

LD 泵浦的 946nm Nd :YAG 激光器及腔内倍频 473nm 蓝光输出

刘伟仁 钱龙生 檀慧明 余 锦

(中国科学院长春光机所应光室, 长春 130022)

提要 本文从理论上分析了准三能级系统 946nm Nd :YAG 固体激光器室温运转的条件及实现方法, 并给出腔内倍频获得 473nm 蓝光发射的方案。用波长 808.5nm, 功率 2W 的半导体激光器泵浦 Nd :YAG, 采用腔内插入高损耗元件选模的方法, 在室温下获得 946nm 波长连续红外激光输出 180mW, 斜效率 13%。用 BBO 和 LBO 晶体腔内倍频, 获得 473nm 波长连续蓝色激光, 输出功率分别 12mW 和 50mW, 斜效率分别为 3% 及 10%。

关键词 准三能级, LD 泵浦, 腔内倍频, 473nm 全固体蓝激光器

LD-pumped 946nm Nd :YAG laser and 473nm blue laser by intracavity doubling

Liu Weiren Qian longsheng Tan Huimin Yu Jin

(Laboratory of Applied optics, Changchun Institute of Optics and Fine mechanics, Academic sinica, Changchun 130022)

Abstract Study on how to realize the operation of quasi-three-level system 946nm all-solid-state Nd :YAG laser at room temperature is reported, also the means of emission of 473nm blue laser by Intracavity-doubling. 180mW output of 946nm infrared laser is obtained when pumped by a 2W diode with the slope efficiency 13%. 12mW and 50mW output of 473nm blue laser are obtained using BBO and LBO doubling crystal with the slope efficiency 3% and 10%.

Key words LD-pumped, quasi-three-level intracavity-doubling, 473nm solid-state blue laser

国际上的激光技术发达的国家普遍采用对 Nd :YAG 激光器 946nm 波长的腔内倍频得到 473nm 波长的激光, 这是目前获得全固体蓝激光最有效的手段之一。国外文献对这一波长的激光器的报导为数不少^[1,3,4], 而在国内, 用 Nd :YAG 做激光材料, 达到这样高功率的实用蓝激光器尚属首例。

1 946, 473nm 波长室温运转的理论分析和实现方法

Nd :YAG 作为激光介质在激发状态下存在三条荧光谱线, 1.06 μ m, 1.32 μ m, 946nm。其中 1.06 μ m 和 1.32 μ m 是人们熟知的激光谱线, 采用传统的方法便可获得。而要实现 946nm 波长激光运转却非常困难, 原因是 Nd :YAG 的 946nm 谱线属于准三能级系统之间的跃迁 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, 在泵浦功率密度不是很高的情况下, 反转粒子数较少, 下能级存在严重再吸收; 另外, 它的受激发射截面很小, 约为 4×10^{-20} , 是 1.06 μ m 波长的 1/9, 从而导致激光的阈值大大提高。我们的实验正式在这样的指导方法下进行的。采用端泵浦方式, 激活介质存在最佳长度, 介质过短, 泵浦光不能有效地吸收, 介质过长又导致低能级再吸收严重, 资料与理论表明, 当 Nd 离子掺杂浓度为 1.0atm% 时, 端面泵浦最佳长度为 3mm^[5]; 激光的阈值还 $\propto (\omega_l^2 + \omega_p^2)$, 则要求泵浦光斑半径和激光光斑半径尽可能的小, 以降低阈值。同时由于 1.06 μ m 波长的发射系数是 946nm 谱线发射系数的 9 倍, 必须抑制 1.06 μ m 谱线, 要采取相应的选膜措施。基于以上几个方面的原因, 我们采用如下方法和结构图 1a 与图 1b 获得 946nm 红外及 473nm 蓝色连续激光室温运转。

- ①采用优化设计的聚光系统以达到泵浦光和激光的最佳匹配。
- ②LD 纵向端面泵浦, 耦合效率最高。
- ③Nd :YAG 采用高掺杂浓度 1.0-at.% 以获得高的吸收效率, 吸收系数为 4.3cm^{-1} , 长度为 3mm。
- ④腔内插入高损耗元件选模。
- ⑤腔内倍频获得 473nm 波长连续蓝色激光输出。

2 激光器件与设计

2.1 聚光系统的设计

实验中采用功率为 2W 的北京半导体所生产的半导体激光器, 该激光器的发散角为 $\theta_{//} = 3.5\text{deg}$, $\theta_{\perp} = 30\text{deg}$ 。发光区面积约为 $200\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 。由于半导体激光器发出的光是像散椭圆高斯光束, 作为泵浦光必须经过成形变换才能达到和激光

光束的最佳匹配。成形变换包括两种: ①变换为共腰椭圆高斯光束, 即无像散椭圆高斯光束; ②变换为旋转对称高斯光束。我们的聚光系统可以把泵浦光变换为旋转对称高斯光束。另外由半导体激光器发出的光是线性偏振的, 光束经过平面光学元件时应以布诺斯特角入射, 以减小损耗。光学元件表面均镀增透膜。下图是整个聚光系统的原理和结构图:

图中的聚光系统包括 3 部分: 准直, 阔束, 聚焦。由于半导体激光器的发光特性, 这 3 部分各自都有特定的作用和要求。准直: 由于半导体激光器的发散角很大, 必须用大数值孔径的、同时满足正弦条件和消球差的透镜组来矫正, 方可获得好的准直光束。我们采用计算机光学 CAD 系统优化设计的透镜组作准直镜。阔束: 由半导体激光器发出的光是一个椭圆度为 8 左右的高斯光束, 通过阔束系统一个方向阔展, 将椭圆光束校正为圆光束。我们的阔束系统采用校正棱镜对实现的。两个相同的棱镜安装在入射角为布诺斯特角的位置上, 这样可以最大程度上减少由半导体激光器发出的线偏振光在反射面上带来的损失。通过微调棱镜对间的角度, 可以在很大程度上消除半导体激光器发出光的像散。聚焦: 由前面的讨论, 激光增益介质 Nd :YAG 的最佳长度是 3mm, 对于三能级, 要求泵浦功率密度越高越好, 在泵浦功率一定的情况下, 则要求泵浦光斑半径越小越好。因此对聚光系统有如下要求: 通过适当选取聚光系统的焦距 f , 使光束在焦点 3mm 范围内平均光斑半径达到极小值。通过计算, 当焦距 f 取 15mm 时, 可以满足这一要求, 平均光斑半径为 100 μm 。

2.2 选膜方案

为了抑制 1.06 μ m 和 1.32 μ m 谱线振荡, 必须采取相应的选膜措施。对于输出 946nm 波长的激光, 采用的方案如图 1a, 除了在输出镜上镀 1.06 μ m 高透以外, 在谐振腔内又插入 45°反射膜, 进一步抑制 1.06 μ m 和 1.32 μ m 激光振荡。这样可以放宽对输出镜 1.06 μ m 高透的要求。对于输出 473nm 波长的激光器, 采用的方案如图 1b, 膜系设计更加复杂。为了保证输出镜对 473nm 百分之百的高透和 946nm 百分之百高反, 很难做到同时满足 1.06 μ m 高透的要求。因此 45°反射膜的应用

是不可少的。另外,在 Nd :YAG 的内侧镀 473nm 高反,可以减小蓝光进入 Nd :YAG 带来不必要的损失。插入的倍频晶体两端面均镀 946nm 和 473nm 双增透,损耗小于 1%。

2.3 谐振腔设计

通过设计谐振腔结构参数,可使泵浦光与激光的 TEM₀₀ 模达到最佳匹配,即泵浦光斑半径同激光束腰半径相等,由激光

原理公式: $\omega_0 = \left[\frac{\lambda^2}{\pi^2} (RL - L^2) \right]^{1/4}$

通过计算,当谐振腔输出镜曲率半径 R=50mm 时,腔长 L 取 25mm。对于 946nm 波长的激光器,由于 Nd :YAG 晶体不是很长, L 取 25mm 即可。对于 473nm 波长的激光器,由于插入倍频晶体,实际光程长增加,腔长应适当减小,考虑到便于元件的安装和调试,腔长取 20mm 即可。

2.4 倍频晶体的设计和选取

倍频 946nm 波长可选取的晶体有铌酸钾 KN、LBO 或 BBO。铌酸钾 KN 晶体有效非线性系数最大,原则上讲是首选晶体,但由于价格昂贵,且使用中易于出现晶畴,本文并未采用。BBO 晶体有效非线性系数较大,位相匹配温度范围很宽,但走离效应严重,激光呈椭圆,位相匹配角度范围很窄,易于潮解,实验结果不是很理想。LBO 晶体虽然有效非线性系数较小,位相匹配温度范围很窄,但它的位相匹配角度范围很宽,不潮解,无走离效应,实验结果很理想。小信号下倍频晶体最佳长度的确定由下面公式 (ref. 6) 给出:

$$\frac{a_i}{I_s} = \left(\frac{u_0}{\epsilon_0} \right)^{3/2} \frac{\omega^2 d^2 l^2}{n^3}; I_s = \frac{2\pi^2 hc \Delta \nu}{n \lambda^3} \cdot \frac{\tau_{21}}{\tau_2}$$

由此得到 BBO 晶体的最佳长度为 5mm,考虑到走离效应本实验选取 3mm 的长度。LBO 晶体的最佳长度为 10mm。

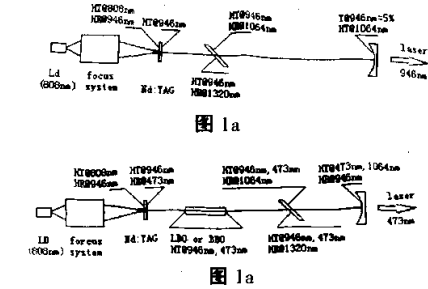


图 1a 室温运转 946nm 连续红外激光结构原理图 图 1b 室温运转 473nm 连续蓝色激光结构原理图

3 实验结果及结论

调整 LD 温度,使其发射谱处于 Nd :YAG 的吸收峰 808.5nm 处。从 LD 出射的激光经过准直,整型,聚焦后在 Nd :YAG 晶体上形成一个直径约为 100um 的光斑,光强分布为高斯分布。为了输出 946nm 激光,采用图 1 结构和膜系,输出镜镀对 946nm 透过率为 5%。对于 473nm 激光采用图 2 结构和膜系。由于 Nd :YAG 晶体各向同性,故 946nm 激光为非偏振态,按理想倍频的要求,应在谐振腔内插入一个偏振片,或在 YAG 晶体上施加压力,便可改变 946nm 光波的非偏振状态,但 these 会增加损耗或给实验带来困难,本实验并未采用。倍频晶体 LBO 和 BBO 四周用电子制冷器恒温,温控精度为 0.1℃。准三能级系统 946nm 激光输出的斜效率由以下公式^[2]

给出: $\frac{dp_{out}}{dp_{abs}} = \frac{T}{A+T} \cdot \frac{\nu_l}{\nu_p} \cdot \frac{dS}{dF}$

由此公式可以看出 946nm 波长的输出功率与各个因素之间的关系,式中 T 代表输出镜的透射率, A 代表光线往返一周的能量损耗 (包括再吸收的损耗), dS/dF 表示该波长激光的量子效率,在 0.85-0.90 之间, ν_l/ν_p 表示激光频率同泵浦光频率比值,比值为 85%。在我们的实验中,透射率 T(946nm)=0.05, A=0.15 (室温时再吸收严重,故 A 值较大),总的斜效率在理论上为 18% 左右。实验中我们用最大功率为 2W 的半导体激光器泵浦,当功率由零增大到 400mW 时,开始有激光输出,即该系统阈值为 400mW,随着泵浦功率的增加,激光输出随之增大,当泵浦增大到 2W 时,946nm 激光输出为 180mW。我们改用 473nm 蓝激光器图 2 结构和膜系,插入 BBO 晶体后得到了

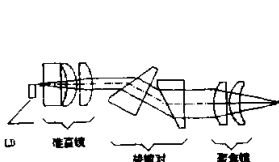


图 2

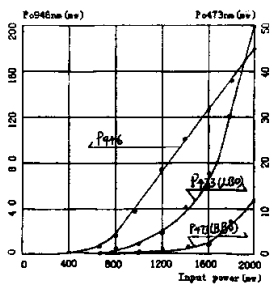


图 3 946nm 红外及 473nm 蓝色激光的输出功率随泵浦功率的关系曲线,图中看出在最大泵浦功率下 946nm 红外激光的斜效率为 13%,473nm 蓝激光的斜效率为 10% (使用 LBO 晶体)

10mW 的 473nm 蓝光输出,激光呈椭圆,换用 LBO 晶体,得到 50mW 蓝光输出,测得蓝激光的发散角为 1.1mrad 左右,束腰直径约 90um。下图是 946nm 及 473nm 激光输出功率随泵浦功率变化的曲线图 3,从图中看出实验曲线与理论基本符合。在最大泵浦功率下,946nm 光光转化效率为 9%,斜效率为 13%,LBO 晶体倍频产生的 473nm 蓝光的光光转化效率为 2.5%,斜效率为 10%。

参考文献

[1] I. Freitag, R. Henking, A. Tunnermann, and H. Welling. Quasi-three-level room-temperature ND :YAG ring laser with high single-frequency output power at 946nm. Optics Letters/December, 1995, 20(24) : 2499-2501

[2] W. A. Clarkson, R. Koch, and D. C. Hanna. Room-temperature diode-pumped ND :YAG Laser at 946nm. Optics Letters/May, 1996, 21(10) : 737-739

[3] David G. Matthews, Richard S. Conroy, and Bruce D. Sinclair. Blue microchip Laser fabricated from ND :YAG and KNbO₃. Optics Letters/February, 1996, 21(3) : 198-200

[4] V. Pruneri, R. Koch, p. G. Kazansky, W. A. Clarkson, P. St. J. Russel, and D. C. Hanna. 49mW of cw blue light generated by first-order quasi-phase-matched frequency doubling of a diode pumped 946nm ND :YAG. Optics Letters/Dec, 1995, 20(23) : 2375-2377

[5] F. Hanson. Efficient operation of a room-temperature ND :YAG 946nm laser pumped with multiple diode arrays. Optics Letters/January, 1995, 20(2) : 148-150

[6] 徐荣甫, 刘敬海. 激光器件与技术教程. 439