Fu Y, et al. Generation of a coherent X ray in the water window region at 1 kHz repetition rate using a mid-infrared pump source [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(11): 1747 - 1749.

[2] Okishev A V, Westerfeld D, Shterengas L, et al. A stable mid-IR GaSb-based diode laser source for the cryogenic target layering at the Omega laser facility [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15760 - 15765.

[3] Villora E G, Shimamura K, Sumiya K, et al. Birefringent and quasi phase-matching with BaMgF_4 for vacuum-UV/UV and mid-IR all solid-state lasers [J]. *Optics Express*, 2009,

17(15): 12362 - 12378.

[4] Walsh B M, Reichle D J, Barnes N P, et al. Er: LuAG operation at $2.7 \mu\text{m}$ [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, 19: 218 - 220.

[5] O'Driscoll E J, Watson M A, Delmonte T, et al. The development and application of photonic technology in infrared and electro-optic countermeasures [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2007, 6738: 673803 - 1 - 673803 - 11.

[6] Lippert E, Nicolas S, Arisholm G, et al. High-power fiber-laser-pumped mid-infrared laser sources [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6397: 639704 - 1 - 639704 - 7.

[7] Das S, Bhar G C, Gangopadhyay S, et al. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP_2 crystal for infrared laser device applications; revisited [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4335 - 4340.

[8] Kafka J D, Watts M L, Pieterse J W, et al. Mid-infrared pulse generation using a sub-picosecond OPO [J]. *Applied Physics B*, 1995, 60(5): 449 - 452.

[9] Phua P B, Tan B S, Wu R F, et al. High average power mid infrared ZnGeP_2 optical parametric oscillator with a wavelength dependent polarization rotator [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(4): 489 - 491.

[10] Lippert E, Nicolas S, Arisholm G, et al. Midinfrared laser source with high power and beam quality [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3839 - 3845.

[11] Henriksson M, Tiihonen M, Pasiskevicius V, et al. ZnGeP_2 parametric oscillator pumped by a linewidth narrowed parametric $2 \mu\text{m}$ source [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1878 - 1880.

[12] Karaganov V, Law M, Kaesler M, et al. Engineering development of a directed IR countermeasure laser [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5615: 48 - 53.

[13] Vodopyanov K L. Mid-infrared optical parametric generator with extra-wide ($3 - 19 \mu\text{m}$) tunability: applications for spectroscopy of two-dimensional electrons in quantum wells [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(9): 1579 - 1586.

[14] 王礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. $2.09 \mu\text{m}$ 纳秒钬激光抽运的磷铈铋光参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 43 - 46.

WANG Li, YANG Jingwei, CAI Xuwu, et al. $2.09 \mu\text{m}$ nanosecond holmium laser pumped ZnGeP_2 optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 43 - 46. (in Chinese)

[15] 韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W 中波红外固体激光器 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 29 - 34.

HAN Long, YUAN Ligang, CHEN Guo, et al. 26 W mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 29 - 34. (in Chinese)

[16] Brosnan S, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, QE15(6): 415 - 431.

[17] Henriksson M, Sjöqvist L, Tiihonen M, et al. Tandem OPO systems for mid-infrared generation using quasi phase-matching and volume Bragg gratings [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2007, 6738: 673805 - 1 - 673805 - 11.

[18] Jiang H L, Bian Ji T, Nie J S, et al. Theoretical and experimental investigation on the $2.7 \mu\text{m}$ laser pumped ZnGeP_2 optical parametric oscillator generation $4.3 \mu\text{m}$ laser [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 76551P: 26 - 29.