

文章编号: 1001-4322(2002)02-0181-04

LD 端面泵浦 Nd:YLF 激光放大器研究^{*}

秦兴武, 陈良明, 李明中, 罗亦鸣, 隋展, 丁磊, 梁樾, 赵润昌

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

摘 要: 描述了对高功率LD 端面泵浦Nd:YLF 激光放大器的研究。放大器的耦合结构采用微透镜对泵浦光进行准直, 透镜导管(lensduct)对其汇聚, 耦合效率达72.2%。用该放大器构成的振荡器的斜效率为35.9%。该激光放大器的口径为 $\phi 0$ mm, 在1053nm 处具有2.66的小信号增益。

关键词: 激光放大器; LD 泵浦; 泵浦耦合; 微透镜

中图分类号: O562.5

文献标识码: A

激光二极管泵浦的固体激光器有着比氙灯泵浦的固体激光器工作稳定、光束质量好、效率更高、重复频率高和结构更紧凑^[1]的特点。Nd:YLF 晶体具有较长的荧光寿命^[2], 比较适合于用功率受限型泵浦源LD 进行泵浦, 可充分发挥激光二极管的潜力。由于激光二极管发出的光具有很大的发散角, 在端面泵浦方式下, 需对其进行高效率的准直和汇聚。国内主要采用透镜组、光纤耦合、透镜光导和自聚焦微透镜等耦合方式, 存在结构复杂、效率不高等缺点。国外LLNL 实验室^[3]曾采用微透镜、透镜导管和均匀器作为放大器的耦合结构, 已应用于“Mercury”激光系统工程。

本文就LD 泵浦Nd:YLF 激光放大器进行了研究, 利用微透镜对泵浦光快轴方向进行准直, 使快轴方向的发散角与慢轴方向的发散角相同或更小, 将发散的椭圆高斯光束变成近似圆高斯光束, 再利用lensduct(透镜导管)对泵浦光汇聚, 经匀束器注入介质中, 构成端面泵浦结构的放大器。

1 放大原理和耦合结构设计

1.1 脉冲放大原理

一般假设放大器作用时间比泵浦速率和自发发射时间短, 放大过程是以输入信号到达之前能量就储存在激光上能级为基础的。当输入脉冲通过工作物质时, 原子被激发而释放出所储存的能量。根据速率方程, 在忽略脉冲持续时间内荧光和泵浦的影响情况下, 可得到粒子数反转为

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma n c \phi \quad (1)$$

式中: n 为反转粒子数; ϕ 为光子通量; σ 为受激发射截面; c 为光速; $\gamma = 1 + g_2/g_1$, 其中 g_1 和 g_2 是能级简并度。

当脉冲通过具有粒子数反转的介质时, 其辐射脉冲的增长由一个非线性的与时间有依赖关系的光子传输方程

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c n \sigma \phi - c \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

来描述, 此方程说明辐射对激活介质的影响, 反之亦然。

1.2 耦合结构设计

激光二极管发出的光是椭圆高斯光束, 因而在端面泵浦过程中, 需要将其光束进行准直并有效地耦合到工作介质中去。因此, 设计了一个耦合系统, 其结构简图如图1, 采用微透镜对二极管快轴方向的发散角压缩至10°或10°以下, 使椭圆高斯光束变成近似圆高斯光束。由于经过准直后的泵浦光截面比工作物质截面大很多, 需对泵浦光的截面进行压缩, 采用lensduct 对其汇聚, 再经过匀束器匀滑后耦合到

^{*} 收稿日期: 2001-10-26; 修订日期: 2001-12-18

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金资助课题

作者简介: 秦兴武(1973-), 男, 研究实习员, 主要从事高功率激光技术研究工作; 绵阳 919-988 信箱。

介质中。

1.2.1 微透镜的设计

为将二极管泵浦光快轴方向的发散角压缩到与慢轴方向相当或更小,采用微透镜来实现。为使平行光无球差地聚焦于焦点处,按照等光程的原理,如图 2(a)所示,可得方程

$$n_2 f = n_1 x + n_2 \sqrt{(f-x)^2 + y^2} \quad (3)$$

将公式(3)变形为标准形式

$$(x-a)^2/a^2 + y^2/b^2 = 1 \quad (4)$$

其中

$$a^2 = [f n_2 / (n_1 + n_2)]^2 \quad (5)$$

$$b^2 = f^2 [\pm \Delta n / (n_2 + n_1)] \quad (6)$$

$$\Delta n \equiv n_2 - n_1 \quad (7)$$

离心率

$$e = \sqrt{1 - b^2/a^2} = n_1/n_2 \quad (8)$$

这里等式(6)和(8)上下的符号分别代表 $n_1 < n_2$, $n_1 > n_2$ 。当 $n_1 < n_2$ 时,光学面为椭圆面(图 2(b));当 $n_1 > n_2$ 时,光学面为双曲面(图 2(c))。由等式(5)和(8)可得两种柱透镜的焦距为

$$f = a[(n_2 + n_1)/n_2] = a + ea \quad (9)$$

对于椭圆面式的微透镜,当其口径为 $2b$ 时,理论上其数值孔径为:

$$D_{\text{ell}} = n_2(b/a) = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (10)$$

在空气中时

$$D_{\text{ell}} = \sqrt{n^2 - 1} \quad (11)$$

式中: n 为透镜所采用材料的折射率。

对于双曲面式的微透镜,当其口径为无限宽时,理论上其数值孔径为

$$D_{\text{hyp}} = n_2(b/2a) = n_2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2/n_1} \quad (12)$$

在空气中时

$$D_{\text{hyp}} = \sqrt{n^2 - 1}/n \quad (13)$$

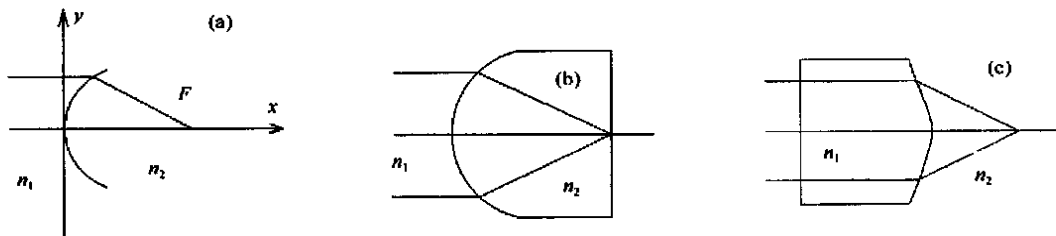


Fig 2 Coordinate and focus principle of micro-lens

图 2 所选坐标系及微透镜的聚焦的原理图

在设计过程中,采用了图 2(b)所示的结构,设计结果为,对 $n = 1.453$ 的材料,口径为 $200\mu\text{m}$,曲率半径为 $105\mu\text{m}$,轴向厚度为 $137\mu\text{m}$,数值孔径为 0.765,反射损失为 6.8%;对 $n = 1.806$ 的材料,口径为 $230\mu\text{m}$,曲率半径为 $135\mu\text{m}$,轴向厚度为 $205.7\mu\text{m}$,数值孔径为 0.833,反射损失为 16.6%。在实际应用中,经综合考虑数值孔径和剩余反射率后,采用 $n = 1.453$ 的材料。

1.2.2 lensduct 的设计

lensduct 的设计主要考虑它的传输效率和对泵浦功率密度的要求。根据传输效率, lensduct 的大端

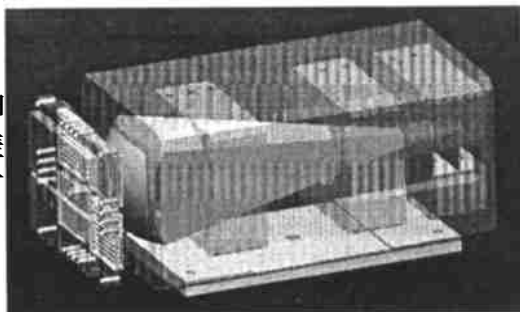


Fig 1 Structure of laser amplifier

图 1 激光放大器结构简图

口径 H 与 r 需相当, 由公式^[4]

$$l = 0.92 \frac{n}{n - 1} r$$

(14)

得到 lensduct 的长度, 小端口径 h 由泵浦功率密度来决定。式中 l 是其全长, n 为其折射率, r 是大端面的曲率半径, 两个方向宽度相同, 而小端是正方形面, 具体情况如图 3 所示。

对 $n = 1.52$ 的材料, 根据泵浦源的泵浦光的面积, H 为 40mm, 曲率半径 R 为 40mm, l 为 107.6mm, h 为 5mm, 从二极管发出的光功率密度为 $1\text{kW}/\text{cm}^2$, 经过 lensduct 后功率密度约为 $16\text{kW}/\text{cm}^2$, 功率密度的缩束比为 16: 1。

2 实验研究

微透镜对二极管泵浦光准直的结果为: 把快轴方向由 40 减小为 10 以下, 基本上与慢轴方向的发散角相同。经过准直后, 用 lensduct 对准直后的泵浦光汇聚, 实验测得的耦合效率为 72.2%。将该放大器用于激光振荡器中, 在输出耦合镜的透过率为 20% 时, 测量了激光振荡器在不同泵浦电流下的输出能量, 如图 4 所示。其光光转换效率为 24.2%, 斜效率达到了 35.9%。采用行波放大, 注入脉冲在介质中以“V”字形通过, 其光路简图如图 5 所示。实验测量了放大器在不同泵浦电流下的小信号增益, 结果如图 6 所示。在泵浦电流为 80A 时, 放大器的单程增益为 2.66。

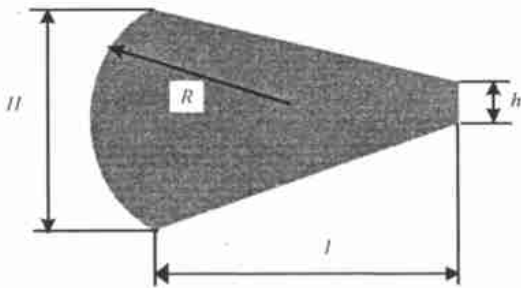


Fig 3 Structure of lensduct
图 3 lensduct 结构简图

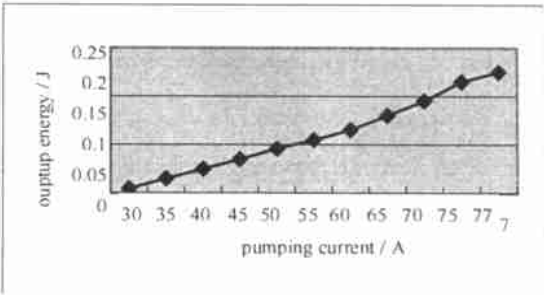


Fig 4 Output energy versus pumping current
图 4 泵浦电流与输出能量曲线

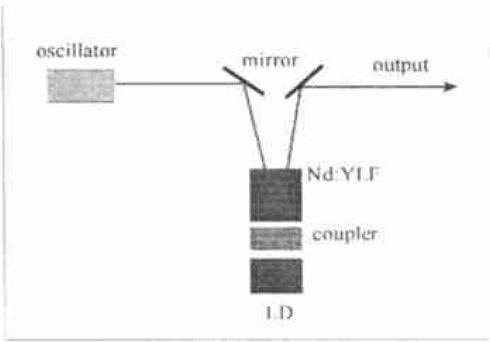


Fig 5 Optics schematic of laser amplification
图 5 放大结构示意图

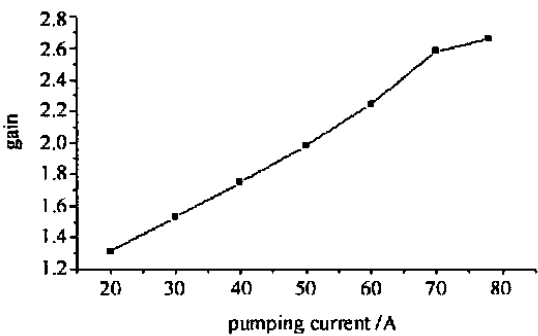


Fig 6 Laser head gain ve pumping current
图 6 放大器增益与泵浦电流关系

3 结 论

本文通过对 LD 端面泵浦 Nd: YLF 激光放大器的研究, 实验结果表明: 微透镜将激光二极管快轴方向的发散角减小到与慢轴方向的发散角相当, 有效地将泵浦光进行了准直; lensduct 在提高泵浦功率密度和传输效率方面有好的效果。在对微透镜材料的选取时, 不仅要考虑材料具有较大的数值孔径, 而且也应充分考虑材料的反射损失, 选取 n 为 1.453 的材料比较合适。这样的耦合结构在大功率 LD 端面

泵浦中具有比较好的效果。

参考文献

- [1] 戴特力. 半导体二极管泵浦固体激光器[M]. 成都: 四川大学出版社, 1993 (Dai T L. Semiconductor diode pumped solid-state laser. Chengdu: Sichuan University Press, 1993)
- [2] Koechner D W. Solid state laser engineering[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [3] Orth C, Beach R, Bibeau C, et al. Design modeling of the 100-J diode-pumped-solid-state laser for project mercury[R]. SPIE International Symposium on High-Power Laser and Applications, 1998
- [4] Beach R J. Theory and optimization of lens ducts[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(12): 2005—2014
- [5] 王卫民, 罗斌, 高清松, 等. LD 侧面泵浦 Nd: YAG 板条双程功率放大器初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(3): 292—294 (Wang W M, Luo B, Gao Q S, et al. Study on LD side-pumped Nd: YAG slab double-pass amplifier. *High power laser and particle beams*, 2001, **13**(3): 292—294)
- [6] Waston E A. Analysis of beam steering with decentered microhens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(11): 2665—2670
- [7] James R. Leger, Member, William C. Goltso. Geometrical transformation of linear diode-laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers[J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1991, **28**(4): 1088—1100
- [8] Song J, Liu A P, Shen D Y, et al. High optical-to-optical efficiency of LD pumped CW Nd: YAG laser under pumping distribution control [J]. *Appl Phys*, 1998, **B66**: 539—542
- [9] Pollnau M, Luthy W, Jensen T, et al. Investigation of diode-pumped 2.8μm laser performance in Er:BaY2F8[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(1): 48—50
- [10] Bowman S R, Lynn J G, Searles S K, et al. High-average-power operation of a Q-switched diode-pumped holmium laser[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(20): 1724—1726
- [11] Bibeau C, Bass I L, Beach R J, et al. Performance of a Q-switched Yb: Sr₅(PO₄)₃F laser[R]. 1996 OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers

Study on laser-diode-end-pumped Nd: YLF laser amplifier

Q N Xingwu, CHEN Liangming, LIM ing-zhong, LUO Yiming,

SU I Zhan, D N G Lei, L AN G Yue, ZHAO Run-chang

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,

P. O. Box 919-988, Sichuan Mianyang 621900, China)

Abstract The study on high power laser diode arrays end-pumping Nd: YLF laser amplifier is discussed in this paper. The amplifier's coupling structure includes a micro lens which collimates the pumping light and a lens duct which focuses it into the laser rod. Its coupling efficiency is up to 72.2%. The slope efficiency of the laser oscillator composed by the amplifier is 35.9%. A small signal gain of 2.66 is obtained at 1053nm.

Key words laser-amplifier; LD-pumped; pumping-coupling; micro lens