

全固态高效率 473nm 蓝光激光器

李玉文¹, 李斌², 王靖田³, 魏艳玲¹

(1.吉林工程技术师范学院 基础科学系, 长春 130052; 2.长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130012;
3.长春理工大学 理学院, 长春 130022)

摘要: 利用 LD 泵浦 Nd:YAG/LBO, 三镜折叠腔结构, 实现了高效的瓦级蓝光输出。通过对系统的优化, 当注入功率为 12.3W 时, 473nm 蓝光激光的输出功率为 1.3W, 光-光转换率达 10.6%, 并且对激光器输出功率的稳定性进行了分析和讨论。

关键词: LD 泵浦; Nd:YAG/LBO; 三镜折叠腔; 蓝光激光

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2009) 02 - 0348 - 04

All-Solid-State Efficient 473nm Blue Laser

LI Yuwen¹, LI Bin², WANG Jingtian³, WEI Yanling¹

(1. Department of fundamental sciences, Jilin Teacher's Institute of engineering and technology, Changchun 130052;
2. Changchun Institute of optics fine mechanics and physics CNI company, Changchun 130012; 3. Changchun University of Science and Technology, Department of physics, Changchun 130022)

Abstract: A LD-pumped Nd:YAG/LBO laser with three-mirror-fold cavity was presented to get watt-level high efficiency blue laser. By optimizing design, when the input power was 12.3W, 1.3W output power of 473nm blue laser was obtained. The optical-to-optical efficiency is up to 10.6%. At last, the stability of the blue laser was also analyzed and discussed.

Key words: LD-pumped; Nd:YAG/LBO; three-mirror-fold cavity; blue laser

由于蓝光激光在显示、光谱学、信息存储、水下通信等诸多领域的应用十分广泛, 而使其成为近年来的研究热点, 利用 LD 泵浦 Nd:YAG 实现 946nm 谱线的运转并利用倍频技术来获得 473nm 蓝光激光是当前获得蓝光激光颇为流行的手段。但由于 Nd:YAG 中的 946nm 谱线属于准三能级结构存在重吸收效应^[1], 并且 946nm 谱线的受激截面也比较小, 所以激光器的总体效率比较低, 一般在 10% 以内^[3-5]。而通过对系统的优化, 在注入泵浦功率为 12.3W 时, 获得了 1.3W 的 TEM₀₀ 模的 473nm 蓝光激光, 光-光转化率高达 10.6%, 实现了高转换率的蓝光。

1 实验设计

由激光二极管激光端面泵浦 Nd:YAG 且处于稳态时的速率方程出发可以推导出^[2]:

$$F = \frac{1 + \frac{B}{fS} \ln(1 + fS)}{f \int_0^{\infty} \frac{\exp[-(a^2 + 1)x]}{1 + fS \exp(a^2 x)} dx} \quad (1)$$

式中各参数如下:

$$a = \frac{\omega_p}{\omega_L}, x = \frac{2r^2}{\omega_p^2}, B = \frac{2\sigma N_1^0}{(L + T_3)}, F = \frac{4P_L \tau_f \sigma_3 \eta_a}{\pi h \nu_p \omega_L^3 l}, f = f_1 + f_2, \\ \phi = \frac{2nlp_L}{ch\nu_L}, P_{out} = P_L T_3, S = \frac{2c\sigma_f \Phi}{\pi n \omega_L^3 (L + T)}$$

P_L 为腔内单向的激光功率, P_{out} 是激光的输出功率, T_3 为 946nm 的透过率, L 为除透射损耗以外往返程损耗率, F 为归一化泵浦速率, S 为归一化腔内光子数。由 (1) 式即可得出激光器的输出功率。令 $S=0$ 得:

$$F_{th} = \frac{(1 + a^2)(1 + B)}{f} \quad (2)$$

将上述参数代入得:

$$P_{th3} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_L^2 + \omega_p^2) (L + T_3 + 2N_1^0 \sigma l)}{4\sigma_f \eta_a (f_1 + f_2)} \quad (3)$$

P_{th3} 为泵浦准三能级的阈值, ω_p 和 ω_L 分别为泵浦

光腰斑半径和激光腰斑半径。由(3)式可以绘制出激光器阈值与激光晶体长度的关系, 选取 $L=1\%$, $T=5\%$, 如图1所示。

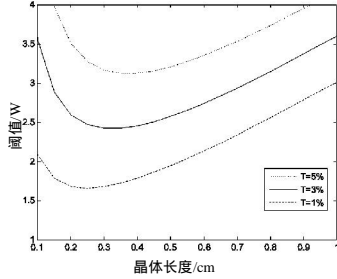


图1 阈值与晶体长度的关系

Fig.1 Curve of the 946nm threshold versus length of Nd:YAG

由图可以看出为使激光器的阈值最低, 晶体的长度应该取在3~4mm之间, 但是由(1)式可知当晶体取3~4mm左右时不能使激光器的效率最高。利用(1)式取 $L=1\%$, $T=5\%$ 时, 得到在不同泵浦功率下, 激光晶体的长度与输出功率的关系如图2所示。

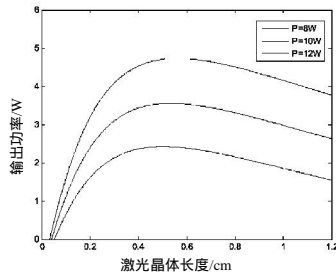


图2 晶体长度与输出功率的关系

Fig.2 Curve of the 946nm output power versus length of Nd:YAG

可见在泵浦功率为12W、10W、8W的情况下, 为了使激光器的输出功率最高晶体的长度应分别为5.5mm、5mm、4.5mm左右, 并兼顾阈值与效率实验中选择的 Nd:YAG 晶体规格为 $\phi 3 \times 4$ mm, 晶体用铝箔包裹放在紫铜热沉中。实验装置如图3所示。

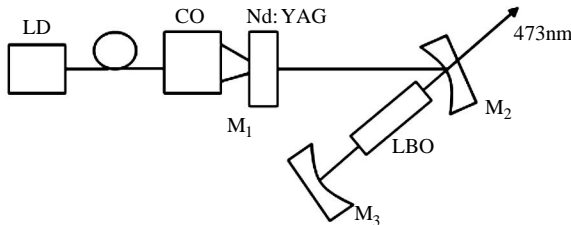


图3 蓝光实验装置

Fig.3 Setup of LD pumped Nd:YAG/ LBO blue laser

图3中, 为LD列阵光纤耦合输出、V型腔结构, Nd:YAG 晶体上的泵浦光斑半径为200 μ m左右, 设 M_1M_2 的长度为 L_1 , M_2M_3 的长度为 L_2 , Nd:YAG 晶体端面直接镀808nm@AR, 946nm@HR,

1064nm@AR, 1319nm@AR 做为 M_1 , 晶体的另一面镀1064@AR, 1319@AR, 946@AR 膜, M_2 的曲率半径 $R_2=50$ mm 镀1064nm@AR, 1319nm@AR, 946nm@HR, 473nm@AR 膜, M_3 的曲率半径 $R_3=200$ mm 镀946nm@HR, 473nm@HR, LBO 两面镀946nm@AR, 473nm@AR, 由ABCD定律有:

$$M = \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a = \left(1 - \frac{2L_2}{R_2}\right) \left(1 - \frac{L_1}{f}\right) - \frac{L_2}{f} \quad (2)$$

$$b = \left(1 - \frac{2L_2}{R_2}\right) L_1 + L_2 \quad (3)$$

$$c = -\frac{2}{R_2} \left(1 - \frac{L_1}{f}\right) - \frac{1}{f} \quad (4)$$

$$d = -\frac{2L_1}{R_2} + 1 \quad (5)$$

$$g_1 = a - \frac{b}{R_1} \quad (6)$$

$$g_2 = d - \frac{b}{R_3} \quad (7)$$

$$\omega_{01}^2 = \pm \frac{\lambda b}{\pi} \frac{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}{g_1 + a g_2 - 2 a g_1 g_2} \quad (8)$$

$$\omega_{02}^2 = \pm \frac{\lambda b}{\pi} \frac{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}{g_2 + d g_1 - 2 d g_1 g_2} \quad (9)$$

ω_{01} 和 ω_{02} 分别为长臂和短臂上的光腰。计算了热透镜焦距值并利用稳腔法对热焦距进行了测量, 对比值如图4所示。

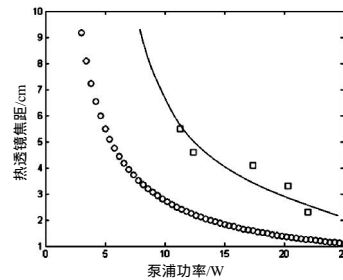


图4 热透镜焦距与泵浦功率的关系

Fig.4 The length of thermal focus versus pump power

可见理论值与实验值还是有一定差距, 但总体趋势还是吻合的比较好, 取 $L_1=66$ mm 时由(1)-(7)得, 由热透镜焦距与V形腔的短臂构成的稳区图如图5所示, 短臂取30mm~48mm 谐振腔都在稳区内, 本文取短臂为36mm 得出热透镜焦距与各分臂上的光腰的关系如图6所示。

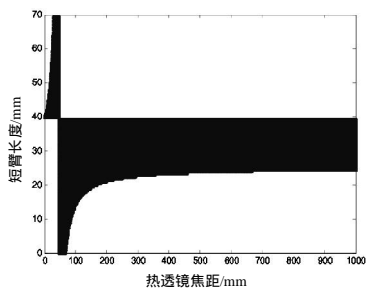


图5 三镜折叠腔稳区图

Fig.5 The stable area of three fold cavity

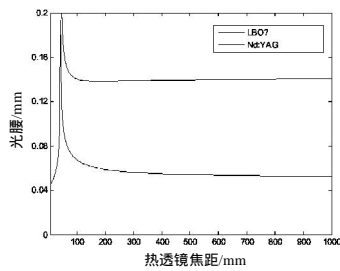


图6 光腰与热焦距的关系

Fig.6 Curve of the beam waist versus the length of thermal focus

由图4、图5和图6可以看出,在泵浦功率为12W时热透镜焦距为50mm左右,处在该谐振腔的稳区内, ω_{01} 和 ω_{02} 在随热焦距的变化还是非常平稳的,且 ω_{01} 约为150 μm 满足模式匹配的要求, ω_{02} 约为50 μm 满足高频效率的要求^[6]。

蓝光激光器常用的倍频晶体由LBO、BBO、BIBO等,BBO和BIBO虽然有效非线性系数大,但这两种晶体的走离角也比较大,很难获得高质量光束的蓝光,本实验选择LBO作为倍频晶体,LBO虽然有效非线性系数较小,但走离角也很小,所以可以通过增加晶体的长度和紧聚焦的方法来获得高的倍频效率,实验中选择LBO晶体的规格为3×3×15mmmm。Nd:YAG、LD和LBO晶体分别用TEC冷却,严格控温,仔细调整光路使系统的状态达到最佳。实验中利用格兰棱镜测量了LD发光的偏振比,大约为水平偏振与垂直偏振之比约为3:1左右,946nm激光的偏振比与LD的偏振比和偏振方向基本相同,采用Coherent公司的FieldMasterGS功率计对473nm激光的输出功率进行测量,得到了473nm蓝光激光器的输出特性曲线如图7所示,在泵浦功率为12.3W时输出功率最高为1.3W,继续增加泵浦功率蓝光的输出功率急剧下降,由图4和图5可以看出,由于在高泵浦功率下热透镜焦距很小严重影响了谐振腔的稳定性,使谐振腔跑出稳区之外,由原来的稳定腔变成了非稳腔。对蓝光激光的偏振进行测量,测量结果为垂直

偏振与水平偏振之比约为100:1,基本为线偏振光。图8为蓝光远场光斑,由图可以看出该光斑为TEM₀₀模结构,但略成椭圆,这是由于V型腔存在象散和LBO的走离效应所致。

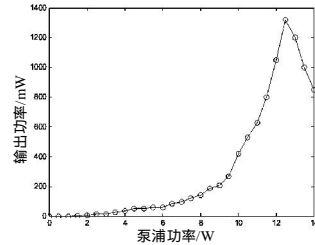


图7 输出功率与泵浦功率关系曲线

Fig.7 The output power of 473 nm laser as a function of pump power

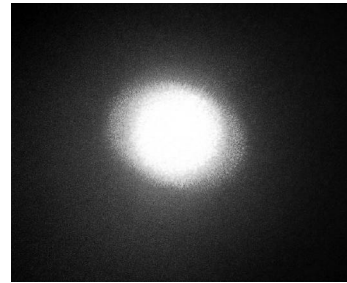


图8 蓝光远场光斑

Fig.8 Far field spot of the blue laser

对蓝光激光的输出功率的稳定性进行了测量,测得在一小时内的稳定度为5%左右,功率的波动性比较大,并对此进行了相应的分析,如下:

(1) 由于Nd:YAG的吸收谱线较窄,一般为1nm左右,而LD输出谱线随温度的变化约为0.3nm/℃,所以温度的变化会造成功率的不稳。

(2) 因为946nm谱线属于准三能级系统,当温度升高时会接近三能级系统,下能级的粒子会对激光产生重吸收使下能级粒子产生跃迁,使下能级粒子数减少,这时又使三能级系统逐渐向四能级转变,这种变化类似于一种广义的被动调Q,从而使激光的输出功率产生波动。

(3) 激光器运转过程中,存在多模,由于各模之间的模式竞争和耦合效应也会使输出功率不稳。

为使蓝光激光输出功率更高运转更稳定,在以后的实验中应采取以下措施:

1) 首先要解决热饱和问题,对于热饱和可以通过降低激光晶体的参杂浓度,增加晶体的长度,来降低单位体积的发热量,扩大散热面积,或用复合晶体。

2) 稳定性问题,由于Nd:YAG对温度变化及其敏感,温度的浮动造成功率的不稳,所以要严格温

控。946nm 激光属于准三能级系统,当温度过高时会使准三能级趋近于三能级系统,这时会造成激光器的输出功率不稳,所以应尽量降低晶体的温度。多横模起振也会造成功率不稳,可以适当限模,或适当增大基模光斑。多纵模也是不稳的原因,可以加入全波片,或偏振片等光学器件进行实验。

2 结论

对准三能级系统进行了分析,指出了传统以阈值最低为标准来选取激光晶体规格的方法不能使激光器的输出功率最高,本文采用兼顾阈值与效率的方法来选取激光晶体的规格,并且对激光器的谐振腔进行了合理的优化,最终利用V型腔LBO内倍频结构,在注入泵浦功率为12.3W的情况下,最终获得1.3W的蓝光激光,光-光转换率达10.6%,并且对激光器输出功率的稳定性进行了分析和讨论,通过对系统的进一步优化,有望得到更高功率的蓝

光输出。

参考文献

- [1] Tso Yee Fan, Robert L Byer. Modeling and CW operation of a Quasi-Three-Level 946nm Nd:YAG laser [J]. IEEE J-QE, 1987, 23(5): 605-612.
- [2] Risk W P, Lenth W. Room temperature CW 946nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode-array and intracavity frequency doubling to 473nm Opt [J]. Lett, 1987, 12(12): 993-995
- [3] 王军营,郑权,薛庆华,等.1.1w连续输出473nm全固态蓝光激光器[J].中国激光,2004,31(5):523-526.
- [4] 高兰兰,檀慧明.利用复合Nd:YAG实现600mW高效紧凑型蓝光激光器[J].光子学报,2004,33(1):8-10.
- [5] 刘伟仁,陈颖新.LD泵浦的室温运转内腔倍频473nm全固态蓝激光器[J].光学精密工程,2000,8(2):133-135.
- [6] 郑权,赵岭,檀慧明,等.LD泵浦高效率折叠腔Nd:YAG/LBO蓝光激光器[J].激光与红外,2001,31(3):144-146.

(上接第335页)

本试验优化出了液体培养基最佳配方,若对金顶侧耳进行发酵培养,其菌丝体将更适合用作生产食品及真菌类药物。液体培养所得菌丝体不仅可以直接食用,而且可以用于提取其中的活性物质。与培养子实体相比,其生活周期短、且不受时间和地域的限制,将会取得良好的经济效果。

参考文献

- [1] 谢福泉,羿红,兰家细,等.金顶侧耳子实体营养成分分析[J].食用菌学报,2007,14(2):81-85.
- [2] 宋洋,孙佳明,王秀丽,等.HPLC-MS/MS多反应监测法测定榆黄蘑中甘露醇的含量[J].世界科学技术:中医药现代化,2008(1):85-87.
- [3] Cheung P C. Chemical evaluation of some lesser known edible mushroom mycelia produced in submerged culture from soy milk waste [J]. Food Chemistry, 1997, 60(1): 61-65.
- [4] Pani B K, Das S R. Effect of carbon and nitrogen nutrition on the growth of some edible basidiomycetes in submerged culture [J]. Journal of Phytochemical Research, 1997, 10(1-2): 63-64.
- [5] 王谦,闫蕾蕾,王永利,等.金顶侧耳深层液体培养及相关检测[J].菌物系统,2006,21(1):102-106.
- [6] 张桂春,李绍龙,王淑芳,等.金顶侧耳液体培养基的优化筛选[J].山东农业大学学报:自然科学版,2006,37(3):349-353.
- [7] 陈由强,叶冰莹.花生DNA快速简便提取方法的研究[J].花生科技,1999,99(3):1-4.
- [8] 唐良华,苏敏,郑丹华,等.食用菌总DNA提取方法的研究[J].福建轻纺,2006,1-4.