

# 温度调谐 LBO 晶体光参量振荡器\*

林树杰 张雨东 吴柏昌 陈创天

(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

**摘要** 本文详细研究 0.532  $\mu\text{m}$  激光泵浦、温度调谐 II 型非临界相位匹配 LBO 光参量振荡器。当温度从 20  $^{\circ}\text{C}$  升高到 200  $^{\circ}\text{C}$  时, 其信号波和闲置波的调谐范围分别为 1.002~0.898  $\mu\text{m}$  和 1.134~1.306  $\mu\text{m}$ 。本装置最吸引人之处是本征输出线宽比 I 型情形小一个量级。

**关键词** LBO 晶体, 光参量振荡器, 温度调谐

## 1 引言

1965 年 Giordmaine 等<sup>[1]</sup>演示成功第一个光学参量振荡器, 此后光参量振荡器作为高效宽调谐相干光源的前景一直引人注目。然而由于受到其核心——非线性光学晶体的限制, 其实用化进程非常缓慢。近几年, 几种非线性光学晶体如 KTP, BBO, LBO 相继问世, 半导体激光泵浦全固态激光器也使人们易于获得更好的泵浦光源, 光参量振荡器研究又重新活跃起来<sup>[2]</sup>。

LBO 晶体属  $mm2$  点群双轴晶体, 其定义非线性光学系数的压电轴系  $abc$  与定义光学主折射率的轴系  $xyz$  之间的对应关系为:  $a-x, b-z$  和  $c-y$ <sup>[3,4]</sup>。同倍频情形<sup>[5]</sup>类似, 在  $xy, xz$  主平面上可能实现 I 型相位匹配光参量振荡, 在  $yz, xz$  主平面上可能实现 II 型相位匹配光参量振荡, I 型、II 型非临界相位匹配分别沿  $x, z$  主轴方向。J. Zhang 等最早研究了 LBO 晶体的光参量放大过程, Z. Xu 和 A. Fix 等首先报道观察到 LBO 光参量振荡输出。我们也曾利用 LBO 的 I 型相位匹配光参量放大得到 0.65~2.5  $\mu\text{m}$  范围的可调谐输出, 发现光参量过程折返现象<sup>[6]</sup>并实际观察到了 OPO 四波长输出<sup>[7]</sup>。本文深入研究温度调谐 II 型非临界相位匹配 LBO 光参量振荡器。与先前的 I 型相比, II 型光参量振荡呈现一些新的特点。

## 2 实验与分析

实验装置示于图 1。泵浦光源为倍频的 Nd:YAG 激光,  $\lambda_p = 0.532 \mu\text{m}$ , 重复率 10 Hz, 脉宽  $\tau = 8 \text{ ns}$ , 水平偏振。光斑直径用逆望远镜系统缩束至  $d = 2 \text{ mm}$ 。光参量振荡器腔长  $L = 60 \text{ mm}$ , 平面介质输入镜片  $M_1$  和输出镜片  $M_2$  的透过率曲线绘于图 2。 $M_1$  对信号波反射率为  $R_1 \approx 100\%$ ,  $M_2$  对信号波反射率为  $R_2 \approx 50 \sim 60\%$ 。LBO 晶体沿主轴  $z$  方向通光, 尺寸为  $4.2 \times 4.2$

\* 本工作得到国家自然科学基金和“八六三”计划资助。

收稿日期: 1993 年 3 月 19 日, 收到修改稿日期: 1993 年 4 月 22 日

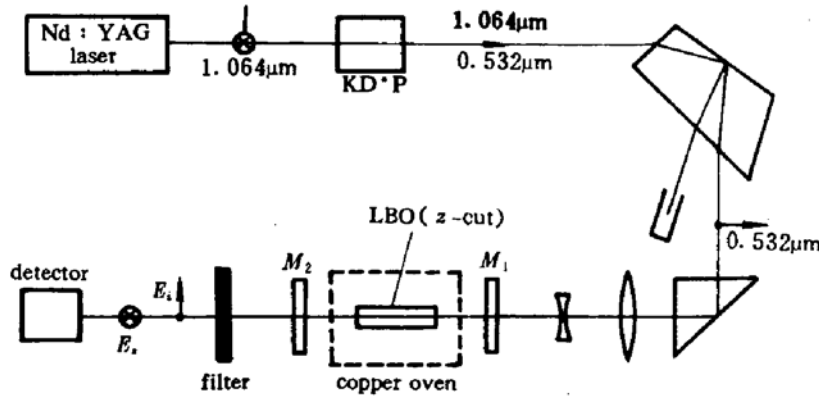


Fig. 1 Experimental schematic for temperature-tuned type II NCPM LBO OPO (Top view)

×14.8 mm, 两端面未镀膜。晶体以  $y$  轴竖直置于紫铜加热炉中, 后者控温精度  $\sim 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

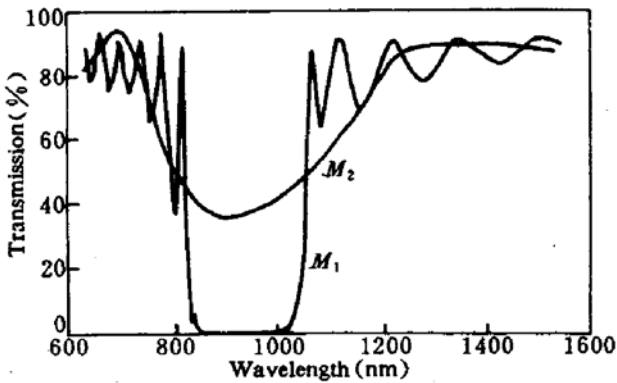


Fig. 2 Percent transmissions for the input ( $M_1$ ) and output OPO mirrors ( $M_2$ ). The transmissions at  $0.532\text{ }\mu\text{m} > 80\%$  for both mirrors

### 2.1 振荡阈值与转换效率

首先在室温 ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下测得 OPO 振荡阈值  $\approx 200\text{ MW/cm}^2$ , 信号波长 =  $1.002\text{ }\mu\text{m}$ , 竖直偏振 ( $E_s // y$ ); 闲置波长 =  $1.134\text{ }\mu\text{m}$ , 水平偏振 ( $E_i // x$ )。为了了解振荡阈值与光参量振荡器各参量的相关, 我们编制程序对振荡阈值进行理论计算<sup>[8]</sup>。取  $d_{\text{eff}}(\text{II}) = d_{31} = 1.2\text{ pm/V}$ ,  $M_2$  对  $\lambda_s = 1.002\text{ }\mu\text{m}$  的反射率  $R_2 = 55\%$ , 计算的振荡阈值 =  $186\text{ MW/cm}^2$ , 这与实验值相当接近。图 3 是振荡阈值与信号波反射率、晶体长度、光参量振荡器腔长之间的关系曲线。容易证

实, 高反射率、长晶体、短腔长有利于降低振荡阈值。最有效的降低振荡阈值的办法是使用长晶体, 理论上非临界相位匹配时不存在光束离散效应, 可允许使用任意长度的晶体, 但实际上长度超过  $25\text{ mm}$  的 LBO 晶体已很少见且价格昂贵。缩短腔长也受到腔内加热炉的限制; 本实验中为保证加热均匀, 紫铜块长度  $\geq 55\text{ mm}$ , 这使腔长  $L$  不能小于  $60\text{ mm}$ 。相对而言通过提高反射率来降低振荡阈值最为可行, 当信号波反射率  $R_2$  由  $55\%$  提高到  $85\%$ , 振荡阈值可下降近一半。我们现有镜片的反射率偏低, 振荡阈值偏高, 这致使最高泵浦强度 (由镜片损伤阈值决定) 与振荡阈值的比值较小, 转换效率不能提高<sup>[8]</sup>。本实验中, 当入射泵光能量 =  $75\text{ mJ/Pulse}$  时, 输出总能量 =  $3\text{ mJ/Pulse}$ , 总转换效率  $\eta = 4\%$ 。

### 2.2 温度调谐曲线

缓慢加热晶体, 当温度从室温上升至  $200\text{ }^\circ\text{C}$  时, 信号波、闲置波调谐范围分别为  $1.002\sim 0.898\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.134\sim 1.306\text{ }\mu\text{m}$  (见图 4)。加热过程中, 各波偏振保持不变。以多项式拟合实验信号波长为

$$\lambda_s = 1.010 - 4.039 \times 10^{-4}T - 9.031 \times 10^{-7}T^2 + 7.015 \times 10^{-10}T^3 \quad (1)$$

$\lambda_s$  的单位为  $\mu\text{m}$ ,  $T$  的单位为  $^\circ\text{C}$ 。

而闲置波长仍可由关系式  $1/\lambda_i = 1/\lambda_p - 1/\lambda_s$  求出。(1) 式不是一个线性关系, 信号波长的温度调谐速率  $d\lambda_s/dT$  在典型温度  $20, 100, 200\text{ }^\circ\text{C}$  下分别为  $-0.439, -0.563, -0.681$

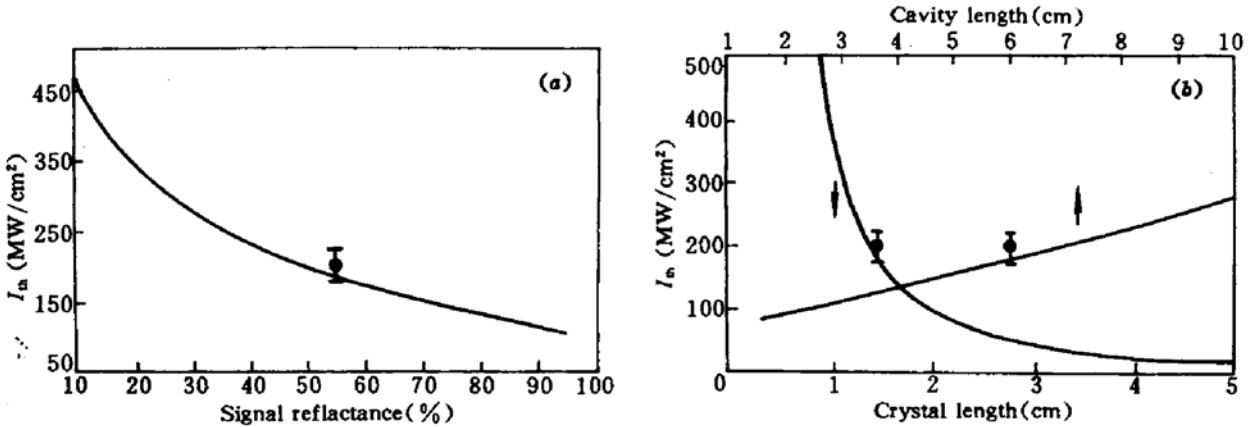


Fig. 3 The calculated pump intensity threshold versus

(a) Signal reflectance of the output mirror; (b) Crystal length and cavity length. • is the measured value of this experiment

nm/°C

已经知道,变温调谐非临界相位匹配光参量振荡满足

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \tag{2}$$

$$\omega_p n_x(\omega_p, T) = \omega_s n_x(\omega_s, T) + \omega_i n_y(\omega_i, T) \tag{3}$$

从 Velsko 的 LBO 热光系数<sup>[9]</sup>又有

$$n_x(\omega_p, T) = n_x(\omega_p) + (-1.8 \times 10^{-6})(T - 20) \tag{4}$$

$$n_x(\omega_s, T) = n_x(\omega_s) + (-1.8 \times 10^{-6})(T - 20) \tag{5}$$

$$n_y(\omega_i, T) = n_y(\omega_i) + (-13.6 \times 10^{-6})(T - 20) \tag{6}$$

这样给定一个温度,从式(2)~(6)和 Sellmeier 方程<sup>[8]</sup>便能够解出信号波长,结果用实线表示于图 4。室温下,计算的信号波长=1.003 μm,闲置波长=1.133 μm,与实验值相差无几。当温度升高,计算结果正确预见变化趋势。但 T=200 °C 时,计算的信号波长可比实测大 41.0 nm。因此,室温附近,Velsko 的热光系数基本适用,高温时仅供参考。最近,林斌等给出新的一组 LBO 热光系数<sup>[10]</sup>,采用这组系数的计算结果(图 4 虚线)比 Velsko 的有所改进,但计算的信号波长仍比实测短 12 nm。

### 2.3 输出线宽

本型光参量振荡器最突出的特点是其较窄的本征输出线宽。如图 1,不插入任何色散元件,当温度=100 °C,λ<sub>s</sub>=0.96 μm 时,记录输出信号光谱(图 5),测得其线宽=1.77 nm。使用同样的泵浦条件和振荡腔,相近的晶体长度(l=15.0 mm),并输出同一信号波长,I 型非临界相位匹配 LBO 光参量振荡器的信号线宽达 18 nm。I 型线宽比 II 型大一个数量级。一般而言,影响光参量振荡器线宽的原因主要有列几方面<sup>[8,11]</sup>:

1) 共线波矢失配。这可由失配条件:

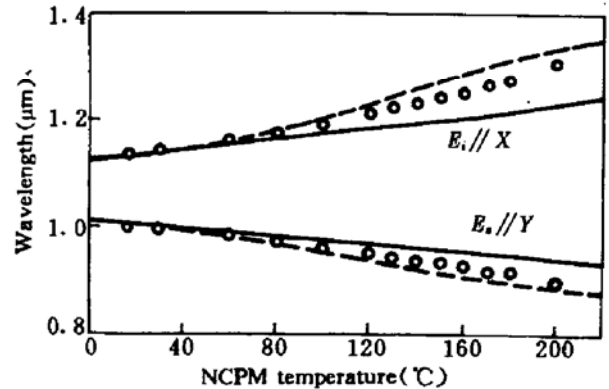


Fig. 4 Temperature tuning curve for type II NCPM LBO OPO. o and • are the measured signal and idler wavelengths. The solid and dashed lines are calculations with Velsko's and Lin's thermo-optical coefficients, respectively

$$(\Delta K \cdot l)/2 = 2.782 \quad (7)$$

$$\text{或} \quad \Delta\lambda_s = (5.564/l) \times (\partial \Delta K / \partial \lambda_s)^{-1} \propto (\partial \Delta K / \partial \lambda_s)^{-1} \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \Delta K \equiv 2\pi \left( \frac{n_x(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_x(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{n_y(\lambda_s, T)}{\lambda_s} \right) \quad (\text{对II型}) \quad (9)$$

$$\Delta K \equiv 2\pi \left( \frac{n_y(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_x(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{n_z(\lambda_s, T)}{\lambda_s} \right) \quad (\text{对I型}) \quad (10)$$

进行估算<sup>[8]</sup>。对II型光参量振荡,计算得  $\Delta\lambda_s = 1.8 \text{ nm}$ 。而I型  $\Delta\lambda_s = 29.8 \text{ nm}$ ,由于I型相位匹配,信号波和闲置波偏振都平行于  $z$  轴,  $\partial \Delta K / \partial \lambda_s$  只来自  $n_z$  色散贡献,而II型相位匹配,信号波和闲置波偏振分别平行于  $x, x$  轴,  $n_y, n_x$  色散的差别贡献更大,因此  $|\partial \Delta K / \partial \lambda_s(\text{II})| \gg |\partial \Delta K / \partial \lambda_s(\text{I})|$ 。我们还考查了 BBO, KTP 等,发现这个规律也同样存在。

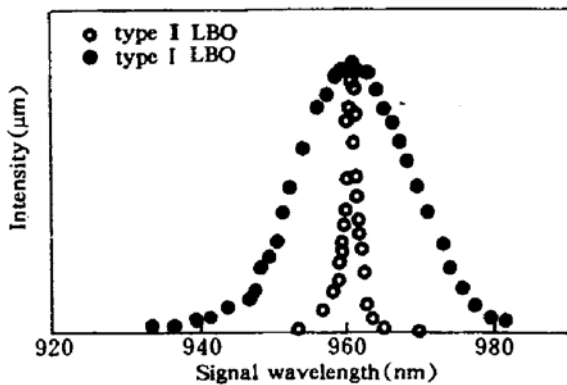


Fig. 5 Recorded signal spectra at  $0.96 \mu\text{m}$  of type II NCPM OPO and type I NCPM OPO. The linewidth of the former is one order in magnitude smaller than the latter

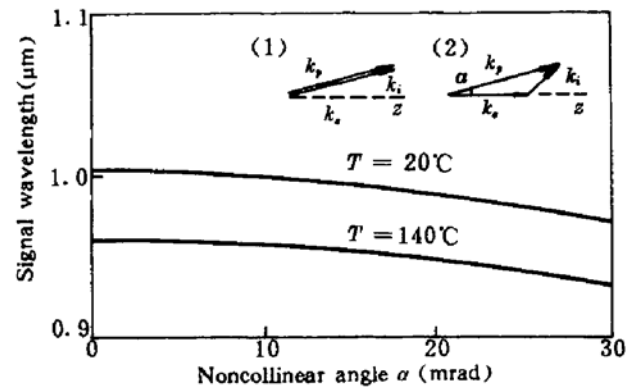


Fig. 6 Two phasematching schemes related to the pump divergence that may broaden the signal spectrum. The solid curves are the calculated signal wavelength versus the angle between the pump and the signal waves at non-collinear phase matching (case 2). Note  $d\lambda_s/d\alpha = 0$  at  $\alpha = 0$

2) 泵浦光发散。这个因素影响线宽可能有两种方式(图6):偏轴共线匹配和非共线匹配。前者产生的信号波不能多次放大,对线的宽贡献可以忽略。后者的计算曲线见图6。由于泵浦发散角  $< 1.0 \text{ mrad}$ ,所以非共线的影响也可以忽略。事实上,在非临界相位匹配时,可以证明:  $d\lambda_s/d\alpha = 0$ ,说明  $\alpha$  对  $\lambda_s$  没有一级项贡献。

3) 温度涨落。此时  $\Delta\lambda_s \sim \Delta T \times |d\lambda_s/dT|$ 。已知II型相位匹配的  $|d\lambda_s/dT| \leq 0.68 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,控温精度  $\sim 0.1^\circ\text{C}$ ,所以  $\Delta\lambda_s \sim 0.07 \text{ nm}$ 。而在  $\lambda_s = 0.96 \mu\text{m}$  时,I型相位匹配的  $d\lambda_s/dT \sim 9.0 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ <sup>[8]</sup>。  $\Delta\lambda_s \sim 0.9 \text{ nm}$ 。因此,在本实验情形,温度涨落对线宽的影响是次要的。当信号波长变化时,II型的  $d\lambda_s/dT$  随波长变化不大,温度涨落对线宽的影响总是很小,而在I型匹配的简并点附近,  $d\lambda_s/dT \rightarrow \infty$ ,温度涨落将成为影响线宽的主要原因之一。

综合上述分析,虽然计算结果不能非常准确地符合实验值,但我们仍然能够确认,II型光参量振荡器线宽窄的主要原因是其信号波和闲置波的偏振方向之间的正交关系。

## 参 考 文 献

- 1 J. A. Giordmaine *et al.* . *Phys. Rev. Lett.* , 1965, 14 : 973
- 2 W. Bosenberg *et al.* . *Laser Focus World* , 1992, 28 : 165
- 3 C. Chen *et al.* . *J. Opt. Soc. Am.* , 1989, B6 : 616
- 4 S. Lin *et al.* . *J. Appl. Phys.* , 1990, 67 : 634
- 5 S. Lin *et al.* . *Appl. Phys. Lett.* , 1991, 59 : 154  
Erratum, *Appl. Phys. Lett.* , 1992, 60 : 2032
- 6 S. Lin *et al.* , *Appl. Phys. Lett.* , 1991, 59 : 2805
- 7 S. Lin *et al.* . *Chinese Journal of Lasers (English Edition)* , 1993, B2(1) : 33
- 8 S. J. Brosnan *et al.* . *IEEE J. Quant. Electr.* , 1979, QE-15 : 415
- 9 S. P. Velsko *et al.* . *IEEE J. Quant. Electr.* , 1991, QE-27 : 2182
- 10 B. Lin *et al.* .  $dn_x/dT = 2.797 \times 10^{-6} - 4.328 \times 10^{-8}T - 2.121 \times 10^{-10}T^2$ ,  
 $dn_y/dT = -6.560 \times 10^{-6} - 2.120 \times 10^{-7}T + 3.172 \times 10^{-10}T^2$   
 $dn_z/dT = 6.116 \times 10^{-6} - 2.567 \times 10^{-7}T + 6.649 \times 10^{-10}T^2$  , to be published
- 11 A. Seilmeier *et al.* . *Opt. Commun.* , 1978, 24 : 237

A Temperature-tuned LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> Optical Parametric Oscillator

Lin Shujie Zhang Yudong Wu Bochang Chen Chuangtian

(Fujian Institute of Matter Structure, Academia Sinica, Fuzhou 350002)

**Abstract** A temperature-tuned type II noncritical phase-matched LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) optical parametric oscillator (OPO) pumped by 0.532 μm was investigated in detail. At the temperature range of 20~200 °C, the tuning range covers 1.002~0.898 μm and 1.134~1.306 μm. The most attractive feature of the device is the very narrow signal linewidth which is only 1/10 of that of type I LBO OPO.

**Key words** LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, LBO, optical parametric oscillator, temperature tuning