

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0222-04

3~4 μm KTA 光参量振荡器的理论设计

任 钢¹, 蔡邦维¹, 钟 鸣², 曾钦勇², 李 彤², 牛瑞华²

(¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)
(²西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 阐述了 3~4 μm KTA 光参量振荡器(OPO)研究的背景和意义,对目前国内外研究现状和发展趋势进行了分析。对 KTA-OPO 的相位匹配方式、温度调谐特性以及腔形进行了理论计算分析。同时对 KTA-OPO 参量设计中应考虑的一些问题如 KTA 晶体的最佳长度,抽运功率的影响,OPO 腔镜的镀膜,OPO 谐振腔的结构和腔长、抽运源和 OPO 之间的模式匹配等进行了讨论。所设计的 3~4 μm KTA-OPO,其重复频率为 1~40 Hz,脉宽 <20 ns,单脉冲能量 >30 mJ。

关键词 非线性光学; 3~4 μm ; 中红外; KTA; 光参量振荡器

中图分类号 O437 **文献标识码** A

Theoretical Design of 3~4 μm KTA Optical Parametric Oscillator

REN Gang¹, CAI Bang-wei¹, ZHONG Ming², ZENG Qin-yong², LI Tong², NIU Rui-hua²

(¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)
(² South-West Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract The background and the meaning of studying on 3~4 μm KTiOAsO_4 (KTA) optical parametric oscillator (OPO) were clarified. The researching status at present and the developing direction in the future of the KTA OPO were introduced too. The phase-matching mode, the temperature tuning characteristic and the structure of OPO cavity were calculated and theoretically analyzed. At the same time, some problems which should be considered, such as the best length of the KTA crystal, the effect of pumping power, the coating of the OPO cavity mirror, the structure and cavity length of the OPO, the mode matching between the pump source and OPO, were discussed. The designed 3~4 μm KTA OPO possessed the repeating frequency of 1~40 Hz, the pulse-width less than 20 ns and the single pulse energy more than 30 mJ.

Key words nonlinear optics; 3~4 μm ; mid-infrared; KTA; optical parametric oscillator

1 引 言

3~4 μm 是大气的窗口波段,位于这一波段的激光对大雾、烟尘等具有较强的穿透力,受气体分子吸收和悬浮物散射的影响小,因此在光谱测量、遥感、环保和军事上具有很高的应用价值。3~4 μm 中红外光参量振荡器(OPO)一直是国内外研究的热点,它具有调谐范围宽,可实现紧凑、小型化、全固化等优点。近几年来,随着物化性能好、非线性系数大、透明范围宽、吸收系数小、损伤阈值高等优质中红外非线性晶体的出现和发展,更为该领域的研究开拓了全新的前景,把 3~4 μm 中红外 OPO 进一步推向了实用化。

KTA 晶体的透光范围为 0.35~5.3 μm ,在

1~4 μm 吸收系数 <0.01 cm^{-1} ,具有损伤阈值高 (>600 MW/cm^2),非线性系数大 ($d_{24} = 3.2 \text{ pm}/\text{V}$),物化性能稳定,生长技术较成熟等优点;能用 Nd:YAG 1.064 μm 激光抽运,可以实现非临界相位匹配(NCPM),而且解决了 KTP 晶体在 3.4 μm 附近的吸收峰问题;热导系数高,在高功率激光抽运时不会产生热透镜效应,适合高重复频率高能量中红外输出^[1~3]。目前 KTA-OPO 国外已有研究,但大部分报道的 KTA-OPO 运转方式均为连续或高重复频率,而且单脉冲能量和峰值功率较低^[4~8]。

我们所设计的 3~4 μm KTA-OPO,其重复频率为 1~40 Hz,脉宽 <20 ns,单脉冲能量 >30 mJ。对其相位匹配方式、温度调谐特性以及 OPO 腔形

作者简介: 任 钢(1978—),男,四川大学电子信息学院博士研究生,主要从事可调谐固体激光器、非线性光学及其应用的研究。E-mail: just_rg@163.com

进行了理论计算分析。同时对 KTA-OPO 参量设计中应考虑的一些问题进行了讨论,为我们下一步即将开展的实验工作提供了理论基础。

2 技术方案

2.1 相位匹配方式

KTA 是正双轴晶体, II 类相位匹配的有效非线性系数和增益都远远大于 I 类相位匹配,所以一般采用 II 类相位匹配方式。在 $x-z(\varphi=0)$ 平面的相位匹配、有效非线性系数、增益、参量允许角、走离曲线如图 1 所示。

$$\text{type II: } \frac{1}{\lambda_p(o)} = \frac{1}{\lambda_s(e)} + \frac{1}{\lambda_i(o)}$$

由图 1 可见,当相位匹配角 θ 增大到 90° 时,其有效非线性系数、增益和参量允许接收角都达到最大,而走离角则变为 0。此时 $\theta=90^\circ, \varphi=0$,即为非临界相位匹配。采用非临界相位匹配方式的 KTA-OPO 由于有较大的接收角,因而允许抽运光有较大的发散角,对抽运光光束质量的要求大大降低;同时由于其消除了走离效应,因而不会出现在某一方向增益被压缩的现象,而且使非线性晶体的有效增益长度达到最大。

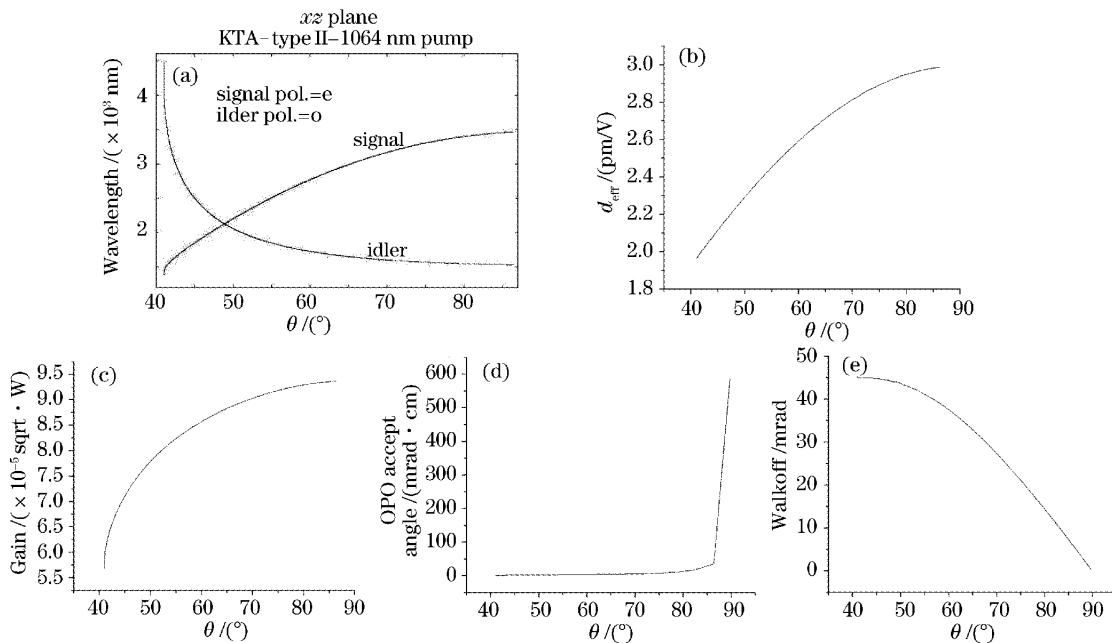


图 1 KTA-OPO 的 (a) 相位匹配, (b) 有效非线性系数, (c) 增益, (d) 参量允许角和 (e) 走离曲线

Fig. 1 Phase-matching (a), effective nonlinear index d_{eff} (b), gain (c), accepted angle (d) and walkoff (e) curve of KTA-OPO

采用非临界相位匹配时,可通过改变温度的方式实现可调谐输出。温度调谐曲线如图 2 所示。

可看出,温度调谐的可调范围不大, $0 \sim 100^\circ\text{C}$

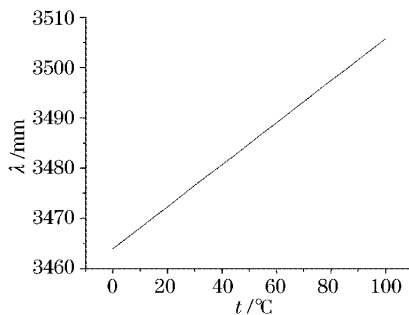


图 2 温度调谐曲线

Fig. 2 Temperature tuning curve

内,波长变化只有 $3464 \sim 3506$ nm(从另一个方面也可以看出 KTA-OPO 对温度变化不敏感)。但对于我们的应用来说,对 OPO 的调谐特性要求不高,因而影响不大。注意到当温度升高时,OPO 输出波长将向长波方向移动,因此可以适当地升高 OPO 的工作温度,以获得所需要的中红外波段。

2.2 实验装置

OPO 的腔形主要有直腔和环形腔两种,其中直腔又分为外腔和内腔。采用不同腔形所设计的 OPO 实验装置分别如图 3 所示,其中图 3(a)为外腔结构,图 3(b)为内腔结构,图 3(c)为环形腔结构。

相对于外腔抽运的 OPO 来说,内腔抽运的 OPO 具有峰值功率密度高、起振阈值低、效率高等优点,而且在结构上比较紧凑,易于小型化。但其输

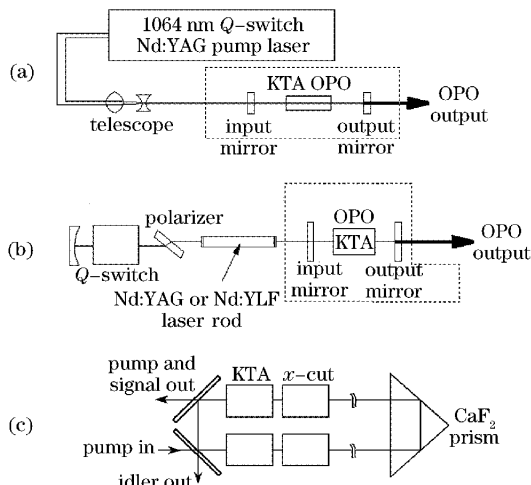


图 3 KTA-OPO 实验装置示意图
Fig. 3 Experimental setup of KTA-OPO

出光束质量较外腔结构差,而且其高的抽运峰值功率对于 KTA 的损伤阈值是一个考验。

而相对于直腔来说,环形腔具有以下优点:损伤阈值高;能有效地利用晶体长度,效率高;不用考虑抽运光的后向反射问题;其腔形设计能将所需要的闲频光与抽运光和信号光分离,降低了对腔镜镀膜的要求。缺点是抽运阈值较高^[9]。

从目前我们所具备的条件来看,采用外腔结构的 OPO 实验装置是比较成熟和现实的。如果条件具备,可以考虑采用内腔和环形腔,以进一步提高 OPO 的性能。

2.3 KTA-OPO 设计中应考虑的其他问题

2.3.1 KTA 晶体的最佳长度

从理论上来说,晶体的长度越长越好,以增加参量过程的增益长度。但是随着晶体长度的增加,参量过程会发生逆转换(即闲频光和信号光转换为抽运光),从而影响整个 OPO 的转换效率^[10],如图 4 所示。同时晶体的长度越长,输出参量光的光束质

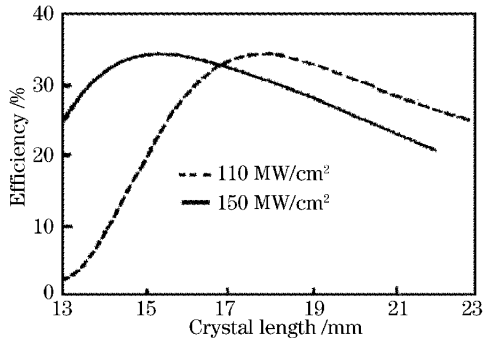


图 4 KTA 晶体的最佳长度
Fig. 4 Effect of KTA crystal length

量也越差^[11]。因此在选择 KTA 晶体的长度时,应兼顾这两个因素,以选择最合适的长度。

2.3.2 抽运功率的影响

光参量过程中,抽运光强度能够直接决定 OPO 参量输出的大小。在其他参量确定的情况下,抽运光强度并不是越高越好。在晶体损伤阈值范围内,抽运光强度存在一个最佳值,超过这个值,腔内会发生强的逆转换过程,它将抑制正过程的发生,从而导致参量输出效率下降^[10],如图 5 所示。同时随着抽运功率的增加,OPO 的光束质量也随之变差^[12]。因此要选择最佳的抽运功率,以实现高功率、高光束质量 OPO 输出。

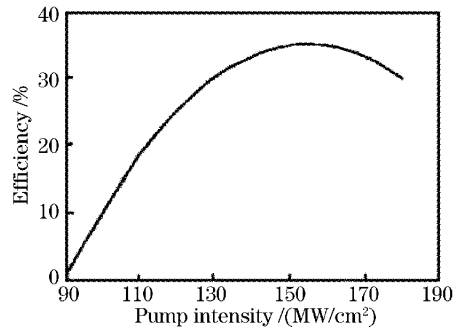


图 5 抽运功率密度的影响
Fig. 5 Effect of pump intensity

2.3.3 OPO 腔镜的镀膜

参量过程对 OPO 腔镜的镀膜非常敏感,因此合适的腔镜反射率将有利于得到最佳输出。由于所需要的是 3.4~3.8 μm 的闲频光,因而 OPO 谐振腔应对闲频光振荡。同时单谐振 SRO-OPO 较双谐振 DRO-OPO 具有更好的稳定性,更适用于高峰值功率抽运,膜片更容易制备^[13],因此 SRO-OPO 是一种十分可行的方案。当采用外腔结构的实验装置时,闲频光单谐振情况下各腔镜的反射率如图 6 所示。

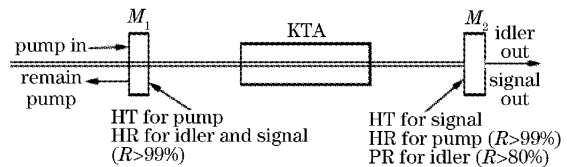


图 6 OPO 腔镜反射率
Fig. 6 Reflectivity of OPO cavity mirror

存在的问题是 3.4~3.8 μm 的高反膜镀制难度高,而且损伤阈值较低。应选择合适的腔镜基底以提高膜层的损伤阈值。

2.3.4 OPO 谐振腔的结构和腔长

实验中所采用的 OPO 谐振腔是平-平腔,但平-平腔会产生高阶横模,使光束质量大大降低,从而影响整个 OPO 的转换效率。而非稳谐振腔能抑制高阶横模,从而改善光束质量和转换效率^[10]。

在相同的抽运功率密度下,增加 OPO 腔长会使 M^2 减小^[12],从而改善光束质量。但随着腔长的增加,OPO 的起振阈值也随之增高。因而设计 OPO 腔长时,应兼顾这两个方面。

2.3.5 抽运源和 OPO 之间的模式匹配

在实验装置设计中采用了一个模式匹配望远镜,以实现抽运源和 OPO 之间的模式匹配。只有两者之间模式匹配,才能实现抽运光能量向闲频光和信号光的完全有效转换,否则会大大影响转换效率,使 OPO 输出能量下降。

参 考 文 献

- 1 Wei Jinqiang, Wang Jiyang, Liu Yaogang *et al.*. Crystal growth and properties of KTiOAsO_4 [J]. *J. Synthetic Crystals*, 1994, **23**(2): 95~101
魏景谦,王继扬,刘耀岗等. KTiOAsO_4 晶体的生长和性质研究 [J]. *人工晶体学报*, 1994, **23**(2): 95~101
- 2 John D. Bierlein, Herman Vanherzeele, A. A. Ballman *et al.*. Linear and nonlinear optical properties of flux-grown KTiOAsO_4 [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(9): 783~785
- 3 S. Cussat-Blanc, A. Ivanov, D. Lupinski *et al.*. KTiOPO_4 , KTiOAsO_4 and KNbO_3 crystals for mid-infrared femtosecond optical parametric amplifiers; analysis and comparison [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(suppl.): S247~S253
- 4 C. Rahlff, Y. Tang, W. Sibbett *et al.*. High-repetition-rate, mid-infrared KTA-OPO at 3.44 μm [C]. *CLEO*, 1996. 267
- 5 Larry R. Marshall. Efficient multiwatt 2~5 μm tunable sources [C]. *CLEO*, 1996. 368~369
- 6 B. Ruffing, A. Neble, R. Wallenstein. All-solid-state cw mode-locked picosecond KTiOAsO_4 (KTA) optical parametric oscillator [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(5): 537~544
- 7 Ruifen Wu, Kin Seng Lai, Hui Feng Wong *et al.*. Compact mid-IR intracavity OPO [C]. *SPIE*, 2001, **4595**: 287~292
- 8 G. Vysniauskas, D. Burns, E. Bente. Development of a nanosecond high energy KTA OPO system operating 2.9 μm [C]. *CLEO*, 2002. 333
- 9 Mark S. Webb, Peter F. Moulton, Jeffrey J. Kasinski *et al.*. High-average-power KTiOAsO_4 optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1161~1163
- 10 Xu Xiuli, Xu Yao, Xu Zuyan *et al.*. Theoretical and experimental research of travelling-wave optical parametric oscillation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 478~483
徐秀俐,徐 瑶,许祖彦等. 行波光参量过程的理论与实验研究 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 478~483
- 11 Margaret K B, Mark S B. High energy, near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators [C]. *SPIE*, **2986**: 113~122
- 12 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Liu Qiang *et al.*. Study of the spatial beam quality of KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 693~697
姚宝权,王月珠,柳 强等. KTP 光学参量振荡器输出激光的空间模式和光束质量 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8): 693~697
- 13 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tunable Technique [M]. Beijing: Science Press, 1995. 170
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. 170