

# 利用 KTP 光学参量振荡器获得可调谐人眼安全激光

姚宝权 王月珠 鞠有伦 柳 强 于 欣 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

**提要** 报道了用 Nd:YAG 激光器二次谐波 532 nm 抽运 KTP 光学参量振荡器(OPO)的实验结果,获得了对人眼安全的 1.53~ 1.84  $\mu\text{m}$  和近红外 0.74~ 0.82  $\mu\text{m}$  调谐激光输出,重复频率 10 Hz。OPO 谐振腔采用  $\pi$  抽运结构,获得的最高总输出能量为 93 mJ,最高能量转换效率为 16.5%,并测量了光束质量和线宽。

**关键词** KTP 光学参量振荡器,人眼安全激光,可调谐激光

## 1 引 言

当激光在环境监测、测距、目标指示、遥感、成像等领域,特别是在城市等人口众多的地方使用时,需要考虑激光对人眼的安全问题。1.50~ 2.05  $\mu\text{m}$  是公认的人眼安全波段,获得该波长范围的途径很多,如铊、钽固体激光器<sup>[1]</sup>,在高压甲烷气体中对 1.064  $\mu\text{m}$  波长进行拉曼频移<sup>[2]</sup>,非临界相位匹配(NCPM)的 KTP, KTA OPO<sup>[3,4]</sup>,半导体激光器,半导体抽运的掺铒光纤激光器<sup>[5]</sup>等。非临界相位匹配 KTP OPO 以其效率高、装置简单、输出光束质量好被认为是一种非常有应用前景的方法,但其仅限于 90°相位匹配,输出为不调谐的单波长激光;而且在大能量运行时,由于 1.064  $\mu\text{m}$  抽运光产生的闲频光被 KTP 晶体吸收,会导致热透镜效应<sup>[4]</sup>。我们采用 532 nm 抽运的临界相位匹配方式,通过旋转晶体角度实现简便的宽带人眼安全波长调谐,并由计算机精确控制输出波长,探讨了实现大能量输出的可行途径。

## 2 实 验

整个实验装置如图 1 所示。所用的抽运源为美国光谱物理公司制造的 GCR-190 Nd:YAG 激光系统,倍频光 532 nm 脉宽 6~ 7 ns,能量稳定度  $\pm 3\%$ ,光束直径约为 8 mm,光束发散角全宽度  $< 0.5$  mrad。选用的 KTP 晶体尺寸为 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  13 mm,晶轴位于  $x-z$  平面,切割角 56°,采用  $\pi$  类相位匹配方式。临界相位匹配存在走离效应,计算 56°切割的 KTP 晶体走离角为 47 mrad,接受角 0.9 mrad,比非临界相位匹配接受角 56 mrad 小一个数量级。因此对于临界相位匹配 KTP OPO 来说,由于走离效应的存在,小的抽运光束直径会影响晶体中的有效增益长度及抽运光与参量光在空间上的有效耦合<sup>[6,7]</sup>,而利用透镜聚焦缩束会受到其有

限的接受角限制。因此我们充分利用 GCR 激光器光束直径大、输出能量高的特点,对 KTP OPO 进行有效抽运,以期实现高效率输出。

晶体放置在装有步进马达的转角平台上,并由计算机控制转角大小及转速,精度为  $0.01^\circ$ 。实验中将抽运光经  $45^\circ$  532 nm 全反镜侧向入射进 OPO 腔中,再经另一同样的反射镜,将抽运光引出谐振腔。这样的腔型结构避免了强激光正向通过 OPO 谐振腔时损坏 OPO 全反膜和部分反射膜现象,如图 1 所示。OPO 谐振腔的两块反射镜间隔 70 mm,其中输入镜  $M_1$  全反带在中心波长  $1.65 \mu\text{m}$  的反射率大于 99%,对闲频光  $1.53\sim 1.84 \mu\text{m}$  的反射率大于 85%;

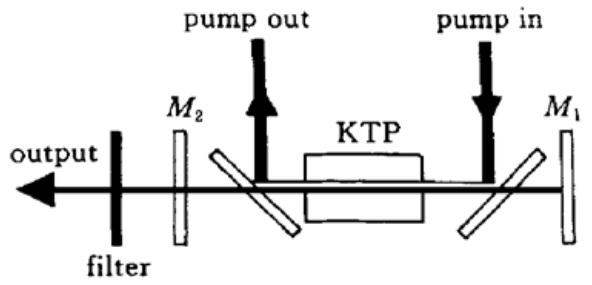


图 1 Nd·YAG 激光二次谐波抽运 KTP OPO 实现人眼安全输出的实验装置

Fig. 1 Experimental setup of KTP OPO pumped by the second harmonic Nd·YAG laser for the use of eye-safe output

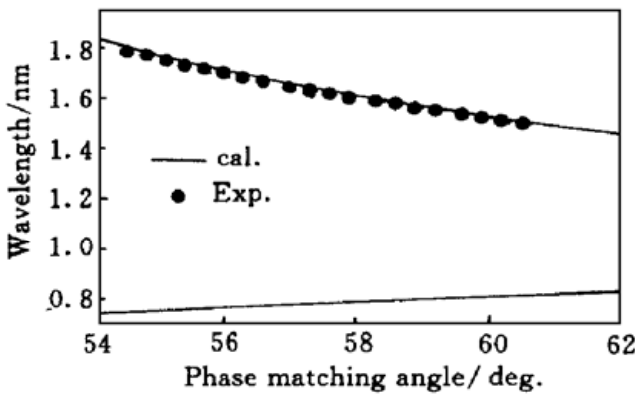


图 2 Nd·YAG 二次谐波抽运 KTP OPO 在人眼安全范围内的调谐曲线

Fig. 2 Tuning curve in the eye-safe range from the KTP OPO pumped at 532 nm by a Nd·YAG laser

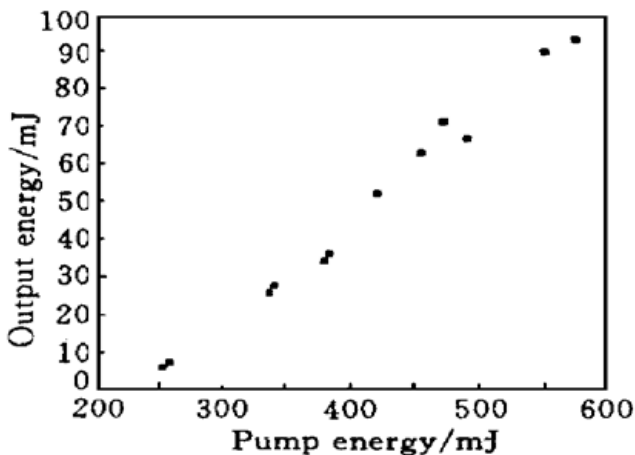


图 3 KTP OPO 输出能量与抽运能量的关系  
谐振腔内带有两个  $45^\circ$  放置抽运光 532 nm 全反镜

Fig. 3 Output energy of KTP OPO versus pump energy  
Cavity with two  $45^\circ$  high reflectors of 532 nm pump beam

输出耦合镜  $M_2$  对闲频光的反射率大于 50%,中心波长  $1.65 \mu\text{m}$  的反射率为 85%; $M_1$  与  $M_2$  对抽运光  $0.532 \mu\text{m}$  的透射率分别为 83.7% 和 94.5%。OPO 采用角度调谐方式,通过晶体在  $x-z$  平面转动,即改变晶体  $z$  轴与抽运光波矢的夹角来实现波长调谐。OPO 输出波长采用 WDG-30 单色仪测量,测量精度为 0.5 nm。输出光用硫化铅红外探测器探测,输出的微弱信号经低噪声 Model-113 前置放大器放大,通过 TEK-466 示波器监测。

晶体正放置时,输出的闲频光波长为  $1.70 \mu\text{m}$ ,信号光波长为  $0.77 \mu\text{m}$ 。当晶体内角在  $53^\circ\sim 59^\circ$  范围内变化时,获得闲频光调谐范围为  $1.53$

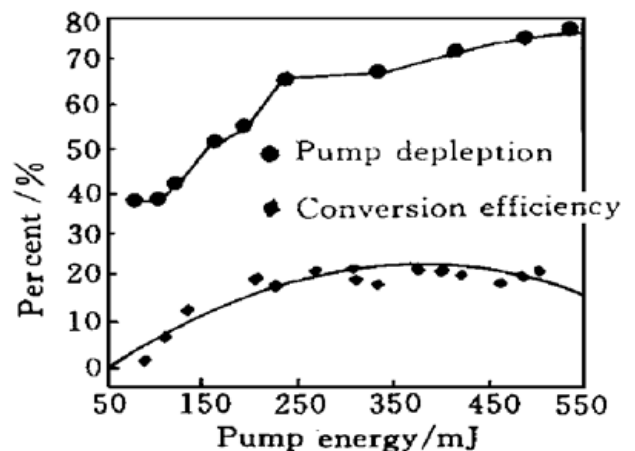


图 4 KTP OPO 抽运损耗和能量转换效率与入射到晶体中的抽运能量的关系曲线

Fig. 4 Pump depletion and energy conversion efficiency versus the energy sent into KTP crystal

~ 1.84 μm, 相应的信号光调谐范围为 0.75~ 0.82 μm, 调谐曲线如图 2 所示(实线是根据山东大学提供的 Sellmeier 方程计算的, • 是用单色仪测得的数据)。整个 OPO 由计算机系统控制步进马达及减速机构, 通过改变晶体通光轴与抽运光之间的夹角来精确实现波长调谐, 调谐精度 0.1 nm(Burleith-4500 波长计测量)。控制软件工作于 Windows '95 环境下, 带有操作方便、直观的可视性界面。调谐过程中, 即 KTP 晶体绕其 y 轴转动时, OPO 输出能量出现下降, 但向角度增大方向旋转比向角度减小方向旋转的能量下降要缓慢, 这主要是因为对于 φ= 0° 切割的 KTP 晶体, 其有效非线性系数与 sinθ 成正比的缘故, 如图 5 所示。

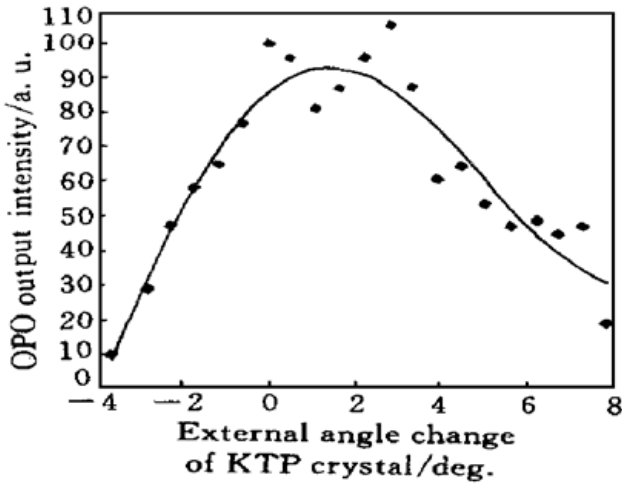


图 5 OPO 输出强度与调谐过程中 KTP 晶体角度变化关系

Fig. 5 OPO output intensity versus the angle change of KTP during the period of tuning

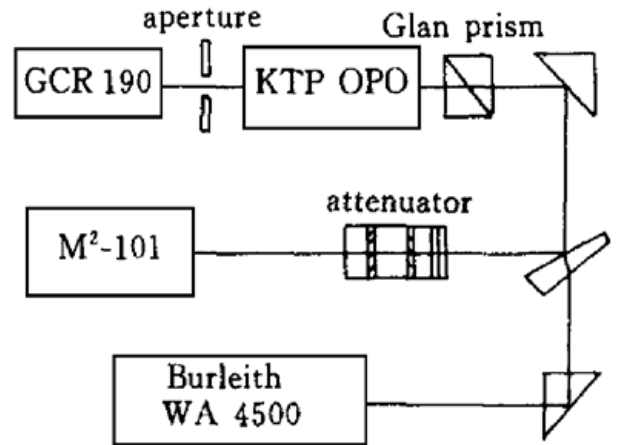
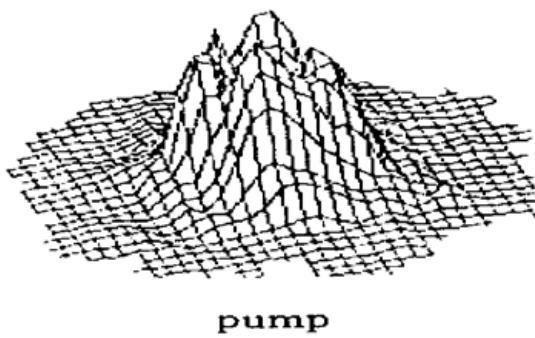
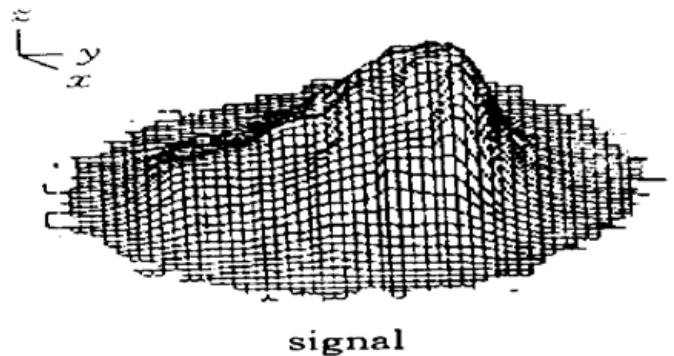


图 6 测量 KTP OPO 信号光光束质量与线宽的实验装置图

Fig. 6 Experimental setup on measurement of beam quality and linewidth of KTP OPO



pump



signal

图 7 KTP OPO 抽运光与信号光的三维空间光束形状

Fig. 7 Beam profile of pump and signal of KTP OPO

用 Newport 2835c 能量计(探头 818J-25B)测定的 KTP OPO 输出能量、能量转换效率、抽运损耗与抽运能量之间的关系如图 3 及图 4 所示。实验中获得的最大输出能量达 93 mJ, 最高能量转换效率为 16.9%。KTP OPO 采用的是 L 类匹配方式, 输出的信号光为水平偏振, 闲频光为垂直偏振。用格兰双输出棱镜将闲频光和信号光分开测量, 0.77 μm 信号光 66 mJ, 1.70 μm 闲频光 27 mJ, 相应的量子转换效率为 17.7% 和 15.8%。从图 3 可看到, 从 5 倍阈值处开始, 抽运能量再提高, 抽运损耗的增加趋向平缓, 能量转换效率趋向饱和, 且有下降的趋势。这主要是因为直线谐振腔中, 当抽运光强度达到一定程度时, 生成的信号光与闲频光重又合成抽

运波,因而在损耗的抽运脉冲会出现新的峰。采用环行腔结构能够消除逆转波的影响,实现大功率运行时高效输出<sup>[6]</sup>。由于 KTP 晶体在 0.532~0.180  $\mu\text{m}$  吸收很小,OPO 在大能量运行时没有观察到热透镜效应。

用 LBA-100A 激光光束分析仪测量了抽运光和 OPO 输出的信号光光束形状,如图 7 所示,抽运光光束形状为近高斯形,而信号光光束呈不对称分布,水平方向的发散性小于垂直方向。用  $M^2$ -101 测量了抽运光和信号光的光束传输参数,如表 1。

表 1 KTP OPO 抽运光和信号光的光束传输参数

Table 1 Laser beam property of pump and signal of KTP OPO

	$\theta_0(x)$ /mrad	$\theta_0(y)$ /mrad	$M^2(x)$	$M^2(y)$
Pump	0.4	0.4	2.2	2.1
Signal	2.8	4.6	4.7	5.5

在双折射临界相位匹配条件下,KTP 晶体在水平方向上的接受角远小于垂直方向上的。由于受水平方向增益波导限制,因而产生的参量光水平方向远场发散角和光束质量  $M^2$  值小于垂直方向的。

用 Burleigh 脉冲波长计测量了 KTP OPO 的输出线宽,波长计中所用 F-P 标准具间距为 0.12 mm,自由光谱范围为 450 GHz。实验中测量的 532 nm 抽运光线宽为  $1.0 \text{ cm}^{-1}$  (0.03 nm), 770 nm 信号光线宽为  $3.3 \text{ cm}^{-1}$  (0.24 nm)。

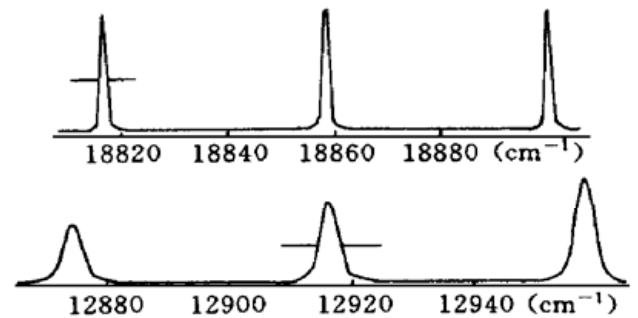


图 8 利用 Burleigh WA-4500 脉冲波长计测量的抽运光(上)和信号光(下)的输出线宽

Fig. 8 Measured linewidth of pump (above) and signal (below) with Burleigh WA-4500 pulse wavemeter

### 3 结 论

采用  $\pi$  形共线抽运结构,闲频光谐振的方式,实现了 KTP OPO 对人眼安全的 1.53~1.84  $\mu\text{m}$  可调谐输出。这种腔型结构避免了强抽运激光对 OPO 谐振腔片的损伤,有利于 OPO 的长寿命运转,降低了宽带反射膜片的制备难度。

### 参 考 文 献

- 1 A. V. Podlipensky, V. G. Shcherbitsky, N. V. Kuleshov *et al.*.  $\text{Cr}^{2+} \cdot \text{ZnSe}$  and  $\text{Co}^{2+} \cdot \text{ZnSe}$  saturable-absorber Q-switches for 1.54  $\mu\text{m}$  Er-glass lasers. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(14): 960~ 962
- 2 Z. Chu, U. N. Singh, T. D. Wilkerson. A self-seeded SRS system for the generation of 1.54  $\mu\text{m}$  eye-safe radiation. *Opt. Commun.*, 1990, **75**: 173~ 178
- 3 L. R. Marshall, A. Kaz. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1730~ 1736
- 4 Mark S. Webb, Peter F. Moulton, J. J. Kasinski. High-average-power  $\text{KTiOAsO}_4$  optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1161~ 1163
- 5 Dong Xiaoyi, Wang Ting. A New Generation of Fiber Communication and Synchronism Network—Principle and Development. Tianjin: Tianjin Press of Science and Technology, 1994. 10~ 20 (in Chinese)
- 6 Walter R. Bosenberg, Alexander Drobshoff, Jason I. Alexander *et al.*. 93% pump depletion, 3.5 W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1336~ 1338

- 7 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6): 415~ 431
- 8 Larry R. Marshall, Alex Kaz, Orhan Aytur. Multimode pumping of optical parametric oscillators. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2): 177~ 182

## Tunable Eye-safe Laser Based on KTP Optical Parametric Oscillator

Yao Baoquan Wang Yuezhu Ju Youlun Liu Qiang Yu Xin Wang Qi

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

**Abstract** The experimental results of singly resonant KTP optical parametric oscillator pumped by second harmonic of GCR-190 Nd:YAG laser system are reported in this paper. The KTP OPO was tunable in the eye-safe wavelengths range of 1.53 ~ 1.84  $\mu\text{m}$  and 0.75~ 0.82  $\mu\text{m}$  in the near-infrared region. In this experiment, the largest energy of 130 mJ and highest energy conversion efficiency of 16.9% with repetition rate of 10 Hz were achieved, while the pump laser was introduced into the oscillator along the direction vertical to cavity axis. At the same time, the beam quality and linewidth of KTP OPO were measured.

**Key words** KTP, optical parametric oscillator, eye-safe laser, tunable laser

## 激光器问世和中国激光创业四十周年纪念大会 在北京科技会堂召开

为纪念激光器问世和中国激光创业四十周年,由中国光学学会、中国电子学会、中国物理学会、中国通信学会、中国兵工学会、中国仪器仪表学会主办,中国光学学会激光专业委员会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会承办的纪念大会于2000年9月26日在中国科技会堂召开。在京参加“中国光学学会第五届会员代表大会”的全体代表也应邀参加了会议。

开幕式上,中国科协主席周光召作了重要讲话。中国光学学会名誉理事长,85岁高龄的两院院士王大珩先生作了鼓舞人心的讲话,他在回顾了我国激光事业的创业史和发展史以后,对年轻一代科技工作者提出了殷切的希望,勉励他们兢兢业业,承前启后,为我国的激光事业多作贡献。

之后宣读的8篇学术报告回顾了我国早期的激光研究,对激光及其相关领域的现状和发展动态进行了综述。这8篇报告是:徐至展院士的“强激光科学技术的研究与发展——上海光机所早期‘两大’研究重要进展回顾”;范滇元院士的“大型激光系统的研究与应用”;简水生院士的“中国光纤通信技术的发展”;陈良惠院士的“半导体激光器的发展”;李峻亨教授的“激光医学现状”;周济院士的“试述中国光电子产业发展的对策”;邓树森研究员的“中国激光加工产业正在兴起”以及徐端颐教授的“我国光存储技术发展现状”。