

15

1579-1583

激光器 激光晶体

第 47 卷 第 9 期 1998 年 9 月
1000-3290/98/47(09)/1579-06物理学报
ACTA PHYSICA SINICAVol. 47, No. 9, September, 1998
©1998 Chin. Phys. Soc.

研究快讯

激光二极管抽运

Nd:YVO₄激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体
1342 nm 和 671 nm 激光器研究*

TN248.1

TN244

张恒利 何京良 陈毓川 侯玮 刘嵘 冯宝华 许祖彦

(中国科学院物理研究所光物理开放研究实验室, 北京 100080)

王建明 吴星

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

吴柏昌 陈创天

(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

(1998 年 6 月 18 日收到)

报道了激光二极管抽运的 Nd:YVO₄ 晶体 1342 和 671 nm 激光特性. 1342 nm 激光最大输出功率为 1.75 W, 光-光转换效率为 32.1%, 斜效率为 43%. 利用 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体腔内倍频, 当输入抽运功率为 6 W 时, 获得功率为 502 mW 的 671 nm 激光输出, 光-光转换效率超过 8.3%; 当 671 nm 激光输出功率为 400 mW 时, 短期的不稳定性小于 2%.

PACC: 4255R

1 引言

1.3 μm 区域激光由于与硅光纤传输窗口符合而有非常广泛的应用前景, 作为中红外光参量激光器的抽运源较 1.06 μm 将更为有效; 由于全固态激光器具有效率高、结构简单、稳定、寿命长等优点, 其倍频的高功率全固态红光激光器也必将在很大程度上替代价格昂贵、效率低、设备复杂的氦离子激光器, 并可应用于彩色显示、医学等领域.

近几年, Nd:YVO₄ 晶体相对于常用的 Nd:YAG 晶体, 由于具有发射截面大、吸收带宽、输出为线偏振等优点, 成为激光二极管(Laser diode, 简称为 LD)抽运的固体激光器中研究最多的激光晶体之一. 其研究工作, 主要集中于 1.06 μm 这一谱线及其倍频的 0.53 μm^[1-3], 对于 1.34 μm 这条谱线研究较少^[4-6], 且主要是小功率抽运, 大功率抽运则少见报道. 但对 Nd:YVO₄ 晶体, 在 1.34 μm 处的发射截面仍是较大的. 文献报道^[7]为 $(6 \pm 1.8) \times 10^{-19}$ cm², 且其 1.34 μm 谱线与 1.06 μm 谱线的分支比为 0.24, 大于 Nd:YAG 晶体的 0.18^[8], 其发射截面寿命积也较 Nd:YAG 晶体的大得多.

* 国家高技术研究发展计划(批准号:863-715-001-00)资助的课题.

连续光倍频,其转换效率与基频光的功率密度、倍频晶体的非线性系数、倍频晶体的长度、倍频晶体中基频光和倍频光的走离角等因素有关.采用腔内倍频将因腔内高的基频光功率密度而提高倍频转换效率;另外, $1.3\ \mu\text{m}$ 接近 LBO 晶体的非临界相位匹配(NCPM)点,采用温度匹配方式,可以实现非临界相位匹配.因此我们采用了 I 类非临界相位匹配的 LBO 晶体进行腔内倍频.

2 基频光输出特性

实验装置如图 1(a)所示,采用普通的平-凹腔结构.其中作为抽运源的激光二极管,是美国 SDL 公司出品的光纤输出模块,型号 SDL-3450-p5,光纤输出口径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.4,室温下中心波长为 $806\ \text{nm}$,峰值波长随温度变化系数为 $0.3\ \text{nm}/^\circ\text{C}$,最大耦合输出功率为 $10\ \text{W}$,用国产的 HX-10555 恒温循环器进行温控.

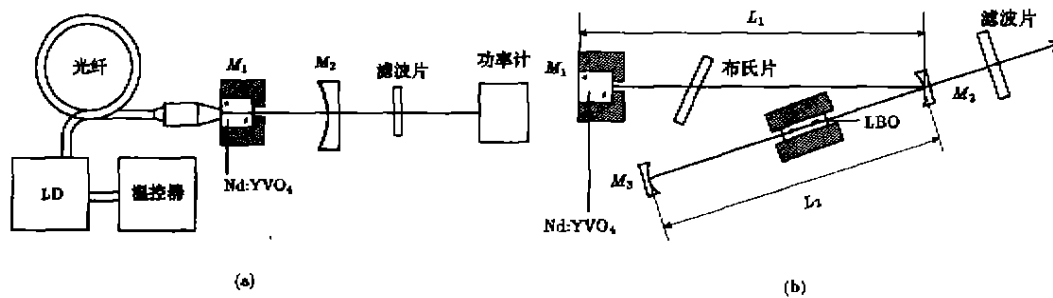


图 1 LD 抽运 Nd:YVO₄ 激光器及腔内倍频的实验装置示意图

为减小激光器运行过程中热效应,我们采用了特殊设计的准直耦合系统.光纤输出的抽运光束经该准直耦合系统后,光斑放大约 1.5 倍,即打在 Nd:YVO₄ 晶体上的抽运光斑直径约为 $600\ \mu\text{m}$.这样一方面减小了抽运光束发散角,另一方面也使得抽运功率密度远小于 Nd:YVO₄ 晶体的光伤阈值^[5],该系统的耦合效率约 83%.激光谐振腔采用简单的平凹腔结构,在激光腔设计过程中,设计激光腔使抽运光束腰远大于腔模束腰,使得在腔模中 Nd:YVO₄ 晶体因受热比较均匀而减小热效应的影响^[9].鉴于此,我们设计腔长约 $50\ \text{mm}$,相应的抽运光斑半径约 $300\ \mu\text{m}$,腔模束腰约 $150\ \mu\text{m}$,基本符合上述要求.

Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$, a 轴切割,通光长度为 $5\ \text{mm}$,Nd 离子掺杂浓度约 1%.一端面镀 $1342\ \text{nm}$ 高反膜(反射率大于 99%)和 $808\ \text{nm}$ 增透膜(透过率大于 90%),同时对 $1064\ \text{nm}$ 波长的透过率大于 60%,作为一面腔镜(M_1)使用;另一端面镀 $1342\ \text{nm}$ 的增透膜(透过率大于 99%).在激光器运行过程中,Nd:YVO₄ 晶体利用循环水冷却.输出腔镜(M_2)对 $1342\ \text{nm}$ 的透过率为 $T = 5\%$,曲率半径皆为 $100\ \text{mm}$,对 $1064\ \text{nm}$ 的透过率大于 90%.

实验中,控制 LD 模块的温度使其发射中心波长与 Nd:YVO₄ 晶体吸收峰重合以最大限度的提高抽运效率.我们对激光器的输入-输出特性进行了测量,利用滤波片滤掉剩余

的 808 nm 抽运光,结果如图 2 所示.在抽运功率为 5.45 W 时,得到 1.34 μm 激光输出最大功率达 1.75 W,激光器的斜效率达到 43%,光-光转换效率为 32.1%,就我们所知,这一结果达到了目前文献报道的最好水平^[4,5].激光器阈值约为 1.2 W.

如前所述,为了减小 Nd:YVO₄ 晶体的热效应,我们设计的抽运光斑半径比较大,约为 300 μm ,这是造成激光器阈值比较高的主要原因.激光输出为一圆形光斑,用一维针孔探测器在距离激光器约为 1 m 处在水平方向上进行一维针孔扫描测量,证明为 TEM₀₀ 模.对激光器的稳定性进行了测量,当激光输出功率为 1.4 W 时,对激光器进行了 30 min 连续监测,输出功率的不稳定性小于 2%.

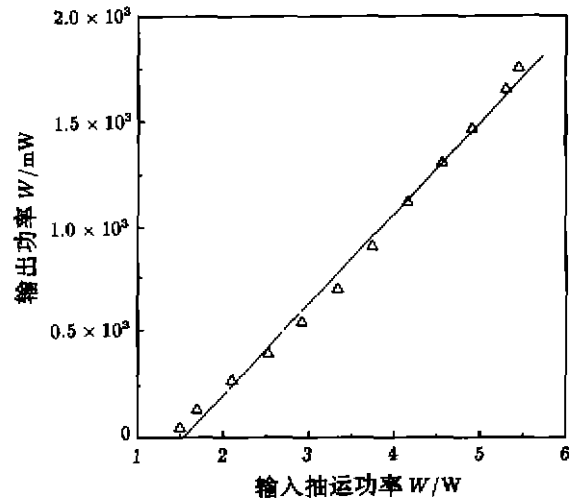


图 2 1342 nm 激光的输入-输出关系

3 LBO 晶体 I 类 NCPM 腔内倍频

本实验采用装置如图 1(b)所示,为三镜折叠腔结构.其中 LD, Nd:YVO₄ 晶体(其一端面作为一面腔镜使用)及聚焦耦合系统与图 1(a)同.腔镜 M_2, M_3 皆为平-凹镜,其凹面曲率半径皆为 100 mm,其中 M_2 镀有对 1342 nm 高反(大于 99.5%)和 671 nm 增透(大于 85%)双色介质膜,作为 671 nm 激光的输出镜,镜 M_3 对 1342 和 671 nm 双高反(大于 99.5%).LBO 晶体切割方向沿 x 轴,尺寸 3 mm \times 3 mm \times 14 mm,通光长度为 14 mm,两端镀有 1342 和 671 nm 双色增透膜,置于紫铜夹具内,由半导体制冷器制冷.在激光器工作时,LBO 晶体置于腔镜 M_2 和 M_3 之间的束腰处(距 M_2 约为 60 mm).折叠腔的两个臂长分别为 $L_1 \approx 200$ mm, $L_2 \approx 160$ mm.测量时利用滤波片滤掉基频光.

室温下,首先在注入抽运功率较小且不加 LBO 晶体时,调节好谐振腔,此时在倍频光的输出方向上漏出一部分基频 1342 nm 激光;加入 LBO 晶体后,通过仔细调节,可直接得到微弱的红光输出.对 LBO 晶体进行制冷,逐渐降低其温度,在由室温降至 5.4 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中,可以看到红光输出在经过两次较小的波动后达到最大值.进一步降低晶体温度,倍频光的输出将逐步减小.

与理论计算^[10]比较,可以看出存在大的差别:实验测得非临界相位匹配温度为 5.4 $^{\circ}\text{C}$,低于理论计算的 14 $^{\circ}\text{C}$.根据具体的实验条件,我们认为造成这些差别的原因主要有以下几点:1)温度检控点为 LBO 晶体的紫铜夹具;2)LBO 晶体本身温度不均匀,因为 LBO 晶体处基频光的功率密度非常高(10^5 — 10^6 W/cm^2),使得 LBO 晶体通光中心位置与晶体表面的温度差别比较大;3)在降温的过程中,LBO 晶体的温度滞后于紫铜夹具的温

度,这使得夹具的温度难以与 LBO 晶体的温度同步.

在温度匹配点处, LBO 晶体夹具的温度变化 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 671 nm 激光输出变化(与峰值比较)小于 5%,这说明 LBO 晶体在 I 类非临界相位温度匹配点附近,对温度的控制精度要求并不苛刻.

维持晶体夹具温度稳定在 $5.4\text{ }^\circ\text{C}$, 改变抽运功率,得到 671 nm 激光器的输入-输出关系,如图 3 所示,图 3 中实线为二次拟合

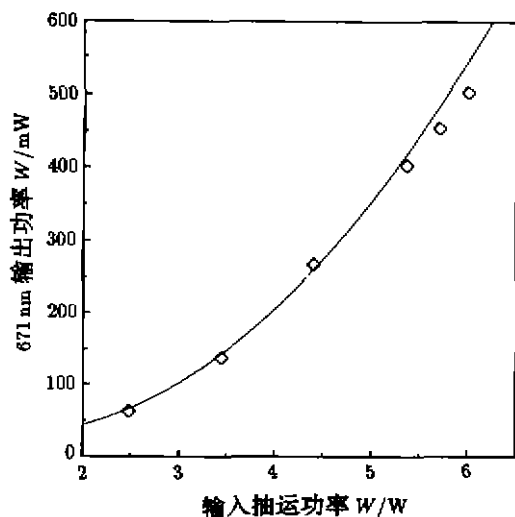


图 3 671 nm 激光输入-输出关系

曲线,如图 3 所示,图 3 中实线为二次拟合曲线,空心方块为 LBO 晶体 I 类 NCPM 腔内倍频的实验点.可以看出,当输入抽运功率为 6 W 时,得到 671 nm 的最大输出功率为 502 mW ,光-光转换效率超过 8.3% .此时,输出镜漏出基频光功率约为 100 mW .另外,在输出镜的另一方向上(Nd:YVO_4 晶体与镜 M_2 的直线方向上), 671 nm 的输出功率超过 30 mW ,计及此,则红光输出功率超过 530 mW .进一步提高腔镜对 1342 nm 反射率,输出镜对 671 nm 的透过率,必将进一步提高 671 nm 激光的输出功率.输出激光光斑中心为一亮的圆斑,四周有杂散光,这些杂散光主要是由于 671 nm 激光在腔内多

次反射造成的.降低抽运光功率,可得到激光器的阈值抽运功率约为 1.2 W .由于 LBO 晶体潮解,为避免低温下晶体表面结雾,我们没有对激光器的长期稳定性进行检测. 3 min 时间内,在输出功率为 400 mW 时, 671 nm 的输出不稳定性小于 2% .

分析图 3 中实验点与理论拟合曲线,可以发现当输入抽运功率较小时,实验值与理论拟合值非常符合,当输入抽运功率高于 4.5 W 时,实验值偏离了理论拟合曲线,且随着抽运功率的增加,实验值与理论拟合曲线的偏差也加大.我们认为这是由于 Nd:YVO_4 晶体的热透镜效应造成的.根据稳定腔往返矩阵理论并将 Nd:YVO_4 晶体等效为一屈光度为 D (屈光度 D 与抽运功率近似成正比关系^[11])的薄透镜进行数值计算,得到对应于不同屈光度($D=0.1, 2, 4, 6$)时腔镜 M_2, M_3 之间的腔模大小与位置的关系,见图 4.从图 4 中可以看出,对应于不同的屈光度,腔镜 M_2, M_3 之间的腔模束腰位置和大小略有不同,即随着 D 的增加(相应于输入抽运功率的增加),束腰将增加,其位置亦将向镜 M_2 方向移动.所以,当抽运功率较小(D 较小)时,镜 M_2, M_3 之间的腔模束腰恰好位于 LBO 晶体的中间位置,倍频效率最高,因而与理论拟合曲线符合得较好;但是随着抽运功率的增加, Nd:YVO_4 晶体的热透镜效应加剧,使得腔内模式发生变化,束腰变大,且偏离了 LBO 晶体的中间位置,使得倍频效率减小, 671 nm 激光输出偏小于理论值,从而偏离了理论拟合曲线.

比较利用 KTP 晶体 II 类临界相位匹配进行腔内倍频的结果^[6](当输入抽运功率为 5.5 W 时, 671 nm 激光输出功率为 273 mW ,光-光转换效率约为 5%).可以看出,利用 I

类非临界相位匹配 LBO 腔内倍频 1342 nm 比利用 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体的倍频效率和最大红光输出都高得多. 我们认为主要原因是当倍频 1342 nm 时, KTP 晶体中的走离角很大, 为 2.54° ^[9]; 若 KTP 晶体处基频光束腰为 $50 \mu\text{m}$, 那么 KTP 晶体的有效作用长度仅为 2.28 mm (基频光的束腰太大, 将大大降低倍频效率, 因为在小信号情况下倍频效率与基频光的功率密度平方成正比). 而对非临界相位匹配的 LBO 晶体而言, 理论上有效作用长度为无穷大, 因为不存在走离效应. 当然这并不是说 LBO 晶体越长越好, 此时腔模的共焦长度将成为限制 LBO 晶体长度的主要因素. 共焦长度为 $L_f = \pi z_0$ (其中 $z_0 = \pi \omega^2 / \lambda$, ω 为非线性晶体处基频光束腰, λ 为基频光

波长), 在基频光束腰约为 $50 \mu\text{m}$ 时, 共焦长度为 18.2 mm. 另外, 在倍频时, 由于 LBO 晶体为 I 类非临界相位匹配, 基频光沿 LBO 晶体主轴传播, 多次通过将不改变基频光的偏振态; 利用 KTP 晶体 II 类临界相位匹配, 由于 KTP 晶体的双折射效应 (包括由于 KTP 晶体对基频光的吸收造成的热致双折射), 基频光多次通过后, 基频光的偏振态将会发生一定程度的改变, 从而造成倍频光输出功率的波动^[12,13], 因此在抽运倍频光的输出稳定性上利用 LBO 晶体 I 类非临界相位匹配优于 KTP 晶体 II 类临界相位匹配.

4 结 论

研究了 Nd:YVO₄ 晶体 1342 nm 的激光输出特性, 在输入抽运功率为 5.45 W 时, 得到最大输出功率为 1.75 W, 光-光转换效率为 32.1%, 斜效率为 43%. 利用 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体腔内倍频, 当输入抽运功率为 6 W 时, 获得功率为 502 mW 的 671 nm 激光输出, 光-光转换效率约为 8.3%. 在温度匹配点处温度波动为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 时, 对 671 nm 激光输出影响小于 5%, 这说明 LBO 晶体在 I 类非临界相位温度匹配点附近, 对温度的控制精度要求并不苛刻. 对比利用 KTP 晶体腔内倍频的结果, 其倍频效率和最大 671 nm 激光输出以及稳定性都有一定的提高.

感谢吴令安教授、孔羽飞博士、徐瑶副研究员的有益讨论.

[1] R. Scheps, J. F. Myers, G. Mizell, *Appl. Opt.*, 33(1994), 5546.

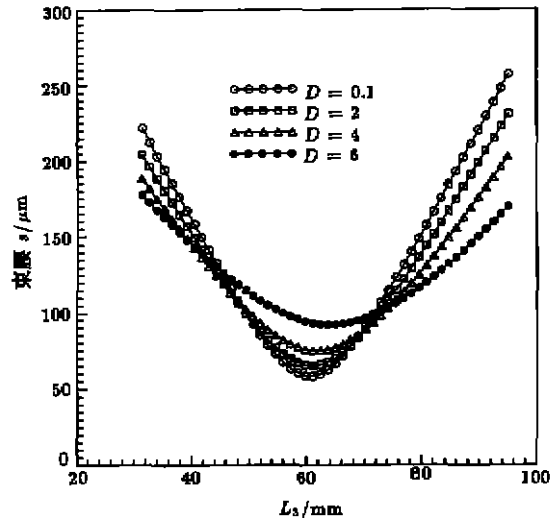


图 4 Nd:YVO₄ 晶体等效为薄透镜时, 在不同屈光度下腔镜 M₂, M₃ 之间束腰的位置与束腰大小的变化关系 (L_s 为计算取值点至 M₂ 的距离)