

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0029-03

利用 CLBO 晶体获得紫外输出

柳强, 巩马理, 闫平, 石彬, 王东生

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 计算了硼酸铯锂(CLBO)相位匹配角、有效非线性系数、倍频时谐波走离角、允许参量等参数,利用 CLBO 晶体实现纳秒级高脉冲能量 Nd:YAG 的4次谐波输出,最大紫外 266 nm 输出能量为 50 mJ,由输入的二倍频向四倍频转换的效率大于 40%,并且阐述了新型晶体 CLBO 的高效频率变换特性。

关键词 激光技术; CLBO; 相位匹配; 四次谐波

中图分类号 TN244

文献标识码 A

Ultraviolet generation in nonlinear crystal-CsLiB₆O₁₀

LIU Qiang, Gong Ma-li, YAN Ping, SHI Bin, WANG Dong-sheng

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract The phase-matching angle, effective nonlinear coefficients, walk-off angle and angular bandwidth are calculated. High pulse energies of nanosecond level fourth-harmonic generation of a Nd:YAG laser have been obtained with CsLiB₆O₁₀ nonlinear crystal. 50 mJ of 266 nm output with a conversion efficiency 40% from the second-harmonic input was generated. The properties of effective frequency conversion in a new nonlinear crystal-CsLiB₆O₁₀ are discussed.

Key words laser technique; cesium lithium borate; phase-matching; fourth-harmonic generation

1 引言

紫外激光器在高密度光盘、机械加工、物质表面改性、超微细加工、金属探伤等工业领域,紫外线造影、细胞解析、微型手术刀等医学领域,作为紫外光源的科研领域具有广泛的应用前景。但是,固体激光波长都工作在近红外区,直接产生更短波长的激光非常困难,采用非线性频率变换获得紫外激光是非常有效的方法。目前的研究主要集中于 BBO 和 CLBO 晶体上,由于 BBO 晶体的紫外吸收较多,温度和角度的允许范围也较小,这样,对于高功率 Nd:YAG 的 4 次,5 次谐波产生的相位匹配条件就相对比较严格。1995 年日本 Yusuke Mori^[1]等首次报道了一种新型非线性晶体——硼酸铯锂(CLBO),具有较大的非线性系数,离散角小,双折射适中,温度带宽和接收角范围都很宽,抗损伤阈值高,特别是可以生长大尺寸单晶,而且生长周期短等优点,非常适合 Nd:YAG 激光的高次谐波、紫外和频以及紫外连续可调谐光学参量振荡器(OPO)。

日本 OSAKA 大学 Y. K. Yap 等报道了 Nd:YAG 激光器高次谐波,利用新型的非线性晶体 CLBO,在重复频率 10 Hz,脉宽 7 ns,基波输入 2800 mJ 时,获得 600 mJ 的 4 次谐波输出,320 mJ 5 次谐波输出,由基波向 5 次谐波的转换效率大于 10%^[2]。另外,CLBO 晶体也被成功地应用在高重复频率(10 kHz)全固态激光系统上,获得的 266 nm 的输出功率已经大于 20 W^[4]。K. Kato^[5]等利用 Nd:YAG 的 5 次谐波(213 nm)与 Nd:YAG 的 2 次谐波抽运的 KTP-OPO(1405 nm)在 CLBO 晶体和频,室温下获得了 185 nm 深紫外激光,并给出了 CLBO 晶体的 Sellmeier 方程。中国科学院上海光学精密机械研究所也曾报道过 CLBO 晶体的倍频特性^[6]。本文计算了 CLBO 相位匹配曲线、有效非线性系数、倍频时谐波走离角、允许参量等参数,并实验研究了利用 CLBO 晶体实现 Nd:YAG 的 4 次谐波,获得 266 nm 输出能量大于 50 mJ,由 2 倍频向 4 倍频的转换效率大于 40%。

作者简介: 柳强(1971.6-),男,博士后,主要从事二极管抽运的全固态激光器以及激光频率变换技术的研究。

E-mail: liuqiang@tsinghua.org.cn

2 CLBO 晶体的倍频特性

由三波互作用的相位匹配条件和能量守恒定律以及 K. Kato^[4]等给出的 Sellmeier 方程,可以求出 CLBO 晶体的倍频相位匹配曲线,如图 1,CLBO 晶体 I 类相位匹配和 II 类相位匹配倍频的相位匹配角分别为: $\theta=29^\circ, \phi=45^\circ$ 和 $\theta=42^\circ, \phi=45^\circ$, I 类相位匹配 4 倍频的相位匹配角为: $\theta=62^\circ, \phi=45^\circ$, 倍频最短的基波波长分别为 476 nm 和 640 nm,这就意味着利用 CLBO 晶体倍频所能获得的最短波长为 238 nm,比 KDP(260 nm)和 LBO(277 nm)获得的最短倍频波长短,比 BBO 晶体获得的最短倍频波长长。无论采用何种匹配方式都可以实现二倍频输出。

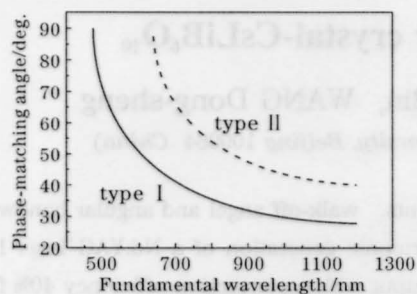


图 1 CLBO 晶体倍频的相位匹配角

Fig.1 Phase-matching angle for SHG of type I and type II CLBO crystal

图 2 为 CLBO 晶体 I 类和 II 类倍频有效非线性系数,CLBO 晶体的 II 类相位匹配适合 Nd:YAG 激光的 2 倍频,具有更大的有效非线性系数,日本 OSAKA 大学 Y.K.Yap 等利用 CLBO 晶体,在 Continuum 的 Powerlite 激光器上实现了能量大于 1.5 J,转换效率大于 50%的 2 倍频输出。对于 I 类相位匹配来说,Nd:YAG 激光的 4 倍频的有效非线性系数几乎接近最大值。

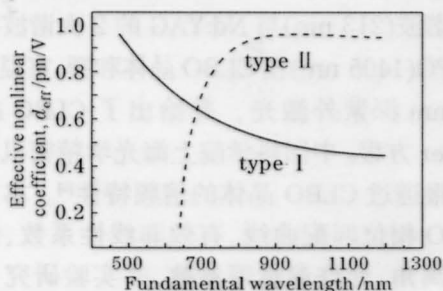


图 2 CLBO 晶体倍频有效非线性系数

Fig.2 Effective nonlinear coefficients for SHG of type I and type II CLBO crystal

利用 CLBO 晶体对激光 Nd:YAG 倍频时,不能达到非临界相位匹配,所以存在离散角。计算结果

如图 3 所示,走离角最大在 2° 左右,明显小于 BBO 晶体。对于高功率激光倍频,由于基波的光斑直径较大,光波的走离效应影响并不明显,在小能量激光倍频时,由于基频光的能量密度较低,基频光常常需要缩束或者聚焦,例如对于 532 nm 激光倍频,利用 12 mm 的 CLBO 晶体,抽运光光斑直径不能小于 400 μm ,超过 400 μm ,抽运光与倍频光在晶体内部将发生分离,使倍频效率降低。

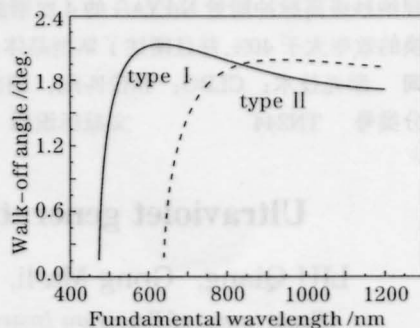


图 3 CLBO 晶体倍频时谐波走离角

Fig.3 Walk-off angel for SHG of Type I and Type II CLBO crystal

对于小信号倍频解,谐波的功率密度或转换效率与相位失谐 Δk 量关系密切,此关系通过函数 $\text{sinc}^2(\Delta k L/2)$ 表现出来。当 $\Delta k=0$ 时, $\text{sinc}^2(\Delta k L/2)=1$ 为最大值。当 Δk 增加时,函数 $\text{sinc}^2(\Delta k L/2)$ 下降很快,当 $\Delta k=\pm\pi/l$ 时,效率下降为最大值的近 40%,为最大允许相位失谐量,由其可以求得相位匹配的允许参量 $\Delta\theta$:将相位失谐量 Δk 对在相位匹配角附近展成泰勒级数,略去二阶以后的高阶项,可以得出对应于 CLBO 晶体的不同相位匹配方式倍频时的允许角(如图 4)。

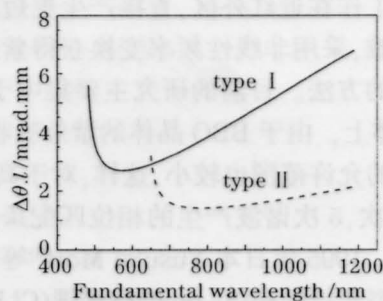


图 4 CLBO 晶体倍频时允许角

Fig.4 Angular bandwidth for SHG of type I and type II CLBO crystal

3 利用 CLBO 晶体实现 Nd:YAG 的 4 次谐波实验

利用灯抽运振-放 Nd:YAG 激光器,最大输出能量为 400 mJ,脉宽为 10 ns,重复频率 1 Hz。实验

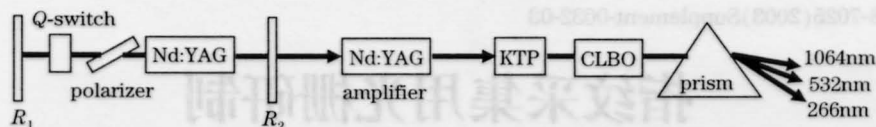


图 5 Nd:YAG 四倍频实验装置

Fig.5 Setup of fourth-harmonic generation of a Nd:YAG laser

装置如图 5 所示,主振激光经过一级放大后,利用 II 类匹配 KTP 晶体对 1064 nm 激光倍频,相位匹配角为 $\theta=90^\circ, \phi=24.4^\circ$,晶体尺寸为 9 mm×9 mm×6 mm。再利用 I 类相位匹配 CLBO 晶体对 532 nm 激光倍频,此时相位匹配角为 $\theta=62^\circ, \phi=45^\circ$,有效非线性系数几乎接近最大值,晶体尺寸为 7 mm×8 mm×9 mm,最后利用石英棱镜将 1064 nm, 532 nm, 266 nm 分开利用能量计测量。

实验结果如图 6, 7 所示。无论是二倍频还是四倍频输出,随着注入能量的增加,输出能量呈线性增大,转换效率在初期增长较快,随着注入能量的增加呈饱和趋势。由 1064 nm 向 532 nm 转换的效率为 50%,最大输出能量 180 mJ,由 532 nm 向 266 nm 转换的效率接近 40%,由于 CLBO 晶体和石英棱镜的端面都未镀增透膜,表面的反射损耗较大,最大紫外 266 nm

输出能量为 50 mJ。

4 结 论

CLBO 晶体具有较大的非线性系数,离散角小,双折射适中,温度带宽和接收角范围宽,抗损伤阈值高等很多优点,特别是可以生长大尺寸单晶,而且生长周期短等优点,非常适合 Nd:YAG 激光的高次谐波产生,为实现深紫外激光输出提供了新途径。但是,CLBO 晶体还存在严重的潮解问题,我们使用的 CLBO 晶体大概一年时间,由于潮解样品先从各个顶角和棱边开裂,裂纹逐渐向晶体内部延伸,最后导致整个晶体碎裂。目前,防止晶体潮解的一种方法是将晶体像 BBO 那样密封在真空或者充氮气的盒子里,另一种方法是将晶体在加热状态下使用,如果 CLBO 晶体的潮解开裂问题一旦得到很好的解决,它的应用前景是非常广阔的。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所张秀荣老师提供 CLBO 晶体。

参 考 文 献

- 1 Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal: cesium lithium borate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**:1818~1820
- 2 Y. K. Yap, M. Inagaki, S. Nakajima *et al.*. High-power fourth-and fifth-harmonic generation of a Nd:YAG laser by means of a CsLiB₆O₁₀[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1348~1350
- 3 Y. K. Yap, M. Inagaki, S. Nakajima *et al.*. CsLiB₆O₁₀ crystal for frequency doubling the Nd:YAG laser [J]. *Opt. Comm.*, 1998, **145**:101~104
- 4 Tetsuo Kojima, Susumu Konno, Shuichi Fujikawa *et al.*. High-power high-repetition-rate all-solid-state UV laser [C]. CLEO, 1999. 64
- 5 Nobuhiro Umemura, Kiyoshi Kato. Ultraviolet generation tunable to 0.185 μm in CsLiB₆O₁₀[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20):6794~6796
- 6 Zhang Xiurong, Zhang Shunxin, Chai Yao. Harmonic generation in a new nonlinear crystal—CsLiB₆O₁₀ [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(7):669~672 (in Chinese)

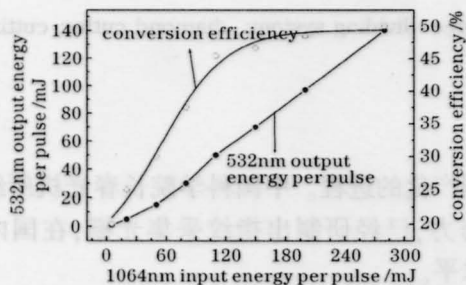


图 6 532 nm 输出能量和 1064 nm 注入能量的关系

Fig.6 Output energy at 532 nm is show as a function of 1064nm input energy

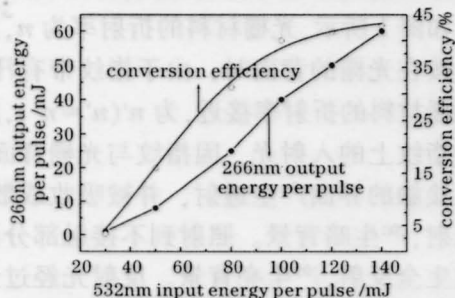


图 7 266 nm 输出能量和 532 nm 注入能量的关系

Fig.7 Output energy at 266 nm is show as a function of 532 nm input energy