

文章编号: 0258-7025(2001)08-0693-05

# KTP 光学参量振荡器输出激光的空间模式和光束质量

姚宝权 王月珠 柳 强 王 骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

**提要** 理论上通过二维傅里叶变换求解耦合波方程,分析了 KTP 光学参量振荡器(OPO)信号光的空间分布;实验上利用 Nd:YAG 倍频激光(532 nm)抽运非临界( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )及临界相位匹配 KTP( $\theta = 62.7^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) OPO,测量了参量光的空间分布、远场发散角及  $M^2$  因子等参数,讨论了抽运功率、谐振腔长、残余光后向二次抽运对 OPO 参量光的发散角和光束质量因子  $M^2$  的影响。

**关键词** 光学参量振荡器,质量因子  $M^2$ , 相位匹配

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

## Study of the Spatial Beam Quality of KTP Optical Parametric Oscillator

YAO Bao-quan WANG Yue-zhu LIU Qiang WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The beam quality factor of parametric light from KTP optical parametric oscillator pumped by a doubling-frequency Nd:YAG laser (532 nm) was measured by means of laser beam analyzer. The beam quality dependence of different pumping conditions is discussed such as pump power, pump beam diameter, OPO cavity length, phase-matching mode, and pumping with or without reflection. In the theoretical analysis, double-refractive walk-off term is introduced into coupling-wave equations which are numerically solved with light propagation method and Runge-Kutta algorithm. The molding results agree well with the observed OPO performance.

**Key words** optical parametric oscillator, beam quality  $M^2$ , phase matching

## 1 引 言

KTP, BBO, LBO 等都是实现可见至近红外参量输出的优质非线性晶体,它们具有吸收损耗小、有效非线性系数大、透明范围宽、抗损伤阈值高等特点。由这些晶体构成的光参量转换系统在调谐范围、能量及转换效率、线宽压缩等方面都已有了较多的研究<sup>[1-3]</sup>。光学参量振荡器(OPO)不同于固体激光器,它不是依靠激光介质中高低能级间粒子数反转来实现激光振荡,而是在高功率脉冲激光的弛豫时间内,参量光在谐振腔中从噪声水平经非线性耦合放大建立起来。参量光输出的空间模式,不但受到抽运光及谐振腔结构的影响,而且受到晶体的非线性双折射的影响。在众多的实际应用中,需要对 OPO 输出光的传输特性进行分析,以评估其应用效果。本文

对 Nd:YAG 倍频光 532 nm 抽运 KTP OPO 的信号光光束质量在理论及实验上进行了分析和讨论。

## 2 理论分析

OPO 的非线性混频过程通常采用耦合波方程描述,忽略晶体走离角的影响的平面波耦合波方程,可定量求解 OPO 的阈值、效率,但无法描述光束的横向分布、衍射、走离等。在下面的理论模型中,包含了双折射走离角引起的光束横向偏离项,光束的空间分布可以是高斯型、平顶波等任意形状。首先将 OPO 腔内所有的辐射光都分成若干时间间隔,每个间隔为光在腔内往返一周所需的时间。在每一个时间间隔内,光场振幅的演变可通过求解式(1)计算,光场的横向分布按矩形网格构造而成。求解过程中运用了快速傅里叶变换法(FFT),FFT 可处理任何含有衍射的光束传输过程,能够跟踪三个光波场中横

向任意位置的场幅和相位。

设定 KTP 晶体的晶轴位于  $x-z$  平面, OPO 采用 II 类匹配方式 ( $o \rightarrow o+e$ )。在实验室坐标系内, 抽运光垂直偏振, 沿  $y$  轴方向; 产生的闲频光为寻常光, 偏振方向沿  $y$  轴, 不发生走离效应, 而信号光为非寻常光, 沿水平方向偏振, 双折射走离角  $\rho$  导致产生的信号波坡印廷矢量和波矢  $k$  沿  $x$  方向发生偏离。忽略衍射效应的影响, 慢振幅变化条件下引入走离项的耦合波方程组为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = -\tan(\theta) \frac{\partial \xi}{\partial x} - \alpha_j \xi + P_j \quad (1)$$

$j$  代表  $s$  (信号波),  $i$  (闲频波) 和  $p$  (抽运波);  $\alpha_j$  为三波各自的线性损耗系数, 包括晶体吸收和输出耦合镜的反射。 $\xi$  为光电场  $E_j$  的傅里叶分量:

$$E_j = 1/2\{\xi \exp[-i(\omega t - k_j z)] + \xi^* \exp[i(\omega t - k_j z)]\} \quad (2)$$

非线性偏振驱动项  $P_j$  定义为:

$$P_s = i \frac{d_{\text{eff}} \omega_s}{cn_s} \xi_p \xi_i^* \exp(i \Delta k z)$$

$$P_i = i \frac{d_{\text{eff}} \omega_i}{cn_i} \xi_p \xi_s^* \exp(i \Delta k z)$$

$$P_p = i \frac{d_{\text{eff}} \omega_p}{cn_p} \xi_s \xi_i \exp(-i \Delta k z) \quad (3)$$

$d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数,  $\omega_j$  为角频率,  $c$  为光速,  $n_j$  为折射率,  $\Delta k = k_p - k_s - k_i$  为波矢失谐量。设  $\xi$  在空间  $x-y$  坐标系的横向分布为高斯型, 将  $\xi, p_j$  进行傅里叶变换到空间频域  $\epsilon_j$  和  $p_j$ , 并代入式(1) 得

$$\frac{\partial \epsilon_j}{\partial z} = -i(2\pi s_y \tan \theta) \times \epsilon_j - \alpha_j \epsilon_j + p_j \quad (4)$$

$s_y$  为空间频谱中垂直坐标分量。由于(4)式经傅里叶变换后右方无微分项, 可用四阶龙格-库塔法直接求数值解。抽运场的时间分布为高斯型, 最大值一半处的全宽度(FWHM)为 10 ns, 电场振幅峰值强度为  $3.5 \times 10^7$  V/m, 相当于峰值功率密度  $300 \text{ MW/cm}^2$ ; 抽运脉冲分成 31 个时间间隙。将光束在  $x-y$  空间离散成  $32 \times 32$  个栅格, 混频过程中在晶体内的积分步数为 32; 每一次积分前  $\xi$  被傅里叶逆变换成  $\xi$  以求出偏振驱动项  $p_j$ , 然后傅里叶变换成  $p_j$  代入式(4) 进行求解。图 1 为计算的有走离和无走离两种情况下的信号光空间光束形状, 无走离时(图 1(a)) 输出光呈对称分布, 有走离时(图 1(b)) 光束呈非对称分布, 在垂直方向及非临界面上光束被显著拉长。

该物理模型通过快速傅里叶变换法求解耦合波方程组, 能够获得 OPO 的信号光、闲频光及损耗的

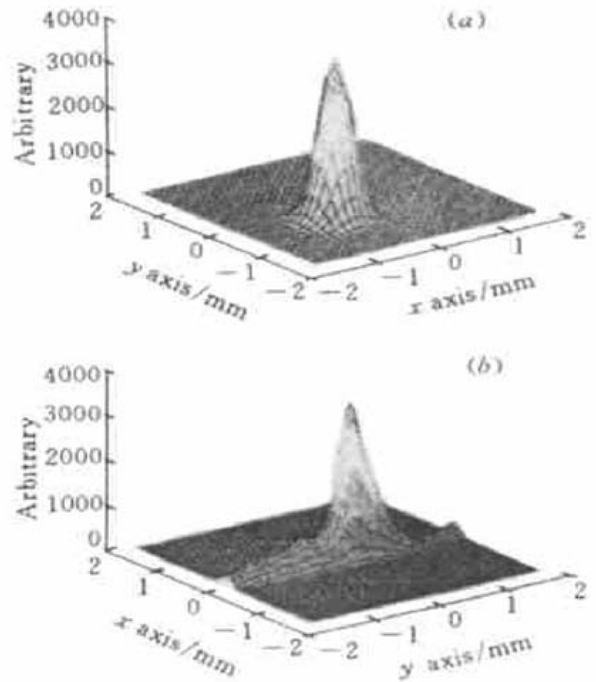


图 1 根据式(4)计算的 KTP OPO 信号光三维空间分布 (a) 无走离角计算结果; (b) 走离角为 0.05 mrad 条件下计算结果, 波矢失谐量  $\Delta k = 0$

Fig. 1 Beam profiles of signal wave output of KTP OPO calculated according to equation (4) (a) without walkoff; (b) with walk-off angle of 0.05 mrad, wave vector mismatch  $\Delta k = 0$

抽运光场在远场的空间分布; 还可定量描述光束横向分布、衍射、走离等因素对 OPO 阈值、效率、脉冲时间分布等的影响。

### 3 实 验

#### 3.1 实验装置

KTP OPO 和空间光束测试分析系统如图 2。抽运源为 PIANO-1000 型 Nd:YAG 激光器, 重复频率 10 Hz, 倍频光 532 nm 最高输出能量 450 mJ, 光束直径 6

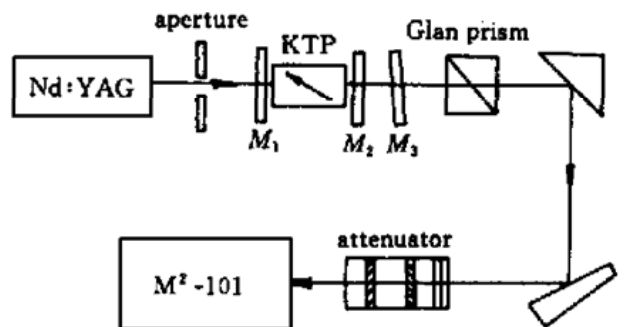


图 2 测量 KTP OPO 光束质量的实验装置图  
Fig. 2 Experimental setup for measuring beam quality of KTP OPO

mm, 脉宽 6~8 ns, 全宽度发散角小于 1.0 mrad。KTP 晶体尺寸 8 mm × 10 mm × 15 mm(由山东大学晶体材料研究所提供), 晶轴位于  $x$ - $z$  平面,  $\theta = 62.7^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 晶体两端镀 532~1450 nm 增透膜。OPO 谐振腔采用平行平面腔结构, 输入镜  $M_1$  对 1.4~1.55  $\mu\text{m}$  反射率大于 99%, 输出耦合镜  $M_2$  对在中心波长 1.44  $\mu\text{m}$  反射率约为 50%, 滤光片  $M_3$  对抽运光 532 nm 反射率大于 99.7%, 对 1.44  $\mu\text{m}$  和 0.84  $\mu\text{m}$  透射率大于 85%。格兰棱镜滤除参量输出中垂直偏振的闲频光, 直角棱镜和楔形镜利用每个镜面的  $45^\circ$  反射将入射到 CCD 相机上的信号光衰减而不引起光束分布变化。

根据山东大学提供的 KTP 晶体折射率的 Sellmeier 方程, 计算出 532 nm 抽运  $62.7^\circ$  切割的 KTP OPO 闲频光波长为 1.44  $\mu\text{m}$ , 信号光波长为 0.84  $\mu\text{m}$ 。晶体正放置时, 用 Buleigh WA-4500 脉冲波长计测量信号光的波长为 840.72 nm, 线宽为  $3.4 \text{ cm}^{-1}$  (0.23 nm)。计算在此角度切割的 KTP 晶体走离角为 39 mrad, 接受角为 0.9 mrad。

OPO 信号光光束质量测量及分析用 Spiricon 的  $M^2$ -101 和 LBA-100A 激光束分析仪, 能够对光束直径、横截面的光强分布、远近场发散角、束腰及位置等进行精确测量。 $M^2$  因子是国际标准推荐的衡量激光光束质量的参数, 它综合了光束直径及远场发散角两个参数, 任意光束传输因子

$$M^2 = \pi w_0 \theta / 4 \lambda \quad (5)$$

$w_0$  为激光束腰宽度,  $\theta$  为远场发散角,  $\lambda$  为激光波长。对光束质量的评价标准是: 对基横模高斯分布和均匀相前分布的光束  $M^2$  值等于 1, 而对于非基横模光束值都大于 1。激光束的束宽  $w(z)$  在传输过程中的变化满足自由空间的传输方程

$$w^2(z) = w_0^2 + M^4 \left[ \frac{\lambda}{\pi w_0} \right]^2 (z - z_0)^2 \quad (6)$$

$z_0$  为最小束腰的位置,  $z$  为传输距离。光束质量  $M^2$

因子能够描述激光传输的基本特性, 因而实验中着重测量了 OPO 信号光  $M^2$  值。

### 3.2 OPO 信号光的空间分布

#### 3.2.1 临界相位匹配 KTP OPO

图 3 为测量的 532 nm 抽运光和 KTP ( $\theta = 62.7^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) OPO 信号光空间光束形状的轮廓图和立体图。抽运光斑呈一规则的圆形(图 3(a)), 光强为准高斯分布(图 3(b))。KTP OPO 信号光光斑形状呈椭圆型, 光束在水平方向被压窄, 在垂直方向上明显拉长, 如图 3(c) 所示; 从图 3(d) 光强的三维分布可看出, 在晶体的非临界方向有隆起现象, 与理论计算的结果图 1(b) 相吻合。在抽运光光束直径 2.3 mm, 2 倍阈值抽运功率 ( $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 条件下, 测量 OPO 输出光的  $M^2$  因子在水平和垂直方向上分别为 4.9 和 10.3, 全宽度发散角为 1.6 mrad 和 4.0 mrad, 表 1 列出测量的抽运光和 OPO 信号光的激光参数。

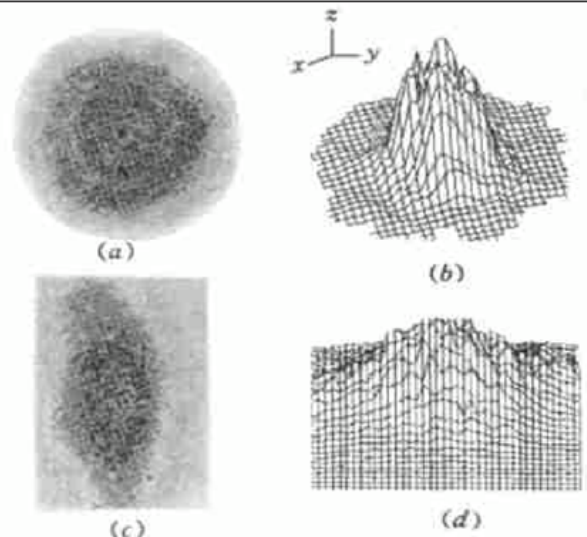


图 3 KTP OPO 抽运光 ((a), (b)) 与输出信号光((c), (d)) 的空间光束形状 (a), (c) 二维分布; (b), (d) 三维分布

Fig. 3 Beam profiles of pump and signal of KTP OPO (a), (c) 2D spatial profile; (b), (d) 3D spatial profile

表 1 抽运光和信号光的光束参数

Table 1 Beam parameters of pump and signal

	$w_{0x} / \text{mm}$	$w_{0y} / \text{mm}$	$\theta_x / \text{mrad}$	$\theta_y / \text{mrad}$	$M_x^2$	$M_y^2$
Pump	1.8	2.1	0.8	0.8	2.2	2.5
Signal	3.3	2.8	1.6	4.0	4.9	10.3

信号光在水平方向上的远场发散角远小于垂直方向上的, 因而用长透镜聚焦可获得较小的光斑和长的焦深, 如图 4 所示。

临界相位匹配的 KTP OPO, 水平面上有限的接受角限制了具有增益的离轴波矢  $k_x$ , OPO 谐振腔内信号光往返振荡放大过程中, 信号光束会被压窄;

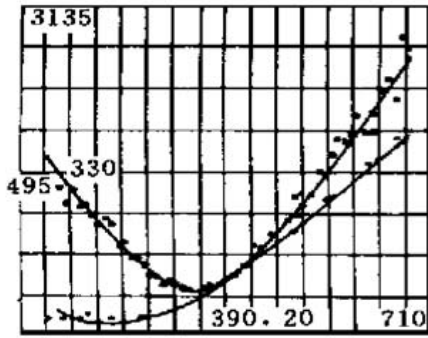


图 4 测量的 840 nm 信号光经 400 mm 凸透镜聚焦后焦点附近的焦斑直径

Fig. 4 Measured beam diameter of signal at 840 nm with 400 mm focal lens

而在垂直面上由于有较大的接受角, 参量光在振荡过程中, 发散角限制程度较小。

### 3. 2. 2 非临界相位匹配的 KTP OPO

临界相位匹配的 KTP OPO, 双折射导致信号光波矢偏离坡印廷矢量, 因而水平方向的增益波导受到限制。如果 KTP 晶体沿  $x$  轴切割 ( $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$ ), 信号光波矢与坡印廷矢量则不发生偏离。这种  $90^\circ$  相位匹配方式也称作非临界相位匹配。非临界相位匹配的优点是: 1) 消除了走离效应, 使非线性晶体有效增益长度达到最大; 2) 接受角最大, OPO 可被离轴抽运, 发散角较大的激光抽运仍可获得高效输出。水平及垂直方向都没有走离现象存在, 就不会出现在某一方向增益波导被压缩现象。图 5 为 532 nm 抽运非临界相位匹配 KTP (大小  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ) OPO (输入镜在  $1.06 \mu\text{m}$   $R > 99\%$ , 输出镜在  $1.06 \mu\text{m}$   $R \approx 70\%$ ) 输出信号光光束形状。抽运光束直径 2.3 mm, 抽运能量密度  $1.5 \text{ J/cm}^2$ , 测量的参量光  $M^2$  值分别为 12.3 和 11.4, 全宽度发散角为 7.8 mrad 和 7.4 mrad。从图 5 可看出, 由于晶体  $x$ - $z$  面和  $y$ - $z$  面上都没有走离效应存在, OPO 信号光输出光束呈对称性分布, 光束的水平方向和垂直方向的  $M^2$  值和发散角都比较接近。这与走离角为零的条件下理论分析所得的 KTP OPO 信号光空间分布相一致 (见图 1 (a))。

### 3. 3 影响 OPO 光束质量的因素

我们从抽运功率、抽运光直径、谐振腔长、损耗的抽运光后向抽运等方面讨论了这些因素对 OPO 输出光的发散角和光束质量因子  $M^2$  的影响。

#### 3. 3. 1 抽运功率对 OPO 光束质量的影响

从图 6 看到, 随着抽运功率的增加, 水平和垂直方向上的光束质量都同时变差。抽运光束直径 2.3

mm, 当抽运能量从 8 mJ 增加到 64 mJ 时 (1~8 倍阈值), 水平方向上的发散角从 1.9 mrad 增加到 4.8 mrad, 非临界方向上的发散角从 4.1 mrad 增加到 6.7 mrad。在振荡阈值附近, 由于 OPO 输出的不稳定性, 每次测量值都有较大差别。单共振 OPO 是一种高阈值行为, 通常高斯光束的中心先达到阈值。随着抽运功率密度的提高, 参量光空间频谱的高频分量也参与振荡, 因而输出光发散角增大。要实现高功率、高光束质量 OPO 输出, 采用非稳谐振腔是一个有效途径<sup>[5]</sup>。

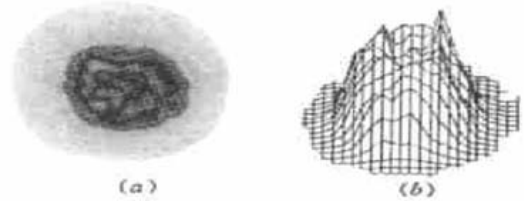


图 5 Nd: YAG 倍频光抽运非临界相位匹配 KTP OPO 信号光束空间形状

(a) 光强轮廓图; (b) 光强三维分布图

Fig. 5 Signal beam profile of KTP OPO with non-critically phase matching pumped by frequency-doubled light of Nd: YAG

(a) fluence contour plot; (b) 3D beam profile

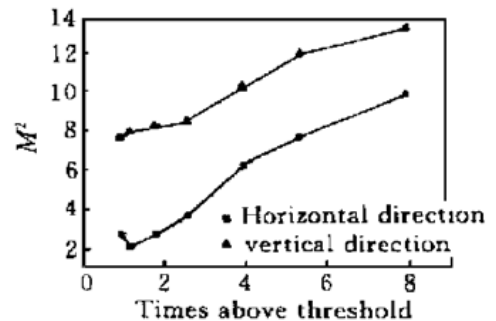


图 6 KTP OPO 信号光的光束质量因子  $M^2$  与抽运功率的关系

Fig. 6 Beam quality  $M^2$  of signal of KTP OPO dependence on pump power

#### 3. 3. 2 抽运光光束直径对 OPO 光束质量的影响

图 7 (a) 为 OPO 信号光光束质量因子与抽运光光束直径 (抽运能量密度  $0.4 \text{ J/cm}^2$ ) 的变化关系。随着抽运光束直径的增加, OPO 谐振腔内信号光束腰也在增大, 同时  $M^2$  值也增大, 式 (5) 可以证明这一点。

#### 3. 3. 3 腔长对 OPO 光束质量的影响

在相同的抽运能量密度下 ( $0.4 \text{ J/cm}^2$ ), 增加 OPO 腔长会使  $M^2$  值减小, 如图 7 (b) 所示。当腔长从 28 mm 加长至 77 mm 时, 垂直方向上的发散角从

4.0 mrad 减小到 3.1 mrad。

OPO 谐振腔长的增加, 导致在抽运脉冲弛豫时间内, 参量光在谐振腔内的往返次数减少, 同时阈值的增加有利于抑制边缘振荡, 因此长腔 OPO 比短腔的光束质量好。Bosenberg 等利用长腔非共振 OPO 实现了 6~ 7 倍衍射极限的参量光输出<sup>[4]</sup>。

### 3.3.4 后向反射抽运光对 OPO 光束质量的影响

高阈值单共振的 OPO, 在形成有效耦合输出后, 抽运光并没有完全损耗。如果将残余抽运光按一定的相位匹配条件重新反射回 OPO 谐振腔内进行反

向抽运, 能够降低 OPO 阈值<sup>[6]</sup>。反射的抽运光在谐振腔内产生双程增益, 信号波在前向抽运产生的走离相反方向又产生走离, 导致输出参量光的光束质量变差。

如果将残余光按原光路返回, 会有损坏抽运激光器内光学元件的危险, 因此我们考虑了在 KTP 接收角范围内, 将抽运反射光偏离原光路和反射到限孔光阑的边缘的几种情况, 其远场发散角和  $M^2$  值的关系如表 2。损耗抽运光参与二次抽运, 虽可降低 OPO 阈值, 但光束质量变差。

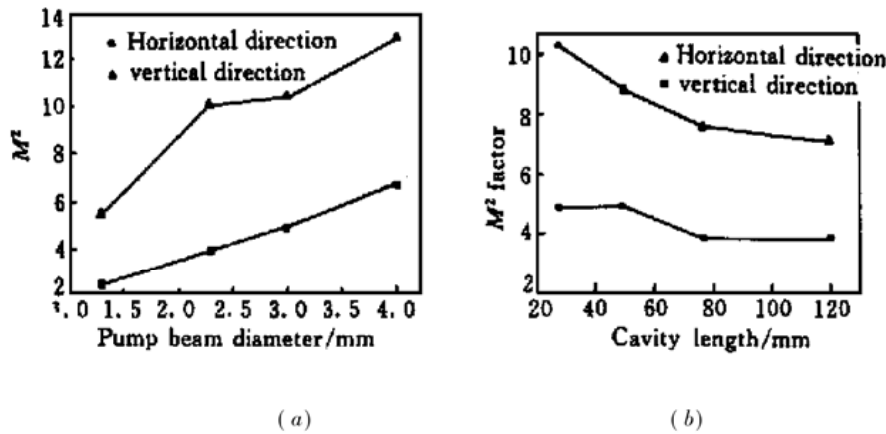


图 7 KTP OPO 信号光  $M^2$  因子值与抽运光光束直径 (a) 及与谐振腔长 (b) 的关系

Fig. 7 Beam quality  $M^2$  of signal of KTP OPO dependence on pump beam diameter (a) and on cavity length (b)

表 2 有无抽运反射时远场发散角与 OPO  $M^2$  值的关系

Table 2 Far field divergence angle and  $M^2$  value of OPO with and without pump reflector

	$\theta_x$ /mrad	$\theta_y$ /mrad	$M_x^2$	$M_y^2$
Without pump reflection	1.8	3.8	4.8	9.8
With pump reflection according to original light path	2.0	4.1	5.5	13.1
With pump reflection at the left-right edge of aperture	2.2	4.6	6.0	11.5
With pump reflection at the up-down edge of aperture	2.0	5.0	5.1	12.7

## 4 结 论

KTP OPO 输出参量光空间模式受非线性晶体双折射走离影响, 呈现非对称性, 水平面上的光束质量好于垂直面上的。对于平行平面腔 OPO, 抽运功率的提高虽可提高输出能量, 但光束质量变差, 长腔 OPO 会使光光束质量得到一定改善。

### 参 考 文 献

- 1 Yin Jiabin, ZhaoQingchun, He Huijuan *et al.*. Near-IR KTP single-resonant optical parametric oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1993, **13**(3): 224~ 228 (in Chinese)
- 2 Wu Qiong, Xu Zuyan, Zhang Dongxiang *et al.*. Tuning of an optical parametric oscillator using a compound cavity. *Chinese*

- J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(2): 138~ 142 (in Chinese)
- 3 W. R. Bosenberg, Dean R. Guyer. Broadly tunable, single-frequency optical parametric frequency-conversion system. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1716~ 1722
- 4 L. R. Marshall, A. Kaz. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1730~ 1736
- 5 B. C. Johnson, V. J. Newell, J. B. Clark *et al.*. Narrow-bandwidth low-divergence optical parametric oscillator for nonlinear frequency-conversion applications. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2122~ 2127
- 6 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6): 415~ 431