

利用双光学参量振荡器结构输出 4.3 μm 激光方案

姜海林, 卞进田, 聂劲松, 孙晓泉

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 鉴于中红外激光的重要应用价值, 提出了分别用 2.1 μm 和 2.7 μm 激光泵浦 ZnGeP₂(ZGP) 光学参数振荡器(OPO), 采用不同相位匹配方式输出 4.3 μm 的激光方案, 计算并比较了匹配角、走离角、有效非线性系数、泵浦光的允许线宽、允许发散角、参量输出光的线宽以及 ZGP 对泵浦光的吸收系数等, 确定最佳方案为利用 1.06 μm 激光泵浦内腔式 KTP OPO 输出的 2.7 μm 激光作为泵浦源, 采用第 II 类匹配方式泵浦 ZGP OPO 输出 4.3 μm 激光, 该方案克服了传统方案的不足, 并给出了实验装置图, 选择了合适的实验参数, 计算了相应参数对 ZGP OPO 阈值的影响。2.7 μm 初步实验结果表明: 此方案切实可行, 为下一步 4.3 μm 激光输出实验奠定了基础。

关键词: 非线性光学; 4.3 μm 激光; 光学参量振荡器; ZGP

中图分类号: TN248 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)02-0210-04

Theoretical investigation on a method generating 4.3 μm laser based on the tandem optical parametric oscillator

Jiang Hailin, Bian Jintian, Nie Jinsong, Sun Xiaoquan

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

Abstract: The scheme of ZnGeP₂ (ZGP) optical parametric oscillator (OPO) generating 4.3 μm laser with different phase matching types pumped by 2.1 μm and 2.7 μm laser respectively were presented in view of the important application value of mid-infrared laser. The phase matching angle, walkoff angle, effective nonlinear coefficient, allowable linewidth and divergence angle of pump laser, linewidth of output laser and absorption coefficient of ZGP to pump laser were calculated and compared. The results show that the optimal scheme to generate 4.3 μm laser based on ZGP OPO is to use 2.7 μm laser as pump source, which was generated by 1.06 μm laser pumped KTP intracavity OPO with type II phase matching. The experimental scheme and proper parameters were presented. The effects of parameters on the threshold of ZGP OPO were analyzed. The results of theoretical calculation and preliminary experiment of 2.7 μm laser show that it is feasible to generate 4.3 μm laser by this method, which lays a foundation for the further experiments.

Key words: nonlinear optics; 4.3 μm laser; optical parametric oscillator; ZGP

收稿日期: 2010-05-10; 修订日期: 2010-07-05

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室资助项目

作者简介: 姜海林(1981-), 男, 博士生, 主要从事固体激光技术及非线性光学频率变换技术的研究。Email: jianghailin228@126.com

导师简介: 孙晓泉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电技术研究。Email: sunxq@tom.com.cn

0 引言

中红外波段激光在光谱学、医疗、遥感、环保及军事等领域具有重要的应用价值,使得该波段激光成为各国研究的热点。目前,普遍采用 1.06 μm 激光泵浦 KTP OPO 输出的 2.1 μm 激光作为泵浦源,采用 I 类匹配方式来泵浦 ZGP OPO 进而得到中红外激光输出^[1-2]。但这种方法的主要缺点是:输出的参量光位于简并点附近,线宽较宽^[3],达到 80~200 cm^{-1} ,不够实用;若加入线宽控制元件(如标准具或光栅),又增加损耗,阈值会增加;且 2.1 μm 激光只能作为泵浦光,目前,尚无其他用途。

另外,2.7 μm 激光处于 H_2O 吸收峰上,和 4.3 μm 激光在军事上均有重要应用。鉴于此,文中提出了一种利用内腔式 KTP OPO 输出的 2.7 μm 激光作为泵浦光来泵浦 ZGP OPO,实现 4.3 μm 激光输出的新方案,与其他几种方案相比,克服了传统方法的不足,显示了其优越性。结合理论计算及 2.7 μm 激光输出初步实验结果,论证了此方案的可行性,为下一步 4.3 μm 激光输出实验研究奠定了基础。

1 方案设计

ZGP 晶体由于其优良的特性而成为利用 OPO 输出中红外激光的首选晶体,不同文献对其 Sellmeier 方程系数报道稍有差异,依据参考文献[4]计算 2.7 μm 激光泵浦 ZGP OPO,分别采用 I 类及 II 类匹配方式输出中红外激光的调谐曲线如图 1 所示。

计算 ZGP OPO 分别采用几种匹配方式得到 4.3 μm 激光输出的相应参数如表 1 所示,其中 θ 为相位匹配角, d_{eff} 为有效非线性系数, ρ 为走离角, α 为 ZGP 晶体对泵浦光吸收系数^[5], $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\beta$ 分别为泵浦光允许线宽和允许发散角^[6], $\Delta\nu$ 为输出参量光线宽^[3],计算中 ZGP 晶体 d_{36} 取 75.4 pm/V ,最大允许失配量 $\Delta k = \pm\pi/l$,其中晶体长度 l 取 10 mm。

由此可见,采用 2.7 μm 激光泵浦比用 2.1 μm 激光泵浦更有利,因为在有效非线性系数相差不大的情况下,前者对泵浦光的允许线宽及允许发散角更大,走离角更小,ZGP 晶体对 2.7 μm 吸收系数比对 2.1 μm 更小。此外,前者泵浦光和输出光波长更接近,光子能量差异更小,对于一定的量子效率,其转换效率更高。与

2.1 μm 激光相比,2.7 μm 激光不但可以作为泵浦光,同时也是实际应用中的重要激光波长。

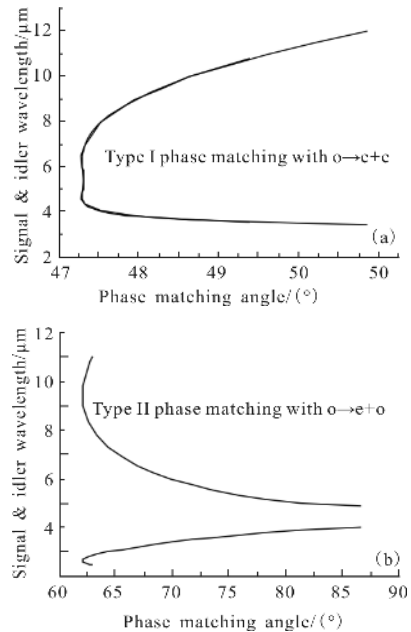


图 1 2.7 μm 激光泵浦 ZGP OPO 输出中红外激光调谐曲线
Fig.1 Tuning curves for the ZGP OPO generating mid-infrared laser pumped by 2.7 μm laser

表 1 两种匹配方式得到 4.3 μm 激光输出的相应参数
Tab.1 Parameters of ZGP OPO generating 4.3 μm laser with two phase matching types

Parameters	Pumped by 2.7 μm laser		Pumped by 2.1 μm laser
	Type II	Type I	Type I
$\theta/(\text{°})$	68.3	47.4	54.5
$d_{\text{eff}}/\text{pm}\cdot\text{V}^{-1}$	70.1	75.1	71.3
ρ/mrad	7.7	11	10.5
α/cm	0.01	0.01	0.08
$\Delta\lambda/\text{nm}$	1.61	1.65	0.56
$\Delta\beta/\text{mrad}$	18.0	7.5	5.8
$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	about 10	about 100	about 80~200

对于 2.7 μm 激光泵浦的情况,采用第 II 类匹配方式比用第 I 类匹配方式更有利,主要是因为后者在 4.3 μm 处输出线宽过宽,且其走离角更大,对泵浦光允许发散角更小。

此外,相比采用 2.79 μm Cr:Er:YSGG 或 2.94 μm Er:YAG 激光泵浦的情况,用 OPO 技术产生 2.7 μm 波段激光具有装置小巧、成本低、波长连续可调谐等优点。

经过比较,ZGP OPO 最终选择 II 类匹配 2.7 μm (o)

→4.3 μm(e)+7.26 μm(o)方式输出 4.3 μm 激光, 据此, 设计出实验原理图, 如图 2 所示。泵浦源为脉冲氙灯泵浦电光调 Q 的 1.06 μm Nd:YAG 激光器, 脉宽约 16 ns, 储能电容 100 F, KD*P 为电光调 Q 晶体, M₁ 为 Nd:YAG 激光器后腔镜, 对 1.06 μm 全反, M₂ 为 1.06 μm 偏振片, M₃ 为 KTP OPO 输入镜, 基质为 K9 玻璃, 膜层 T=83% @1.06 μm, 对信号光 1.7~1.8 μm 全反 (R>99%), M₄ 为 Nd:YAG 激光输出镜, 同时, 也作为 KTP OPO 输出镜, 基质为白宝石, R>90% @1.06 μm, R>99.8% @1.7~1.8 μm, T=65% @2.7 μm; OPO 腔长 26 mm, KTP 晶体尺寸为 6 mm×6 mm×15 mm, 两端镀有对泵浦光和信号光增透的双波长增透膜。晶体置于精确调角转台上, 通过水平调节晶体承载转盘调节匹配角。

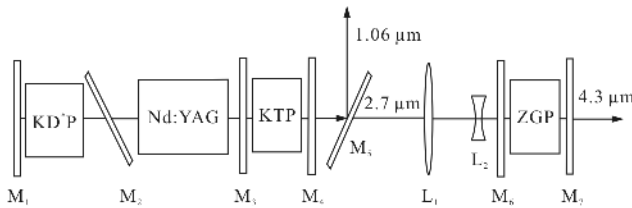


图 2 双 OPO 结构实验装置原理图

Fig.2 Experiment schematic diagram of tandem OPO

M₅ 为滤光片, 对 2.7 μm 激光高透, 其他波长激光全反, 经过 CaF₂ 透镜 L₁ 及 L₂ 组成的聚焦系统将 2.7 μm 激光聚焦, M₆ 及 M₇ 分别为 ZGP OPO 输入镜及输出镜, 使信号光 4.3 μm 谐振, 泵浦光双程通过, 输入镜 M₆ T>95% @2.7 μm, R>99 @4.3 μm, 输出镜 M₇ R=95% @2.7 μm, R=70% @4.3 μm。ZGP 晶体尺寸为 6 mm×6 mm×10 mm, 腔长为 15 mm。

定义信号光能量为 100 μJ 时, 泵浦光的输入能量密度为 OPO 的振荡阈值 (阈值时信号光功率为初始噪声功率的 e³³ 倍), 其阈值能量密度可表示为^[7]:

$$J_{th} = \frac{1.125}{kg_s L_{eff}^2} \frac{\tau}{(1+\gamma)^2} \left[\frac{33L}{c\tau} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right]^2 \quad (1)$$

式中: τ 为泵浦光脉冲半高宽; k 为增益系数; g_s 为模式耦合系数; L_{eff} 为参量有效增益长度; 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 为晶体对参量光吸收系数; l 为晶体长度; R 为 OPO 腔镜对信号光一次往返反射率。计算时取值为: 泵浦光脉宽 12 ns (FWHM), 聚焦半径 0.6 mm (1/e²), 对参量光吸收系数 0.01 cm⁻¹, 通过保持其他变量不变, 改变某一变量, 分析其对阈值的影响, 结果如图 3 所示。

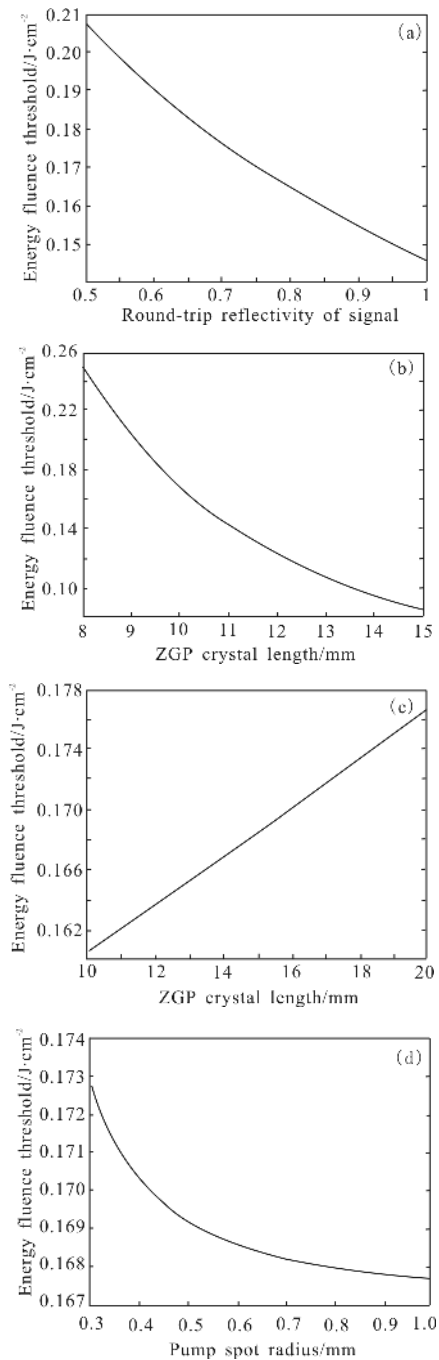


图 3 ZGP OPO 阈值与各参数关系曲线

Fig.3 Curves of parameters vs thresholds of ZGP OPO

由图可见, OPO 振荡阈值在各参数取上述值时, 约为 0.17 J/cm², 而 ZGP 晶体损伤阈值在文中泵浦光情况下为 1 J/cm², 则可满足泵浦光能量密度为 4~6 倍振荡阈值时, 既可实现有效转换, 又不至于损伤晶体。通过计算可知, 2.7 μm 泵浦激光能量为 5~10 mJ 时, 利用 CaF₂ 透镜聚焦其光斑至特定大小, 即可满足泵浦能量密度要求, 有效实现 4.3 μm 激光输出, 在更高泵浦能

量下需要更大的光斑半径以避免对晶体的损伤。ZGP OPO 从 2 μm 至 3~5 μm 转换效率已大于 50%^[8]。

2 2.7 μm 激光输出实验结果

为准确测量闲频光 2.7 μm 激光能量,滤除泵浦光及信号光等干扰,将 OPO 输出激光先后经过 M_3 及抛光锗片($T=45\%$ @ 2.6~2.8 μm ,对短于 1.7 μm 的光波基本不透)滤光后,进入探测器的只有 2.7 μm 的激光,用 LE-3 型探测器和 COHERENT EPM2000 激光能量计测量输出能量随泵浦电压的变化曲线,如图 4 所示。

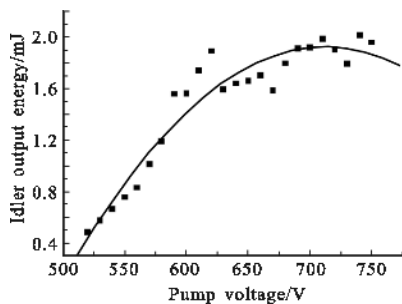


图 4 闲频光 2.7 μm 输出能量随泵浦电压的变化曲线

Fig.4 Output energy of 2.7 μm laser vs pump voltage

测得闲频光 2.7 μm 最大输出能量约 2 mJ,总的电光转换效率约为 0.01%,斜效率约 0.03%。转换效率较低的原因有:一方面是由于 OPO 腔镜镀膜质量不高,输入镜对泵浦光透过率只有 83%,输出镜对泵浦光反射率只有 90%,未能充分利用泵浦光能量,并且在之前的实验中,晶体及镜片膜层出现损伤,致使 OPO 振荡阈值增加,输出闲频光能量较小;另一方面是由于在基模高斯光束泵浦下,耦合信号光和闲频光基模尺寸小于泵浦光尺寸,泵浦光只有光斑中间一部分能量转换到信号光和闲频光中去,导致转换效率不高;此外,输出闲频光 2.7 μm 与泵浦光 1.064 μm 波长差异大,在相同的量子效率下,其转换效率要比通常输出 1.57 μm 或 2.1 μm 激光时低。

可以看出:阈值泵浦电压约 510 V,在泵浦电压超过 670 V 后输出能量趋于饱和。其原因在于:OPO 输入镜 M_3 对 1.064 μm 反射率尚有 17%,在高泵浦能量下与激光器后腔镜 M_1 之间形成 1.064 μm 激光振荡,此时已构成外腔式 OPO 泵浦,导致转换效率下降。并测量了在泵浦电压 630 V、重频 1 Hz 下,输出的 2.7 μm 闲频光能量稳定度约为 $\pm 7\%$,如图 5 所示。

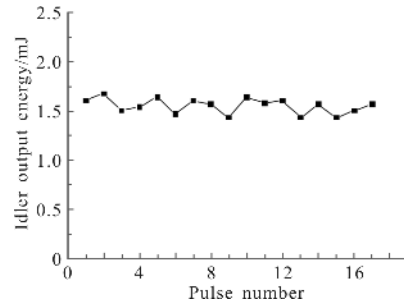


图 5 2.7 μm 闲频光能量输出稳定度

Fig.5 Stability of idler output energy of 2.7 μm laser

由于腔内泵浦光(1.064 μm)和信号光(1.756 μm)能量密度都较高,各自的倍频及二者之间的和频效应都会发生,实验中观察到和频红光(0.663 μm)及倍频绿光(0.532 μm)输出。

在输出光路上放置一块色散棱镜,将不同波长的光分开,通过狭缝选择红光进入探测器。使用由 He-Ne 激光器校准的 WGD-300B 型电动单色仪测得和频红光波长在 663 nm 附近。由于泵浦光波长确定,所以由和频红光波长可唯一确定信号光波长,进而验证了闲频光 2.7 μm 输出。

用快速响应 Si PIN 光敏二极管及 Tektronix TDS 520D 500 MHz 示波器探测红光脉冲波形,测得其波形如图 6 所示,脉宽约为 12 ns,小于泵浦光脉宽。这是由于晶体切割角度对应的和频效应有效非线性系数很小,只有当信号光与泵浦光都较强时,才能产生明显的和频输出,而二者光强的最大值并不同步,致使和频光脉宽窄于泵浦光脉宽。

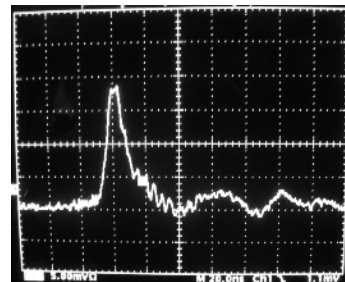


图 6 663 nm 和频红光输出脉冲波形

Fig.6 Output pulse profile of 663 nm red laser generated by sum frequency

下一步将优化 OPO 腔镜镀膜参数及腔型结构,提高泵浦能量密度,利用两块各 15 mm 长 d 的 KTP 晶体成走离补偿放置,可进一步提高 2.7 μm 激光输
(下转第 219 页)

- 龚德铸, 王立, 卢欣. 微光探测 EMCCD 在高灵敏度星敏感器中的应用初探[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增刊): 534-539.
- [2] Robbins M S, Hadwen B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2003, 50(5): 1227-1231.
- [3] Hyneczek J, Nishiwaki Takahiro. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs [J]. *IEEE Trans on Electron Device*, 2003, 50(1): 239-245.
- [4] Hyneczek J. CCM -a new low -noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1992, 39(8): 1972-1975.
- [5] Edmundo A, Gutierrez D, Octavio G C, et al. Electron transport through accumulation layers and its effect on the series resistance of MOS transistors [C]//Proceedings of the 1998 Second IEEE International Caracas Conference, 1998: 51-54.
- [6] Lenoble M, Cresswell J V, Young L. The surface potential variation in the interelectrode gaps of gaas cermet-gate charge-coupled devices [J]. *Solid State Electronics*, 1990, 33(7): 851-857.
- [7] Okuto Y, Crowell C R. Energy-conservation considerations in the characterization of impact ionization in semiconductors[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(8): 3075-3081.
- [8] Miller B W, Barber H B, Harrison H. Barrett single-photon spatial and energy resolution enhancement of a columnar CsI (Tl)/EMCCD gamma-camera using maximum-likelihood estimation[C]//SPIE, 2006, 6142: 61421T-1.
- [9] Hyneczek J. Impactron -a new solid state image intensifier[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2001, 48(10): 2038-2041.

(上接第 213 页)

出能量及转换效率,满足 ZGP OPO 的泵浦要求。

3 结论

针对 2.1 μm 激光泵浦 ZGP OPO 输出中红外激光的不足,提出采用内腔式 KTP OPO 得到的 2.7 μm 激光以第 II 类匹配方式泵浦 ZGP OPO 实现 4.3 μm 激光输出,具有输出线宽窄、转换效率高、走离角小、对泵浦光允许参量大且吸收小以及作为泵浦光的 2.7 μm 激光仍可作它用等优点。给出了实验装置图及相应参数,理论计算及初步实验结果表明:此方案切实可行,为下一步 4.3 μm 激光输出实验奠定了基础。

参考文献:

- [1] Wang Keqiang, Han Long, Wang Jianjun, et al. 3-5 μm solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 169-173. (in Chinese)
- 王克强, 韩隆, 王建军, 等. 3-5 μm 固体激光[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 169-173.
- [2] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP₂ [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [3] Henriksson M, Tiihonen M, Pasiskevicius V, et al. ZnGeP₂ parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2 m source[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1878-1880.
- [4] Das S, Bhar G C, Gangopadhyay S, et al. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP₂ crystal for infrared laser device applications: revisited[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4335-4340.
- [5] Vodopyanov K L. Mid-infrared optical parametric generator with extra-wide (3-19 μm) tunability: applications for spectroscopy of two-dimensional electrons in quantum wells [J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, 16(9): 1579-1586.
- [6] Yao J Q. The Technology of Nonlinear Optical Frequency Transformation and Laser Tuning [M]. Beijing: Science Press 1995: 20-58. (in Chinese)
- 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 20-58.
- [7] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1979, QE-15(6): 415-431.
- [8] 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.