

LD泵浦的Nd:YAG微片激光器实验研究*

沈小华 单振国 周复正 胡文涛 黄国松 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘 要 详细讨论了激光二极管泵浦的Nd:YAG微片激光器输出的纵、横模特性. 当泵浦功率小于740 mW时, 输出为单纵模、基横模, 线宽达到仪器分辨极限25 MHz.

关键词 微片激光器, 增益导引, 热效应, 频率漂移.

1 引 言

在某些应用, 如相干雷达、相干光通信、高分辨率光谱, 对光源的单色性有很高的要求. 固体激光器具有窄脉宽、高功率的特点, 是上述领域的合适光源, 但固体激光器由于存在“空间烧孔”现象, 一般同时存在多个纵模的振荡, 影响输出光的单色性. 采取一些特殊的技术手段, 如标准具限模、环形腔、非平面腔、1/4波片法等, 能实现稳定的单纵模输出, 但往往是结构复杂、调整困难.

本文利用半导体激光泵浦的特点, 设计了一厚度只有700 μm 的Nd:YAG微片激光器, 纵模间隔与荧光线的半宽度相近, 用超短腔实现单个纵模的振荡. 已经获得CW 62 mW的激光输出^[1], 本文着重研究了输出激光的频谱特性.

2 实验结果与分析

2.1 实验装置

Nd:YAG微片厚度为700 μm , 口径 $\Phi 3$ mm, 为双平面结构; 输入端对808 nm、 $T > 80\%$, 对1.06 μm 全反, 为增加对泵浦光的吸收长度, 另一面对808 nm反射大于90%, 对1.06 μm 、 $T = 1\%$. 泵浦源为CW 1.0 W的激光二极管(由北京半导体所提供), 发光元面积为280 $\mu\text{m} \times 1$ μm , 微片激光器的泵浦阈值为28 mW.

2.2 横模研究

谐振腔的非涅耳数对激光器的横模分布起着重要作用, 大的非涅耳数易产生高阶横模. 微片激光器的有效口径为 $\Phi 2$ mm, 相应的非涅耳数达 1.4×10^3 , 但是激光二极管端面泵浦不同于闪光灯的侧面泵浦在径向有几乎均匀的增益, 仅在泵浦光的强区有有效增益, 其余区域

* 本工作为国家自然科学基金资助项目. 项目号:10069177003.

收稿日期:1993年7月16日

损耗大于增益，这种泵浦光的增益导引相当于给激光器加了一软光阑。如果把泵浦光的束腰定义为这一软光阑的半径，那么实际的菲涅耳数只有 14，只比一般限孔的闪光灯泵浦的固体激光器略大。实验中用摄像机监视 1.06 μm 输出光的横模分布，激光器调整到较好状态时，泵浦功率可以一直到 740 mW，仍能维持良好的基模输出。当泵浦功率高于 740 mW 时，产生 TEM₀₁，如图 1 所示。这是由两个因素作用的结果，首先泵浦光的热效应使介质轴向发生不均匀的膨胀，原来的双平腔，变为双凹腔；又在径向发生不均匀的折射率变化，即发生自聚焦，这样使高阶横模的衍射损耗降低；泵浦光增加，在加强这种热透镜效应的同时，激光器增益也增加，这样高阶横模有可能起振。

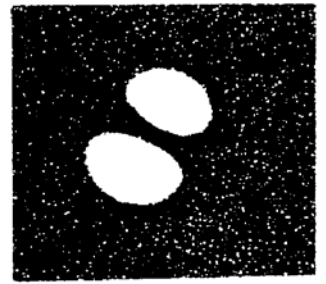


Fig. 1 The transverse mode at pumping power of 800 mW

从菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式出发，考虑了微片激光器的增益分布，在计算机上求腔内光场的自洽解，获得如图 2 所示的 TEM₀₀，TEM₁₀ 一维近似分布。菲-基的一维近似方程：

$$u_2(x) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L} R \exp(-iKL)} \int_{-2\omega_0}^{2\omega_0} a(x') u_1(x') \exp\left[-\frac{iK}{2L}(x-x')^2\right] dx' \quad (1)$$

$$a(x) = \sqrt{1 + g_0 \exp\left[-2(x-x_0)^2/\omega_0^2\right]} \quad (2)$$

式中 g_0 为泵浦光中心处单程增益； R 为镜面反射率，包含了介质的单程损耗； L 为腔长； K 为波矢的模； ω_0 为泵浦光束腰，对泵浦光空间分布作了高斯光束近似。从图 2 所示 TEM₀₀ 一维光强分布可看出，虽然可以把泵浦光作为高斯分布处理，但输出的固体激光远不是高斯分布，这也是激光二极管的端面泵浦与均匀的闪光灯侧面泵浦在输出光场分布上的不同之处。

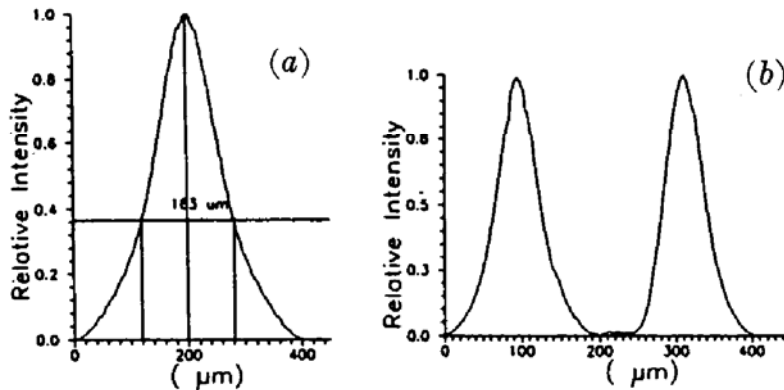


Fig. 2 One-dimension field intensity profile by calculation a) TEM₀₀ b) TEM₁₀

2.3 纵模频率

把微片激光器的输出光用光纤耦合到 WDG 500-1 光栅单色仪。该光谱仪的分辨率为 0.20 nm，本实验中微片激光器的纵模间隔为 0.45 nm，所以从该光谱仪能分辨输出是单纵模还是多个纵模。实验中发现当泵浦功率为 200~500 mW 时，在连续或脉冲工作时，输出始终是单个纵模，激光波长为 1.064 μm，如图 3 所示。没有发现 1.0638 μm 附近 1.0615 μm 次峰振荡。

2.4 纵模频移

当泵浦功率提高时，沉积在增益介质的热量也随之增加，使腔长发生改变，振荡纵模出现频移。微片激光器腔长很短，这种效应尤其显著。但它的纵模间隔很大，与增益线宽相近，

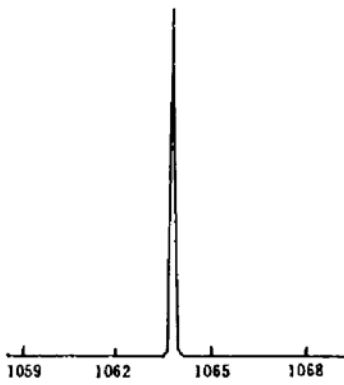


Fig. 3 The spectrum of single-longitudinal-mode

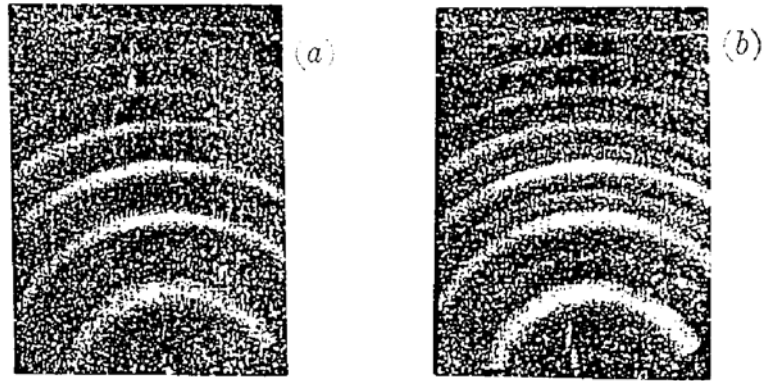


Fig. 4 Interference patterns of the microchip laser (a) single-longitudinal-mode ($P_p = 700 \text{ mW}$) (b) two-longitudinal-mode ($P_p = 820 \text{ mW}$)

所以一般不会发生跳模现象；而使谐振纵模频率连续扫过增益介质的荧光线，因此改变泵浦功率可以对激光频率连续调谐。实验中微片的输出光经一透镜发散后进入一厚度为 5 mm，反射率为 80% 的标准具，用 CCD 接收干涉信号，进入计算机处理。图 4 是用 Tektronix 拷贝机拍摄下来的干涉图样。图 4(a) 中只有一套干涉图样，显然输出是单纵模；从图 4(b) 可见，当泵浦功率增加到 800 mW 时，输出激光中包含有一强一弱的两个纵模。这主要由两个因素作用。如图 5，低功率泵浦时，腔内唯一的一个振荡纵模 a 位于增益线左侧，而位于另一侧的纵模 b 因增益较小，不能形成振荡；当泵浦功率提高时，纵模 a 向小的方向漂移至 a'，而 b 则向峰值方向牵引至 b'，结果使 a'、b' 的增益相近，可能出现两个纵模振荡。如果原来的振荡纵模位于右侧，泵浦功率增加，则只会拉大主纵模与邻近纵模增益差距，抑制主纵模以外的纵模振荡。此外当泵浦功率提高，增加了腔的总体增益，使纵模之间的竞争更趋激烈。

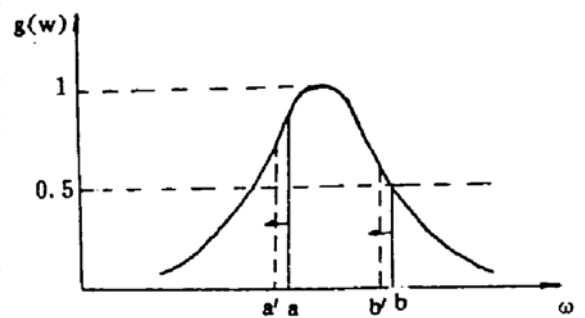


Fig. 5 Frequency-shift of longitudinal modes at the fluorescence curve

为了研究纵模频率随泵浦功率的变化，在计算机上监视某一定点干涉级数随泵浦功率的改变作为粗略计算谐振频率随泵浦功率变化的根据。当泵浦功率从 88 mW → 820 mW，干涉条纹向中心收缩，近中心的某一点干涉级数由 $m \rightarrow m - 2$ 。对 F-P 标准具

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4\pi h} \Delta m \tag{3}$$

式中 h 为标准具的厚度， Δm 为干涉级数的改变量， $\Delta\lambda$ 为波长的漂移量，实验结果如表 1。泵浦功率增加，热效应使腔长伸长，振荡的纵模频率向长波方向漂移。泵浦功率从 88.0 → 820 mW，纵模频率移动了 -9.6 GHz，大约是荧光线的十五分之一， $dy/dp = -1.4 \times 10^{-2} \text{ GHz} \cdot \text{mW}^{-1}$ 。实验中发现激光器以 400 μs ，100 Hz 准连续运转时，没有发现明显的频移。

Table 1

$P_{\text{pump}}(\text{mW})$	88.0	430	820
m	m_0	$m_0 - 1$	$m_0 - 2$
$\Delta\lambda (\text{\AA})$	0	0.18	0.36
$\Delta\nu (\text{GHz})$	0	-4.8	-9.6

Zayhowski 等从热传导方程出发推导了微片激光器泵浦热效应对谐振频率的漂移量^[2]。

对连续工作状态:

$$\frac{\partial T}{\partial P} = \frac{K}{4\pi CL} \left[I + \ln \left(\frac{2r_b^2}{r_m^2 + r_p^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P} = \frac{K}{4\pi C} \left(\alpha_r + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \left[I + \ln \left(\frac{2r_b^2}{r_m^2 + r_p^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \nu}{\partial P} = - \frac{\nu K}{4\pi CL} \left(\alpha_l + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \left[I + \ln \left(\frac{2r_b^2}{r_m^2 + r_p^2} \right) \right] \quad (6)$$

式中 n 为增益介质的折射率, ν 为激光频率, k 为泵浦光的热转换效率, α_l 为增益介质的热膨胀系数, C 为介质热导率, $\partial n/\partial T$ 表示折射率随温度的变化率, I 为欧拉常数, r_m , r_p 分别为腔模、泵浦光的半径, r_b 泵浦光中心离薄片热沉的距离. 这些参数列于表 2. 从表 2 的参数出发, 按(4)、(5)、(6)式可以计算出微片激光器的温度、腔长、输出频率对泵浦功率的微分量. $\partial T/\partial p = 5.8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, $\partial L/\partial p = 0.048 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{W}^{-1}$, $\partial \nu/\partial p = -1.88 \times 10^7 \text{ Hz} \cdot \text{mW}^{-1} = -1.88 \times 10^{-2} \text{ GHz} \cdot \text{mW}^{-1}$, 计算与实验测量的结果示于图 6. 理论计算结果比实验略大, 主要原因是按(6)式计算时没有考虑到泵浦光的发散.

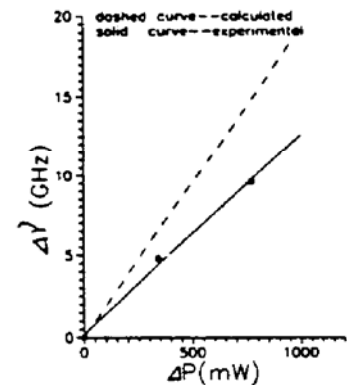


Fig. 6 Dependence of oscillational frequency-shift on pump power

Table 2

k	K ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	l (cm)	$\alpha_l + 1/n$ (K^{-1})	I	r_b (mm)	r_p (mm)	r_m (mm)
0.12	0.103	0.07	1.15×10^{-5}	0.577	1	0.15	0.15

2.5 激光器的线宽

用法布里-珀罗扫描干涉仪测量激光的线宽, 法布里-珀罗的自由光谱范围为 1 GHz, 极限分辨率为 25 MHz. 图 7 是泵浦功率为 400 mW 时的单模光谱, 从图中可看出线宽已达到仪器的分辨极限 25 MHz. 泵浦功率升高, 从法布里-珀罗扫描没有发现线宽的改变. 有报道该类激光器的线宽低于 5 kHz^[3], 但本文的法布里-珀罗扫描仪没有足够的分辨率, 所以实际的线宽可能远小于 25 MHz.

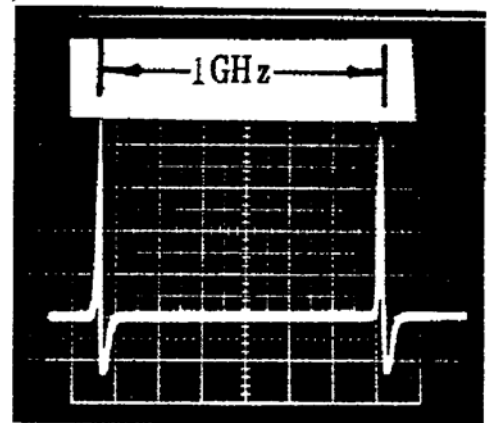


Fig. 7 Optical spectrum of single-mode at pumping power of 400 mW

3 讨 论

微片激光器的谐振频率对温度是敏感的, 在本文的实验中因泵浦光的热效应使薄片温升约 5°C , 频移了 10 GHz, 因此可以方便地通过对薄片的温度实行主动调制, 实现输出激光的调谐. 另一方面, 为了提高输出频谱的稳定性, 除了对激光器实行精确的温控外, 为减少输出频率对泵浦功率的依赖性, 可以选择准连续工作状态, 或设计薄片热沉(heat sink)时, 使热沉尽量靠近泵浦中心, 利于热传递, 减小温升. 微片激光器并不是在所有状态下都能单纵模、

基横模工作,在大功率泵浦时,往往产生二个纵模或出现高阶横模,解决这个问题的一条途径是增加在增益介质内的泵浦光斑,以降低泵浦功率密度.但在低功率泵浦时,输出激光纵模、横模结构都能保持良好的稳定性.

参 考 文 献

- [1] Zhenguo Shan, Xiaohua Shen, LD pumped Nd:YAG microchip laser. *Chinese J. Lasers*, 1993 **B2**(4): 289~294
- [2] J. J. Zayhowski, J. A. Keszenheimer, Frequency tuning of microchip laser using pumped-power modulation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 1118~1122
- [3] J. J. Zayhowski, A. Moordian, Frequency-modulated Nd:YAG microchip laser. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(12): 618~620

A Nd:YAG Microchip Laser Pumped by a LD

Shen Xiaohua Shan Zhanguo Zhou Fuzheng Hu Wentao
 Huang Guosong Deng Ximing

(Joint Laboratory of High Power Laser & Physics, Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics,
Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 16 July 1993)

Abstract Single-mode-oscillation was observed in a Nd:YAG microchip laser below 740 mW pumped by a LD. The spectrum showed an instrument-limited linewidth of less than 25 MHz. Frequency-shift with pumped power was presented in detail.

Key words Microchip laser, Gain-guide, Thermal effect, frequency-shift.