

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0189-03

# 内腔式 Nd:YAG 激光抽运 KTP 双谐振 光学参量振荡器

鲁燕华, 王卫民, 彭跃峰, 庞 毓, 张 雷, 崔玲玲

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 介绍了高重复频率、高平均功率的  $2\ \mu\text{m}$  激光器的应用前景和产生方式, 从 KTP 晶体的折射率椭球和 Sellmeier 方程出发, 分析了当用  $1.064\ \mu\text{m}$  连续 Nd:YAG 激光抽运 II 类相位匹配的 KTP 晶体, 发生光参量作用时, 晶体绕切割角  $\theta$  的调谐特性, 并计算了  $\theta$  角调谐曲线。结果表明, 当  $\theta$  角等于  $52.6^\circ$  时, 信号光和空闲光刚好在  $2.128\ \mu\text{m}$  处简并输出。为了抑制 KTP 晶体的走离效应, 综合了内腔式光学参量振荡器(OPO)和短晶体级联外腔式 OPO 的优点, 设计了一套采取两块短晶体级联内腔式 OPO 的实验装置, 该装置在声光调 Q 下可实现高重复频率  $2\ \mu\text{m}$  的激光输出。并对该实验装置的抽运振荡阈值, 转换效率, KTP 晶体走离长度, 线宽等进行了数值模拟计算。

**关键词** 非线性光学; 光学参量振荡器(OPO); KTP 晶体; 相位匹配; 走离效应

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## Intracavity KTP Doubly Resonant Optical Parametric Oscillator Pumped by Nd:YAG Laser

LU Yan-hua, WANG Wei-min, PENG Yue-feng, PANG Yu, ZHANG Lei, CUI Ling-ling  
(*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract** The application prospect and production methods of the high-repetition-rate, high average power  $2\ \mu\text{m}$  laser were reported. With the KTP crystal refractive index ellipse and the Sellmeier equations, the tuning characteristic of the crystal about the cutting angle was analyzed when the  $1.064\ \mu\text{m}$  continuous Nd:YAG laser pumped the type II phase matching KTP crystal. The cutting angle tuning curve was also calculated. As a result, when the cutting angle was  $52.6^\circ$ , the signal and the idler were degenerated at  $2.128\ \mu\text{m}$  with perpendicular polarization. To restrain the dispersion effect, the authors combined the intracavity optical parametric oscillator (OPO) with the short crystals connecting external OPO and designed an experimental set of intracavity doubly resonant optical parametric oscillator with two short KTP crystals connecting, with which high-repetition-rate  $2\ \mu\text{m}$  laser output was realized with acoustic-optic Q-switch. Finally, the threshold, the converting efficiency, the crystal dispersion length and the linewidth were numerically simulated.

**Key words** nonlinear optics; optical parametric oscillator; KTP crystal; phase matching; dispersion effect

### 1 引 言

高重复频率、高平均功率的  $2\ \mu\text{m}$  激光源在军事上的应用越来越广泛, 如激光测距和激光雷达, 特别是能为目前迫切需求的  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段的激光器提供有效的抽运源。实现  $2\ \mu\text{m}$  激光的方法很多, 较普遍的有两种, 一种是二极管激光器抽运的掺稀土杂质(如 Tm, Ho 等)的固体激光器, 另一种就是 Nd:YAG 激光抽运的 KTP 光学参量振荡器(OPO)。虽然前者获得的  $2\ \mu\text{m}$  激光光学质量较好, 但稀土元素均属准三能级, 阈值较高, 通常需要

在低温下工作, 制冷工序复杂, 所以第二种方法更为适用。采用 OPO 一个必须注意的关键问题是由于晶体的双折射引起的走离效应。E. Cheung 等<sup>[1]</sup>采用成对的性能一致的 6 块短晶体作为 OPO 的工作物质以对走离效应进行补偿从而实现高的波长转换效率; 而 P. B. Phua 等<sup>[2]</sup>则把 OPO 器件放置在抽运源激光器的腔内以增加 OPO 振荡次数, 获得了  $6.5\ \text{W}, 2\ \mu\text{m}$  的激光输出。本文首先计算了 II 类相位匹配下 KTP OPO 的  $\theta$  角调谐曲线, 然后综合上述两种抑制走离效应方法的优点, 设计了一套采取两块短晶体级联内腔式双谐振 OPO 的实验装置,

\* 基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 鲁燕华(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器的研究。E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

并对该双谐振 OPO 的抽运振荡阈值, 转换效率, KTP 晶体走离长度, 线宽等进行了数值模拟计算。

## 2 KTP 晶体 II 类相位匹配角度调谐曲线

KTP 属正交晶系, 是光学双轴晶体(有两个光轴), 折射率椭球的主轴互相垂直, 其关系确定为  $n_x < n_y < n_z$ , 从恰当的 Sellmeier 方程得到的 3 个主轴折射率为

$$\begin{cases} n_x^2 = 3.0065 + \frac{0.03901}{\lambda^2 - 0.04251} - 0.01327\lambda^2, \\ n_y^2 = 3.0333 + \frac{0.04154}{\lambda^2 - 0.04547} - 0.01408\lambda^2, \\ n_z^2 = 3.3134 + \frac{0.05694}{\lambda^2 - 0.05658} - 0.01682\lambda^2, \end{cases} \quad (1)$$

任何传播方向上的折射率都由折射率椭球给出, 折射率椭球的定义是

$$\frac{k_x^2}{n_{wj}^2 - n_{x,wj}^2} + \frac{k_y^2}{n_{wj}^2 - n_{y,wj}^2} + \frac{k_z^2}{n_{wj}^2 - n_{z,wj}^2} = 0, \quad (2)$$

式中  $k_x = \sin \theta \cos \phi$ ,  $k_y = \sin \theta \sin \phi$ ,  $k_z = \cos \theta$ ,  $\theta$  是与  $z$  轴的夹角,  $\phi$  是与  $x-y$  平面的  $x$  轴的夹角, 下标  $j$  表示抽运光、信号光或空闲波的频率。对于垂直于每个波长传播方向的两个本征偏振态, 必须解出(2)式以确定折射率( $n_{wj1}$ ,  $n_{wj2}$ )。在 KTP 晶体中, I 类相互作用的非线性系数很低, 因此没有实际用途, 对于 KTP 中  $x-z$  平面( $\phi = 0$ )上的传播, II 类相互作用对应着正单轴晶体的 II 类相位匹配( $o \rightarrow o + e$ )。将  $\phi = 0$  代入(2)式, 得到

$$\begin{cases} n_p^o = n_y(\lambda_p), & n_s^o = n_y(\lambda_s), \\ n_i^e = [n_x^2(\lambda_i) \cos^2 \theta + n_z^2(\lambda_i) \sin^2 \theta]^{-1/2}, \end{cases} \quad (3)$$

将(1)式, (3)式代入 OPO 的能量方程和动量方程

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad \frac{n_p^o}{\lambda_p} = \frac{n_s^o}{\lambda_s} + \frac{n_i^e}{\lambda_i}, \quad (4)$$

即可计算得出信号波长、空闲波长关于 KTP 晶体切割角  $\theta$  的调谐曲线。

图 1 示出的是  $1.064 \mu\text{m}$  激光抽运的 KTP OPO ( $\phi = 0$ , II 类相位匹配)的相位匹配角的计算结果。实线表示信号波长, 虚线表示空闲波长。信号光的偏振跟抽运光的一样沿着晶体的  $y$  轴( $o$  光), 空闲波在  $x-z$  平面上偏振( $e$  光)。由计算得知, 当  $\theta = 52.6^\circ$  时, 信号光和闲频光波长刚好相等均为  $2.128 \mu\text{m}$ , 对应图 1 中两条曲线的交点。

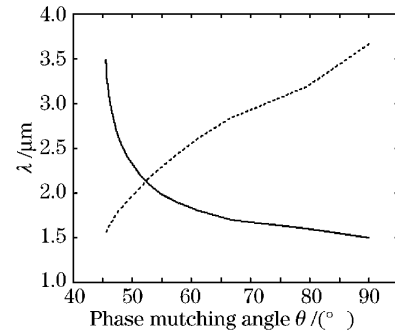


图 1 图 1 KTP OPO 角度调谐曲线

Fig. 1 Angle tuning curve of KTP optical parametric oscillator (OPO)

## 3 实验装置及理论计算

由前面分析得知在  $1.064 \mu\text{m}$  抽运光下, 当 KTP 晶体切割角  $\theta = 52.6^\circ$ ,  $\phi = 0$  时, KTP OPO 刚好可以在  $2.128 \mu\text{m}$  处简并输出, 所以在 OPO 类型上可以选用双谐振 OPO 大大降低抽运振荡阈值。由于晶体的双折射效应,  $e$  光在晶体中传播会发生走离效应(或称离散效应), 即信号波与空闲波的功率流向发生偏离。为解决此问题有两种方法: 第一种是采用成对的性能一致的短晶体作为 OPO 的工作物质以对走离效应进行补偿; 第二种是把 OPO 器件放置在抽运源激光器的腔内以增加 OPO 振荡次数, 即内腔式 OPO。在本实验装置中, 我们综合这两种方法的优点, 采用两块 KTP 晶体级联内腔式 OPO, 实验装置如图 2 所示。

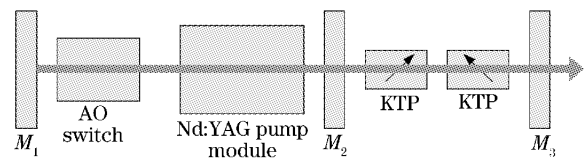


图 2 内腔式 KTP OPO 实验装置简图

Fig. 2 Schematic of intracavity KTP OPO experimental setup

图 2 中 Nd:YAG 抽运模块输出连续  $1.064 \mu\text{m}$  激光, 棒尺寸为  $\phi 6.35 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ , 最大可用二极管激光功率  $3600 \text{ W}$ , 采用声光调 Q 后重复频率为数千赫兹, 连续 Nd:YAG 激光的脉冲宽度约为  $50 \text{ ns}$ 。  $M_1, M_2, M_3$  都为平面镜:  $M_1$  对  $1.064 \mu\text{m}$  反射率  $> 99\%$ ;  $M_2$  对  $1.064 \mu\text{m}$  激光透射率  $> 99\%$ , 对  $2.128 \mu\text{m}$  激光全部反射;  $M_3$  对  $1.064 \mu\text{m}$  激光反射率  $> 99\%$ , 对  $2.128 \mu\text{m}$  激光部分反射, 反射率为  $60\%$ 。因此  $M_2, M_3$  与 KTP 晶体在 Nd:YAG 激光器腔内构

成 OPO。两块 KTP 晶体尺寸均为  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ,  $52.6^\circ$  切割, 采用 II 类相位匹配, 两个通光面上镀  $1.064\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.800 \sim 2.300\text{ }\mu\text{m}$  增透膜。

### 3.1 抽运振荡阈值

双共振 OPO 的阈值条件<sup>[3]</sup>

$$(\Gamma_0 L)_{\text{th}}^2 = \frac{(1-R_i^2)(1-R_s^2)}{(R_i+R_s)^2}, \quad (5)$$

$\Gamma_0$  是  $\Delta k = 0$  时的增益系数,  $R_s, R_i$  分别为信号光和空闲光的反射率, 不难求得阈值抽运功率密度

$$I_{\text{pth}} = \frac{1}{2} n c \epsilon_0 |A_p|^2 = \frac{n_p c \epsilon_0}{2 B_s B_i L^2} (\Gamma_0 L)_{\text{th}}^2,$$

其中  $B_n = \frac{\omega_n}{2 n_n c} \chi_{\text{eff}}$ , ( $n = s, i$ )。对于 II 类相位匹配的 KTP OPO 的有效非线性系数, 可以利用下式得出近似值

$$\chi_{\text{eff}} \approx 2(d_{24} - d_{15}) \sin 2\phi \sin \theta - 2(d_{15} \sin^2 \phi + d_{24} \cos^2 \phi) \sin \theta, \quad (6)$$

本实验装置中  $\theta = 52.6^\circ$ ,  $\phi = 0$ ,  $d_{24} = 3.64\text{ pm/V}$ ,  $d_{15} = 1.91\text{ pm/V}$ , 则得到  $\chi_{\text{eff}} \approx 5.78\text{ pm/V}$ 。再将  $n_p = 1.7480$ ,  $n_s = 1.7259$ ,  $n_i = 1.7700$ , 真空光速  $c$ , 真空介电常量  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 有效晶体长度  $L = 3\text{ cm}$ , 反射率  $R_s = R_i = 60\%$  代入, 计算得抽运振荡阈值  $I_{\text{pth}} = 2.8\text{ MW/cm}^2$ 。

### 3.2 转换效率

考虑抽运光、信号光及空闲光空间分布均为高斯型基模, John E. Bjorkholm 等从平面波出发推导出高斯分布下转换效率<sup>[3]</sup>

$$\eta = (R_i + R_s) \left[ \frac{2}{\sqrt{N_0}} - \frac{2}{N_0} - \frac{(R_i + R_s) \ln N_0}{2 N_0} \right],$$

$N_0$  为光束中心处的超阈值倍数。在本实验模型中,  $R_i = R_s = 60\%$ , 计算转换效率  $\eta$  关于超阈值倍数  $N_0$  的关系曲线如图 3 所示。

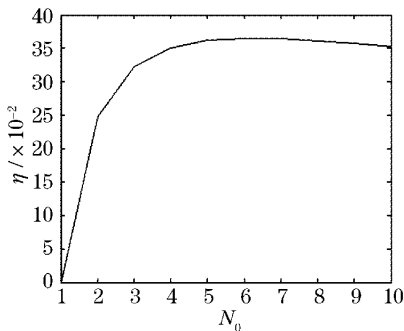


图 3 KTP OPO 转换效率曲线

Fig. 3 Curve of KTP OPO converting efficiency

### 3.3 走离长度

对于 KTP 晶体中的 II 类相位匹配, 双折射走离角为:

$$\tan \rho = \frac{(n_p^o)^2}{2} \left[ \frac{1}{(n_s^o)^2} - \frac{1}{(n_i^o)^2} \right] \sin 2\theta, \quad (7)$$

夹角  $\rho$  限制了可能产 OPO 的有效晶体长度, 光束完全分离, 其距离称为走离长度(或离散长度), 即  $l_d = w_0 \sqrt{\pi}/\rho$ , 其中  $w_0$  为抽运光束半径。

在本实验模型中,  $\theta = 52.6^\circ$ ,  $n_p^o = 1.7480$ ,  $n_s^o = 1.7259$ ,  $n_i^o = 1.7700$ ,  $w_0 = 3\text{ mm}$ , 计算得出  $\rho = 0.0244\text{ rad}$ ,  $l_d = 218\text{ mm}$ 。显然计算得到的走离长度明显大于 KTP 晶体的尺寸长度, 所以晶体尺寸长度是合理的。

### 3.4 线宽

理论上参量振荡频率( $\omega_{s_0}, \omega_{i_0}$ )应既满足共振频率条件:  $\omega_s + \omega_i = \omega_p$ , 又满足相位匹配条件  $\Delta k = 0$ 。然而通常  $\omega_s$  和  $\omega_i$  的共振频率都偏离相位匹配线, 相应的频率间隔为<sup>[4]</sup>

$$(\omega' - \omega_{s_0})_{\text{max}} = N_{\text{max}} \frac{\pi c}{n_s L_c} = \frac{\pi c}{2 L_c} \left( \frac{n_i}{n_s} \cdot \frac{1}{n_i - n_s} \right), \quad (8)$$

式中  $L_c$  为腔的长度,  $n_i = 1.7700$ ,  $n_s = 1.7259$ ,  $L_c = 9\text{ cm}$ , 所以计算得带宽为  $1.2 \times 10^{11}\text{ rad/s}$ , 换用波数表示线宽为  $3.9\text{ cm}^{-1}$ 。

## 4 结 论

内腔式 Nd:YAG 激光抽运的 KTP 双谐振 OPO 既能有效抑制走离效应, 又相对于单谐振 OPO 具有阈值低、转换效率高的优点, 是产生  $2\text{ }\mu\text{m}$  激光的一种行之有效的办法。虽然它的线宽较大, 但可以采用光栅和扩束棱镜以及插入标准具等方法对其进行压缩。

## 参 考 文 献

- 1 E. Cheung, S. Palese, H. Injeyan. High power optical parametric oscillator source [J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**: 55~59
- 2 P. B. Phua, Kin Seng Lai, Ruifen Wu. Multiwatt high-repetition-rate  $2\text{-}\mu\text{m}$  output from an intracavity KTiOPO<sub>4</sub> optical parametric oscillator[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1435~1439
- 3 John E. Bjorkholm. Some effects of spatially nonuniform pumping in pulsed optical parametric oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(3): 109~118
- 4 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6): 415~431