

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0314-05

ZnGeP₂-OPO 中红外激光器的允许参量和角调谐特性分析

李 光 王 丽

(北京工业大学应用物理系, 北京 100124)

摘要 根据色散方程、能量和动量守恒, 研究非线性晶体 ZnGeP₂ (ZGP) 的光参变特性, 得到 2 μm 抽运时的 I 和 II 类 ZGP-OPO 角度调谐曲线。在 I 类匹配时角度调谐范围为 50.7°~57°, 对应的波长连续调谐范围在 2.4~11 μm; 在 II 类相位匹配时, 波长调谐范围 2.4~11.5 μm (在 3~6 μm 不连续), 对应的角度调谐范围为 58°~87°。同时对调谐过程中的允许角、走离角进行了分析, 对 ZGP 与 AgGaS₂ (AGS) 和 AgGaSe₂ (AGSe) 晶体做了分析比较, 结果表明 ZGP 为较好的中红外激光晶体。

关键词 非线性光学; 中红外辐射; 角度调谐; ZGP 晶体; 允许角; 走离角

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0314

Analysis of Permitted Parameters and Angle Tuning ZnGeP₂-OPO Mid-Infrared Laser

Li Guang Wang Li

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The optical permitted parameters and angle tuning characteristics of ZnGeP₂ (ZGP)-OPO were numerically simulated based on the dispersion equation of ZGP and the momentum and energy conservation in type-I and type-II. The angle tuning ranges of 50.7°~57° in accordance with wavelength tuning from 2.4 μm to 11 μm in type-I, and the wavelength tuning ranges of 2.4~11.5 μm (in-continuity 3~6 μm) with angle tuning 58°~87° in type-II have researched. The acceptance angle and walk-off angle in the process of angle tuning were also numerically simulated. Furthermore, the permitted parameters of ZGP were compared with AGS and AGSe crystal. The conclusions showed that ZGP is the optimum mid-infrared crystal.

Key words nonlinear optics; mid-infrared radiation; angle tuning; ZGP crystal; acceptance-angle; walk-off angle

1 引 言

中红外光源在激光制导、红外遥感和生物医药等军民需领域有着非常广泛的应用^[1]。目前, 产生中红外激光的主要途径是通过非线性光学晶体变频过程, 如光学参量振荡 (OPO)、差频产生 (DFG) 等, 最常用的中红外晶体材料主要有负单轴晶体 AgGaS₂ (AGS), AgGaSe₂ (AGSe) 和正单轴晶体 ZnGeP₂ (ZGP)。其中 ZGP 具有较大的有效非线性系数和相对较高的损伤阈值且机械性能好、便于加

工、双折射较大, 所以成了当前应用前景最好、最具吸引力的中红外激光晶体^[2]。对于通过 AGS, AGSe 两种晶体的非线性变频输出中红外激光的理论和实验研究已经有了很多的报道, 实验上已经获得了 5~17.6 μm 可调中红外输出^[3]。近年来, 对于 ZGP 晶体, 为了进一步提高转换效率和输出光束质量, 用掺 Tm 的激光器直接抽运 ZGP-OPO 产生可调中红外输出成了国内外研究的热点, 并陆续报道了一些实验成果^[4~9]。但是, 对于 ZGP-OPO 允

基金项目: 北京市自然科学基金 (4062008) 项目。

作者简介: 李 光 (1983—), 男, 硕士研究生。主要从事光学频率变换、非线性光学方面的理论和实验研究。

E-mail: liguang_1010@emails.bjut.edu.cn

许角和走离角随波长的变化以及 ZGP-DFG 产生中红外输出的报道较少。本文基于 ZGP 的色散方程、能量和动量守恒,通过数值模拟得到了 ZGP-OPO 的相关角度调谐及参数曲线,并与 AGS 和 AGSe 进行了比较。

2 ZGP-OPO 的理论分析与数值计算

2.1 角度调谐曲线

设参与非线性作用的三个光波分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, 满足能量守恒 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3, \omega = 2\pi/\lambda$, 相应的折射率为 n_1, n_2, n_3, θ 为 e 光波矢和光轴的夹角, c 为光速。在 I 类和 II 类条件下, 动量守恒分别为

$$n_{o3}\omega_3 = n_{e1}(\theta)\omega_1 + n_{e2}(\theta)\omega_2, \quad (1)$$

$$n_{o3}\omega_3 = n_{e1}(\theta)\omega_1 + n_{o2}\omega_2, \quad (2)$$

此外, 单轴晶体的折射率椭球方程为

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{(n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^{1/2}}, \quad (3)$$

结合方程(1)~(3)以及 ZGP 晶体的 Sellmeier^[10] 方程, 通过计算机数值计算, 分别得到 2 μm 抽运时的 I, II 类 ZGP-OPO 角度调谐曲线, 如图 1 所示。由图 1 可知, I 类匹配时角度调谐范围为 50.7°~57°, 波长连续调谐范围在 2.4~11 μm 。在 II 类相位匹配时, 波长调谐范围 2.4~11.5 μm (在 3~6 μm 不连续), 对应的角度调谐范围为 58°~87°。通过 I 类匹配可以通过较小的晶体转动角度来达到波长连续调谐的目的, 但 II 类匹配却不能做到连续调谐, 且转角相对大。更严重的是, II 类匹配波长调谐的不连续范围正好涵盖 3~5 μm 这个衰减最小的“红外窗口区”^[11], 不利于实际应用。

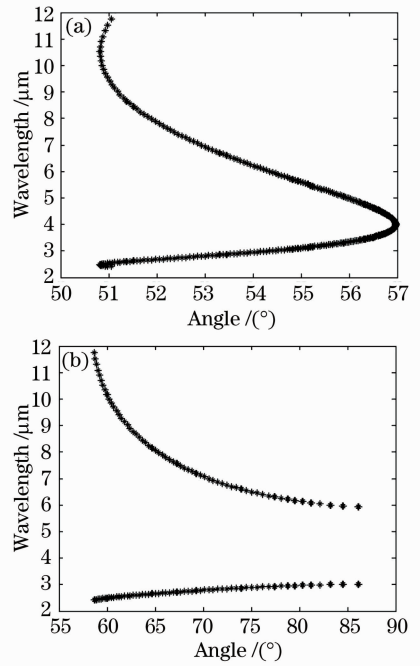


图 1 ZGP 的角调谐曲线。(a) I 类匹配; (b) II 类匹配

Fig. 1 Angle tuned curves of ZGP

(a) type-I; (b) type-II

2.2 允许角随波长的变化

在 OPO 中, 当参变光波沿相位匹配角 θ_m 入射到晶体上时, 可以满足完全相位匹配即 $\Delta k = 0$ 。但在实际中很难做到这一点, 即存在一个“允许角”。由

$$\Delta k = n_1\omega_1 + n_2\omega_2 - n_3\omega_3, \quad (4)$$

将 Δk 在 $\theta = \theta_m$ 以泰勒级数^[12] 的形式展开, 取一级近似, 分别得到 I, II 类相位匹配下 ZGP-OPO 的允许角随波长的变化。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2L \sin\theta_m \cos\theta_m \left\{ \frac{1}{\lambda_s} [n_{e^s}^{\omega_s}(\theta_m)]^3 [(n_{o^s}^{\omega_s})^{-2} - (n_{e^s}^{\omega_s})^{-2}] + \frac{1}{\lambda_i} [n_{e^i}^{\omega_i}(\theta_m)]^3 [(n_{o^i}^{\omega_i})^{-2} - (n_{e^i}^{\omega_i})^{-2}] \right\}}, \quad (5)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{2L \sin\theta_m \cos\theta_m \frac{1}{\lambda_s} [n_{e^s}^{\omega_s}(\theta_m)]^3 [(n_{o^s}^{\omega_s})^{-2} - (n_{e^s}^{\omega_s})^{-2}]}. \quad (6)$$

假设晶体长度为 10 mm, 数值模拟得到 I, II 类匹配方式下, ZGP-OPO 的允许角随波长变化的曲线, 如图 2 所示。从图 2 可知, I 类匹配时, 在信号光部分, 基本上允许角随波长的增大而增大, 变化幅度小于 0.01°; 空闲光部分, 允许角则一直随波长的增大而减小。II 类匹配时, 在信号光部分, 允许角随波长增长而急剧增大, 变化幅度达 1.5°; 空闲光部分,

允许角随波长增大而急剧减小。

2.3 走离角随波长的变化

在单轴晶体中, 由于参量光之间不同的偏振态 (匹配方式不同), 导致光束在有限孔径内发生分离。这种波矢和光线方向偏离的角度称作“走离角”。o 光不存在走离效应, 而 e 光则不同 (有走离角 α)。由于走离角的存在, 使得参量光和抽运光的相互作用

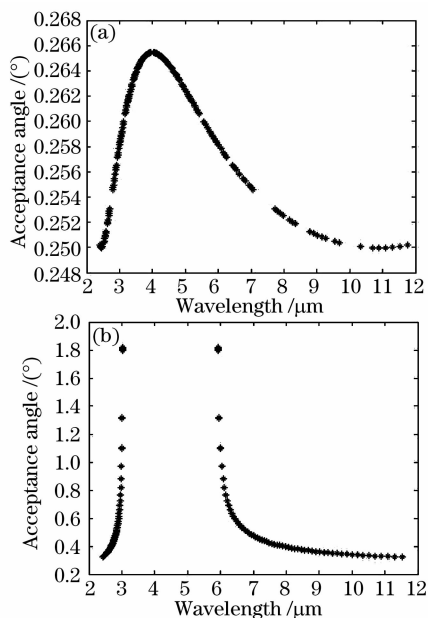


图2 ZGP 允许角

(a) I类匹配; (b) II类匹配

Fig. 2 Acceptance angle of ZGP

(a) type-I; (b) type-II

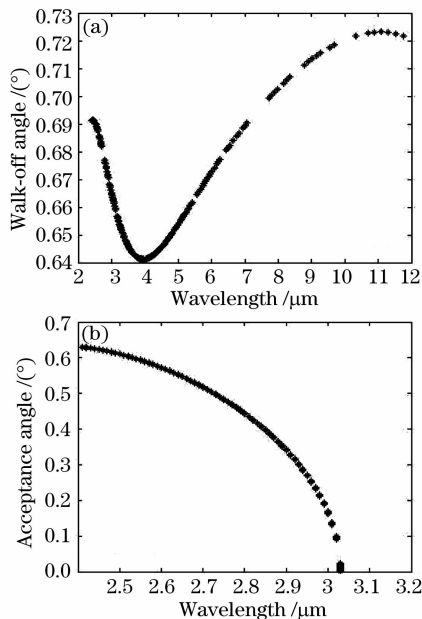


图3 ZGP 走离角

(a)I类匹配; (b) II类匹配

Fig. 3 Walk=off angle of ZGP

(a) type-I; (b) type-II

用长度变小,因而影响了抽运光到参量光的转换效率。走离角的公式为^[12]

$$\alpha = \arctan \left[\frac{1}{2} \times \frac{|(n_e^o)^2 - (n_o^o)^2|}{(n_o^o)^2 \sin^2 \theta_m + (n_e^o)^2 \cos^2 \theta_m} \sin 2\theta_m \right] \quad (7)$$

经过计算机模拟,得到了 I, II 类匹配 ZGP-OPO 的走离角随波长变化的曲线,如图 3 所示。从图 3 可知, I 类匹配时,信号光和空闲光都是 e 光。在信号光部分,走离角随波长的增大而减小;在空闲光部分,走离角随波长的增大而增大,但变化幅度小于 0.1° 。II 类匹配时,经过计算, n_{2e} 小于 n_{3o} , e 光只能是波长较小的信号光。走离角随信号光波长增大而减小,变化幅度为 0.53° 。相比起来, II 类走离角随波长的变化比 I 类大,不利于抽运光到参量光的能量转换。

3 ZGP 和 AGS, AGSe 晶体特性的比较

ZGP, AGS 和 AGSe 是目前最常用的三种中红外非线性光学晶体。我们根据 AGS, AGSe 晶体的 Sellmeier^[8] 方程数值计算它们的相关特性曲线,并和 ZGP 进行了比较。图 4 所示为 I, II 类匹配情况下,三种晶体材料 OPO 的角度调谐曲线比较曲线(ZGP, AGSe 用 $2 \mu\text{m}$ 激光抽运; AGS 用 $1.06 \mu\text{m}$ 激光抽运)。从图 4 可知, I 类匹配时, AGS 的波长调谐范围最宽,并且其调谐角度也最宽($35.5^\circ \sim 54.3^\circ$);而另外两种晶体 ZGP 和 AGSe, 它们的调谐曲线特性比较相似,波长调谐范围比 AGS 略窄,但调谐角度改变幅度却很小($6^\circ \sim 7^\circ$)。这就使得在晶体转动过程中输出光束不会严重偏离腔轴,有利于输出光束的稳定性。而 II 类匹配时,三种晶体都不能够达到波长的连续调谐,且转角范围变化幅度相比 I 类情况下都要宽许多(达到 $40^\circ \sim 50^\circ$)。因此, I 类匹配优于 II 类匹配, ZGP 和 AGSe 晶体优于 AGS 晶体。

图 5 所示为 I, II 类匹配情况下,三种晶体材料 OPO 的允许角随波长变化曲线比较。由图 5 可知, I 类匹配时,三种晶体 OPO 的允许角的变化幅度都不大。相比起来 AGSe 的允许角最大, ZGP 次之(与 AGSe 相差不大), AGS 最小。而在 II 类匹配时,在三种晶体各自波长调谐间断点附近,允许角都有急剧的上升。上升幅度从大到小依次是 AGSe, ZGP, AGS。从允许角越大越有利于相位匹配的角度看, II 类匹配略微优于 I 类匹配, ZGP 和 AGSe 晶体优于 AGS 晶体。

图 6 所示为在 I, II 类匹配情况下,三种晶体材料 OPO 的走离角随波长变化曲线比较。从图 6 可以看出, I 类匹配过程中,三种晶体各自 e 光的走离角的变化幅度都很小,但 AGS 晶体比 ZGP 和 AGSe 晶体的走离角要大一倍。II 类匹配过程中,在信号光部分, AGS 和 AGSe 晶体的抽运光相对于

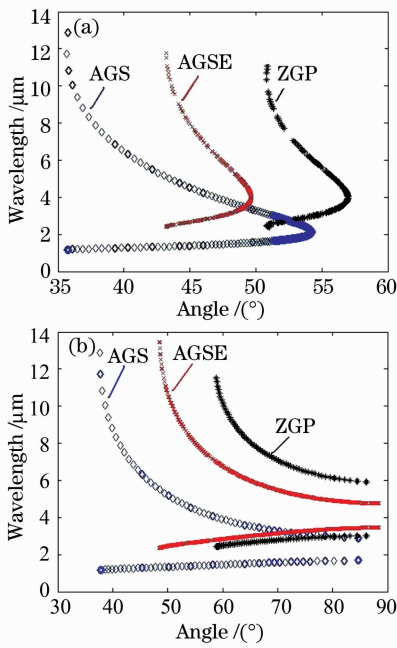


图 4 ZGP, AGS, AGSe 的角度调谐曲线的比较。
(a) I 类匹配; (b) II 类匹配

Fig. 4 Comparison of angle tuned curves of ZGP, AGS and AGSe. (a) type-I; (b) type-II

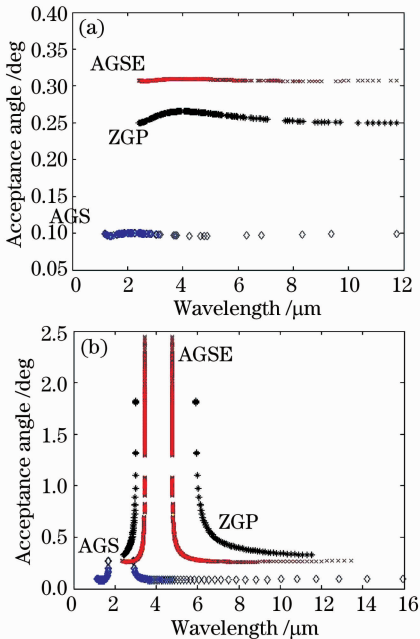


图 5 ZGP, AGS 和 AGSe 的允许角比较曲线。
(a) I 类匹配; (b) II 类匹配

Fig. 5 Comparison of acceptance angle tuned curves of ZGP, AGS and AGSe. (a) type-I; (b) type-II

信号光(○光)的走离角随着波长的增大而快速下降;而在空闲光部分,抽运光和空闲光的走离角随波长的变化基本一致。所以,空闲光得到了相对较多的抽运光能量。而 ZGP 晶体,在 II 类过程中,信号

光的走离角随波长增大而快速下降。

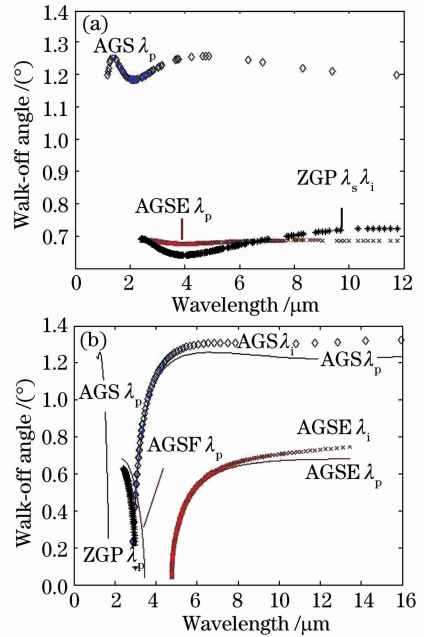


图 6 ZGP, AGS 和 AGSe 的走离角比较曲线。
(a) I 类匹配; (b) II 类匹配

Fig. 6 Comparison of walk-off angle tuned curves of ZGP, AGS and AGSe. (a) type-I; (b) type-II

4 结论

通过计算机数值模拟了 ZGP 晶体 I 类, II 类相位匹配的角度调谐曲线,并与 AGS 和 AGSe 两种晶体做了比较,得到 2 μm 抽运时的 I, II 类 ZGP-OPO 角度调谐曲线。在 I 类匹配时角度调谐范围为 50.7°~57°,对应的波长连续调谐范围在 2.4~11 μm,在 II 类相位匹配时,波长调谐范围 2.4~11.5 μm (在 3~6 μm 不连续),对应的角度调谐范围为 58°~87°。综合三种晶体调谐特性及其参数的分析比较,结果发现,在产生可调谐中红外输出方面,ZGP 和 AGSe 晶体优于 AGS 晶体。但如果进一步考虑到 ZGP 比 AGSe 有更大的有效非线性系数以及更高的损伤阈值,且机械性能好、便于加工,可应用于高功率环境,ZGP 晶体是前景看好的中红外激光晶体。总体来说,ZGP 晶体可以说是前景最被看好的中红外激光晶体之一,是一种很优良的产生可调谐中红外输出的非线性晶体材料。

参 考 文 献

- Huang Cunxin, Li Jianbao, Lei Muyu *et al.*. Research progress and current trends in 3~5 micron optical materials[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2003, **32**(3): 276~281
黄存新, 李建保, 雷牧云 等. 中波红外光学材料的研究现状和发

- 展趋势[J]. 人工晶体学报, 2003, **32**(3):276~281
- 2 Dong Chunming, Wang Shanpeng, Tao Xutang. Research and development of mid-infrared nonlinear optical crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, **35**(4):785~789
董春明,王善朋,陶绪堂. 中红外非线性光学晶体的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2006, **35**(4):785~789
 - 3 Kazi Sarwar Abedin, Sajjad Haidar, Yuji Konno *et al.*. Difference frequency generation of 5~18 μm in a AgGaSe₂ crystal [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(9):1642~1645
 - 4 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Li Yufeng *et al.*. 3~5 μm mid-infrared ZnGeP₂ OPO with a 0.7 W output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):18
姚宝权,王月珠,李玉峰等. 3~5 μm 中红外 ZnGeP₂ 光参量振荡器输出功率达到 0.7 W[J]. 中国激光, 2004, **31**(1):18
 - 5 Li Qi, Dong Guofeng, Wang Qi. Object classification simulation for ladar-passive-infrared imaging combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1347~1352
李琦,董国峰,王骐. 用于激光成像雷达和被动红外成像复合的目标分类仿真[J]. 中国激光, 2007, **34**(10):1347~1352
 - 6 D. Creeden, P. A. Ketteridge, P. A. Budni *et al.*. Mid-infrared ZnGeP₂ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 μm Tm-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4):315~317
 - 7 A. F. Nieuwenhuis, C. J. Lee, I. D. Lindsay *et al.*. High-efficiency mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator directly pumped by a lamp-pumped, Q-switched CrTmHo: YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1):52~54
 - 8 Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng *et al.*. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho: YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):39~42
姚宝权,贺万骏,李玉峰等. 2 μm Tm, Ho: YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):39~42
 - 9 B. Yao, Y. Ju, Y. Wang *et al.*. Performance evaluation of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Tm, Ho: GdVO₄ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1):68~70
 - 10 Liu Qiang, Gong Mai, Yan Ping *et al.*. Phase-matching of optical parametric oscillator [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(2):1~4
柳强,巩马理,闫平等. 光学参量振荡器的相位匹配[J]. 激光杂志, 2002, **23**(2):1~4
 - 11 Tian Wen, Ren Gang, Cai Bangwei *et al.*. Calculation and analysis of ZnGeP₂ optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1):104~106
田文,任刚,蔡邦维等. ZnGeP₂ 光参量振荡器晶体参数的数值分析[J]. 激光技术, 2006, **30**(1):104~106
 - 12 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear Optics [M]. Xian: Xidian University Press, 2003. 127~128
石顺祥,陈国夫,赵卫等. 非线性光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003. 127~128