

文章编号: 1001-4322(2006)08-1261-04

# 磷锗锌光学参量振荡器技术研究\*

鲁燕华, 王卫民, 彭跃峰, 谢刚, 庞毓, 崔玲玲

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 报道了一台高重复频率  $2\ \mu\text{m}$  光学参量振荡器泵浦的磷锗锌光学参量振荡器。磷锗锌晶体 ( $\text{ZnGeP}_2$ , 简称 ZGP) 采用 I 类相位匹配方式, 切割角度  $\theta$  为  $55^\circ$ ,  $\varphi$  为  $0^\circ$ , 尺寸  $5.5\ \text{mm} \times 6\ \text{mm} \times 18\ \text{mm}$ , 在  $4.0\ \text{kHz}$  重复频率下, 当注入  $5.2\ \text{W}$  的  $2\ \mu\text{m}$  圆偏振光时, 获得  $310\ \text{mW}$  中红外输出, p 偏振态  $2\ \mu\text{m}$  到  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  光-光转换效率  $12\%$ 。通过调节晶体的角度, 实验获得 ZGP 光学参量振荡器的波长调谐曲线, 在误差范围内与理论变化规律相符。

**关键词:** 光学参量振荡器; 相位匹配; 磷锗锌晶体; 角度调谐; 中红外激光

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

中红外激光光源在成像激光雷达、温室气体探测、毒品稽查等领域具有广泛的应用。磷锗锌(ZGP)光学参量振荡器(OPO)是产生高重复频率、高平均功率中红外激光的最佳器件之一<sup>[1]</sup>。要获得中红外激光输出,首先必须产生稳定可靠的  $2\ \mu\text{m}$  泵浦源。P. A. Budni 等人用掺  $\text{Tm}$  和  $\text{Ho}$  的 YLF 激光器泵浦 ZGP 得到了  $10\ \text{W}$  ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,  $10\ \text{kHz}$  重复频率)输出<sup>[2]</sup>, 而国际上更多的是采用  $1.06\ \mu\text{m}$  泵浦的 KTP 光学参量振荡器作为泵浦源<sup>[3]</sup>。因掺  $\text{Ho}$  的 YAG 激光器不能在常温下工作, 本文采用内腔式 Nd:YAG 泵浦的 KTP 光学参量振荡器输出  $2\ \mu\text{m}$  激光。由于温度调谐方式需要在较大范围内对温度精确控制, 实现起来困难, 因此我们采用角度调谐方式。通过调节晶体的相位匹配角, 实验获得了 ZGP OPO 的波长调谐曲线, 在  $3.68\sim 4.88\ \mu\text{m}$  内实现调谐输出, 实验曲线与理论曲线在误差范围内基本吻合。

## 1 ZGP OPO 角度调谐原理

磷锗锌晶体属于黄铜矿型结构,  $42\ \text{m}$  点群, 透明范围为  $2\sim 12\ \mu\text{m}$ ,  $2\ \mu\text{m}$  激光泵浦时非线性系数大 ( $d_{36} = (75 \pm 8)\ \text{pm/V}$ , 有效非线性系数 Type I :  $d_{\text{eff}} = d_{36} \sin(2\theta) \cos(2\varphi)$ ; Type II :  $d_{\text{eff}} = d_{36} \sin(2\theta) \sin(2\varphi)$ ), 非常适合用于中红外光学参量振荡器。而且 ZGP 晶体热导率高 ( $0.18\sim 0.36\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 硬度大, 化学及机械性能稳定, 易于抛光和镀膜, 与同类晶体 ( $\text{AgGaS}_2, \text{AgGaSe}_2$  等) 相比优势巨大。

ZGP 属于正单轴晶体, Barnes 归纳其 Sellmeier 方程<sup>[4]</sup>为

$$\begin{cases} n_o^2 = 4.644\ 67 + \frac{5.100\ 87\lambda^2}{\lambda^2 - 0.136\ 56} + \frac{4.277\ 77\lambda^2}{\lambda^2 - 1\ 653.89} \\ n_e^2 = 4.715\ 39 + \frac{5.263\ 58\lambda^2}{\lambda^2 - 0.143\ 86} + \frac{2.373\ 10\lambda^2}{\lambda^2 - 1\ 000.82} \end{cases} \quad (1)$$

当泵浦波长为  $2.10\ \mu\text{m}$  时, ZGP 晶体存在两类相位匹配方式

$$\begin{cases} \omega_p n_{p,o} = \omega_s n_{s,e} + \omega_i n_{i,e} & (\text{type I}) \\ \omega_p n_{p,o} = \omega_s n_{s,o} + \omega_i n_{i,e} & (\text{type II}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\omega_p, \omega_s, \omega_i$  分别表示泵浦波、信号波和空闲波的圆频率;  $n_{p,o}$  表示泵浦波为 o 光时的折射率,  $n_{s,e}$  代表信号波为 e 光时的折射率;  $n_{i,e}, n_{s,o}$  如此类推。

I 类相位匹配下泵浦波为 o 光(沿晶体 y 轴), 信号波和空闲波均为 e 光(在晶体  $xz$  平面), 三者折射率分别为

$$\begin{cases} n_{p,o} = n_o(\lambda_p) \\ n_{s,e} = [n_o^{-2}(\lambda_s) \cos^2 \theta + n_e^{-2}(\lambda_s) \sin^2 \theta]^{-1/2} \\ n_{i,e} = [n_o^{-2}(\lambda_i) \cos^2 \theta + n_e^{-2}(\lambda_i) \sin^2 \theta]^{-1/2} \end{cases} \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2006-04-27; 修订日期: 2006-06-14

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 鲁燕华(1981—), 男, 湖北鄂州人, 硕士, 主要从事二极管泵浦固体激光器研究; happyeleo@yahoo.com.cn.

式中： $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$  分别表示泵浦波、信号波及空闲波的波长； $\theta$  表示相位匹配角，又称为晶体的切割角。

而 II 类相位匹配下泵浦波和信号波为 o 光（沿晶体 y 轴），空闲波为 e 光（在晶体 xz 平面），三者折射率分别为

$$\begin{cases} n_{p,o} = n_o(\lambda_p) \\ n_{s,o} = n_o(\lambda_s) \\ n_{i,e} = [n_o^{-2}(\lambda_i) \cos^2 \theta + n_e^{-2}(\lambda_i) \sin^2 \theta]^{-1/2} \end{cases} \quad (4)$$

将(3)式、(4)式分别代入光参量振荡器的能量和动量方程，得到两类相位匹配方式下 ZGP 晶体角度调谐曲线，分别如图 1 和图 2 所示。

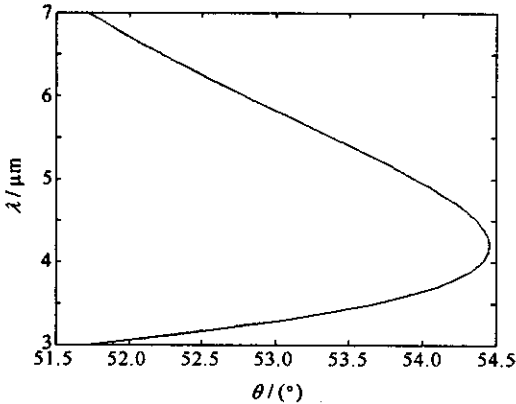


Fig. 1 Type I phase matching angle tuning curve of ZGP OPO

图 1 ZGP OPO I 类相位匹配角度调谐曲线

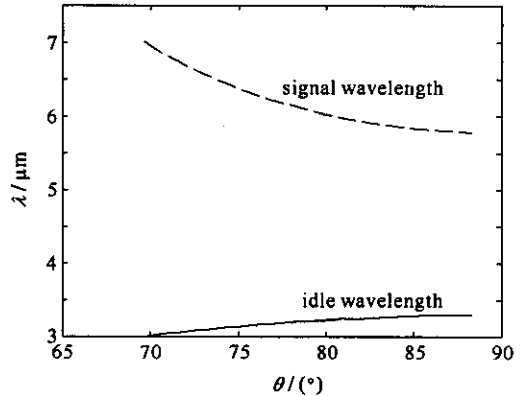


Fig. 2 Type II phase matching angle tuning curve of ZGP OPO

图 2 ZGP OPO II 类相位匹配角度调谐曲线

比较图 1 和图 2 知，II 类相位匹配下在 3~5 μm 范围内仅仅能获得 3.0~3.3 μm 这小段波长调谐，而 I 类相位匹配下能在 3~5 μm 整个范围内实现波长调谐，因此实验中采用 I 类相位匹配方式。

## 2 实验装置

由图 1 可见，在 I 类相位匹配下当泵浦波长为 2.10 μm，晶体切割角度  $\theta = 54.4^\circ, \varphi = 0^\circ$  时，ZGP 光学参量振荡器在 4.20 μm 处简并输出，即信号波长刚好与空闲波长相等。因此为了便于角度调谐，晶体切割角度应在  $\theta = 54.4^\circ$  附近。实验中 ZGP 晶体实际切割角度  $\theta = 55^\circ, \varphi = 0^\circ$ （购买晶体时按 2.05 μm 泵浦源计算所得），尺寸大小 5.5 mm×6 mm×18 mm。在实验中晶体必须与光轴有一定倾斜角度，如图 3 中旋转方向微小转动晶体。所用的 2 μm 激光是利用内腔式 Nd:YAG 泵浦的 KTP 光学参量振荡器来产生的<sup>[5]</sup>。为了降低泵浦振荡阈值，ZGP OPO 采用双谐振方式，装置如图 3 所示。

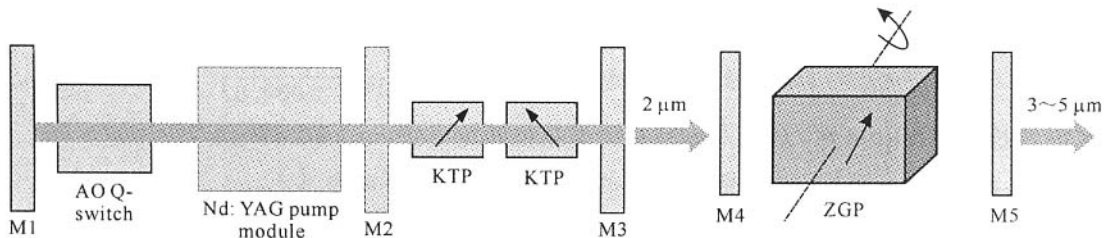


Fig. 3 Schematic of the experimental setup of ZGP OPO

图 3 ZGP OPO 实验装置简图

图中，M1, M2, M3, M4, M5 均为平面镜，其中 M1, M3 以及 Nd:YAG 棒组成 1.064 μm 激光器；而 M2 和 M3 与 KTP 晶体在 1.064 μm 激光器的腔内构成光学参量振荡器；M4 和 M5 与 ZGP 晶体又构成第二级 ZGP 光学参量振荡器。M1 对 1.064 和 2.10 μm 激光均全反射；M2 对 1.064 μm 激光透射率大于 99%，对 2.10 μm 激光全反射；M3 对 1.064 μm 激光全反射，对 2.10 μm 激光反射率为 60%；M4 对 2.10 μm 激光透射率大于 99%，对 3.6~4.5 μm 范围内的激光均全反射(>99%)；M5 对 2.10 μm 激光反射率大于 99%，对 3.6~4.7 μm 范围内的激光部分反射，平均反射率为 70%。在 ZGP OPO 中我们没有采用 KTP OPO 中两块短晶体级联的方式来抑制走离效应，这是因为 ZGP 晶体的走离长度很大，设计长度远远小于走离长度。信号场和空闲场从噪声水平放大到给定水平需要一定时间，这个时间称为建立时间。为减小建立时间，就要求缩短腔长，我们

设计的腔长  $L_c = 24 \text{ mm}$ 。晶体切割方向如图 3 中箭头所示,调谐特性将在图示方向旋转一微小角度实现。

### 3 实验结果与分析

根据设计的实验装置,在  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  泵浦源功率  $P$  高于起振阈值  $P_{th}$  时,测得  $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$  激光的输出功率与  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  激光的输出功率关系,如图 4 所示, $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  激光为圆偏振光,重复频率  $4.0 \text{ kHz}$ 。由图 4 可知, $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  泵浦阈值约为  $3.3 \text{ W}$ ,当注入  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  激光  $5.2 \text{ W}$  时获得  $310 \text{ mW}$  中红外输出。

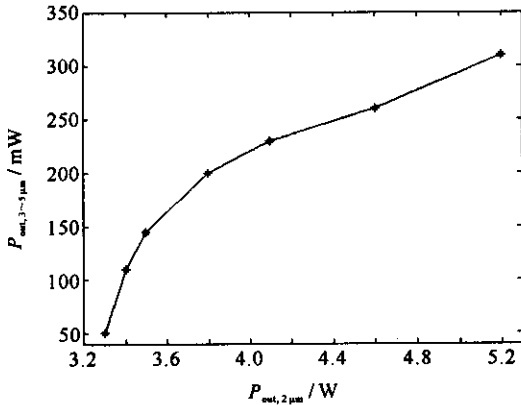


Fig. 4 Output power of  $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$  laser vs that of  $2 \text{ }\mu\text{m}$   
图 4  $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$  激光输出功率与  $2 \text{ }\mu\text{m}$  激光输出功率关系

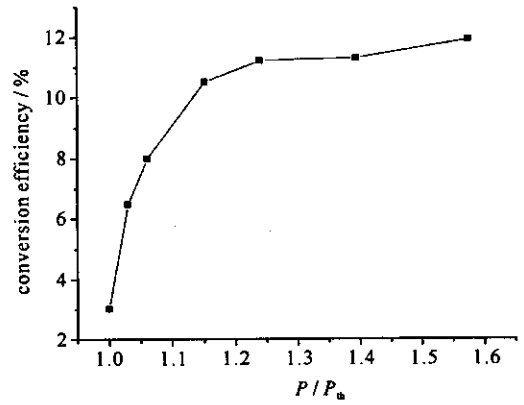


Fig. 5 Experimental conversion efficiency curve  
图 5 实验测得转换效率曲线

图 5 是基于图 4 描绘的转换效率曲线,参量振荡过程中  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  激光仅 p 光起作用,因此转换效率应以圆偏振态  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$  激光功率的一半计算。在略高于阈值处转换效率增大迅速,随着输入功率增加转换效率持续增大,但增速逐渐变小,变化规律与理论变化曲线<sup>[5]</sup>一致。实验获得最大转换效率为  $12\%$ 。

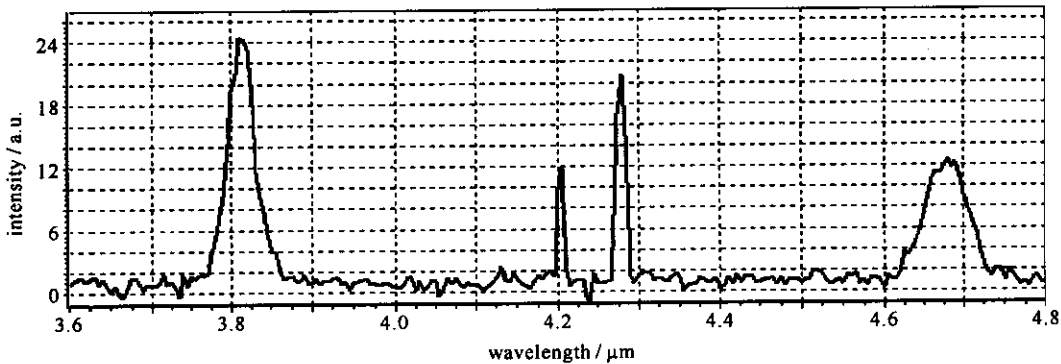


Fig. 6 Spectra of  $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$  laser  
图 6 中红外激光光谱图

图 6 是光谱仪测得  $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$  激光的光谱。从图中可看出有 4 个波长激光输出,对应中心波长分别为  $3.82, 4.20, 4.28$  和  $4.68 \text{ }\mu\text{m}$ 。 $3.82 \text{ }\mu\text{m}$  和  $4.68 \text{ }\mu\text{m}$  构成一对信号波和空闲波,对应泵浦波波长  $2.10 \text{ }\mu\text{m}$ ; 而  $4.20 \text{ }\mu\text{m}$  和  $4.28 \text{ }\mu\text{m}$  构成另一对信号波和空闲波,对应泵浦波长  $2.12 \text{ }\mu\text{m}$ 。这说明两块 KTP 晶体角度没有理想完全对齐,造成  $2 \text{ }\mu\text{m}$  泵浦源有两个波长。

图 7 给出 ZGP OPO 在不同相位匹配角下的波长调谐曲线。实际波长都是信号波和空闲波成对出现,图中的点表示较小的信号波长。比较实验获得的角度调谐曲线和理论计算所得的角度调谐曲线,可以发现虽然两者各个点不精确重合,但两者之间误差较小,变化规律一致,曲线基本吻合。

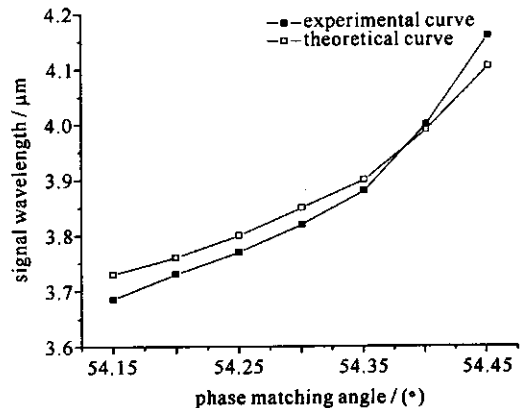


Fig. 7 Experimental angle tuning curve of ZGP OPO  
图 7 实验测得 ZGP OPO 角度调谐曲线

## 4 结 论

本文利用内腔式 KTP OPO 产生  $2.10\ \mu\text{m}$  激光, 泵浦 I 类相位匹配磷锗锌晶体, 实验获得 310 mW 中红外输出, 信号波波长  $3.82\ \mu\text{m}$ , 空闲波波长  $4.68\ \mu\text{m}$ , 重复频率 4.0 kHz,  $2.10\ \mu\text{m}$  到  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  光-光效率 12%, 并实验验证了 ZGP OPO 的角度调谐特性。进一步的实验研究正在进行中, 应提高 ZGP 晶体中红外膜层损伤阈值以获得更高功率的输出。

### 参考文献:

- [1] 姚宝权, 王月珠, 王骥, 等. 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, **26**(3):217-220. (Yao B Q, Wang Y Z, Wang Q, et al. Development of mid-infrared optical parametric oscillator. *Laser Technology*, 2002, **26**(3):217-220)
- [2] Budni P A, Pomeranz L A, Lemons M L, et al. 10 W mid-IR holmium pumped ZnGeP<sub>2</sub> OPO[J]. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **19**:226-229.
- [3] Phua P B, Lai K S, Wu R F. Coupled tandem optical parametric oscillator (OPO): an OPO within an OPO[J]. *Optics Letter*, 1998, **23**(16):1262-1264.
- [4] Barnes N P, Murray K E, Jani M G. ZnGeP<sub>2</sub> parametric amplifier[J]. *J Opt Soc Am B*, 1998, **15**(1):232-237.
- [5] 鲁燕华, 王卫民, 彭跃峰, 等. 内腔式 Nd:YAG 激光泵浦 KTP 双谐振光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2006, **33**(s0):189-191. (Lu Y H, Wang W M, Peng Y F, et al. Intracavity KTP doubly resonant optical parametric oscillator pumped by Nd:YAG laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(s0):189-191)

## Zinc germanium phosphide optical parametric oscillator

LU Yan-hua, WANG Wei-min, PENG Yue-feng, XIE Gang, PANG Yu, CUI Ling-ling  
(*Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** This paper reported a ZGP (zinc germanium phosphide) optical parametric oscillator (OPO) pumped by high-repetition rate  $2\ \mu\text{m}$  OPO. Type I ZGP crystal (ZnGeP<sub>2</sub>) with the size of  $5.5\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}\times 18\ \text{mm}$  was cut at phase matching angles of  $55^\circ$  and  $0^\circ$ . Under 4.0 kHz repetition rate, 310 mW mid-IR laser was obtained when the random polarization  $2\ \mu\text{m}$  pumping power was 5.2 W. The optical-to-optical efficiency of the p-polarized  $2\ \mu\text{m}$  to  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  was 12%. The experimental wavelength tuning curve of ZGP OPO was also achieved by tuning the angle of the ZGP crystal. It accorded with the theoretical rule in the error range.

**Key words:** Optical parametric oscillator; Phase matching; Zinc germanium phosphide; Angle tuning; Mid-IR-laser