

激光二极管泵浦 Nd:FAP 激光器*

胡文涛 周复正 陈有明 刘 文 吴光照 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

陆 江 金振洪 黄肇明

(上海科技大学光纤技术研究所, 上海 201800)

摘 要 报道激光二极管泵浦的掺钕氟磷酸钙固体激光器。该器件在重复频率为 100 Hz 的准连续状态下运行, 当耦合输出透过率为 8% 时, 得到 31% 的斜效率。比较了 FAP 和 YAG 这两种介质的激光器的性能, 理论分析得出的两者的阈值泵浦功率的相对值与实验结果相一致, 并证实 FAP 是一种很有前途的适合激光二极管泵浦的激光介质。

关键词 激光二极管泵浦, 固体激光器, 晶体的光谱特性。

1 引 言

近年来以激光二极管作泵浦源的固体激光器取得惊人进展。早期的激光二极管泵浦的固体激光器研究主要以 YAG 为基质晶体, 尽管迄今它仍是应用得最为广泛的激光材料, 但其它介质如 GSGG、GGG、YLF、YVO₄ 等也相继出现, 并都具有一定的特色, 人们还在不断地寻求适合激光二极管泵浦的新材料。在这一研究领域中, 走在最前列的是利弗莫尔实验室, 1992 年, 利弗莫尔实验室的科学家们采用两个激光二极管面列阵从两个侧面泵浦一个 Nd:YAG 板条, 峰值泵浦功率为 8 kW, 占空比为 35%, 板条尺寸为 1.6×9×0.4 cm, 平均输出功率达 1050 W, 全光-光效率达 28%, 而整个激光头的尺寸仅为 15×15×10 cm^[1]。灯泵浦^[2,3]和染料激光泵浦^[4] Nd:FAP 晶体的 1.0629 μm 激光器已有过报道。而本文报道的是一种激光二极管泵浦的新材料——掺钕氟磷酸钙单晶, 并在自行生长出该晶体的基础上, 研制成激光二极管纵向泵浦的固体激光器。在本工作进行的过程中, 出现了激光二极管泵浦 FAP 激光输出的报道^[5], 其结果为: 当激光器的耦合输出镜的透射率为 1.2% 时, 泵浦阈值功率为 118 mW, 斜效率为 25%; 同时还报道了用 Cr:LiSAF 激光器作泵浦源的结果: 斜效率达 44% ($T = 1.2\%$), 而当 $T = 5\%$ 时, 斜效率可高达 67%, 证明 Nd:FAP 是一种高效的激光介质。

* 本课题得到国家自然科学基金资助。

** 本研究工作中所用的 Nd:FAP 晶体是由中国科学院上海光学精密机械研究所改进的引上法生长的。

收稿日期: 1994 年 1 月 7 日; 收到修改稿日期: 1994 年 3 月 23 日

2 晶体的光学和光谱特性

氟磷酸钙单晶(FAP)的化学式为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, 该晶体属六角晶系 $\text{P6}_3/\text{m}(\text{C}_6\text{h})^{2+}$ 。该晶体的密度为 3.2 g/cm^3 , 折射率为 1.634 (σ 光) 和 1.631 (e 光), 热导率为 0.02 W/cm/k , 这一数值约为 YAG 的 $1/3$ 。当掺杂浓度为 $1. \text{at}\%$ 时, FAP 单晶在室温下的荧光谱如图 1 所示^[5], 光谱曲线表明: 最强发射线在 $1.0629 \mu\text{m}$, 其 π 偏振的强度为 σ 偏振的 2.6 倍, 谱线宽度为 0.6 nm 。图 2 是 Nd:FAP 中 Nd^{3+} 离子能级结构简图。由于晶格场结构的对称性, 使得 Nd^{3+} 离子

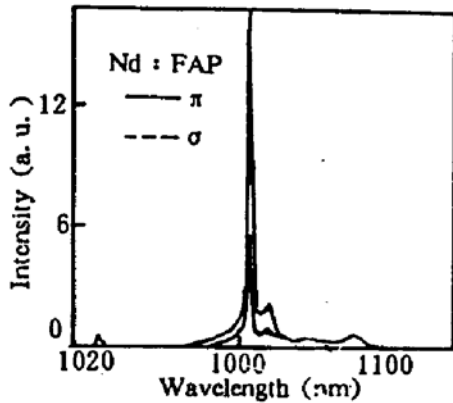


Fig. 1 Fluorescence spectra from Nd:FAP at room-temperature. The π polarized ($E // C$) fluorescence is 2.6 times more intense than the $\sigma(E \perp C)$ fluorescence

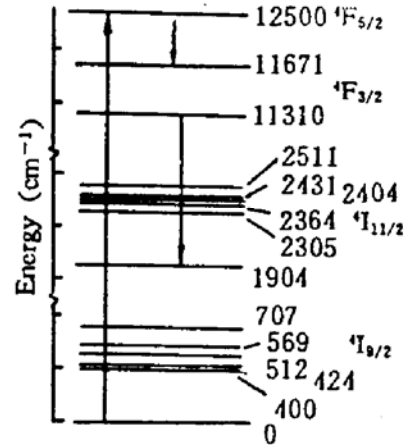


Fig. 2 Energy levels of Nd^{3+} in FAP. The laser transition is indicated by a heavy arrow, diode pump transition by a light arrow

的简并自由离子态分裂成一套柯喇末多重态。从图中可以看到: 基态 $^4I_{9/2}$ 分裂成 5 个子能级, 第一激发态 $^4I_{11/2}$ 分裂成 6 个子能级, 第二激发态 $^4F_{3/2}$ 分裂成 2 个子能级。最强发射线 $1.0629 \mu\text{m}$ 是 $^4F_{3/2}$ 的 R_1 子能级到 $^4I_{11/2}$ 的 Y_1 子能级间的跃迁。与 Nd:YAG 中 Nd^{3+} 的最强谱线比较, 其线宽较窄, 增益截面较大。文献[2]中给出的测试结果表明: 在低掺杂条件下, Nd:FAP 在主线上的 π 偏振的发射截面是 Nd:YAG 的 1.25 倍, Nd:FAP 主线的激光上能级 R_1 在 $^4F_{3/2}$ 多重态的粒子数占据比为 0.8 , 而 YAG 仅为 0.6 。FAP 主线的荧光寿命随 Nd^{3+} 离子浓度的增加而减少, 在 $1.0 \text{ at}\%$ 的掺杂浓度下, 寿命为 $200 \sim 240 \mu\text{s}$ 。图 3 给出室温下 $1.0 \text{ at}\%$ 掺杂的 FAP 晶体的吸收光谱^[5], 其吸收具有偏振特性, π 偏振强于 σ 偏振, 主吸收峰在 807 nm , 半宽为 2.5 nm , 吸收系数的峰值约为 12 cm^{-1} , 比相同掺杂浓度的 YAG 大。

综上所述, 除热导率外 FAP 的其它光谱特性均优于 Nd:YAG, 加上 FAP 易生长出大块的晶体, 且费用很低, 使之成为很有前途的激光二极管泵浦介质。

3 激光器设计

激光二极管纵向泵浦的 FAP 激光器的光学结构如图 4 所示。泵浦源为 (SDL-820) CW 3W 的二极管激光器, 其发光面的尺寸为 $500 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, 两个方向相应的发散角为 $8^\circ \times 38^\circ$, 室温

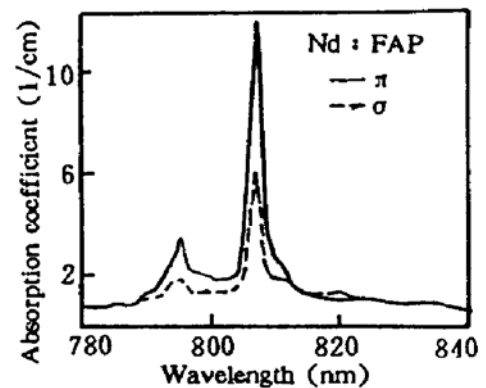


Fig. 3 Room temperature polarized absorption spectra of $\text{Nd}^{3+}:\text{FAP}$ in the 800 nm region

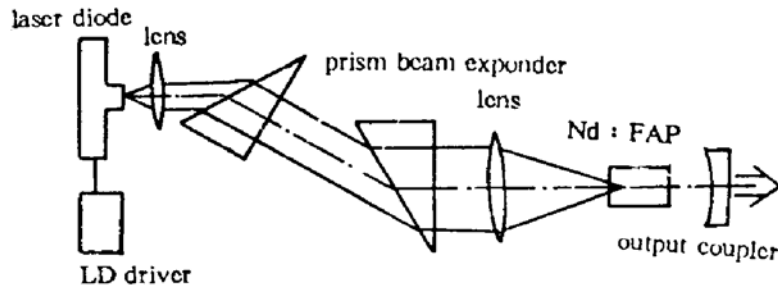


Fig. 4 Schematic diagram of laser-diode-pumped Nd:FAP laser

下的发射光谱的中心波长为 807.5 nm, 通过温控系统可调节中心波长, 使之与晶体的吸收峰吻合。为了优化泵浦光和谐振腔模式的匹配, 采用了棱镜对扩束耦合系统。激光二极管发出的激光首先由一块焦距为 8 mm, 相对孔径为 1 的非球面透镜 f_1 来收集并准直, 从 f_1 出来的平行光经过棱镜对时, 发散角小的一维被扩束, (扩束倍率为 4 倍) 而发散角大的一维则保持不变地通过棱镜对, 此后泵浦光再经一块焦距为 32 mm 的球面镜聚焦到晶体内部。根据几何光学的原理可知: 通过上述耦合系统, 在焦点处(假设在空气中)的光斑尺寸为 $500 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$, 而相应的发散角变为 $8^\circ \times 9.5^\circ$ 。经过整形变换, 泵浦光在晶体中传播时发散角变小且光斑趋于圆化, 这显然改善了泵浦光与腔模的匹配效果, 有利于获得高的效率。整个耦合系统对泵浦光的透过率为 80%。激光介质 FAP 的设计尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 泵浦光通过介质时, 将有 90% 被吸收(介质对泵浦光的平均吸收系数为 8 cm^{-1})。增益介质的两个端面均为平面, 激光膜设计为: 泵浦光入射面对 $1.06 \mu\text{m}$ 全反, 对 808 nm 增透(透射率为 75%), 另一面为 $1.06 \mu\text{m}$ 的单色增透膜。输出耦合腔镜的曲率半径有 30 mm 和 200 mm 两种, 透射率 $T = 2\%, 4\%, 6\%, 8\%$ 。器件在准连续状态下运转, 泵浦脉宽为 400 μs , 重复频率为 100 Hz。

4 实验结果和讨论

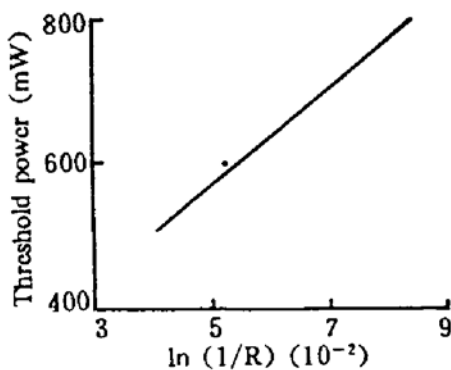


Fig. 5 Threshold energy versus $\ln(1/R)$

首先, 根据 Findly-Clay 法则^[6]来确定增益介质的内 (曲率半径 200 mm 和镜面位置保持不变), 泵浦阈值发生相应的变化, 对应 $T = 4\%, 6\%, 8\%$, 阈值泵浦功率(激光二极管发射功率)分别为 504 mW, 654 mW, 796 mW。以阈值泵浦功率为纵坐标, $\ln(1/R)$ (其中 R 为输出镜的反射率)为横坐标给出实验数据, 然后用一次方程来拟合(结果如图 5 所示), 拟合给出的一次方程为:

$$Y = 6853.7X + 226.2$$

Findly-Clay 法则所对应的关系式为:

$$P_{th} = P_{th0} + P_{th0} \cdot \ln(1/R) / \delta$$

式中 P_{th0} 为输出透射率为零时的阈值泵浦功率, δ 为晶体的内损耗, 除了晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的吸收、散射和衍射损耗外, 还有激光薄膜的不完善引起的损耗。对照上述两式得 $\delta = 3.3\%$ 。

实验研究了器件的斜效率。图 6 为输出透过率为 2%, 4% 和 6% 时的输入-输出能量关

系曲线, 其中输入能量是指晶体吸收的能量, 即激光二极管输出的能量乘上以下系数: 耦合系统的效率 0.8, 晶体前表面对泵浦光的透射率 0.75, 以及晶体的吸收效率 0.9。由于晶体的吸收具有偏振特性, 实验中转动晶体的角度以使激光二极管的偏振方向与晶体的 c 轴平行。从以上曲线中得到对应三种透射率的斜效率分别为 18.9%, 27.0% 和 31.0%。理论上计算斜效率的公式为:

$$\eta = \eta_p \times \eta_o \times (\lambda_p/\lambda) \times [T/(\delta + T)]$$

式中 η_p 为泵浦光落在激活区的部分, η_o 为激光的量子效率取为 0.8, λ_p 为泵浦光波长, λ 为输出激光波长。

当 $T = 2\%$ 时, $\eta = \eta_p \times 0.8 \times (0.808/1.06) \times [2/(2 + 3.3)] = 0.23 \eta_p$, 理论值与实验值比较得 $\eta_p = 0.82$ 。下面就按 $\eta_p = 0.82$ 来反推 $T = 4\%$ 和 6% 时的斜效率:

$$\text{对 } T = 4\%, \eta = 0.82 \times 0.8 \times (0.808/1.06) \times [4/(4 + 3.3)] = 27.4\%;$$

$$\text{对 } T = 6\%, \eta = 0.82 \times 0.8 \times (0.808/1.06) \times [6/(6 + 3.3)] = 32.3\%;$$

由此可见, 两个结果都与实验相符。

图 7 给出部分实验的纪录照片, (a) 为 $T = 6\%$ 时, 近阈值处的激光弛豫振荡波形, 从波形的衰减规律可以看出, 此时起振的纵模为单个或少数几个; (b) 是远离阈值的激光振荡波形(此时明显是多模振荡)和相应的输出能量积分曲线。

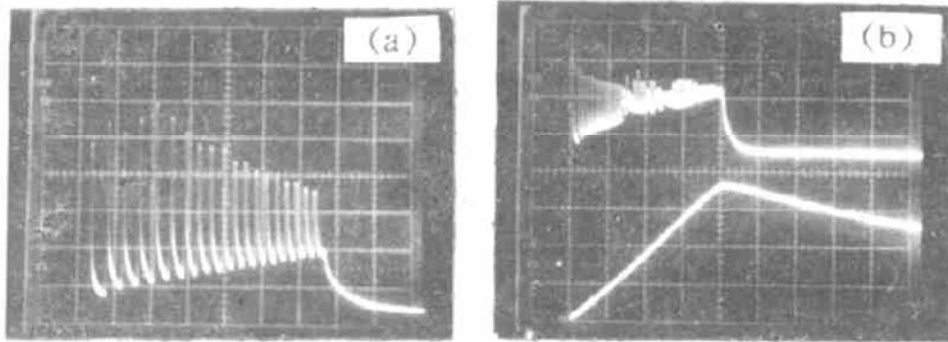


Fig. 7 Laser oscillation waveforms. (a) near threshold state, with single or few longitudinal modes; (b) far above threshold state, with some longitudinal modes, the lower trace in b is the integrated laser output energy

通过激光二极管泵浦的 FAP 和 YAG 激光器的实验结果来比较两者的性能。当输出镜的曲率半径为 30 mm, $T = 2\%$ 时, FAP 的阈值泵浦功率为 196 mW, YAG 是 158 mW, 两者的比值为 1.24。这里所用的 YAG 棒尺寸为 $\phi 3 \times 5$ mm, 两端面为平面, 掺杂浓度为 1.0 at%, 吸收系数为 6 cm^{-1} , 对泵浦光的吸收率为 0.95, 两端面镀制的薄膜相当理想, 作者曾用同样的方法测得它的内损耗为 0.7%, 晶体前表面对泵浦光的透射率为 0.85。

估算阈值泵浦功率的理论公式为:

$$P_u = \pi(\delta + T)h\nu / (\eta_c \eta_o \eta_a \eta_s \eta_r \sigma \tau) \sqrt{(\omega_0^2 + \omega_s^2)(\omega_0^2 + \omega_p^2)} / 2$$

上式中的 η_c 、 η_o 、 η_a 、 η_s 和 η_r 分别为耦合效率, 晶体前表面透射率, 斯托克斯量子效率, 吸收效率和激光上能级粒子数占据比; ω_0 为谐振腔的基模半径, ω_s 和 ω_p 为泵浦光在两个方向的平均

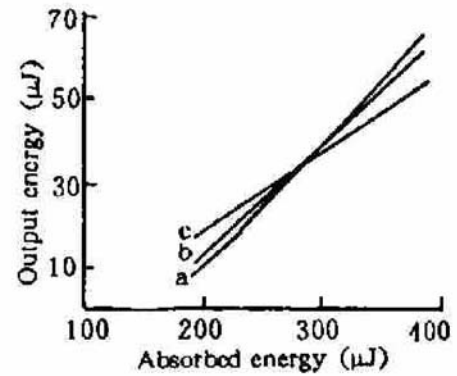


Fig. 6 Laser output energy versus absorbed energy. With the transmission of output coupler of $a = 2\%$, $b = 4\%$, $c = 6\%$

半径。根据谐振腔的结构,求得 $\omega_0^2 = 4284$ 。假设泵浦光的聚焦点在晶体的中心,可求得晶体内的平均泵浦光斑。对 FAP 有: $\omega_2^2 = 79939$, $\omega_1^2 = 2097$; 对 YAG 则有: $\omega_2^2 = 89871$, $\omega_1^2 = 4653$ 。将有关的数据代入阈值表达式,求得 FAP 和 YAG 的阈值泵浦功率的比值为 1.14,这一数值与实验结果基本一致。

采用上述输出镜,激光二极管泵浦 YAG 激光器得到 32.2% 的斜效率,根据这个结果来估计一下此时泵浦光和腔模的耦合效果(用 η_r 来表征),因 $\eta = \eta_r \times 0.8 \times (0.808/1.06) \times [2/(2 + 0.7)] = 0.4518 \eta_r$, 故 $\eta_r = 0.71$ 。这个数值比前文讨论的 FAP 的值小,这是因为 YAG 晶体较长,且输出镜曲率半径小,基模尺寸变小。

上海光机所的范瑞英高工为本研究工作中所用的激光介质研制光学薄膜;浙江大学的范琦康教授提供了光学耦合系统中的扩束棱镜对,在此向他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] G. Albrecht, R. Beach, Comaskey, Diode-pumped-slab-laser output exceeds one kilowatt. *Laser Focus Worlds*, 1992, 28(8): 9
- [2] R. C. Ohlmann, K. B. Steinbrugge, R. Mazelsky, Spectroscopic and laser characteristic of deodymium-doped calcium fluorophosphate. *Appl. Opt.*, 1968, 7(5): 905
- [3] K. B. Steinbrugge, T. Henningsen, R. H. Hopkins *et al.*, Laser properties of Nd³⁺ and Ho³⁺ doped crystal with the apatite structure. *Appl. Opt.*, 1972, 11(5): 999
- [4] Z. Shao, Y. Chen, An efficient cw Nd: FAP laser. *Chinese Physics Letters*, 1991, 11(7): 392
- [5] X. X. Zhang, A. B. Villaverde, M. Bass *et al.*, Spectroscopy and lasing performance of Nd³⁺ doped Ca₅(PO₄)₃F. *Proc. SPIE*, 1993, 1863: 35
- [6] D. Findlay, R. A. Clay, The measurement of internal losses in 4-level lasers. *Phys. Lett.*, 1966, 20(3): 277

Laser Diode Pumped Nd:FAP Laser Oscillator

Hu Wentao Zhou Fuzheng Chen Youming

Liu Wen Wu Guangzhao Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Lu Jiang Jin Zhenhong Huang Zhaoming

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 7 January 1994; revised 23 February 1994)

Abstract A laser-diode-pumped Nd:FAP laser oscillator is reported in this paper. A slope efficiency of 31% has been obtained with the transmission of output coupler of 8%, while the repetition rate is 100 Hz. The performance of LD pumped FAP and YAG lasers is compared, Nd:FAP is demonstrated to be a promising laser medium fitting for LD pumping.

Key words laser diode pump, solid state lasers, spectroscopic properties of crystal.