

文章编号: 0258-7025(2002)11-0961-04

$M^2 \leq 1.14$ 的 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器

吴海生, 闫平, 巩马理, 柳强, 刘敏, 谢韬

(清华大学精密仪器系数字光电与激光技术实验室, 北京 100084)

提要 采用国产 1 W 的 InGaAs 激光二极管(LD)掺杂浓度为 10 at.-% 的 Yb:YAG 微晶片($\phi 5 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$)室温下获得了输出功率 91.5 mW, 波长 1.049 μm 的基模激光连续输出, 光束质量 $M^2 \leq 1.14$, 斜率效率为 30%。在晶体制冷情况下, 获得了 111 mW 的激光输出, 斜率效率达 40%。

关键词 Yb:YAG 晶体, 光束质量, LD 抽运固体激光器

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

$M^2 \leq 1.14$ Diode-pumped Yb:YAG Microchip Laser

WU Hai-sheng, YAN Ping, GONG Ma-li, LIU Qiang, LIU Min, XIE Tao

(Digital Photonics Lab, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A diode-pumped Yb:YAG microchip laser with good beam quality was presented. At room temperature, 91.5 mW output power at 1.049 μm was obtained with 10 at.-% doped Yb:YAG microchip crystal and 1 W InGaAs diode. The slope efficiency was about 30%. The M^2 values were found to be 1.14 and 1.07 in the vertical and horizontal directions respectively. When the crystal was cooled, 111 mW output power and 40% slope efficiency were obtained.

Key words Yb:YAG crystal, beam quality, DPSSL

1 引 言

从 90 年代以来,随着高功率 InGaAs 激光二极管(LD)性能的不断改善,具有准三能级结构的 Yb:YAG 激光器得到了迅速发展。因 Yb:YAG 晶体具有宽的吸收带宽(约 18 nm),长的上能级寿命(0.950 ms)等优良的光谱和热力学性能,当使用 InGaAs 激光二极管作为 Yb:YAG 激光器抽运源时,可延长储能时间,而且 940 nm InGaAs 二极管性能比 808 nm AlGaAs 二极管性能更加稳定,从而使其寿命提高了 2 倍左右。同时, Yb:YAG 晶体具有量子效率高、热承载小、不存在激发态吸收和上转换、高掺杂而不发生浓度猝灭等特点,已成为高功率高亮度激光器中的首选材料,目前已经获得了千瓦级激光输出^[1-3]。作为高掺杂的材料,有利于减小晶体厚度,制成微型激光器,实现 LD 抽运的固体激光器(DPSSL)微型化和集成化。因此 LD 抽运的

Yb:YAG 固体激光器已成为当前固体激光领域一个新兴的研究方向。

目前,国外采用钛宝石和 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器已有很多报道^[4-6],同时可调谐的激光器也已经实现^[7];而在国内这方面的报道还很少^[8]。我们采用国产 LD 和 Yb:YAG 晶体实现了室温下具有高光束质量的 1.049 μm 的基模激光连续输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为 1 W 的 InGaAs 激光二极管,电源采用具有高精度温控电路的 SDL-820 电源,抽运光经过两个焦距为 9.8 mm 的透镜耦合,约 76%抽运光聚焦于 Yb:YAG 晶体上。激光腔采用平凹腔,腔长为 25 mm,晶体前表面作为平面反射镜,输出耦合镜曲率半径为 49.6 mm,透过

收稿日期: 2001-08-20; 收到修改稿日期: 2001-11-06

作者简介: 吴海生(1974.8—)男,清华大学精密仪器与机械学系在读博士生,主要从事光学设计及激光器件方面的研究。

E-mail: wuhs@post.pim.tsinghua.edu.cn

率为 2.3%。晶体前表面对 940 nm 抽运光镀增透膜,透过率为 92.04%,对 1030 nm 镀高反膜,反射率为 99.83%,后表面对 940 nm 抽运光镀高反膜,反射率为 99.17%,对 1030 nm 镀增透膜,反射率为 94.53%。Yb:YAG 晶体掺杂浓度为 10at.-%,采用导热性很好的黄铜作为晶体装夹元件,其外壳采用

半导体制冷器制冷,以控制晶体的温度。实验中采用了 Molelectron Detector 公司 EPM2000 型功率计,美国 Spiricon 公司 PC 激光光束分析仪和 M²-200 光束传输分析仪以及 Burleigh Instruments 公司 WA-4000 型波长计分别对激光输出功率、激光强度分布、激光光束质量以及输出激光波长进行了测量。

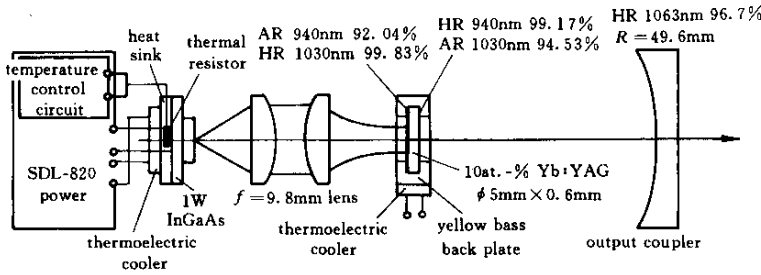


图1 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器结构示意图

Fig.1 Schematic of LD pumped Yb:YAG microchip laser

3 激光器抽运耦合系统

对于 Yb:YAG 准三能级激光器,抽运光经耦合系统后,在激光晶体表面的抽运功率密度要高于所需最小抽运功率密度,这是设计耦合系统的基本判据。

要使晶体透明,参与激光辐射的上下能级粒子数密度至少应相等,即

$$f_b n_U = f_a n_L \quad (1)$$

其中 f_b 为激光上能级参与激光辐射的斯塔克能级粒子数密度占上能级粒子密度的百分比, n_U 为上能级粒子数密度, f_a 为激光下能级参与激光辐射的斯塔克能级粒子数密度占下能级粒子数密度的百分比, n_L 为下能级粒子数密度,因此所需最小抽运功率密度 ρ_p 为

$$\rho_p = n_U h\nu_p / \tau_f \quad (2)$$

式中 ν_p 为抽运光频率, τ_f 为上能级寿命。由于掺杂浓度 n_d 是晶体常用的参数,由 $n_d = n_U + n_L$ (2)式可改写为

$$\rho_p = n_d h\nu_p f_a (f_a + f_b) \tau_f \quad (3)$$

实验中 $n_d = 1.38 \times 10^{21}$ ions/cm³,上能级寿命 $\tau_f = 0.95$ ms,常温下若输出激光为 1.029 μ m, $f_a = 0.046$, $f_b = 0.772$,所需最小抽运功率密度 $\rho_p = 17.2$ kW/cm³;若输出激光为 1.048 μ m,则 $f_a = 0.020$, $f_b = 0.772$,其所需最小抽运功率密度 $\rho_p = 7.7$ kW/cm³,可见在抽运功率密度较小的情况下,1.048 μ m 的激光更容易起振。

本实验中,根据 LD 发光尺寸 100 μ m \times 1 μ m,采用放大倍率为 1 的耦合系统。但由于实际耦合系统中光学元件引入像差等因素的影响,实际所得光斑直径要大于 100 μ m。应用 Zemax 光学设计软件,采用焦距为 $f = 9.8$ mm, $R = 5.015$ mm 的两个平凸透镜构成耦合系统,所得晶体抽运面上光斑点列图如图 2 所示,图中反应光斑整体集中程度的 RMS 半径为 104.36 μ m,对应抽运功率密度为 22.2 kW/cm³,大于 1.048 μ m 振荡的最小功率密度 7.7 kW/cm³,因此满足设计使用要求,经实验测得实际耦合效率约为 76%(透镜表面未镀增透膜)。

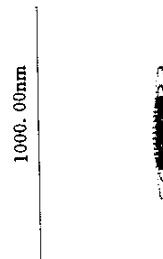


图2 耦合系统点列图

Fig.2 Spot diagram of coupling system

4 实验结果与讨论

4.1 LD 温度控制

要使 LD 发射谱(中心波长 943.8 nm)与 Yb:YAG 941 nm 处强吸收峰相匹配,必须控制 LD 的工作温度,经测定 LD 需工作在 20℃。当 LD 电流为

1.6 A 时,LD 波长随温度漂移的变化曲线如图 3(a) 所示,激光输出功率随温度的变化如图 3(b)所示。两图表明,在 20℃ 时,LD 输出波长为 940.93 nm,此时 Yb:YAG 激光器获得最大输出功率。

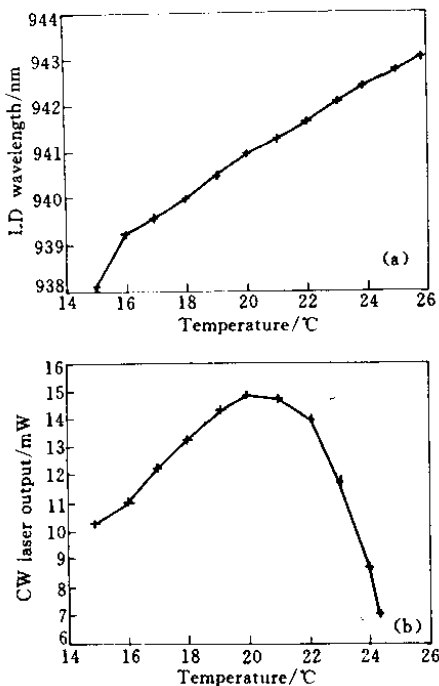


图 3 (a) LD 波长随温度的变化曲线;
 (b) Yb:YAG 激光输出功率随温度的变化曲线
 Fig.3 (a) Curve of LD wavelength vs temperature;
 (b) Curve of Yb:YAG laser output power vs temperature

4.2 输出功率

对于准三能级结构,晶体制冷可改变激光上下能级粒子数分布,降低阈值,提高激光输出功率。实验中在晶体制冷情况下,LD 电流为 2.05 A 时获得了 111 mW 的激光输出功率,斜率效率为 40%,如图 4(a)所示。但由于环境温度和晶体温度相差较大导致晶体表面积水,而晶体所镀膜系又较容易潮解,晶体表面膜层出现很多小瑕疵,影响了激光器性能,因此在晶体制冷情况下没有进一步找出最佳工作状态。在以后实验中,没有再对晶体温度进行控制,所有实验都是晶体处在室温下进行的。

室温下(25℃),采用 $T = 2.3\%$ 的输出耦合镜,获得了 91.5 mW 的激光输出,斜率效率为 30%,阈值为 300 mW 输入输出曲线见图 4(b)所示。通过 LD 电源精确的电流控制 ($\pm 0.1\%$) 和温度控制 ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) 激光输出功率稳定性在 $\pm 1\%$ (σ 值) 以内 (1 h 统计结果)。

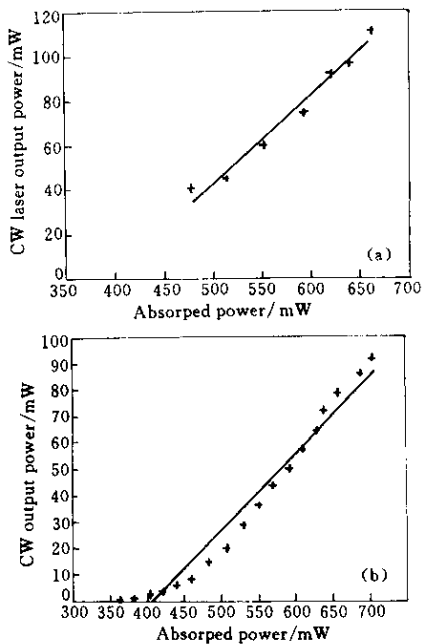


图 4 LD 抽运的 Yb:YAG 激光器输出功率与输入功率的关系
 (a) 晶体被冷却时 (b) 晶体未被冷却(室温下)时
 Fig.4 Output power vs input power for LD pumped Yb:YAG laser
 (a) crystal was cooled;
 (b) crystal was not cooled(at room temperature)

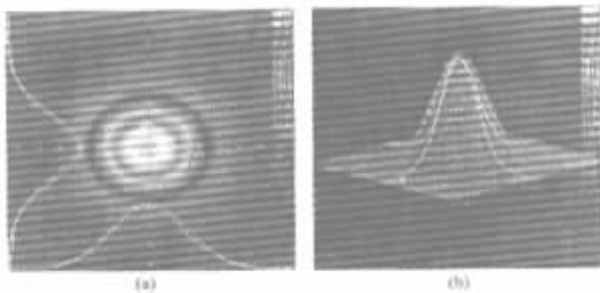


图 5 激光强度分布图
 (a) 二维 (b) 三维

Fig.5 Laser intensity distribution for (a) 2D, (b) 3D

4.3 光束质量

图 5 分别给出了激光光束的二维和三维光强分布图,可以看出激光光束的对称性很好,为基横模输出。图 6 给出了 M^2 -200 光束传输分析仪所测激光光束经焦距 $f = 500$ mm 的透镜后,其光束宽度和传输距离之间的曲线图,其中 XY 代表垂直于光轴的平面坐标, Z 轴原点为透镜后表面顶点。所测 M^2 在 X 方向(垂直)和 Y 方向(水平)的值: $M^2_X = 1.14$, $M^2_Y = 1.07$,进一步证实了输出激光具有极高

光束质量;输出激光 X 方向的束腰为 0.1524 mm , Y 方向束腰为 0.1469 mm ; X 方向发散角为 9.834 mrad , Y 方向的发散角为 9.576 mrad 。

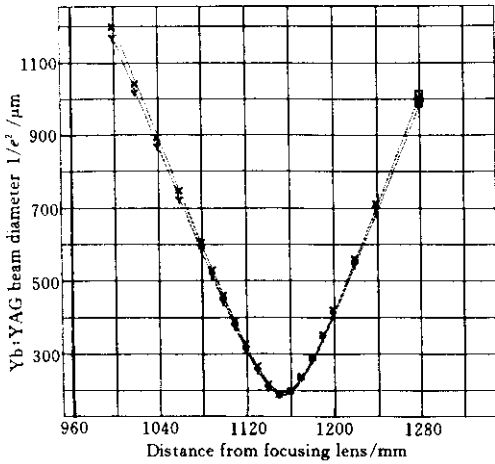


图6 X, Y 方向 Yb:YAG 激光光束直径 ($1/e^2$) 随离开聚焦透镜距离 (Z) 的关系

Fig. 6 Yb:YAG beam diameter in X and Y directions vs distance from focusing lens (Z)

4.4 输出波长

使用 WA-4000 型波长计所测激光光谱如图 7 所示, 激光峰值波长为 1049.3 nm 。目前文献记载, LD 抽运的 Yb:YAG 激光器输出波长为 1030 nm , 因此实验前反光膜是针对 1030 nm 镀膜的; 根据镀膜测试曲线, 反光膜在 $1020 \sim 1080 \text{ nm}$ 的范围内反射率非常接近。由于 1030 nm 光存在较强的自吸收以及抽运阈值高, 因此较 1049.3 nm 不易输出。

4.5 合作上转换

同时, 在实验中观察到了较强的绿色荧光, 根据一些文献^[9]推测, Yb:YAG 晶体中可能含有杂质 Ho^{3+} 离子, Yb^{3+} 和 Ho^{3+} 离子间有合作上转换发生。当采用 941 nm InGaAs 二极管抽运 Yb:YAG 晶体时, Yb^{3+} 离子首先由 ${}^2F_{7/2}$ 能级跃迁到 ${}^2F_{5/2}$ 能级, 处于 ${}^2F_{5/2}$ 能级的 Yb^{3+} 离子能量通过无辐射转移到 Ho^{3+} 离子的 5I_6 能级。当一个 Ho^{3+} 通过这种能量转移被激发到 5I_6 能级上时, 该离子继续吸收由 Yb^{3+} 离子转移来的能量或者邻近已处于 ${}^2F_{5/2}$ 能级 Yb^{3+} 离子能量, 使其再次向上跃迁到 5F_4 或 5S_2 能级, 最后向下跃迁到 5I_8 能级产生绿光发射。由于合作上转换的存在, 使得输出激光效率明显下降, 这也是目前无法实现高效激光输出的重要原因之一。

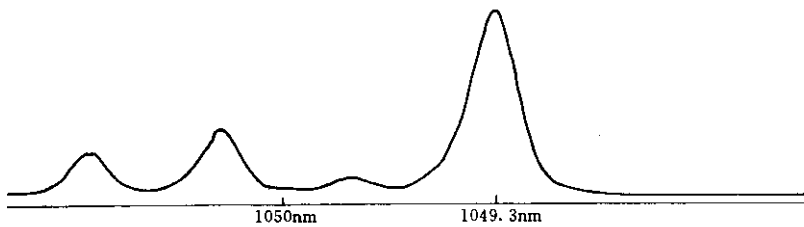


图7 Yb:YAG 激光光谱图

Fig. 7 Laser spectrum of LD pumped Yb:YAG laser

参 考 文 献

- 1 Christian Stewen, Karsten Contag, Mikhail Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(4):650 ~ 657
- 2 David S. Sumida, Alexander A. Betin, Hans Bruesselbach *et al.*. Diode-pumped Yb:YAG catches up with Nd:YAG [J]. *Laser Focus World*, 1999, **35**(6):63 ~ 70
- 3 R. J. Beach, E. C. Honea, S. B. Sutton *et al.*. High-average-power diode-pumped Yb:YAG lasers [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:246 ~ 260
- 4 P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1089 ~ 1091
- 5 T. Y. Fan, S. Klunk, G. Henein. Diode-pumped Q-switched Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6):423 ~ 425
- 6 U. Griebner, R. Grunwald, H. Schönengel. Thermally bonded Yb:YAG planar waveguide laser [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **164**:185 ~ 190
- 7 U. Brauch, A. Giesen, M. Karszowski *et al.*. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):713 ~ 715
- 8 Yang Peizhi, Deng Peizheng, Liu Yupu *et al.*. Efficient output of a Ti:sapphire laser-pumped Yb:YAG thin chip CW laser at $1.053 \mu\text{m}$ [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(10):865 ~ 868 (in Chinese)
- 9 Qi Changhong, Liu Chuangxin, Lin Fengying *et al.*. Upconversion luminescence of Ho^{3+} in Yb^{3+} - Ho^{3+} doped ZBLAN glasses [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(6):561 ~ 564 (in Chinese)