

纳秒中红外可调谐参量激光研究

李浩宁¹, 张大成^{1*}, 朱江峰^{1**}, 田文龙¹, 刘寒¹, 康仁铸¹, 魏志义²

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190

摘要 中红外可调谐激光已被广泛应用于医疗、军事,以及环保等领域。利用 1064 nm 激光抽运磷酸钛氧钾 (KTP) 晶体光参量振荡器 (OPO) 产生 2.6 μm 波长可调谐参量激光。该光参量振荡器采用腔外单谐振结构,利用 II 类相位匹配的方式获得了最大的非线性系数。实验实现了 2.4~2.8 μm 的波长调谐范围,并在 155 mJ 泵浦能量下,获得了最大单脉冲能量为 12.6 mJ、转化效率为 8.1%、光束质量为 5 倍的衍射极限。

关键词 激光光学; 中红外; 可调谐激光; 光参量; 光束质量; 纳秒脉冲

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1114002

Nanosecond Mid-Infrared Tunable Parametric Laser

Li Haoning¹, Zhang Dacheng^{1*}, Zhu Jiangfeng^{1**}, Tian Wenlong¹,

Liu Han¹, Kang Renzhu¹, Wei Zhiyi²

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

² Key Laboratory of Photophysics of Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Mid-infrared tunable laser is widely used in several fields, such as medical, military, and environmental protection. Herein, a tunable parametric laser with a central wavelength of 2.6 μm is generated by pumping a KTP crystal based optical parametric oscillator (OPO). The OPO employs an extra-cavity single resonance structure. Type-II phase matching is used to obtain a maximum nonlinear coefficient. Experimental results demonstrate that the wavelength of the oscillator can be adjusted in the range of 2.4~2.8 μm . The maximum pulse energy is 12.6 mJ with a pumping energy of 155 mJ, whereas the conversion efficiency is 8.1%. The beam quality is measured to be five-fold of the diffraction limit.

Key words laser optics; mid-infrared; tunable laser; optical parameter; beam quality; nanosecond pulse

OCIS codes 140.3070; 140.3600; 190.4970

1 引 言

中红外可调谐激光在大气分子中的吸收特性使得该波段激光在军事、医疗、遥感、通信,以及工业加工等领域有着重要的应用价值^[1-3]。在光谱学、大气监测等领域,因 H₂O、CO₂、CO 等大气中众多原子和分子的吸收峰处于中红外波段,故可以根据大气分子对激光的选择性吸收强度来确定气体浓度^[4]。在定向红外对抗系统中需要匹配中红外光谱区域的大气透射窗口,在大气传输窗口内实现波长的多样性时,不易受到对抗的影响^[5]。基于 2.0~2.5 μm 波段的激光在大气中的传播衰减速度很小,且处于

大气窗口,适用于自由空间光通信^[6]。2.6 μm 波段处于水的吸收峰,故 2.6 μm 的激光可以被人体生物组织中的水分子强烈吸收,对周围组织的热损伤较小,已被广泛应用于生物医疗等领域^[7]。

目前,获得 2.6 μm 中红外激光输出的方法主要有光参量振荡技术(OPO)、量子级联激光器,以及半导体激光器等。其中基于 OPO 的可调谐中红外固体激光器具有转换效率高、调谐范围宽、光束质量好,以及结构简单等优点^[8-11]。在众多非线性晶体中,磷酸钛氧钾(KTP)晶体具有非线性光学系数大、热导率高、失配度小、走离角小、不潮解,以及稳定的化学和机械性能等特点,是目前

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-07-25

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(XJS17025)、国家自然科学基金青年基金(61705174)

* E-mail: dch.zhang@xidian.edu.cn; ** E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

OPO 常用的非线性晶体之一^[12-14]。光参量振荡器的理论最早是由 Kroll^[15] 提出的,1965 年美国贝尔实验室的 Giordmaine 等^[16] 首先用脉冲泵浦光实现了光参量振荡输出。1989 年 Burnham 等^[17] 首次利用 1.06 μm 的 Nd:YAG 激光抽运 KTP 晶体实现了中红外波段参量激光输出。此后,基于 KTP 晶体的 OPO 向着高转换效率、高光束质量方向发展。2014 年 Cui 等^[18] 搭建了一台高功率腔内抽运双谐振光学参量振荡器,其声光 Q 开关的调制频率设置为 5 kHz,获得的最大输出功率为 70 W。同年 Verma 等^[19] 采用高抗灰迹磷酸钛氧钾 (HGTR KTP) 非线性晶体,在 20 W 泵浦功率下,实现了 7 W 的 2.1 μm 的激光输出,转化效率为 35%。2016 年 Mei 等^[20] 将两块 KTP 晶体相向放置以补偿走离效应,提高转换效率,实现了 2.068~2.191 μm 波长连续可调谐,最大输出功率为 3.29 W,光光转换效率为 20.69%。同年,谢小兵等^[21] 在重复频率为 400 Hz、泵浦能量为 5 mJ 下实现了单脉冲能量 0.9 mJ 的 2.05 μm 激光输出,光光转换效率达到了 18%,光束质量因子 M^2 在 x 、 y 方向上分别为 2.08 和 3.03。2018 年 Verma 等^[22] 采用 Nd:YVO₄ 作为泵浦源,在 10 kHz 的重复频率下实现了 3 W 的 2.1 μm 激光输出,斜效率为 23.6%。上述报道中的平平腔 KTP-OPO 的波长大多工作在 2.1 μm ,即 KTP 晶体的简并点附近,可以实现极高的转化效率。而基于 KTP 晶体的 2.6 μm 波段附近的 OPO 激光器却鲜有报道。2010 年彭跃峰等^[23] 通过 1064 nm 激光抽运两块相向放置的 KTP 晶体腔内光参量振荡技术,在重复频率 7 kHz 下,获得了功率为 7.6 W,光光转换效率为 15.2%,光束质量 M^2 小于 1.6 的 2.68 μm 激光输出。2017 年卞进田^[24] 同样采用两块晶体相向放置的 OPO 结构,在低重复频率 10 Hz 下,利用 89 mJ 的泵浦能量获得了脉冲能量为 7.5 mJ,光光转换效率为 8.4% 的 2.7 μm 激光输出。

在临界相位匹配 OPO 系统中,采用双晶体结构虽然可以补偿走离,但也极大地增加了整个激光器的体积。对于晶体切割角较大的 2.6 μm KTP-OPO,其走离效应对于激光输出的影响相对较小,因此,可以采用单晶体的结构设计来满足小体积 KTP-OPO 的需求。本文设计了一台中心波长为 2.6 μm 的紧凑型光参量振荡器,在单晶体、单谐振结构下获得了较高转换效率的可调谐中红外激光输出。

2 实验设计

实验采用 KTP 晶体作为参量转换晶体,在双程泵浦条件下,根据 KTP-OPO 的阈值表达式^[25-27] 拟合得到 OPO 阈值与晶体长度之间的关系,并且通过 o 光和 e 光之间的距离来表征晶体的走离效应,如图 1 所示,在 KTP 晶体长度较小时,OPO 的阈值能量密度会随着晶体长度的增加而降低,当晶体长度增加到一定值之后,阈值能量密度会达到一个最小点。之后受光波的走离效应、非线性晶体的吸收和泵浦光发散角等的影响,KTP 晶体的能量阈值会有所增加,晶体的有效增益长度 $l_{\text{eff}} = 45 \text{ mm}$ 。实验采用单晶体结构,走离角一定时,晶体越长,o 光和 e 光的距离就越远,相应的其走离效应对于激光器转换效率的影响也就越明显。为了平衡两者之间的关系,实验晶体长度选取曲线交点处的 20 mm,振荡阈值约为 0.2 J/cm²。

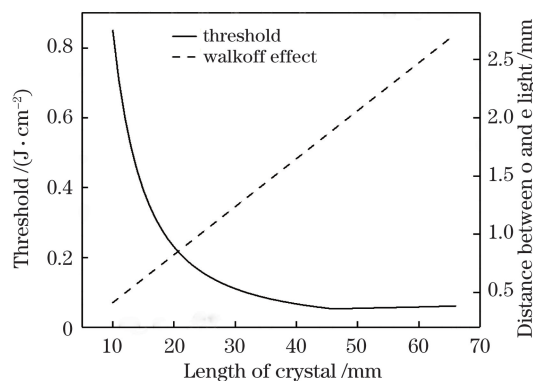


图 1 晶体长度对阈值和走离的影响

Fig. 1 Effect of crystal length on threshold and distance between o and e polarization light

根据以上分析进行实验方案设计,具体的光路如图 2 所示。泵浦源为 Nd:YAG 激光器 (DW300, 镭宝光电), 波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 6 ns, 重复频率为 10 Hz。泵浦激光望远镜系统将光斑缩束至入射光斑的 2/3, 其中凸面镜焦距 $f_{F1} = 150 \text{ mm}$, 凹面镜焦距 $f_{F2} = -100 \text{ mm}$ 。OPO 的腔型结构为平平腔, 腔长为 26 mm, M1 镜片对基频光 1064 nm 高透, 对信号光 1800 nm 高反, M2 对基频光和信号光高反, 对闲频光 2600 nm 高透。KTP 晶体 I 类和 II 类相位匹配的有效非线性系数 d_{eff} 分别为 0~1.2 pm/V 和 0~3.5 pm/V^[28]。有效非线性系数越大, 转换效率就越大, 故本文选择非线性系数高的 II 类相位匹配角进行切割。根据 KTP 晶体在 XZ 平面内的 II 类相位匹配角度调谐曲线^[29-30] 可知: 当晶体切割角度为 59.8° 时, 闲频光输出中心波长为 2.6 μm 。

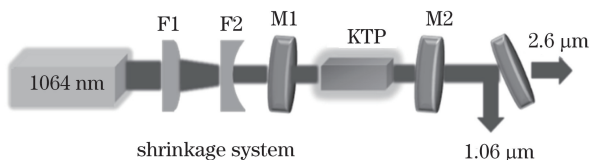


图 2 KTP-OPO 激光器示意图

Fig. 2 Schematic of KTP-OPO laser

3 实验结果与分析

3.1 光谱调谐

实验中腔内的信号光和闲频光的强度较高,通过调节腔镜可以观测到可见光束中的红光和绿光,其中红光为泵浦光与闲频光的和频,绿光为泵浦光的倍频,利用和频光可以辅助判断是否有闲频光输出^[31]。由于 OPO 输出的激光为中红外波段,而本实验室缺少低重复频率中红外光谱测量设备,因此实验中通过测量和频光的光谱来间接获得中红外激光的波长,如图 3 所示。通过调节晶体角度,可以实现输出激光波长调谐。但受到腔内插入损耗、通光面的尺寸,以及腔镜的镀膜等的影响,目前实验上获得的波长调谐范围仅为 $2.4\sim 2.8\ \mu\text{m}$ 。

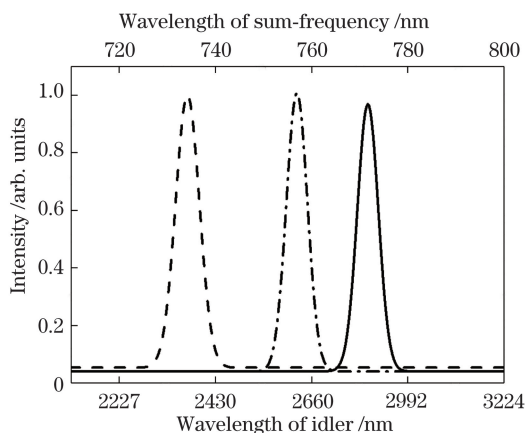


图 3 光参量振荡器输出波长的调谐范围

Fig. 3 Wavelength tuning range of OPO

3.2 输出能量与转换效率

在平平腔结构下,KTP-OPO 输出的 $2.6\ \mu\text{m}$ 激光能量随输入能量变化的曲线如图 4 所示,输出闲频光能量随泵浦能量的增大而线性增大,获得的最大单脉冲能量为 $12.6\ \text{mJ}$,转化效率为 8.1% ,与文献^[24]报道的双晶体结构的转化效率 8.4% 接近。这主要是因为本文采用单晶体结构缩短了 OPO 的腔长,从而获得了较高转化效率的激光输出。利用线性拟合得到的 OPO 的起振阈值为 $84\ \text{mJ}$ 。OPO 腔相对于光束以一定的角度倾斜放置是为了防止激光反射损伤光腔,但该做法会使得激光损耗增加,导

致实验阈值($0.37\ \text{J}/\text{cm}^2$)与理论值($0.2\ \text{J}/\text{cm}^2$)间有存在一定的偏差。

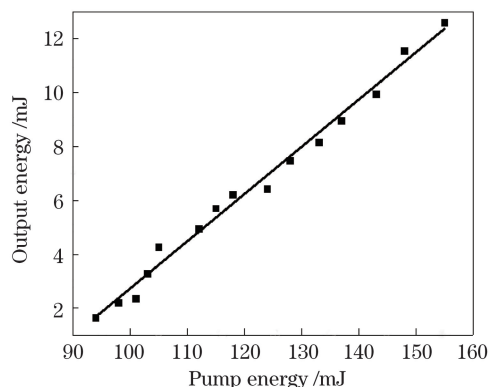


图 4 闲频光能量随泵浦能量的变化曲线

Fig. 4 Energy of idlerlight versus pump energy

图 5 展示了在泵浦能量 $140\ \text{mJ}$ 下,KTP-OPO 闲频光输出能量随腔长的变化关系。由图可知,随着腔长的减小,OPO 的振荡阈值减小,转换效率随之增加,输出能量变大。这是因为腔长的增加使得腔内衍射损耗增大,从而造成输出闲频光能量下降,该结果与文献^[32]报道的结果一致。

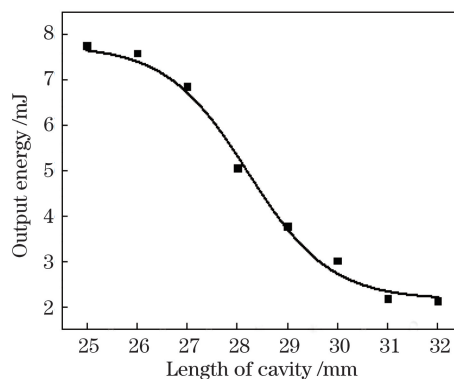


图 5 闲频光能量随腔长的变化曲线

Fig. 5 Energy of idlerlight versus cavity length

3.3 光束质量

在军事、大气光谱测量等应用中,往往需要远距离传输激光束,这就要求中红外激光具有较好的光束质量。因此,测量和提高中红外激光光束质量对于光源的应用具有重要意义。目前,常用的激光光束质量测量方法主要有:套孔法、CCD 法,以及刀口法等。套孔法的精度较差,很少被使用;CCD 法的精度较高,但价格也比较昂贵,且难以适用于峰值功率较高的脉冲激光测量;刀口法的操作相对简单,精度也较高,且能适用于峰值功率高的脉冲激光测量^[33-34]。结合上述分析,本文自行搭建了一套刀口测量装置来测量所产生的中红外激光光束质量,图 6 为该装置的示意图。

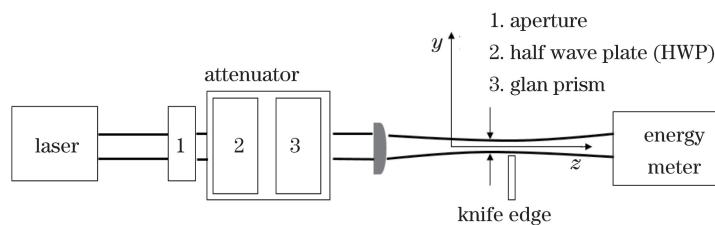


图 6 刀口法激光光束质量测量装置示意图

Fig. 6 Setup for beam quality measurement by knife edge method

光束质量的评价参数通常有光束远场发散角 θ 、焦斑尺寸、衍射极限倍数 β 、 M^2 因子、Strehl 比和环围功率比等。本文采用比较理想和实用的衍射极限倍数评价光束质量,其定义为

$$\beta = \theta / \theta_0, \quad (1)$$

式中: θ 为实际远场发散角; θ_0 为理想远场发散角。根据光波衍射理论,能够计算得到圆形实心均匀光束的理想远场发散角,即衍射极限角为

$$\theta_0 = 1.22\lambda / D, \quad (2)$$

式中: D 为光束直径。已知输出激光的波长,通过测量输出激光的光斑大小,就可得到理想远场发散角。在实际的测量中,通常是采用近场方法来测量远场发散角,即利用一个聚焦光学系统将被测激光束聚焦。如图 6 所示,在激光传播 z 轴方向上的某一位置放置刀口,当刀口没有遮挡激光光束时,此时的激光能量最大;当刀口沿 y 方向移动,光斑被遮挡的面积变大,激光能量下降;当激光光斑被完全遮挡时,此时的激光能量最小。分别测量透射能量为最大激光能量的 16% 与 84% 时对应的刀口在 y 轴方向上的位置 y_1 与 y_2 , 即得刀口位置处光斑直径 $y = 2|y_1 - y_2|$ 。通过测量 z 轴方向不同位置的光斑大小,利用双曲线拟合即可得到光束束斑大小,如图 7 所示,所产生的 OPO 光的光束质量为 5 倍衍射极限,这与文献[22]报道的结果相近。

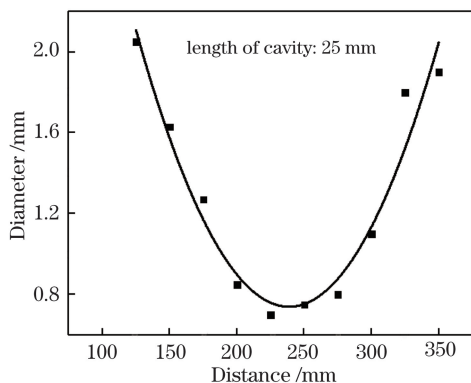


图 7 聚焦光斑直径

Fig. 7 Diameter of focus spot

4 结 论

设计了一台基于光参量振荡技术高脉冲能量的 $2.6 \mu\text{m}$ 可调谐激光器,在单晶体结构下实现了单脉冲能量为 12.6 mJ,光光转换效率为 8.1%,调谐范围为 $2.4 \sim 2.8 \mu\text{m}$ 的中红外激光输出。 $2.6 \mu\text{m}$ 激光单脉冲能量的提高主要受限于光学元器件的损伤。为了给军事、环境监测,以及有机光谱测量等方面的应用提供更为优质的激光源,后续可采用更优的光学器件、双晶体结构和环形腔设计,来进一步提高中红外激光的单脉冲能量和光束质量。

致谢 感谢西南大学高子叶博士给予的帮助和有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Wang B. Research on high repetition rate high efficiency $2.1 \mu\text{m}$ KTP optical parametric oscillator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
王彬. 高重频高效率 $2.1 \mu\text{m}$ KTP 光参量振荡器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [2] Godard A. Infrared ($2\text{--}12 \mu\text{m}$) solid-state laser sources: a review[J]. Comptes Rendus Physique, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [3] Nie D D, Li Y J, Feng J X, *et al.* Broadly tunable and high power continuous-wave single-frequency infrared laser by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401016.
聂丹丹, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生宽调谐高功率连续单频红外激光[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401016.
- [4] Xie X K. Low-threshold mid-infrared continuous-wave optical parametric oscillator and high-stability compact product research[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
谢旭凯. 低阈值中红外连续光参量振荡器及其高稳定小型化产品研发[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [5] Yin Y. Requirements for directed infrared

- countermeasures laser [J]. *Applied Physics*, 2018, 8(7): 318-323.
- 尹扬. 光电对抗对激光光源的要求 [J]. *应用物理*, 2018, 8(7): 318-323.
- [6] Qin X Z. Studies on the mid-infrared optical parametric oscillator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- 秦薪镇. 中红外光学参量振荡技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [7] Frauchiger J, Lüthy W. Interaction of 3 μm radiation with matter [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1987, 19(4): 231-236.
- [8] Tian W L, Wang Z H, Zhu J F, *et al.* Tunable femtosecond near-infrared source based on a Yb:LYSO-laser-pumped optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(1): 014207.
- [9] Faist J, Capasso F, Sivco D L, *et al.* Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [10] Garbuzov D Z, Lee H, Khalfin V, *et al.* 2.3-2.7- μm room temperature CW operation of InGaAsSb-AlGaAsSb broad waveguide SCH-QW diode lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(7): 794-796.
- [11] Bao Z R G T, Zhang D Y, Feng Y T, *et al.* Research on tunable mid-infrared OPO laser [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9): 986-988.
- 包照日格图, 张大勇, 冯宇彤, 等. 可调谐中红外 OPO 激光器研究 [J]. *激光与红外*, 2012, 42(9): 986-988.
- [12] Wei X B, Peng Y F, Wang W M, *et al.* 2 μm pulsed laser with 100 mJ intracavity KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2762-2765.
- 魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 百毫焦腔内 KTP 光参量振荡 2 μm 脉冲激光器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2762-2765.
- [13] Shen D Z, Chen J R. Research progress and market prospects of KTP crystals and devices [J]. *Advanced Materials Industry*, 2007(10): 66-71.
- 沈德忠, 陈建荣. KTP 晶体与器件的研究进展及市场展望 [J]. *新材料产业*, 2007(10): 66-71.
- [14] Wang Y Z, Yao B Q, Wang Q. KTP optical parametric oscillator with both critically and non-critically phase-matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1368-1373.
- 王月珠, 姚宝权, 王骥. 临界及非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器 [J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1368-1373.
- [15] Kroll N M. Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tuneable oscillators at optical frequencies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1963, 51(1): 110-114.
- [16] Giordmaine J A, Miller R C. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 1965, 14(24): 973-976.
- [17] Burnham R, Stolzenberger R A, Pinto A. Infrared optical parametric oscillator in potassium titanyl phosphate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, 1(1): 27-28.
- [18] Cui Q J, Shu X W, Le X Y, *et al.* 70-W average-power doubly resonant optical parametric oscillator at 2 μm with single KTP [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 639-643.
- [19] Verma S, Mishra C, Kumar V, *et al.* Generation of 2.1 μm wavelength from degenerate high gray track resistant potassium titanyl phosphate optical parametric oscillator [J]. *Pramana*, 2014, 82(2): 227-231.
- [20] Mei J L, Zhong K, Wang M R, *et al.* High-repetition-rate terahertz generation in QPM GaAs with a compact efficient 2- μm KTP OPO [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1501-1504.
- [21] Xie X B, Li S G, Zhu X L, *et al.* Characteristics of single resonant nanosecond pulse optical parametric oscillator with output wavelength of 2.05 μm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1208002.
- 谢小兵, 李世光, 朱小磊, 等. 2.05 μm 单谐振纳秒脉冲光参量振荡器特性研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1208002.
- [22] Verma S, Bahuguna K C, Chitra, *et al.* Investigation of adhesive-free bonded potassium titanyl phosphate crystal based optical parametric oscillator for generation of 2.1 μm wavelength at high repetition rate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 244-248.
- [23] Peng Y F, Wei X B, Wang W M, *et al.* Intracavity optical parametric oscillator 2.7 μm laser with near diffraction limit beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2376-2379.
- 彭跃峰, 魏星斌, 王卫民, 等. 近衍射极限腔内光参量振荡 2.7 μm 激光器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2376-2379.
- [24] Bian J T. Experimental research on 2.7 μm wave band laser with high peak power generated by KTP optical parametric oscillator [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 22-25.
- 卞进田. KTP OPO 产生 2.7 μm 波段高功率激光实验研究 [J]. *光电技术应用*, 2017, 32(4): 22-25.
- [25] Vanherzeele H, Bierlein J D, Zumsteg F C. Index of refraction measurements and parametric generation in hydrothermally grown KTiOPO₄ [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(16): 3314-3316.
- [26] Lu Y H, Wang W M, Peng Y F, *et al.* Intracavity KTP doubly resonant optical parametric oscillator

- pumped by Nd:YAG laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(s1): 189-191.
- 鲁燕华, 王卫民, 彭跃峰, 等. 内腔式 Nd:YAG 激光抽运 KTP 双谐振光学参量振荡器[J]. 中国激光, 2006, 33(s1): 189-191.
- [27] Gong M L, Li Z Y, Wang J S, *et al.* Noncollinear-pumped KTP optical parametric oscillator[J]. Applied Optics, 1999, 38(36): 7402-7405.
- [28] Wang Y. Study on nanosecond optical parametric oscillator and its applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- 万勇. 纳秒光学参量振荡器及其应用技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [29] Kaskow M, Gorajek L, Zendian W, *et al.* MW peak power KTP-OPO-based “eye-safe” transmitter[J]. Opto-Electronics Review, 2018, 26(2): 188-193.
- [30] Li P, Gao X X, Gu Y Z. Analysis of output characteristics of intracavity-frequency-doubled singly resonant optical parametric oscillator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091901.
- 李鹏, 高小霞, 顾玉宗. 内腔倍频单共振光学参量振荡器输出特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091901.
- [31] Bian J T, Sun X Q, Nie J S. Experimental study on KTP OPO producing 2.6-2.8 μm radiation[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2008, 25(2): 226-229.
- 卞进田, 孙晓泉, 聂劲松. 2.6~2.8 μm KTP OPO 实验研究[J]. 量子电子学报, 2008, 25(2): 226-229.
- [32] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, QE-15(6): 415-431.
- [33] Yang X D, Shao J X, Liao S H, *et al.* Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 829-832.
- 杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 829-832.
- [34] Liu C. Experiment of measuring the size of laser spot by knife edge method [J]. Telecom World, 2017 (10): 240-241.
- 刘彻. 刀口法测量激光光斑尺寸大小的实验[J]. 通讯世界, 2017(10): 240-241.