

文章编号: 0253-2239(2004)04-499-4

CsLiB₆O₁₀ 晶体光学参变振荡器的光学特性*

王 丽¹ 门艳彬²

(¹ 北京工业大学应用物理系, 北京 100022)
(² 河北师范大学物理系, 石家庄 050016)

摘要: 根据三波耦合过程中的能量和动量守恒、晶体的塞耳迈耶尔色散方程, 通过数值模拟计算了 213 nm 作 CLBO 光学参变振荡抽运源时, 分别得到了在 I 类和 II 类相位匹配时参量光调谐范围为 237~289 nm、807~2793 nm 和 404~2800 nm。获得了在 I 类匹配时的单谐振或双谐振腔的 CLBO 光学参变振荡转换效率都大于同等条件下的 BBO 光学参变振荡, II 类匹配时, CLBO 晶体的转换效率略小于 BBO 晶体, 但是 CLBO 光学参变振荡转换效率的最大值较 BBO 光学参变振荡出现于更短的紫外波段。从理论上证明了 CLBO 晶体是优质的深紫外透光波段非线性光学晶体。

关键词: 非线性光学; 光学参变激光器; 深紫外激光; CsLiB₆O₁₀ 晶体; 振荡阈值; 转换效率
中图分类号: TN248 文献标识码: A

Optical Properties of CsLiB₆O₁₀ Crystal Optical Parametric Oscillator

Wang Li¹ Men Yanbin²

(¹ Department of Applied Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022)
(² Physics Department, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016)

(Received 7 January 2003; revised 18 April 2003)

Abstract: The optical properties of the angle tuning, resonance thresholds, and conversion efficiency curves are simulated for CLBO and BBO crystal by using the Sellmeier equation and the energy conservation in type-I and II. The wavelength tuning ranges of 237~289 nm and 807~2793 nm, 404~2800 nm in type-I and type-II are obtained for CLBO-OPO by 213 nm pumped, respectively. The efficiency is obtained that the efficiency of CLBO is larger than that of BBO in type I, and the efficiency of CLBO crystal is less than that of BBO in type II, but the maximum efficiency is obtained in the ultraviolet waveband for CLBO than that of BBO crystal. It is proved theoretically that CLBO is an excellent ultraviolet crystal.

Key words: nonlinear optics; optical parametric oscillator; deep ultraviolet laser; CLBO crystal; oscillation threshold; conversion efficiency

1 引 言

全固态紫外激光器具有体积小、应用方便、产生的紫外光波长短、输出功率高等优点, 而获得广泛的应用, 如机械探伤、高密度光信息存储、光刻技术和微加工技术等^[1~4]。1995 年, 日本的 Mori 等人研制成功了一种新的非线性晶体 CsLiB₆O₁₀ (CLBO),

与同类的 β -BaB₂O₄ (BBO)、LBO、KTP 晶体等相比, 它具有有效非线性系数大、抗损伤阈值高、离散角小、透光波段宽、易于生成大体积的单晶等突出优点^[5,6]。目前对它的研究主要围绕采用调 Q Nd:YAG 激光器实现各次谐波激光输出, 通过五次谐波抽运 CLBO 晶体, 产生波长为 185 nm 的紫外激光输出^[7]。而对于 CLBO 光学晶体的单谐振 (SRO) 和双谐振 (DRO) 光学参变振荡器的理论和实验研究, 未见有关报道^[8]。本文通过数值模拟计算, 得到了 CLBO 和 BBO 晶体的角度调谐比较曲

* 北京市教委面上基金 (Km200310005022) 资助课题。

E-mail: lwang1@bjut.edu.cn

收稿日期: 2003-01-07; 收到修改稿日期: 2003-04-18

线,而 BBO 晶体的角度调谐曲线与实验吻合^[9];单谐振和双谐振光学参变振荡器的振荡阈值和转换效率的比较曲线。从而得出 CLBO 的确是一种优质的紫外非线性光学晶体。

2 CLBO 和 BBO 晶体的角度调谐曲线比较

2.1 I 类相位匹配

设参与非线性作用的三个光波的频率分别为 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 ,其相应的波矢分别为 k_1 、 k_2 和 k_3 ,在三波临界 I 类相位匹配时,折射率 n_1 和 n_2 为 o 光,而 n_3 为 e 光,根据动量和能量守恒,则

$$\omega_1 n_1(\omega_1) + \omega_2 n_2(\omega_2) = \omega_3 n_3(\omega_3, \theta), \quad (1)$$

式中

$$n_3(\omega_3, \theta) = n_e(\omega_3, \theta) = \left[\frac{n_o^2(\omega_3) n_e^2(\omega_3)}{n_o^2(\omega_3) \sin^2 \theta + n_e^2(\omega_3) \cos^2 \theta} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

室温时 CLBO 的色散方程为^[5]

$$n_o^2(\lambda) = 2.2145 + \frac{0.00890}{\lambda^2 - 0.02051} - 0.01413\lambda^2, \quad (3a)$$

$$n_e^2(\lambda) = 2.0588 + \frac{0.00866}{\lambda^2 - 0.01202} - 0.00607\lambda^2. \quad (3b)$$

联立方程(1)~方程(3)和 BBO 晶体的色散方程^[9],经过数值模拟计算分别得到 213 nm、266 nm 和 355 nm 为抽运光时,CLBO 和 BBO 晶体的角度调谐曲线(图 1)。由图 1 可以看出,CLBO 在 I 类相位匹配时,213 nm 的角度调谐范围为 $41.02^\circ \sim 88.86^\circ$,波长调谐范围为 237~289 nm 及 807~2793 nm,但不可连续调谐;266 nm 时角度调谐范围为 $35.69^\circ \sim 61.85^\circ$,波长调谐范围为 300~2775 nm;355 nm 的角度调谐范围为 $30.84^\circ \sim 40.35^\circ$,波长调谐范围为 409~2789 nm。在 I 类相位匹配角度调谐曲线中,BBO 晶体

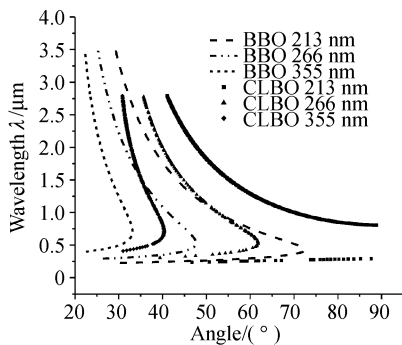


Fig. 1 Angle tuning curves of CLBO and BBO crystal in type I

对 213 nm 可连续调谐,而 CLBO 不可连续调谐,但 CLBO 可在一个比较宽的范围内实现角度调谐。

2.2 II 类相位匹配

假设参与三波相互作用的信号光为 o 光,闲频光和抽运光为 e 光,即 $n_1(\omega_1)$ 、 $n_2(\omega_2, \theta)$ 和 $n_3(\omega_3, \theta)$,在 II (1) 相位匹配 (o+e→e) 时,

$$n_2(\omega_2, \theta) = n_e(\omega_2, \theta) = \left[\frac{n_o^2(\omega_2) n_e^2(\omega_2)}{n_o^2(\omega_2) \sin^2 \theta + n_e^2(\omega_2) \cos^2 \theta} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

将(2)式和(4)式代入(1)式,并联立(1)式~(4)式和 BBO 晶体的色散方程,通过数值模拟计算,得到 II 类相位匹配时 CLBO 和 BBO 晶体的角度调谐曲线(图 2)。由图 2 可以看出,II 类相位匹配时,213 nm 的角度调谐范围为 $16.32^\circ \sim 30.26^\circ$,波长调谐范围为 404~2800 nm;266 nm 的角度调谐范围为 $12.86^\circ \sim 20.59^\circ$,波长调谐范围为 401~2800 nm;355 nm 的角度调谐范围为 $10.85^\circ \sim 14.23^\circ$,波长调谐范围为 410~2792 nm。在 II 类相位匹配角度调谐曲线中 BBO 晶体对 213 nm 不能连续调谐,而 CLBO 可连续调谐,且 CLBO 在很小的角度范围内即可实现宽的调谐范围。

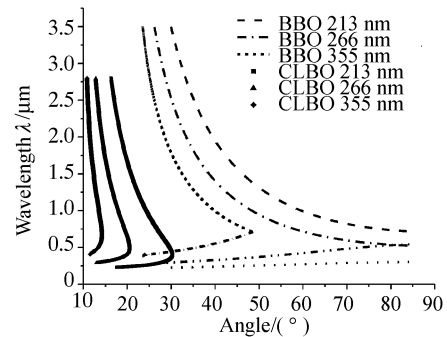


Fig. 2 Angle tuning curves of CLBO and BBO crystal in type II

3 单谐振和双谐振光学参变振荡器的振荡阈值和转换效率

3.1 振荡阈值

光学参变振荡器能够振荡的必要条件是光学参变增益等于或大于信号光和闲频光的损耗。在研究单谐振和双谐振的振荡阈值时,不考虑前行波和后行波的相对相位对振荡阈值的影响。单谐振光学参变振荡器的阈值为^[10]

$$k_1 k_2 E_{\text{3th}}^2(0) l^2 \left[\text{sinc} \left(\frac{l \Delta k}{2} \right) \right]^2 = 2a_2, \quad (5)$$

双谐振光学参变振荡器的阈值为

$$k_1 k_2 \epsilon_{3th}^2(0) l^2 \left[\text{sinc} \left(\frac{l \Delta k}{2} \right) \right]^2 = 2 a_1 a_2, \quad (6)$$

其中 $k_i = \frac{\omega_i d_{eff}}{c n_i}$ 和 $\text{sinc} \left(\frac{l \Delta k}{2} \right) = \frac{\sin(l \Delta k / 2)}{l \Delta k / 2}$,

式中 E_{3th} 为抽运光阈值, l 为晶体长度, $a_i (i = 1, 2)$ 为信号光和闲频光单程功率损失系数, d_{eff} 为有效非线性系数, 在 I、II 类相位匹配下有效非线性系数为

$$d_{eff}(I) = d_{36} \sin \theta \sin(2\phi), \quad (7a)$$

$$d_{eff}(II) = d_{36} \sin(2\theta) \cos(2\phi), \quad (7b)$$

取 I、II 类 CLBO 晶体的 ϕ 切割角分别为 45° 和 0° , $d_{36} = 0.95 \text{ pm/V}$, $l = 5 \text{ mm}$, $\Delta k = 0.1 \text{ rad/cm}$, $a_1 = a_2 = 0.15$. 将(7)式代入(1)式并结合 CLBO 晶体的色散方程(3)和 BBO 晶体的色散方程, 经数值模

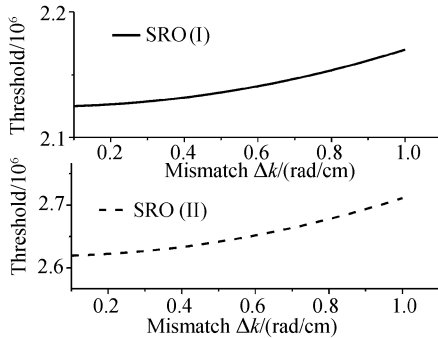


Fig. 4 Theoretical curves of oscillation threshold versus phase mismatching for CLBO

拟得到在 I、II 类相位匹配下, CLBO 和 BBO 晶体单谐振和双谐振光学参变激光器的振荡阈值随晶体长度和相位失配 Δk 的变化曲线, 如图 3 和图 4 所示。

振荡阈值随信号波长变化的关系曲线, 如图 5 和图 6 所示。从图 3 可知, CLBO 晶体在单谐振或双谐振下, 振荡阈值随着晶体长度的增加而降低, 并趋于稳定。同等条件下, II 类匹配下的振荡阈值大于 I 类时的振荡阈值, 双谐振小于单谐振时的阈值。由图 4 可以得出, 对于 I 类和 II 类相位匹配, 其振荡阈值都随相位失配 Δk 的增加而增加, II 类相位失配的振荡阈值远大于 I 类相位匹配的振荡阈值, 其振荡阈值随相位失配的增加速度比 I 类快。由图 5

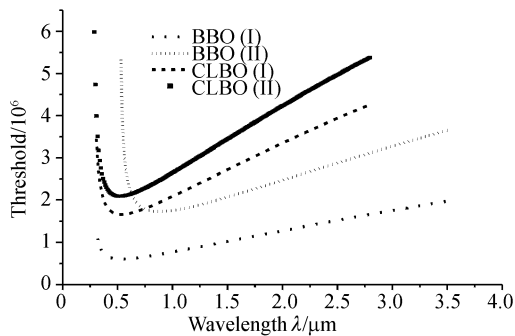


Fig. 5 Oscillation threshold with signal wavelength for BBO and CLBO in type I type II on SRO

和图 6 可知, 对于双谐振, CLBO 晶体的振荡阈值小于同类相位匹配下的 BBO 晶体, 这一结论对于抽运能量较小的连续波, 长脉冲更有利于起振, 并且 CLBO 晶体的最低振荡阈值较 BBO 晶体出现在更短的紫外波段, 由此进一步得出了 CLBO 晶体适合于作为产生高功率紫外激光器的非线性晶体。

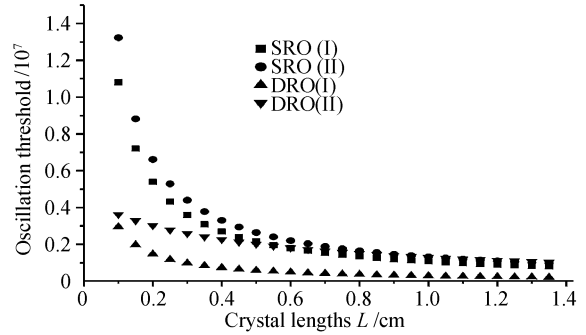
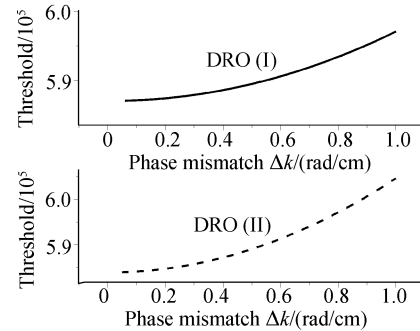


Fig. 3 Oscillation threshold of SRO and DRO with crystal lengths for type I and type II on CLBO



和图 6 可知, 对于双谐振, CLBO 晶体的振荡阈值小于同类相位匹配下的 BBO 晶体, 这一结论对于抽运能量较小的连续波, 长脉冲更有利于起振, 并且 CLBO 晶体的最低振荡阈值较 BBO 晶体出现在更短的紫外波段, 由此进一步得出了 CLBO 晶体适合于作为产生高功率紫外激光器的非线性晶体。

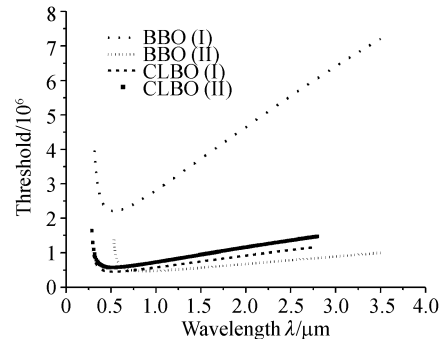


Fig. 6 Oscillation threshold with signal wavelength for BBO and CLBO in type I type II on DRO

3.2 转换效率

对于晶体长度 $l \ll b$ (高斯光束的共焦参量) 时, 高斯型的抽运光束光强为

$$I_p(r) = I_{p0} \exp(-2r^2/W_0^2). \quad (8)$$

利用三波耦合方程,得到双谐振光学参变振荡器转换效率为

$$\eta = \int_0^{r_c} \frac{2}{N(r)} [\sqrt{N(r)} - 1] I_{p0} \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right) \cdot 2\pi r^2 dr / \left[\int_0^\infty I_{p0} \exp\left(-\frac{2r^2}{W_0^2}\right) \cdot 2\pi r^2 dr \right], \quad (9)$$

式中 $N(r)$ 表示 r 处的超阈值倍数,即有

$$N(r) = \frac{I_{p0} \exp(-2r^2/W_0^2)}{I_{p0th}} = N_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{W_0^2}\right), \quad (10)$$

式中 N_0 为光束中心处的超阈值倍数, r_c 是光束横截面中超过阈值的圆半径,可以求得

$$r_c^2 = \frac{1}{2} W_0^2 \ln N_0. \quad (11)$$

将(10)式、(11)式代入(9)式可得双谐振器的转换效率

$$\eta = 4 \left(\frac{1}{N_0^{1/2}} - \frac{1}{N_0} - \frac{\ln N_0^{1/2}}{N_0} \right), \quad (12)$$

单谐振的转换效率:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{l\Delta k}{2}\right) \left(1 - \frac{1}{N}\right). \quad (13)$$

取 $\Delta k = 0.1$ rad/cm, $l = 5$ mm, 抽运光功率为 6×10^6 W, $N = 12$, 对(12)式和(13)式的数值模拟计算, 得到 CLBO 和 BBO 晶体在 I、II 类相位匹配下的单谐振和双谐振光学参变振荡器的转换效率随信号光波长的关系曲线, 如图 7 和图 8 所示。由图 7 和图 8 知, 在 I 类相位匹配下, 无论 CLBO 单谐振或双谐振的转换效率都大于同等条件下的 BBO 晶体的转换效率。在 II 类相位匹配条件下, CLBO 晶体的转换效率约小于 BBO 晶体, 但是 CLBO 光学参变振荡器的转换效率的最大值较 BBO 晶体出现于波长更短的紫外波段。进一步证明了 CLBO 晶体确实是优良的紫外晶体。

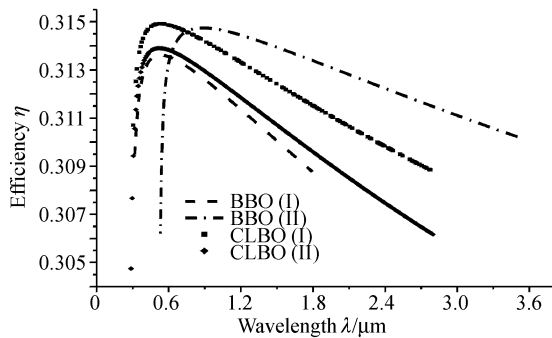


Fig. 7 Efficiency of BBO and CLBO with signal wavelength for SRO in type I and type II

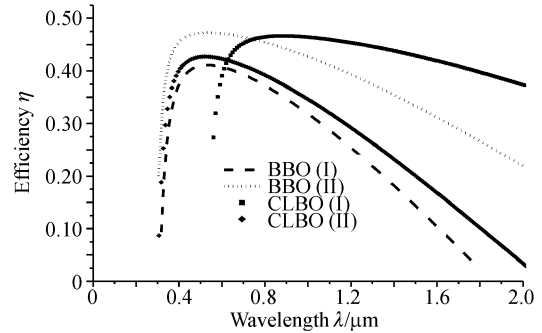


Fig. 8 Efficiency with signal wavelength on BBO and CLBO for DRO in type I and type II

参 考 文 献

- 1 Yap Y K, Inagaki M, Nakajima S *et al.*. High-power fourth- and fifth-harmonic generation of a Nd:YAG laser by means of a CsLiB₆O₁₀. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17):1348~1350
- 2 Zhang Xiurong, Zhang Sunxing, Cai Yao. Harmonic generation in a new nonlinear crystal-CsLiB₆O₁₀. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(2):669~672 (in Chinese)
- 3 Bosenberg W R, Cheng L K, Tang C L. Ultraviolet optical parametric oscillation in β -BaB₂O₄. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(1):13~15
- 4 Zhang Haitao, Gong Mali, Zhao Dazun *et al.*. Design and error analysis of trapeziform grating for high density optical disk storage. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):92~98 (in Chinese)
- 5 Mori Y, Kuroda I, Nakajima S *et al.*. New nonlinear optical crystal; Cesium lithium borate. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13):1812~1820
- 6 Wang Li, Chen Shaohua. Theoretical simulation of effective coefficient and permitted parameters of sum-frequency in CsLiB₆O₁₀. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12):1493~1496 (in Chinese)
- 7 Umemura N, Kato K. Ultraviolet generation-tunable to 0.185 μ m in CsLiB₆O₁₀. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27):6794~6796
- 8 Zhang Jingyuan, Kong Yufei, Xu Zuyan *et al.*. Optical parametric properties of ultraviolet-pumped cesium lithium borate crystals. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3):475~482
- 9 Fan Qikang, Ye Jianhua. Wideband tuning high efficiency on BBO optical parametric oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(5):396~401
- 10 Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* (非线性光学频率变换及激光调谐技术). Beijing: Science Published Press, 1995. 177~182 (in Chinese)