

# 光纤耦合半导体激光器纵向泵浦 固体激光器特性的研究

刘 宁 胡 巍 廖常俊 刘颂豪 徐文成

(华南师范大学量子电子学研究所 广州 510631)

**提要** 利用光纤耦合实现了两个半导体激光器同时纵向泵浦 Nd·YAG 激光器。实验研究了激光器的阈值和激光器输出的光强分布与泵浦光场之间的关系。实验发现当两个半导体激光器采取一定顺序启动时,可以降低固体激光器的阈值。

**关键词** 半导体激光器, 泵浦, 模式, 阈值

## 1 引 言

半导体激光器泵浦固体激光器是固体激光器走向实用化的关键和发展方向。采用纵向泵浦方式可以获得较高的转换效率,但是由于空间限制不易实现多个半导体激光器同时泵浦。将每个半导体激光器的输出耦合进光纤,然后将光纤合并,是一种简便易行的多光束合并方法。合并后的光束就可用来纵向泵浦固体激光器。文献[1~3]研究了合并后光纤之间的间距与激光器输出光强分布的关系,并采用锁相及光束合并技术实现了激光器的单模输出。文献[4,5]研究了激光器的阈值与纵向泵浦光场位置的关系。本文采用光纤合并光束的方法,实验研究了两个半导体激光器同时纵向泵浦 Nd·YAG 晶体时,激光器的阈值及激光器输出的光强分布与泵浦光场的关系。实验发现当两个半导体激光器以一定的顺序启动时,可以降低 Nd·YAG 激光器的阈值。并且,当两个半导体激光器同时泵浦时,Nd·YAG 激光器的斜效率比单个半导体激光器泵浦时有明显提高。

## 2 实验装置

将两只半导体激光器输出的 808 nm 激光,通过自聚焦透镜和 20 倍的显微物镜耦合到两根光纤中,光纤的芯径为 200  $\mu\text{m}$ 。在另一端将两根光纤合并成双芯光纤,合并后两纤芯的间距约为 400  $\mu\text{m}$ 。合并后的光纤纵向泵浦 Nd·YAG 晶体。Nd·YAG 晶体的尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。Nd·YAG 晶体一端镀 1.06  $\mu\text{m}$  的全反膜和 0.808  $\mu\text{m}$  的增透膜,构成谐振腔的一端。另一端镀 1.06

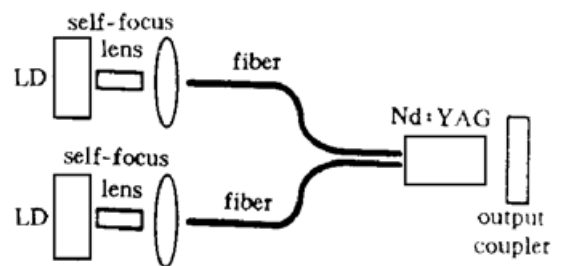


图 1 实验装置

Fig. 1 Setup diagram

$\mu\text{m}$  增透膜。实验装置如图 1 所示。合并后的光纤头与 Nd:YAG 晶体的泵浦端尽量靠近。为了减少泵浦光的损耗,我们在它们之间涂了一层折射率匹配液。输出镜为对  $1.06 \mu\text{m}$  透过率为 3% 的平面镜。

### 3 实验结果

采用图 1 所示谐振腔结构,对两个半导体激光器同时泵浦 Nd:YAG 晶体进行了研究。

#### 3.1 两个半导体激光器同时同步增加泵浦功率

当只用一个半导体激光器泵浦 Nd:YAG 时, Nd:YAG 激光器输出功率与泵浦光强的关系如图 2 (a) 所示。激光器的斜效率为 35%, 光转换效率为 20%。当两个半导体激光器同时泵浦时, Nd:YAG 激光器输出功率与泵浦光强的关系如图 2 (b) 所示。Nd:YAG 激光器输出的斜效率为 55%, 光转换效率为 26%。由图 2 可以看出两个半导体激光器同时泵浦时, Nd:YAG 激光器输出的斜效率有明显提高。

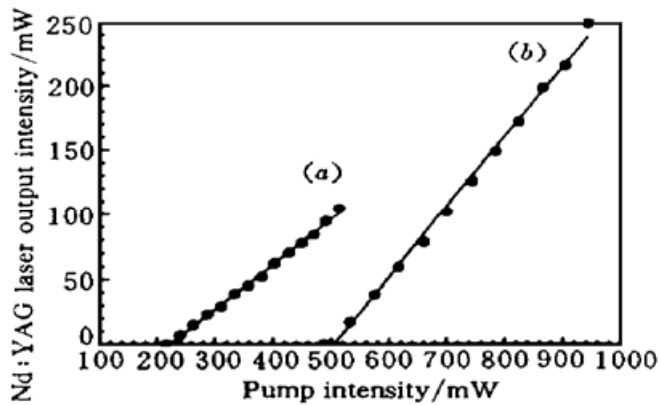


图 2 Nd:YAG 激光器输出功率与泵浦功率的关系

- (a) 单个半导体激光器泵浦;  
(b) 两个半导体激光器同时泵浦

Fig. 2 The output power of the Nd:YAG laser as a function of pump power

(a) Single semiconductor laser pumps;

(b) Two semiconductor lasers pump at the same time

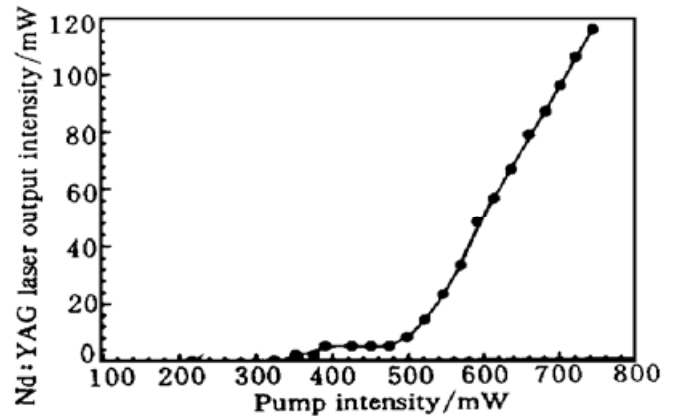


图 3 两个半导体激光器同时泵浦(其中一个半导体激光器的输出功率固定)时, Nd:YAG 激光器输出功率与另一只半导体激光器泵浦功率的关系

Fig. 3 The output power of the Nd:YAG laser as a function of pump power (where the output power of one semiconductor laser is unchanged)

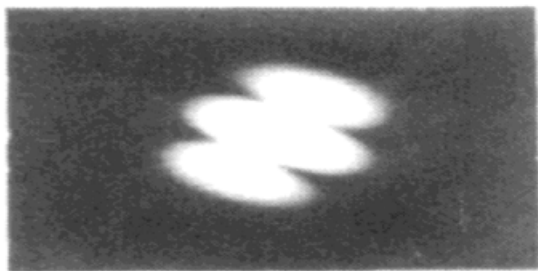


图 4 两个半导体激光器同时泵浦时, Nd:YAG 激光器的输出光强分布

Fig. 4 Nd:YAG laser's output beam profile when the two semiconductor lasers pump at the same time

但是,当采用两个半导体激光器同时同步泵浦时, Nd:YAG 激光器的阈值近似为单个半导体激光器泵浦时阈值的两倍。

#### 3.2 两个半导体激光器同时泵浦但以一定的顺序启动

当其中一个半导体激光器首先启动,并以一固定的能量(单半导体激光器泵浦时, Nd:YAG 激光器的阈值功率)泵浦时, Nd:YAG 激光器输出功率随另一只半导体激光器泵浦功率的变化关系如图 3 所示。图 3 表明当两个半导体激光器以一定的先后次序启动时,固体激光器的阈值低于两个半导体激光器同步增加泵浦功率时激光器的阈值(与图 2 比较即可看出)。

当两个半导体激光器同时泵浦时, 固体激光器输出的光强分布如图 4 所示。光强分布类似于两束光干涉后的结果。结果与文献[1]相同。

## 4 讨 论

由于两泵浦光束合并后两光纤之间的距离约为  $400 \mu\text{m}$ , 因此当两个半导体激光器同时纵向泵浦时, 它们将分别在谐振腔内激发两个泵浦光场。因而泵浦光不能均匀照明整个增益介质, 因此激光谐振腔的振荡模式与泵浦光场的关系复杂<sup>[1~4]</sup>。对于纵向泵浦的固体激光器, 其泵浦的阈值功率为<sup>[4]</sup>

$$P_{\text{th}} = \frac{\gamma I_{\text{sat}}}{\eta_p L} \frac{1}{\iiint s(x, y, z) r_p(x, y, z) dv} \quad (1)$$

其中,  $\gamma$  为单程损耗,  $I_{\text{sat}}$  为饱和光强,  $L$  为增益介质长度,  $\eta_p$  为泵浦转换效率,  $s(x, y, z)$  为归一化谐振腔模场强度分布,  $r_p(x, y, z)$  为增益介质中归一化泵浦光强分布。由(1)式可以看出激光器的阈值与泵浦光场及激光腔振荡模场的交叠积分成反比。说明泵浦光场与谐振腔模场匹配得越好, 激光器的阈值越低。当只有一个半导体激光器泵浦时, 由于光纤输出的泵浦光场可与激光谐振腔的  $\text{TEM}_{00}$  模较好地匹配, 因此固体激光器的阈值较低。而在两只半导体激光器同时泵浦的情况下, 由于两光纤之间有一定的间距, 所以其泵浦光场与谐振腔的模场很难有很好的匹配, 因此造成固体激光器的阈值比较高。图 2 就说明了这种情况。因此当采用多个半导体激光器同时纵向泵浦固体激光器时, 如果同时增加各个半导体激光器的功率, 必然导致高的固体激光器阈值。但是, 如果首先启动其中一个半导体激光器, 那么在较低阈值下就可以使固体激光器的一部分开始工作。这如同在激光器内引入了激光种子, 首先进行“点火”。从激光谐振腔内受激辐射放大过程来看, 引入激光种子必然加快激光振荡的形成。这样从整体上就可以降低固体激光器的阈值。图 3 验证了这种情况。

图 2 的结果表明, 当两个半导体激光器同时泵浦固体激光器时, 固体激光器的斜效率比单个半导体激光器泵浦时有明显的提高。说明其中一个半导体激光器用于克服固体激光器阈值的泵浦能量也转换成了激光输出。这表明两个半导体激光器同时泵浦时, 其结果并不是两个半导体激光器单独泵浦时结果的简单相加。图 4 表明固体激光器输出的光强分布类似于两束光干涉后的结果。说明由于泵浦光场的不均匀, 造成激光谐振腔内形成一个复杂的振荡模场。有文献<sup>[1~3]</sup>认为这是由于两个半导体激光器分别在谐振腔内激发出两个激光振荡场, 它们通过衍射场耦合实现了相位相互锁定使激光器输出的光强分布呈现为对  $\text{TME}_{00}$  模的正弦或余弦函数形式的调制<sup>[1]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 Y. F. Chen, T. M. Huang, K. H. Lin *et al.*. Analysis of the effect of pump position on transverse modes in fiber-coupled laser-diode end pumped lasers. *Opt. Commun.*, 1997, **136**(5, 6): 399~ 404
- 2 Y. F. Chen, C. F. Kao, S. C. Wang. Analytical model for the design of fiber-coupled laser-diode end-pumped laser. *Opt. Commun.*, 1997, **133**(1~ 6): 517~ 524
- 3 S. Menard, M. Vampouille, B. Colombeau. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beam. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 1996~ 1998
- 4 Jingwen Xu, K. K. Lee, Y. C. Chen. Phase locking in a two-element laser array with detuning. *Opt. Commun.*, 1995, **117**(1, 2): 198~ 206
- 5 Michio Oka, Hisashi Masuda, Yushi Kaneda *et al.*. Laser-diode-pumped phase-locked Nd:YAG laser ar-

rays. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(4): 1142~ 1147

## Analysis of Fiber-coupled Laser-diode End-pumped Solid-state Lasers

Liu Ning Hu Wei Liao Changjun Liu Songhao Xu Wencheng

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

**Abstract** Two laser diodes simultaneously pump Nd:YAG through fiber-coupling. The relationship among the laser threshold, the output intensity profile and the pumping fields has been studied experimentally. It has been discovered that the threshold of the Nd:YAG laser can be lowered if the two laser diodes pump in sequence.

**Key words** semiconductor laser, pump, mode, threshold

## Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 晶体及其激光器研究

Yb:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (简称 Yb:YCOB) 晶体是 1998 年报道的新材料<sup>[1]</sup>, 具有荧光寿命长(是 Yb:YAG 的 2.4 倍)、吸收波段宽、非线性系数大、能实现自倍频运转等优点, 是激光倍频和激光自倍频晶体的新品种。我们对该材料的多晶制备、单晶生长、吸收光谱、荧光光谱、荧光寿命和激光器件等进行了比较系统的研究, 取得了一些结果。

(1) 以化学计量比配方, 按分子式 Yb<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>Ca<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (本研究取  $x = 0.2$ ) 合成其多晶作为生长单晶的备料, 用中频感应加热的 Czochralski 法制备高光学质量单晶。根据分析算得的生长过程中各元素有效分凝系数为  $K_{\text{eff}}(\text{Yb}) = 1.1, K_{\text{eff}}(\text{Y}) = 1.0, K_{\text{eff}}(\text{Ca}) = 1.0, K_{\text{eff}}(\text{B}) = 0.94$ ;

(2) 280~ 2450 nm 波长范围内只有一个 850~ 1050 nm 的宽吸收带, 其中最强吸收峰中心波长为 976.4 nm, 可据此确定泵浦源的发射波长;

(3) 荧光光谱表明, Yb:YCOB 晶体有很宽的红外发射带, 波长范围为 940~ 1100 nm, 其中有 5 个明显的发射峰, 有较大应用价值的强峰中心波长为 1032.4 nm 和 1084.7 nm;

(4) 用 LD 泵浦厚度为 1.86 mm 掺 Yb 20 at-% 的未镀膜 Yb:YCOB 样品, 谐振腔为平凹腔。测得基频光阈值振荡泵浦功率仅为 55 mW, 在 760 mW 的吸收功率下, 最大输出功率为 446.4 mW, 光-光转换效率达 58.7%。由激光实验结果绘制的晶体吸收-输出功率曲线显示, 斜效率为 73%。实验中还观测到相当强的自倍频绿光。

### 参 考 文 献

- 1 B. H. T. Chai *et al.*. Lasing, second harmonic conversion and self-frequency doubling of Yb:YCOB (Yb:YCa<sub>4</sub>B<sub>3</sub>O<sub>10</sub>). OSA Topical Conference on Advanced Solid State Lasers, 1998, Postdeadline 11-2~ 11-4

孟宪林 张怀金 祝 俐 Pu Wang\* Judith Dawes\* Peter Dekker\* 刘雪松 程瑞平  
山东大学晶体材料国家重点实验室, 晶体材料研究所 济南 250100

\* Center for Lasers and Applications, Macquarie University, Sydney NSW 2109 Australia

1998-11-26 收稿