

文章编号: 025827025(2004)0921030203

BBO 晶体腔内倍频高效率 473 nm 蓝光激光器

郑 权¹, 赵 岭¹, 董胜明²

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022
² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 BBO (BBO) 晶体是一种新型的非线性光学晶体, 物化性能稳定, 光损伤阈值高, 并且具有相当大的非线性光学系数, 可以制作成频率变换器件, 获得高效的倍频激光输出。报道了用 BBO 晶体对一台运转于 946 nm 激光谱线的激光二极管 (LD) 抽运 Nd:YAG 激光器进行腔内倍频获得高效率的 473 nm 蓝光输出的实验结果。用国产的激光二极管端面抽运厚 212 mm, 掺杂浓度 110 at % 的 Nd:YAG 激光晶体, 在注入抽运光功率为 116 W 时, 用 5 mm 长的 E 类临界位相匹配 BBO 晶体获得的 TEM₀₀ 模蓝光输出达 183 mW, 相应的腔内倍频转换效率为 1114%, 比同样工作条件下 10 mm 长 E 类 LBO 晶体的倍频效率高 45% 以上。

关键词 激光技术; BBO 晶体; 激光二极管; 蓝光激光器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

High Efficient Blue Laser Generation at 473 nm by BBO Crystal

ZHENG Q uan¹, ZHAO L ing¹, DONG Shengming²

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China

²The State Key Laboratory of Crystal Material, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract BBO (BBO) crystal is a novel nonlinear crystal, which has stable physical and chemical properties, high destroy threshold, and big nonlinear effective coefficient, so BBO crystal can be used as frequency conversion device to obtain efficient second harmonic wave generation. In this paper, high efficient blue laser at 473 nm was generated by BBO crystal inserted in a diode pumped Nd:YAG (Y₃AlO₅) laser at 946 nm for intracavity frequency doubling. A home made laser diode was used to end pump a piece of 212 mm long Nd:YAG crystal doped with 110 at %. With 116 W pumped laser, 183 mW TEM₀₀ mode stable blue laser output was obtained by a 5 mm long E typed BBO crystal, conversion efficiency up to 1114%, which was about 45% higher than a 10 mm long E typed LBO (LiBO₃) crystal.

Key words laser technique; BBO crystal; laser diode; blue laser

1 引 言

由于蓝激光在荧光激发, 拉曼光谱, DNA 排序等领域有广泛的应用, 激光二极管 (LD) 抽运的 473 nm 全固态蓝光激光器近年来引起了人们的广泛关

注。利用 Nd:YAG 晶体中 Nd³⁺ 在 946 nm 波段的受激辐射跃迁, 经非线性晶体倍频, 最终可获得波长为 473 nm 的蓝色激光^[1]。对于 473 nm 全固态蓝光激光器, 已有大量文献报道^[2,3]。其中, 多为采用 KN 晶体倍频, 原因是 KN 晶体的有效非线性系数很大, 倍

收稿日期: 2003206202; 收到修改稿日期: 2003208204

基金项目: 国家 863 计划 (No. 2002AA 311141) 资助项目。

作者简介: 郑 权 (1973—), 男, 黑龙江省人, 理学博士, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要研究方向为高性能及大功率全固态激光器。E-mail: zhengquanok@163.com

频效率高。但在实际应用中,KN 晶体易潮解,而且目前 KN 晶体极化、定向和加工等工艺存在着难度,价格高,这些因素都制约着全固态蓝光激光器产业化发展,因此有必要寻找新的晶体。

BBO (BBO) 晶体是一种新型的非线性光学晶体,物化性能稳定、不潮解、光损伤阈值高,并且具有相当大的非线性光学系数,因此是很有应用潜力的新材料^[4],有望制作成频率变换器件,获得高效的倍频激光输出。山东大学的王正平等已经报道了用 BBO 晶体腔外倍频实现 946 nm 倍频蓝光输出的初步实验结果^[5],得到了 2815 mW 的 473 nm 蓝光输出,相应的倍频转换效率仅为 512%。

本文采用 E 类临界位相匹配的 BBO 晶体进行腔内倍频,获得了高效率蓝光激光输出。

2 BBO 晶体的倍频特性

用 SNLO 软件计算了 BBO 晶体的 946 nm 473 nm 倍频参数。为了便于比较,表 1 列出了包括 KN, LBO 和 BBO 三种晶体在 E 类临界位相匹配条件下对 946 nm 波段的倍频参数。

由表 1 可以看出, BBO 晶体的有效非线性系数约是 LBO 晶体的 3 倍,因此可以获得很高的 946 nm 倍频转换效率。需要说明的是,由于 BBO 晶体在 $U=90^\circ$ 的主平面的第二像限 ($90^\circ < H < 180^\circ$) 的有效非线性系数大于第一像限 ($0^\circ < H < 90^\circ$) 的值^[6],因此 BBO 晶体选择了沿 $(161117^\circ; 90^\circ)$ 的 E 类相位匹配方向切割加工。

表 1 KN, LBO 和 BBO 晶体对 946 nm 波段的倍频特性
Table 1 Properties of KN, LBO, and BBO for frequency doubling at 946 nm

Crystals	KN	LBO	BBO
Phase matching (E typed)	$946\ 0(o) + 946\ 0(o) = 473\ 0(e)$	$946\ 0(o) + 946\ 0(o) = 473\ 0(e)$	$946\ 0(e) + 946\ 0(e) = 473\ 0(o)$
At H Udeg	90 0, 60 0	90 0, 19 4	18 3, 90 0
$d_{\text{eff}}(\text{pm/V})$	10 2	0 812	- 2 31
Angle tolerance (m rad · cm)	0 45	2 61	0 65
Temperature range (K · cm)	0 49	7 29	3
Accepted angle (m rad · cm)	0 89, 0 89	5 21, 5 21	1 29, 1 29
Accepted bandwidth	3 67, 3 67	45 86, 45 86	13 21, 13 21
Walkoff angle (m rad)	0 00, 0 00, 46 7	0 00, 0 00, 11 3	40 7, 40 7, 0 00

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。采用中国科学院半导体所生产的连续输出功率为 2 W 的 LD 作为抽运源;采用中国科学院上海光学精密机械研究生院的 Nd:YAG 作为激光介质;采用山东大学晶体材料国家重点实验室提供的 BBO 晶体作为倍频器;采用长春新产业公司生产的高稳定性驱动电源对 LD 提供稳定的电流,并对 LD, Nd:YAG 和 BBO 等元件进行精密的温度控制。

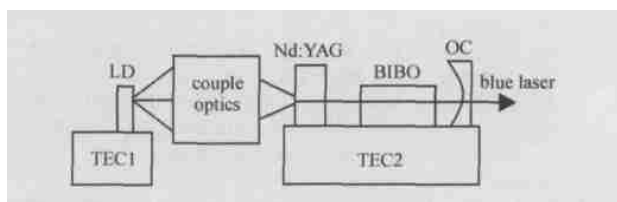


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of equipment

LD 在 25 °C 下中心发射波长为 808.13 nm, 其发散角为 $719\ \text{deg} \times 3316\ \text{deg}$ 。考虑到 946 nm 谱线增益较小,抽运光斑较小时会降低激光阈值。LD 发出的光经过耦合光学系统聚焦成为束腰半径约 80 μm 的抽运光入射到 Nd:YAG 晶体上。激光晶体 Nd:YAG (厚 212 mm, 掺杂浓度 110 at %) 左端面镀 808 nm 增透, 946 nm 高反, 473 nm 高反膜 ($R_{808\ \text{nm}} < 5\%$, $R_{946\ \text{nm}} > 9918\%$, $R_{473\ \text{nm}} > 95\%$), 右端面镀 946 nm 增透膜 ($R_{946\ \text{nm}} < 0102\%$); 倍频晶体 BBO (3 mm × 3 mm × 5 mm, E 类临界相位匹配) 两端均镀 946 nm 和 473 nm 增透膜 ($R_{946\ \text{nm}} < 0102\%$, $R_{473\ \text{nm}} < 1\%$)。输出平凹耦合镜 (OC) 左凹面 (曲率半径 50 mm) 镀 946 nm 高反膜 ($R_{946\ \text{nm}} > 9918\%$) 和 473 nm, 1064 nm, 1319 nm 增透膜 ($R_{473\ \text{nm}} < 1\%$, $R_{1064\ \text{nm}} < 30\%$, $R_{1319\ \text{nm}} < 20\%$), 右平面镀 473 nm, 1064 nm, 1319 nm 增透膜 ($R_{473\ \text{nm}} < 1\%$, $R_{1064\ \text{nm}} < 1\%$, $R_{1319\ \text{nm}} < 1\%$)。

实验中使用的腔长约为 20 mm, 此时谐振腔内光腰约 85 μm , 略大于抽运光斑, 满足纵向抽运全固态激光器谐振腔设计的模式匹配条件^[7]。LD, Nd:YAG 和 BBO 分别用半导体制冷器 (TEC1, TEC2) 严格温控, 确保 LD 发光波长与 Nd:YAG 吸收峰重合, 消除 Nd:YAG 晶体的热效应, 并使 BBO 处于最佳位相匹配状态。

4 实验结果

采用美国 Coherent 公司功率计 (误差 < 3%) 测量不同注入抽运功率下蓝光的输出功率。图 2 给出了两者的关系曲线。激光抽运阈值约 130 mW。当抽运功率 116 W 时, 得到 183 mW 的单横模 (TEM₀₀) 蓝光输出, 光光转换效率达 1114%, 未出现饱和。采用旋转格兰棱镜法测定蓝光偏振方向和偏振比。经测量, 当 808 nm 的二极管抽运源为水平偏振方向注入到激光晶体时, 946 nm 的基频光为水平偏振, 473 nm 的倍频光为垂直偏振, 偏振比超过 150:1。

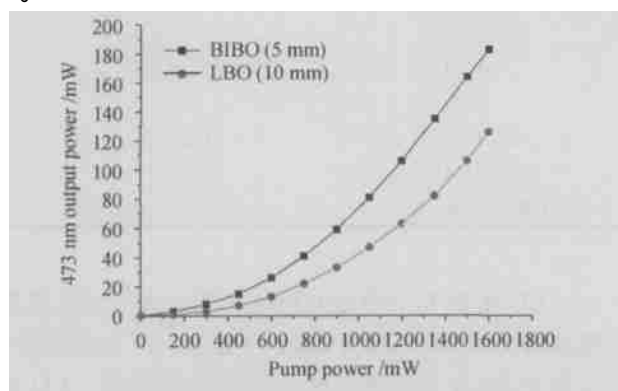


图 2 473 nm 蓝光输出随注入抽运功率的变化

Fig 2 473 nm output as a function of incident power

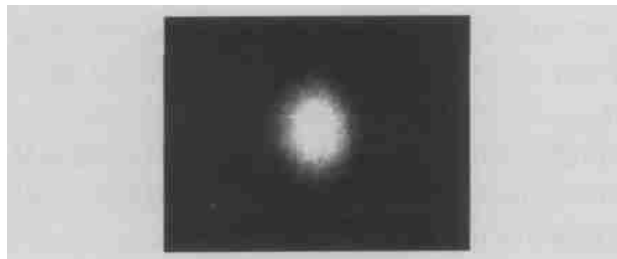


图 3 BBO 倍频的蓝光远场光斑

Fig 3 Farfield spot of blue laser

mm 长的 LBO 晶体倍频时, 获得了 126 mW 的蓝光输出 (见图 2)。可见 5 mm 长的 BBO 晶体的倍频效率比 10 mm 长的 LBO 约高出 45%, 但由于走离角大的原因 (BBO 的走离角约为 LBO 的 4 倍), 其远场光斑比 LBO 倍频时的要差一些。图 3 给出了 BBO 倍频蓝光的远场光斑照片。

5 结 论

由实验结果证明, 采用 BBO 晶体进行 946 nm 的腔内倍频, 可以获得很高效率的 473 nm 蓝光输出。当注入抽运光功率为 116 W 时, 用 5 mm 长的 E 类临界位相匹配 BBO 晶体获得的 TEM₀₀ 模蓝光输出达 183 mW, 相应的腔内倍频转换效率达到 1114%, 比同样工作条件下 10 mm 长 E 类 LBO 晶体的倍频效率高 45% 以上, 因此具有重要的应用价值。

虽然目前 BBO 晶体的生长研究仍然处在早期阶段, 并有许多问题需要解决 (主要的问题是籽晶制备的困难、很低的晶体生长速率和严重的极性生长等), 但其作为全固态蓝光激光器腔内倍频器件的产业化前景已相当可观。

参 考 文 献

- 1 V. Pruneri, R. Koch, P. G. Kazansky *et al.*. 49 mW of cw blue light generated by first-order quasi-phase-matched frequency doubling of a diode-pumped 946 nm Nd:YAG laser [J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(23): 2375~2377
- 2 David G. Matthews, Richard S. Conroy, Bruce D. Sinclair. Blue microchip laser fabricated from Nd:YAG and KNbO₃ [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(3): 198~200
- 3 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*. Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 673~676
郑 权, 赵 岭, 邵永红 等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 673~676
- 4 Teng Bing, Wang Jiyang, Wang Zhengping *et al.*. The growth and properties of new type nonlinear crystal BBO₆ [J]. *Science Letter*, 2001, **46**(12): 987~989
滕 冰, 王继扬, 王正平等. 新型非线性晶体硼酸铋 (BBO₆) 的晶体生长和性能 [J]. *科学通报*, 2001, **46**(12): 987~989
- 5 Wang Zhengping, Du Chenlin, Xu Xinguang *et al.*. Blue laser generation at 946 nm by a BBO₆ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 104
王正平, 杜晨林, 许心光 等. BBO₆ 晶体 946 nm 倍频蓝光输出 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 104
- 6 Zhengping Wang, Bing Teng, Kun Fu *et al.*. Efficient second harmonic generation of pulsed laser radiation in BBO₆ (BBO) crystal with different phase matching directions [J]. *Opt Commun*, 2002, **20**(2): 217~220
- 7 P. Laporta, M. Brussard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10): 2319~2326

文献 [3] 曾报道了采用 E 类临界位相匹配的 LBO 晶体替代 KN 晶体实现 946 nm 的腔内频率转换, 获得了较高效率的蓝光输出。为了比较, 采用 10