

文章编号: 0258-7025(2005)01-0039-04

2 μm Tm, Ho: YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术研究

姚宝权, 贺万骏, 李玉峰, 张兴宝, 鞠有伦, 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 ZnGeP₂ 晶体具有宽的透明范围(0.7~12 μm), 较大的非线性系数 ($d_{36} = 75 \text{ pm/V}$), 最高损伤阈值能量密度为 10 J/cm^2 , 较高的热导率($0.18 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), 因而非常适合作为高功率中红外光参量振荡器(OPO)晶体。理论上分析了 ZnGeP₂ 光参量振荡器相位匹配特性, 实现 3~5 μm 连续调谐范围输出的 I 类相位匹配角在 $52.5 \sim 55.2^\circ$ 之间。实验上, 以 15 W 光纤耦合激光二极管(LD)抽运的 2.05 μm 高重复频率声光调 Q Tm, Ho: YLF 激光器作为抽运源, 其最大平均功率 4 W, 脉冲宽度小于 40 ns, 脉冲重复频率 100 Hz~10 kHz 可调。为降低准三能级系统激光器阈值, 提高激光脉冲能量抽取效率, Tm, Ho: YLF 晶体采用液氮制冷方式, 工作在 77 K 温度条件下。非线性频率转换晶体 ZnGeP₂ 长 15 mm, 55.7° 切割, 光参量振荡器谐振腔为平平腔, 腔长约 20 mm。在 3.6 W 的抽运功率下, 脉冲重复频率 10 kHz, 实现了 4.1 μm 附近中红外激光输出, 参量光脉冲宽度为 20 ns, 平均输出功率为 0.7 W, 光-光转换效率为 20%, 抽运光阈值功率为 0.65 W。

关键词 激光技术; 光参量振荡器; 相位匹配; ZnGeP₂ 晶体; Tm, Ho: YLF 晶体

中图分类号 TN 24 **文献标识码** A

Technical Study of ZnGeP₂ Optical Parametric Oscillator Pumped by a 2 μm Tm, Ho: YLF Laser

YAO Bao-quan, HE Wan-jun, LI Yu-feng,

ZHANG Xing-bao, JU You-lun, WANG Yue-zhu

(National Key Lab of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract ZnGeP₂ crystal with high nonlinear coefficient ($d_{36} = 75 \text{ pm/V}$), broad infrared transmission region (0.7~12 μm) and very high thermal conductivity ($0.18 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) is very suitable for high power mid-infrared radiation generation. Phase matching characteristics of ZnGeP₂ optical parametric oscillator (OPO) are analyzed theoretically, the requirement of type I phase matching angle of $52.5 \sim 55.2^\circ$ must be met to achieve continuously tuning of 3~5 μm . Experimentally, the acousto-optic Q-switched Tm, Ho: YLF laser end pumped by fiber-coupled diode is employed as the pumping source of OPO with the maximum average power of 4 W, pulse duration of less than 40 ns, and pulse repetition rate of 100~10000 Hz. For higher extraction efficiency and low threshold operation to the quasi-three level laser system, the Tm, Ho: YLF crystal is cooled by liquid nitrogen reserved in a small detector type dewar, and works at the temperature of 77 K. The 15-mm-long, 55.7° cut ZnGeP₂ as a frequency converting crystal was placed in a plano-plano cavity with resonator length of 20 mm. Under a pumping power of 3.6 W and pulse repetition rate of 10 kHz, the mid-infrared coherent radiation of OPO near 4.1 μm was achieved with output power of 0.7 W, pulse width of 20 ns, optical-optical conversion efficiency of 20% and threshold pump power of 0.65 W.

Key words laser technique; optical parametric oscillator; phase matching; ZnGeP₂ crystal; Tm, Ho: YLF crystal

收稿日期: 2003-12-23; 收到修改稿日期: 2004-06-29

作者简介: 姚宝权(1970—), 男, 哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室副研究员, 主要从事固体激光器和非线性频率转换技术研究。E-mail: bqyao@mail.hl.cn

1 引 言

高功率、高重复频率、可调谐的中红外固体激光器在遥感探测、激光雷达以及化学探测方面有重要的应用。利用红外晶体磷化锌锗[ZnGeP₂(ZGP)]和硒化银镓(AgGaSe₂)等通过非线性频率变换技术可实现 3~5 μm 中红外激光输出。Budni 等^[1]用 Tm, Ho: YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡器(OPO)实现大于 10 W 中红外输出,转换效率 50%,采用其他的抽运源^[2~5]也实现了 ZnGeP₂ 光参量振荡器中红外激光输出。AgGaSe₂ 是用于 2 μm 波长抽运光参量振荡器的 ZnGeP₂ 材料的唯一竞争材料^[6]。然而,由于这种材料低的热导率(0.011 W/(cm·K)),导致产生热梯度和相继的热透镜效应,因此它只限于低平均功率的应用^[7~11]。适宜于高功率光参量振荡器的红外非线性晶体 ZnGeP₂ 由于对生长条件要求高以及成品率低,现在只有美国和俄罗斯掌握了晶体生长技术。虽然该晶体有大的非线性系数($d_{36} = 75$ pm/V)和较高的热导率(0.18 W/(m·K)),但在 1~3 μm 波长范围存在光学衰减的主要问题。现在晶体生长技术的提高使晶体在 2.05 μm 波长处的吸收系数已降到 0.1 cm⁻¹,高功率的 ZnGeP₂ 光参量振荡器输出才得以实现。为了实现 ZnGeP₂ 光参量振荡器 3~5 μm 的调谐输出,本文首先分析了 ZnGeP₂ 光参量振荡器 I 类和 II 类相位匹配特性, I 类匹配连续调谐范围为 2.8~8.0 μm,晶体内角匹配范围 51.3°~55.2°;在 3~5 μm 波长范围,相位匹配角在 52.5°~55.2°之间;实验上,光纤耦合激光二极管(LD)抽运的 2.05 μm Tm, Ho: YLF 激光器作为抽运源,抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡器,实现 4.1 μm 波长激光输出。

2 ZnGeP₂ 光参量振荡器相位匹配分析

在参量振荡器中,光参量振荡器三波相互作用的能量守恒和共线条件下的动量守恒公式及双折射晶体的折射率椭球公式满足

$$\begin{cases} 1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i, & n_p/\lambda_p = n_s/\lambda_s + n_i/\lambda_i \\ n_e(\theta) = n_o \times n_e / (n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^{1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 λ_p , λ_s 和 λ_i 分别为抽运光、信号光和闲频光的波长, n_p , n_s 和 n_i 分别为抽运、信号和闲频波长的折射率, n_e , n_o 为晶体的主轴折射率, θ 为抽运波矢与晶体

光轴的夹角。晶体折射率塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程^[12]为

$$\begin{cases} n_e^2(\lambda) = 4.6987 + \frac{5.2792}{\lambda^2 - 0.1440} + \frac{2.0986 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 900} \\ n_o^2(\lambda) = 4.6151 + \frac{5.1279}{\lambda^2 - 0.1362} + \frac{2.1693 \times \lambda^2}{\lambda^2 - 900} \end{cases} \quad (2)$$

ZnGeP₂ 是一种黄铜矿晶体,正单轴,对称类型为 $\bar{4}2m$,抽运光为 o 光, I 类匹配方式($o \rightarrow e+e$),切割角 $\varphi = 90^\circ$; II 类匹配方式($o \rightarrow o+e$),切割角 $\varphi = 45^\circ$ 。根据塞耳迈耶尔方程求出满足光子能量守恒关系的信号光、闲频光的折射率,代入共线动量守恒方程求出抽运光的折射率,再由折射率椭球方程最终得出此时的抽运波矢与晶体光轴的夹角 θ 。图 1 为计算的 ZnGeP₂ 光参量振荡器 I 类和 II 类匹配调谐曲线, I 类匹配连续调谐范围为 2.8~8.0 μm,晶体内角匹配范围 51.3°~55.2°;实现 3~5 μm 的调谐,相位匹配角范围在 52.5°~55.2°之间,晶体内角只需转动 2.7°,即可实现中红外波段调谐。一方面,转角范围小有利于变频输出,而且转角过程中不致引起输出光束过分偏离腔轴,有利于提高光束指向稳定性。另一方面,晶体只需要较小的通光孔径即可实现宽带调谐,有利于降低使用晶体的成本,对

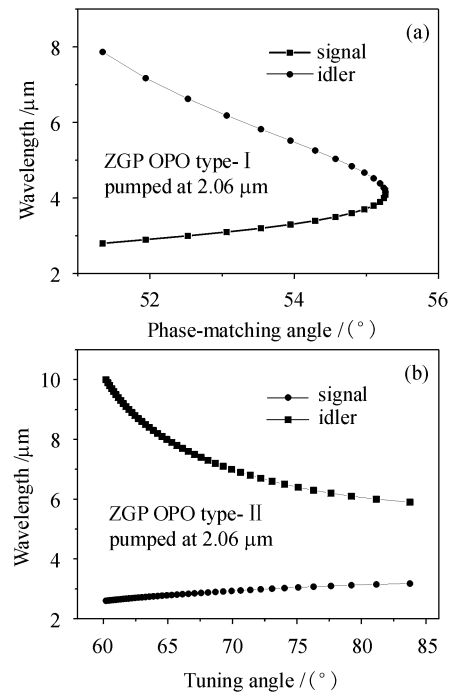


图 1 2 μm 激光抽运的 ZnSeP₂ 光参量振荡器 I 类(a)和 II 类(b)相位匹配调谐曲线

Fig. 1 Tunable wavelength of ZnGeP₂ OPO pumped by 2 μm laser with type I (a) and II (b) phase-matching

于昂贵的晶体 ZnGeP₂ 来说,这一点尤为重要。II 类匹配的调谐范围为 2.7~10.0 μm ,但是中间有 3.2~5.9 μm 的间隙。因此 II 类匹配的信号光和闲频光不可能都在 3~5 μm 范围内,而 I 类匹配则可以,选择 I 类匹配的 ZnGeP₂ 光参量振荡器能保证高功率高效率激光输出。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。光纤耦合激光二极管抽运 2 μm Tm, Ho: YLF 激光器作为抽运源^[13~16],利用光纤传输抽运光,使抽运源远离抽运谐振腔,避免了抽运源的干扰。792 nm 的抽运光经消色差透镜聚焦到晶体上,晶体由液氮制冷,温度降到 80 K 左右,杜瓦瓶两窗镜对 792 nm 和 2 μm 高透,声光调 Q 重复频率在 100 Hz~10 kHz 内可调,将 2 μm 连续输出转变为脉冲激光输出。在谐振腔内 10 kHz 的声光 Q 开关调制下,激光脉冲宽度小于 40 ns,最大平均输出功率 4 W。

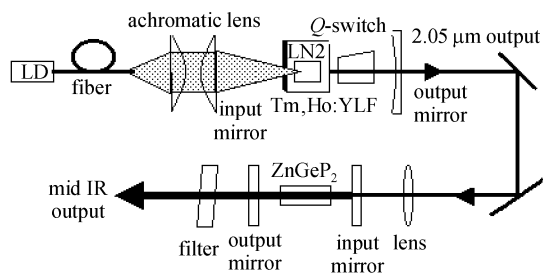


图 2 实验装置

Fig. 2 OPO setup pumped by fiber-coupled LD pumped Tm, Ho: YLF laser

光参量振荡器采用双谐振运行方式,输入镜对 2 μm 高透,对 3~5 μm 高反,输出镜对 2 μm 高反,对 3~5 μm 透过率为 20%。腔后加一个滤光片,对 2 μm 高反,对 3~5 μm 高透。抽运光由 CaF₂ 透镜聚焦到腔长约 20 mm 的平平光参量振荡器谐振腔中,调节抽运光入射角度可以获得 3~5 μm 波长连续可调输出。

美国 Inrad 公司生长的光参量振荡晶体 ZnGeP₂ 尺寸为 5 mm × 5 mm × 15 mm,切割角 55.7°,两端面镀 2.05 μm 和 3.5~4.8 μm 防反膜,晶体对 2.05 μm 的吸收小于 0.1 cm⁻¹。

4 实验结果及分析

用闪耀波长为 4 μm , 150 条/mm 的 WDG50-

1A 光栅单色仪测量了输出波长。在光栅单色仪的出射狭缝端放置 InSb 探测器,它采集到的信号输入到示波器中,通过示波器观察信号。测量时针对不同的波长选用不同的光栅,实验时转动光栅单色仪鼓轮,当观察到信号时读出鼓轮读数即可得出波长值。由此得出光参量振荡器激光输出闲频光波长 4.1 μm 。用上升时间小于 1 ns 的快响应 HgCdTe 探测器测量的脉冲宽度小于 20 ns。在抽运功率 3.6 W 条件下,光参量振荡器输出功率 0.7 W,光-光转换效率 20%,抽运光阈值功率 0.65 W。图 3 为光参量振荡器输出脉冲波形,脉冲后沿产生的失真,可能是由于 Q 开关上浮动的噪声或探测器和示波器之间的阻抗失配引起的。

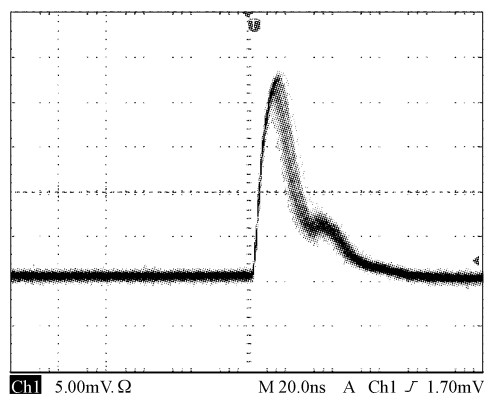


图 3 光参量振荡器输出激光脉冲波形

Fig. 3 Pulse temporal profile of OPO output

5 结论

实现了 2 μm 抽运的高重复频率 ZnGeP₂ 光参量振荡器有效运转。高功率、高重复频率 3~5 μm 光参量振荡器能够被实际用于激光雷达和化学探测等方面,因此在高重复频率时产生的高功率脉冲能增加测量的速率和精度。为了进一步提高 ZnGeP₂ 光参量振荡器的转换效率,需要对激光器进行优化。导致 ZnGeP₂ 光参量振荡器转换效率低的原因有:抽运光光束质量不是很好,激光发散角大;由于镀膜技术限制,3~5 μm 中红外宽带二色膜(抽运光高透,4 μm 附近参量光高反)效果不理想; ZnGeP₂ 在抽运功率高时出现热效应现象;还有光参量振荡器腔型设计、晶体冷却等。此外,由于从国外买不到品质优良的 ZnGeP₂ 晶体,从而导致光参量振荡器输出功率水平同国外有一定的差距。如果国内能够生长大尺寸 ZnGeP₂ 晶体,建立高效的高功率光参量振荡器是可能的。

参 考 文 献

- 1 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. 10 W mid-IR Holmium pumped ZnGeP₂ OPO [J]. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **19**:226~229
- 2 P. B. Phua, K. S. Lai, R. F. Wu. Coupled tandem optical parametric oscillator (OPO): an OPO within an OPO [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(16):1262~1264
- 3 T. H. Allik, S. Chandra, D. M. Rines *et al.*. Tunable 7~12 μm optical parametric oscillator using a Cr, Er: YSGG laser to pump CdSe and ZnGeP₂ crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 597~599
- 4 E. Cheung, S. Palese, H. Injeyan *et al.*. High power conversion to mid-IR using KTP and ZGP OPO [J]. *Advanced Solid-State Lasers, Trends in Optics and Photonics Series*, 1999, **26**:514~517
- 5 E. Cheung, S. Palese, H. Injeyan *et al.*. High power optical parametric oscillator source [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**:55~59
- 6 Huang Jinzhe, Ren Deming, Zhang Lili *et al.*. Experimental research on the second harmonic generation of TEA CO₂ laser in AgCaSe₂ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 559~562
黄金哲,任德明,张莉莉等. TEA CO₂ 激光在 AgCaSe₂ 晶体中的倍频实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 559~562
- 7 S. Chandra, T. H. Allik, G. Catella *et al.*. Continuously tunable, 6~14 μm silver-gallium selenide optical parametric oscillator pumped at 1.57 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(5): 584~586
- 8 P. A. Budni, M. G. Knights, E. P. Chicklis *et al.*. Kilohertz AgGaSe₂ optical parametric oscillator pumped at 2 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13):1068~1070
- 9 H. Komine, J. M. Fukumoto. Noncritically phase matched mid-infrared generation in AgGaSe₂ [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(1):44~49
- 10 R. K. Shori, O. M. Stafsudd. High energy AgGaSe₂ optical parametric oscillator operating in 5.7~7 μm region [C]. CLEO, 2000. 179~181
- 11 T. Schroder. Two-stage nanosecond OPO based on LiNbO₃ and AgGaSe₂ tunable from 3~6 μm [C]. CLEO, 2001. 450~451
- 12 G. Ghosh. Sellmeier coefficients for the birefringence and refractive indices of ZnGeP₂ nonlinear crystal at different temperatures [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(7):1205~1212
- 13 Yuezhu Wang, Xingbao Zhang, Baoquan Yao *et al.*. Fiber-coupled diode end-pumped Q-switched Tm, Ho: YLiF₄ laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6):337~338
- 14 Yuezhu Wang, Xinlu Zhang, Baoquan Yao *et al.*. Performance of a liquid-nitrogen-cooled CW Tm, Ho: YLF laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5):281~282
- 15 Yao Baoquan, Dong Liqiang, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of microchip (Tm, Ho): YLF laser pumped by laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):79~83
姚宝权,董力强,王月珠等. 激光二极管抽运(Tm, Ho): YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):79~83
- 16 Yao Baoquan, Wang Qi, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of (Tm, Ho): YLF microchip laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1216~1218
姚宝权,王 骐,王月珠等. (Tm, Ho): YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1216~1218



2004 年全国全固态激光技术与应用会议在四川绵阳召开

由中国物理学会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会和中国光学学会激光专业委员会联合主办,中国工程物理研究院应用电子学研究所承办的 2004 年全国全固态激光技术与应用会议,于 2004 年 11 月 20~22 日在四川省绵阳市富乐山国际酒店举行。这次会议有来自全国各地的 230 多名专家学者参加,收到论文 116 篇,100 余人作了报告。

开幕式由中国工程物理研究院副院长杜祥琬院士主持,天津大学姚建铨院士致开幕词,他对全固态激光技术与应用发展的历史、现状和未来作了分析和展望。中国科学院上海精密机械研究所范滇元院士代表主办单位讲话,中国工程物理研究院应用电子学研究所范国滨所长代表承办单位致欢迎词。开幕式后华北光电技术研究所周寿桓院士、天津大学姚建铨院士、中国工程物理研究院杜祥琬院士、中国科学院理化技术研究所陈创天院士、中国科学院北京物理研究所魏志义研究员、中国科学院上海光学精密机械研究所楼祺洪研究员、中国工程物理研究院应用电子学研究所唐淳研究员、中国工程物理研

究院激光聚变中心魏晓峰研究员、中国科学院北京半导体所马骁宇研究员、深圳大族激光科技股份有限公司周复正总经理分别作了精彩的大会特邀报告。

本次大会设有 3 个专题分会,在为期 2 天的报告中,会议代表分别就全固态激光技术与应用领域的各个分支,如二极管激光器抽运固体激光器、新型固体激光器(包括光纤激光器和高功率全固态激光器)、高功率二极管激光器及抽运耦合技术、超短脉冲激光技术、固体激光热管理技术、激光晶体和非线性光学材料及应用技术、高功率激光元件及薄膜技术、全固态激光器的应用技术、非线性光学频率变换技术等进行了交流和讨论。

本次会议展示了我国全固态激光技术领域的最新成果,为从事本领域的科研人员加强交流和进行专题学术探讨架起了沟通的平台。同时也揭示了本领域与国际水平存在的差距,为专家学者今后的研究工作指明了方向,对加强和促进我国全固态激光技术研究领域的发展起了积极的推动作用。

(马 沂)