

高效率 LiB_3O_5 光参量振荡器*

叶建华 范琦康

(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

提 要

本文报道 LiB_3O_5 (LBO) 光参量振荡的运转。输出波长范围为: $0.956\sim 1.205\ \mu\text{m}$ 和 $1.488\sim 1.533\ \mu\text{m}$ ($0.828\sim 0.801\ \mu\text{m}$)。最高输出能量大于 $70\ \text{mJ/pulse}$, 效率为 43%。文中还给出了双轴晶体 LBO 的相位匹配曲线和有效非线性系数的计算方法及结果。

关键词: LBO, 光参量振荡器。

一、引 言

LiB_3O_5 (LBO) 晶体是继 BBO 晶体之后生长成功的又一种硼酸系列非线性光学晶体。该晶体化学性质稳定、不潮解、透紫外性能好(紫外截止波长为 $160\ \text{nm}$)、光损伤阈值高达 $25\ \text{GW/cm}^2$ (激光脉宽为 $0.1\ \text{ns}$)^[1]。其 I 型匹配的倍频有效非线性系数为 $2.6 d_{36}$ (KDP)。由此可见, LBO 晶体很适合应用于高功率的光学倍频、混频和光参量过程。LBO 晶体用于 Nd:YAG 激光的倍频及产生三次谐波均已获得 60% 的转换效率。然而应用于光参量振荡器方面的研究最近才见报道^[2]。

本文给出 LBO 晶体在参量过程中相位匹配曲线及有效非线性系数的计算及光参量振荡器的实验研究结果。

二、双轴晶体的相位匹配曲线及有效非线性系数的计算

LBO 晶体是属于正交 $mm2$ 点群、 P_{na21} 空间群的双轴晶体。其光率体坐标系 (x, y, z) 和晶轴坐标系 (a, b, c) 的对应关系为 $x \leftrightarrow a, y \leftrightarrow c, z \leftrightarrow b$ 因此在光率体坐标系中 LBO 的非线性系数矩阵 (d_{in}) 为

$$(d_{in}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \\ d_{31} & d_{33} & d_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Lin 等人^[2]测得 LBO 的 (d_{in}) 各分量值为:

$$d_{31} = \mp 2.51d_{36}(\text{KDP}), \quad d_{32} = \pm 2.69d_{36}(\text{KDP}), \quad d_{33} = \pm 0.15d_{36}(\text{KDP}) \\ d_{15} = \mp 2.30d_{36}(\text{KDP}), \quad d_{24} = \pm 2.52d_{36}(\text{KDP}).$$

LBO 晶体折射率的 Sellmeier 方程为^[1]

收稿日期: 1991年2月28日; 收到修改稿日期: 1991年5月31日

* 本课题为国家自然科学基金资助的项目。

$$\left. \begin{aligned} n_x^2 &= 2.4517 - 0.01177 / (0.00921 - \lambda^2) - 0.0096 \lambda^2, \\ n_y^2 &= 2.5279 + 0.01652 / (0.005459 + \lambda^2) - 0.1137 \lambda^2, \\ n_z^2 &= 2.5818 - 0.01414 / (0.01186 - \lambda^2) - 0.01457 \lambda^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在双轴晶体中, 沿波矢量 \mathbf{k} 方向传播的光波, 其折射率满足下面的菲涅耳方程

$$\frac{k_x^2}{n^{-2} - n_x^{-2}} + \frac{k_y^2}{n^{-2} - n_y^{-2}} + \frac{k_z^2}{n^{-2} - n_z^{-2}} = 0, \quad (3)$$

上述方程的解为^[3]

$$\left. \begin{aligned} n^{e1} &= \sqrt{2} / \sqrt{B - \sqrt{B^2 - 4C}}, \quad n^{e2} = \sqrt{2} / \sqrt{B + \sqrt{B^2 - 4C}}, \\ B &= k_x^2(b+c) + k_y^2(a+c) + k_z^2(a+b), \\ C &= k_x^2bc + k_y^2ac + k_z^2ab, \\ a &= n_x^{-2}, \quad b = n_y^{-2}, \quad c = n_z^{-2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中上标 $e1$ 和 $e2$ 分别表示慢波和快波。对于不同的相位匹配过程, 其匹配条件为

$$\left. \begin{aligned} \text{I 型匹配: } & n_1^{e1} / \lambda_1 + n_2^{e2} / \lambda_2 = n_3^{e2} / \lambda_3, \\ \text{IIA 型匹配: } & n_1^{e2} / \lambda_1 + n_2^{e1} / \lambda_2 = n_3^{e2} / \lambda_3, \\ \text{IIB 型匹配: } & n_1^{e1} / \lambda_1 + n_2^{e1} / \lambda_2 = n_3^{e2} / \lambda_3, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $\lambda_3 < \lambda_2 \leq \lambda_1$, 且满足关系 $\lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1} = \lambda_3^{-1}$ 。对于一定的 λ_1, λ_2 和 λ_3 值, 满足相位匹配条件的 (θ, φ) 值构成一条曲线: $\theta = \theta(\varphi)$ 称为相位匹配曲线, 此曲线上 $|d_{\text{eff}}|$ 有最大值的点称为最佳匹配点 (θ_m, φ_m) 。根据已知的 λ_1, λ_2 和 λ_3 , 由 Sellmeier 方程(2)可以求得以上三个波长的主折射率 n_x, n_y 和 n_z 。再根据相位匹配条件(5)和折射率与波矢量 \mathbf{k} 的关系(4)便可确定匹配方向, 即可确定相位匹配曲线 $\theta = \theta(\varphi)$ 。对于双轴晶体, 在一般情况下相位匹配曲线的函数关系 $\theta = \theta(\varphi)$ 是一个复杂的函数, 没有显解。求相位匹配曲线只能借助于计算机作数值解。

在双轴晶体中两个本征波的电矢量满足方程:

$$E_m = \frac{k_m(k_x E_x + k_y E_y + k_z E_z)}{\omega^2 \mu \varepsilon_0 (n^2 - n_m^2)}. \quad (m = x, y, z) \quad (6)$$

由(6)式可以求得电矢量 \mathbf{E} 的方向余弦:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{k_x}{n^2 - n_x^2} \left[\left(\frac{k_x}{n^2 - n_x^2} \right)^2 + \left(\frac{k_y}{n^2 - n_y^2} \right)^2 + \left(\frac{k_z}{n^2 - n_z^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \\ \cos \beta &= \frac{k_y}{n^2 - n_y^2} \left[\left(\frac{k_x}{n^2 - n_x^2} \right)^2 + \left(\frac{k_y}{n^2 - n_y^2} \right)^2 + \left(\frac{k_z}{n^2 - n_z^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \\ \cos \gamma &= \frac{k_z}{n^2 - n_z^2} \left[\left(\frac{k_x}{n^2 - n_x^2} \right)^2 + \left(\frac{k_y}{n^2 - n_y^2} \right)^2 + \left(\frac{k_z}{n^2 - n_z^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

有效非线性系数定义为: $d_{\text{eff}}^I = \mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{d} : \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2$, 其中 \mathbf{a}_n 代表相应于 λ_n 波长的电场单位矢量。根据 LBO 晶体的非线性系数矩阵(1)以及各作用波的方向余弦(7)式, 便可得到 LBO 晶体在各种类型匹配情况下有效非线性系数。经推导其结果如下

$$\begin{aligned} d_{\text{eff}}^I &= d_{24} \cos \gamma_{32} (\cos \gamma_{11} \cos \beta_{21} + \cos \gamma_{21} \cos \beta_{11}) \\ &\quad + \cos \beta_{32} (d_{31} \cos \alpha_{11} \cos \alpha_{21} + d_{33} \cos \beta_{11} \cos \beta_{21} + d_{32} \cos \gamma_{11} \cos \gamma_{21}) \\ &\quad + d_{15} \cos \alpha_{32} (\cos \beta_{11} \cos \alpha_{21} + \cos \beta_{21} \cos \alpha_{11}) \end{aligned}$$

$$d_{eff}^{IIA} = d_{24} \cos \gamma_{32} (\cos \gamma_{12} \cos \beta_{21} + \cos \gamma_{21} \cos \beta_{12})$$

$$+ \cos \beta_{32} (d_{31} \cos \alpha_{12} \cos \alpha_{21} + d_{33} \cos \beta_{12} \cos \beta_{21} + d_{32} \cos \gamma_{12} \cos \gamma_{21})$$

$$+ d_{15} \cos \alpha_{32} (\cos \beta_{21} \cos \alpha_{12} + \cos \beta_{12} \cos \alpha_{21})$$

$$d_{eff}^{IIB} = d_{24} \cos \gamma_{32} (\cos \gamma_{11} \cos \beta_{22} + \cos \gamma_{22} \cos \beta_{11})$$

$$+ \cos \beta_{32} (d_{31} \cos \alpha_{11} \cos \alpha_{22} + d_{33} \cos \beta_{11} \cos \beta_{22} + d_{32} \cos \gamma_{11} \cos \gamma_{22})$$

$$+ d_{15} \cos \alpha_{32} (\cos \beta_{11} \cos \alpha_{22} + \cos \beta_{22} \cos \alpha_{11})$$

根据上述公式作者编制了 LBO 晶体在光参量过程中相位匹配曲线和有效非线性系数的计算程序。

对于固定泵浦波长 λ_3 的光参量过程，每一组参量波 (λ_1, λ_2) 对应一条相位匹配曲线和一个最佳匹配点 (θ_m, φ_m)。把各相位匹配曲线上的最佳匹配点连起来组成一条最佳匹配曲线。图 1 给出了泵浦波长 $\lambda_3 = 0.532 \mu\text{m}$ 时几条相位匹配曲线及最佳匹配曲线(粗线)。图 2 和图 3 给出了 I 型相位匹配的 LBO 光参量振荡器的有效非线性系数随调谐角度及输出波长的变化。从图 2 和图 3 可以看出不管是定 $\theta(90^\circ)$ 的 φ 角调谐过程还是定 $\varphi(11.9^\circ)$ 的 θ 角调谐过程，在相当宽的波长调谐范围内 d_{eff} 变化不大。

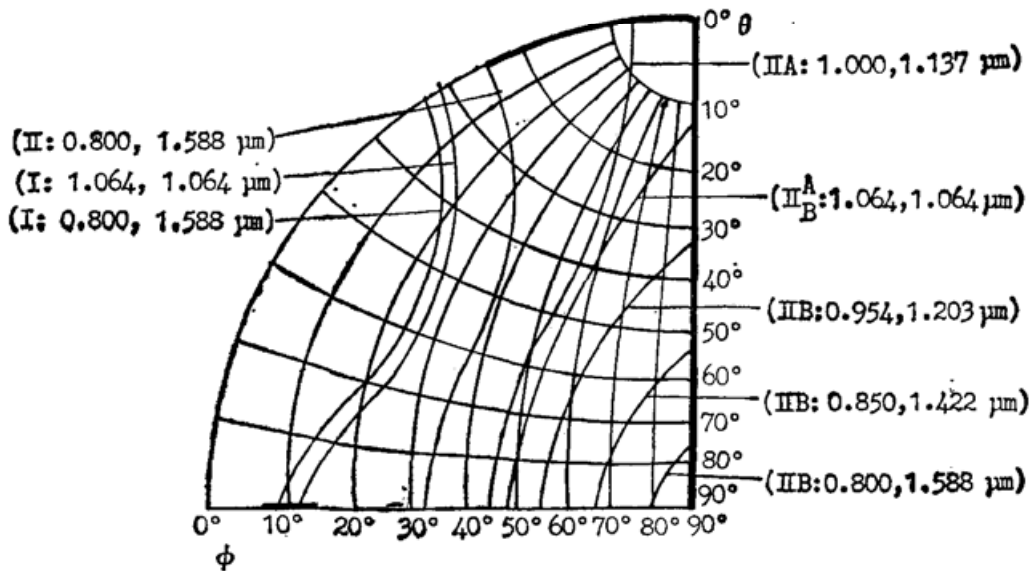


Fig. 1 Phase-matching (PM) curves and optimum PM curves of LBO OPO pumped at $0.532 \mu\text{m}$ in stereogram

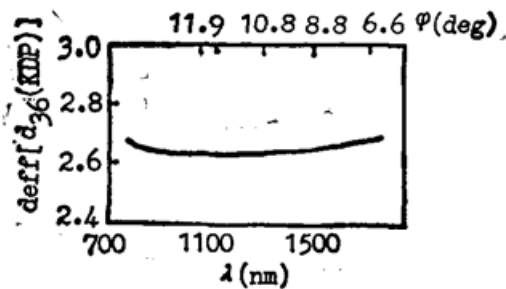


Fig. 2 Effective nonlinear coefficient d_{eff} of LBO vs φ and ($\theta=90^\circ$)

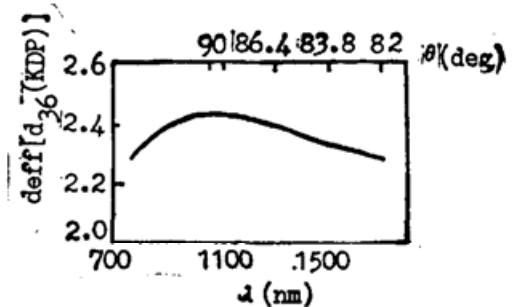


Fig. 3 Effective nonlinear coefficient d_{eff} of LBO vs θ and ($\varphi=11.9^\circ$)

三、实验结果

实验所用的泵浦光源为 YAG 激光器的二次谐波 ($0.532 \mu\text{m}$), 脉冲宽度 (FWHM) 为 15 ns 。此二次谐波通过一个两倍的倒置望远镜使光斑缩小提高功率密度。缩径后的二次谐波再通过一个 $\phi 2.6 \text{ mm}$ 的光阑选取光强均匀的部分作为光参量振荡器的泵浦光。光参量振荡器采取平行平面腔, 腔镜距离为 3 cm 。I 型匹配的 BBO 晶体的切割角为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 10.7^\circ$ 。晶体尺寸为 $4 \times 4 \times 12.2 \text{ mm}^3$ 。晶体两端面未镀膜。

1. 定 $\theta(90^\circ)$ 的 φ 角调谐过程

实验采用了两组谐振腔镜。第一组腔镜在 $1.02 \sim 1.19 \mu\text{m}$ 范围内的反射率分别为 95% 和 80% 左右, 在定 θ 的 φ 角调谐过程中, 获得了 $0.961 \sim 1.192 \mu\text{m}$ 的参量振荡输出。相应的 φ 角 (内角) 变化为 $10.7^\circ \sim 10.32^\circ$ 。第二组腔镜的波长范围为 $1.49 \sim 1.58 \mu\text{m}$ 。两腔镜的反射率分别为 95% 和 92% 左右。在定 θ 的 φ 角调谐过程中获得了 $1.488 \sim 1.583 \mu\text{m}$ (讯号波) 和 $0.801 \sim 0.828 \mu\text{m}$ (空闲波) 的参量振荡输出。相应 φ 角 (内角) 的变化为 $7.2^\circ \sim 8.2^\circ$ 。在此调谐范围内, 光参量振荡器的输出能量随 φ 角的变化不大。

用上述两组腔获得的角调谐实验结果如图 4 所示, 从图 4 可以看出理论计算的调谐曲线与实验结果有一定的差距。其原因可能是用来计算的 Sellmeier 方程 (2) 不够精确。若将计算曲线的 φ 角平移 1.17° (相当于简并点从 11.9° 移到 10.7°), 则计算曲线与实验点符合甚好, 如图 5 所示。

用第一组腔镜时, 光参量振荡器的输出能量随晶体调谐角的变化曲线示于图 6。当泵浦光为 158 mJ/pulse 时, 其最高输出总能量为 66 mJ/pulse 。效率约为 41.8% 。此时相应的晶体角度为正入射位置 ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 10.7^\circ$)。当 φ 角减小时, 由于晶体的倾斜使谐振腔内损耗增加, 导致输出能量减小, 当 φ 角增加时, 除腔内损耗增加外, 计算表明已不能实现相位匹配。然后由于泵浦水平高, 在 $\varphi > 10.7^\circ$ 的一定范围内实验上仍获得振荡输出。 $\Delta k \neq 0$ 时, 光参量增益降低 ($\Delta k \sim \Delta \varphi$), 因此曲线在 $\varphi > 10.7^\circ$ 这一侧输出能量的下降比 $\varphi < 10.7^\circ$ 一侧输出能量的下降更快 (见图 5)。

2. 定 $\varphi(10.7^\circ)$ 的 θ 角调谐过程

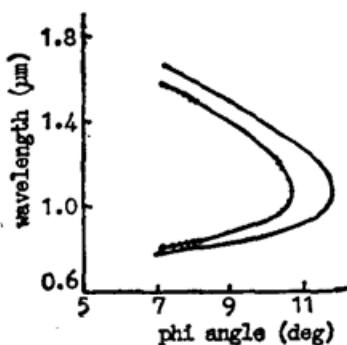


Fig. 4 Experimental and calculated tuning curves in LBO OPO ($\theta = 90^\circ$)

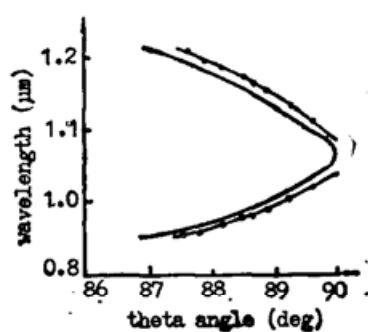


Fig. 5 Experimental ($\varphi = 10.7^\circ$) and calculated ($\varphi = 11.9^\circ$) tuning curves in LBO OPO

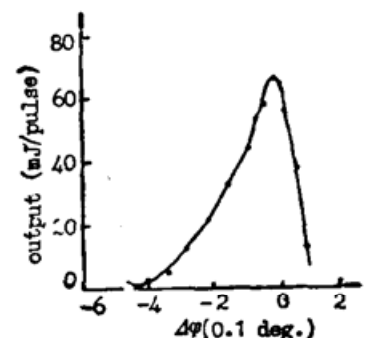


Fig. 6 Output energy vs $\Delta \varphi$ in LBO OPO ($\theta = 90^\circ$)

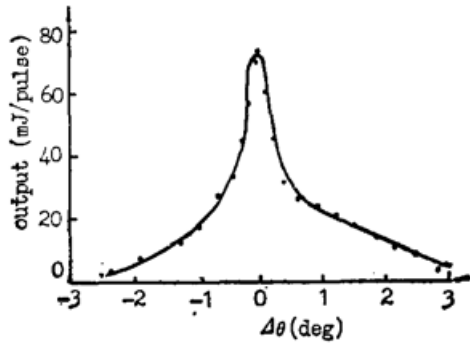


Fig. 7 Output energy vs $\Delta\theta$ in LBO OPO
($\varphi=10.7^\circ$)

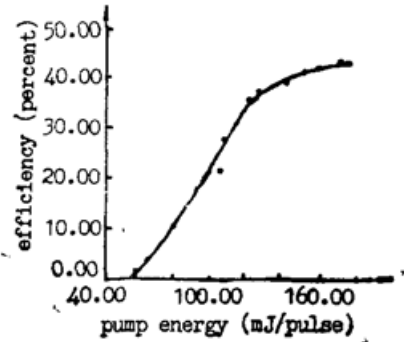


Fig. 8 Energy conversion efficiency vs
pump energy in LBO OPO

实验采用上述第一组腔镜。定 φ 的 θ 角调谐在 $0.956 \sim 1.025 \mu\text{m}$ 波长范围内获得参量振荡输出。相应的 θ 角变化(内角)为 $90^\circ \sim 87.3^\circ$ 。图 5 给出了实验测得的调谐曲线和理论计算曲线。两者也有一些差别,理论计算曲线的 $\varphi=11.9^\circ$,而实验曲线的 $\varphi=10.70^*$ 。定 φ 的角调谐速率 $d\lambda/d\theta$ 与定 θ 的角调谐速率 $d\lambda/d\varphi$ 之比为 1:72。输出能量随转角 θ 变化的实验曲线如图 7 所示。在晶体的正入射位置($\theta=90^\circ$ 、 $\varphi=10.7^\circ$)时,输出最大。在此位置时的阈值约为 50 mJ/pulse ,相应的功率密度约 60 MW/cm^2 。在此位置时光参量振荡器的能量转换效率与泵浦能量的实验关系曲线如图 8 所示。当泵浦能量大于 120 mJ/pulse 时效率开始趋于饱和。当泵浦光输入为 170 mJ/pulse 时,参量振荡器输出能量达 73.3 mJ/pulse 。相应的能量转换效率为 43.1% 。

作者感谢北京人工晶体所为实验提供的优质 LBO 晶体。

参 考 文 献

- [1] C. Chen *et al.*; *J. O. S. A. (B)*, 1989, **B6**, No. 4 (Apr), 616.
- [2] S. Lin *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**, No. 2 (Feb), 634.
- [3] J. Q. Yao, T. S. Fahlen; *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**, No. 1 (Jan), 65.
- [4] Hu Zigan *et al.*; *CLEO'90*, OWE6, J. Y. Zhang *et al.*; *CLEO'90*, OWE7, A. Fix *et al.*; *CLEO'90*, OWE8.

* 现在尚不能确定是计算的不正确,还是给出的切割角不正确。

Efficient LiB_3O_5 optical parametric oscillator

YE JIANHUA AND FAN QIKANG

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 28 February 1991; revised 31 May 1991)

Abstract

This paper reports the operation of LiB_3O_5 (LBO) optical parametric oscillator. Regions of its output wavelength are $0.956\sim 1.205\mu\text{m}$ and $1.488\sim 1.583\mu\text{m}$ ($0.828\sim 0.801\mu\text{m}$). Maximum output energy is over 70 mJ/pulse with energy conversion efficiency of 43%. Calculation method and the results of phase-matching curves and effective nonlinear coefficients for the biaxial crystal LBO are given in this paper.

Key words: LBO optical parametric oscillator.