

文章编号: 1001-3806(2004)02-0173-04

掺镱双包层光纤光栅激光器输出特性的研究

张 军^{1,2}, 潘玉寨¹, 胡贵军¹, 张 亮¹, 李守春³, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态开放实验室, 长春 130033; 2. 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130026; 3. 吉林大学 物理学院, 长春 130026)

摘要: 通过对泵浦源 LD 的温度控制, 研究了不同温度对泵浦源波长以及光纤激光器输出特性的影响。利用熔接在掺镱双包层光纤两端的光纤光栅作为光纤激光器的谐振腔, 采用锥度光纤耦合的方法实现了 5.1W 的单模激光输出, 输出波长 1100nm, 最大转换效率 63%。

关键词: 光纤激光器; 双包层光纤; Yb³⁺ 光纤; 光纤光栅

中图分类号: TN248.1; TN253 **文献标识码:** A

Output characteristics of Yb³⁺ doped double-clad fiber grating laser

ZHANG Jun^{1,2}, PAN Yuzhai¹, HU Guijun¹, ZHANG Liang¹, LI Shouchun³, WANG Lijun¹

(1. Laboratory of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. College of Physics, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In the experiment, we adjust LD's wavelength by control of temperature and analyze the characteristics of fiber laser. The fiber laser in this experiment is composed of a high-power LD pumped with output wavelength of 970nm and a double-clad fiber spliced fiber Bragg gratings (FBGs) at both ends. Experimentally through a taper fiber, we have realized 5.1W of output power at 1100nm, with the highest conversion efficiency of 63%.

Key words: fiber lasers; double-cladding fiber; Yb³⁺-doped fiber; fiber Bragg grating (FBG)

引 言

近年来, 光纤激光器以其散热性能好、转换效率高、泵浦阈值低、可调谐范围宽、光束质量好等显著优势, 受到广泛的关注, 得到了飞速的发展。这一方面得益于高功率、高亮度多模半导体激光器技术的提高; 另一方面也是基于光纤制造工艺和谐振腔技术的改进。特别是以双包层光纤为基础的包层泵浦技术的发明, 使高功率光纤激光器输出成为可能。通过泵浦双包层光纤结构, 可实现从高功率、大面积多模激光二极管泵浦源到单模衍射极限光纤模式的高效简易转换, 大大提高了耦合效率和入纤泵浦功率, 增加了光纤激光器的输出功率^[1,2]。

光纤激光器实用化的一项关键技术是制备合适的光学谐振腔, 实现全光纤激光器。在以前的工作中, 光纤激光器大多是在光纤端面镀膜或采用二色

镜构成谐振腔, 这种谐振腔给泵浦光的耦合以及光纤激光器的封装都带来很大困难, 不利于光纤激光器的实用化。光纤光栅作为一种低损耗器件, 具有非常好的波长选择特性, 采用光纤光栅做谐振腔大大简化了激光器的结构, 同时提高了激光器的信噪比和可靠性, 窄化了线宽, 提高了光束质量。光纤光栅以其使用灵活、成本较低、易于选频等优点, 成为高功率光纤激光器首选谐振腔。目前, 国外已经将高功率光纤光栅激光器作为研究热点, 研究并生产了上百瓦的光纤光栅激光器, 并交付使用^[3]。本文中报道了 LD 抽运的掺 Yb 双包层光纤光栅激光器输出 5.1W 单模激光的实验研究结果。

1 光纤光栅激光器的设计原理

1.1 掺杂光纤的选择

光纤激光器的工作物质是各种掺杂光纤, 依据掺杂离子(如 Er³⁺, Yb³⁺, Nd³⁺ 等)特性的不同, 工作物质吸收不同波长泵浦光而激励出特定波长的激光。实验中双包层光纤采用 Yb 离子作为掺杂剂, 其主要原因有: 一是其能级机构简单, 与掺钕、钕等

作者简介: 张 军(1977), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器研究。

E-mail: zhangjun001@eyou.com

收稿日期: 2003-06-26; 收到修改稿日期: 2003-09-11

其它稀土离子光纤相比,不存在对抽运光或信号光的激发态吸收(ESA),无浓度淬灭效应,因而可以有更高的掺杂浓度,利用较短的掺杂光纤就可以获得较高的增益;二是有较宽的吸收光谱(800nm~1100nm)(见图1实线),可以有多种抽运源,包括半导体激光器甚至可以是钕离子激光器;三是它的辐射光谱也很宽(975nm~1200nm)(见图1虚线),其间有几个重要波长,如1064nm可用于工业加工,1083nm用于原子分子光谱学研究^[4]。

对于均匀光场,泵浦光在光纤中的吸收效率不仅与双包层的纤芯内包层面积比有关,而且与内包层的几何形状和纤芯在包层中的位置有关。内包层结构已由最初的圆形发展到方形、矩形、六边形、星形和D型^[5]。实验中采用准圆形(梅花瓣型)内包层的双包层光纤(其结构如图1右上图所示)。此种结构能有效消除泵浦光中与纤芯不相交的螺旋光束,增加了泵浦光与纤芯的重叠,可以达到很高的抽运光吸收效率。

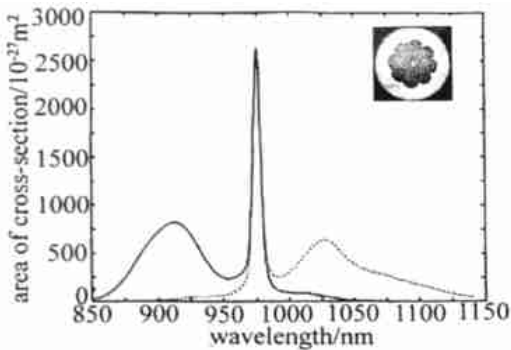


Fig. 1 Absorption (solid) and emission (dotted) cross-section of Yb^{3+} silicate fiber

1.2 泵浦源温控系统的建立

由图1可知,掺锗石英玻璃中掺 Yb^{3+} 光纤(YDF)在915nm和975nm处分别有两个吸收峰,用波长为915nm和975nm的激光作为泵浦源各有优缺点, Yb^{3+} 离子在915nm处的吸收峰值半宽度比较宽,因而对泵浦源的光谱稳定性要求较低; Yb^{3+} 离子在975nm处的吸收峰值半宽度虽然比较窄,但吸收截面是915nm处吸收截面的两倍以上,因此泵浦效率高^[6]。

光纤激光器的输出功率 P_{out} 和泵浦阈值功率 $P_{\text{p,th}}$ 与泵浦光的波长 λ_p 和吸收截面 $\sigma_a(\lambda_p)$ 有如下的关系^[7]:

$$P_{\text{out}} = \left[P_{\text{p0}}(1 - e^{g_p}) - \frac{\beta_{\text{d}} x_1 L h^2 c}{\tau \lambda_p} \right] \frac{\nu_1 \lambda_p}{(1 + R) h c} \quad (1)$$

$$P_{\text{p,th}} = \frac{\beta_{\text{d}} x_1 L h^2 c}{\tau (1 - e^{g_p}) \lambda_p} \quad (2)$$

式中,

$$x_1 = \frac{\sigma_a(\nu_1)}{\sigma_i(\nu_1)} \frac{\ln(\sqrt{R_1 R_2})}{\tau(\nu_1) Q} \quad (3)$$

$$\sigma_i(\nu) = \sigma_a(\nu) + \sigma_e(\nu) \quad (4)$$

$$R = \frac{1 - R_1}{1 - R_2} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

$$g_p = (x - 1) \sigma_a(\lambda_p) \frac{s_d}{s_{i,c}} Q \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{n_2(z)}{n} dz \quad (7)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为光速, g_p 为泵浦光的吸收效率, x_1 为激光光反转粒子数分布, ν_1 为激光光的频率, P_{p0} 为入纤功率, ρ 为镱离子的掺杂浓度, s_d 为有效掺杂面积, L 代表光纤长度, τ 为激发离子的平均寿命, $\tau(\nu)$ 为激光光场重叠因子, $\sigma_a(\nu)$, $\sigma_e(\nu)$ 分别为吸收和激射截面面积, R_1 , R_2 分别为前后腔镜的饱和系数, $s_{i,c}$ 为内包层面积, n_2 , n 分别代表激发离子浓度和总离子浓度。由(1)式~(3)式可知,光纤激光器的泵浦阈值功率和输出光功率都与泵浦波长和镱离子的吸收截面大小有一定的关系,由于镱离子的吸收截面随泵浦源波长变化颇大(如图1实线所示),故选择合适的泵浦光波长显得很有必要。

实验中选用与YDF吸收峰975nm接近的输出中心波长970nm的LD模块,半导体激光器的工作波长随器件温度有一定的变化($d\lambda/dT = 0.26 - 0.33$),考虑到YDF在975nm处的吸收峰带宽仅有8nm,为使泵浦光的工作波长与YDF的吸收谱相匹配,利用半导体制冷和水冷技术相结合,精心设计了LD的温度控制系统,使其输出的中心波长接近975nm,并使工作波长的漂移量控制在吸收峰的半宽度范围之内($\leq 2\text{nm}$)。通过实验分析比较,寻找LD输出中心波长在975nm附近的最佳工作温度

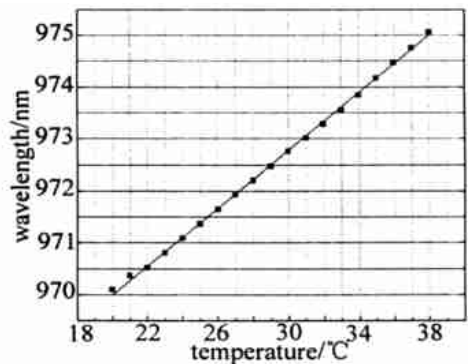


Fig. 2 Change of LD's wavelength by control of temperature

(38°C),其波长随温度变化如图2所示。

1.3 光纤光栅选频的机理

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性(外界入射

光子和纤芯内镱离子相互作用引起折射率的永久性变化), 在纤芯内形成空间相位光栅, 其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透镜或反射)滤波器或反射镜。利用其窄带高反射率特性构成光纤反馈腔, 依靠掺杂光纤为增益介质制成的光纤激光器即可方便地选择和限制输出波长。由于光纤光栅的选频作用, 激光器的激射波长将被稳定在光纤光栅的波长上。不但激光的激射波长得到了稳定, 而且其激射谱线宽和载噪比(激射波长所带的光功率与本底噪声功率之比)也得到了明显的改善^[8]。

常见的光纤光栅激光器有 DBR 型光纤光栅激光器^[9]和 DFB 型光纤光栅激光器^[10], 其典型结构分别如图 3 和图 4 所示。DBR 光纤激光器使用两个高

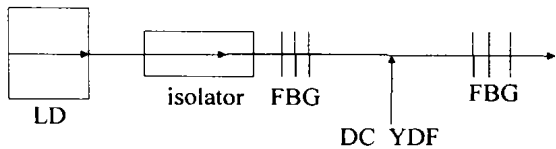


Fig. 3 Sketch of fiber grating laser based on DBR

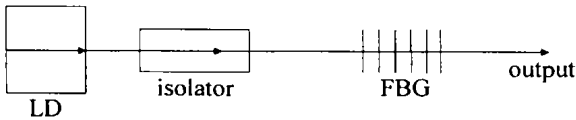


Fig. 4 Sketch of fiber grating laser based on DFB

反射率的光纤光栅来增强模式选择, 可以直接把光纤光栅写到掺杂光纤上, 也可以把光纤光栅写到普通光纤上再熔接到掺杂光纤两端。DFB 光纤激光器则是利用直接在稀土掺杂光纤写入的光栅构成谐振腔, 有源区和反馈区同为一体, 只用一个光栅来实现光反馈和波长选择, 因此频率稳定性较好, 边模抑制比高。但由于高功率光纤激光器的增益光纤都为双包层光纤, 其外包层一般是聚合物材料, 在载氢增敏过程中容易受到破坏, 严重影响泵浦光的耦合, 导致耦合效率较低, 同时, 聚合物的外包层材料对紫外光一般是不透明的, 这也给光纤光栅的制作带来困难。因此, 一般光纤光栅激光器都采用 DBR 型, 即在非增益光纤上写入光栅, 然后再与双包层增益光纤熔接。该方式虽然会产生接头损耗, 但不会破坏双包层光纤本身的特性, 泵浦光的利用率较高。实验中的谐振腔由一对平行设置 DBR 光纤光栅组成, 将其熔接在掺镱双包层光纤的两端。

2 实验结果与分析

实验的掺 Yb^{3+} 双包层光纤光栅激光器结构如图 5 所示, 泵浦源为带 $400\mu\text{m}$ 尾纤的大功率 LD 模

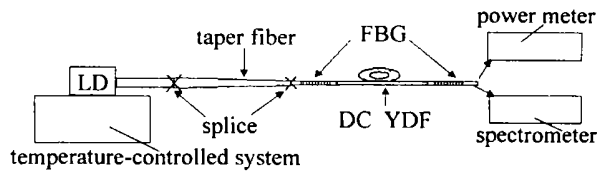


Fig. 5 Schematic configuration of the Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser with FBG

块, 输出中心波长 970nm 。温控系统严格控制 LD 的工作温度, 使输出光产生红移至 975nm 附近。由于 LD 尾纤和双包层光纤内包层参数不匹配, 为了提高入纤功率, 在泵源和掺 Yb^{3+} 双包层光纤加入一根 Taper 光纤, 输入端直径 $400\mu\text{m}$, 输出端 $200\mu\text{m}$ 。两端分别与泵浦源尾纤和掺 Yb^{3+} 光纤直径以及数值孔径相匹配, 采用爱立信公司的 FSU975 型光纤熔接机将其分别熔接, 效率在 85% 以上。增益光纤为掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 内包层形状为准圆形(梅花瓣型), 光纤纤芯直径 $7\mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.15$, 内包层直径 $200\mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.45$, 外包层为圆形直径 $250\mu\text{m}$, 光纤长度 20m 。光纤激光器谐振腔由在稀土掺杂双包层光纤两端连接的光纤光栅 FBG 构成, FBG 的反射中心波长为 1100nm , 输入端的 FBG 对泵浦光的透过率大于 99% , 对 1100nm 波长的光全反, 在输出端的较弱的光纤光栅起到输出耦合及滤波器的作用, 对激光的反射率为 0.04 , 线宽为 0.5nm 。

输出光经准直后测量其光谱特性和功率。图 6a 所示为光纤激光器的输出光谱和用 CCD 镜头拍

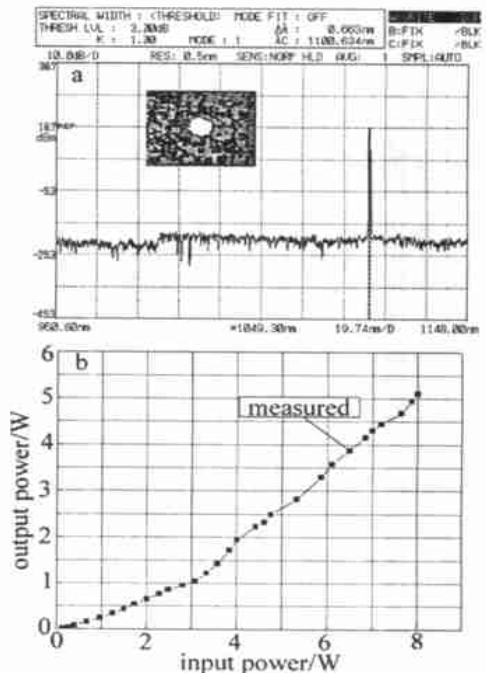


Fig. 6 Out characteristics of fiber grating laser

得的输出光斑。中心波长 1100nm , FWHM 为

0.663nm, 输出光束为 TEM_{00} 模式。图 6b 所示为光纤激光器输出功率特性曲线(温控 LD 38℃), 泵浦阈值功率 150mW, 最大斜率效率为 63%, 最大入纤功率为 8W 时, 最大激光输出功率 5.1W。同时, 测得温控 LD 20℃ 时激光器的功率特性, 泵浦阈值功率 165 mW, 当最大入纤功率同样为 8W 时, 输出激光 4.95W, 斜率效率约为 61%。此实验结果有效证明高功率半导体激光器泵浦的中心波长以及掺杂离子的吸收截面变化对光纤激光器的泵浦阈值功率、输出光功率有一定的影响。

与用双色镜耦合的光纤激光器相比, 光纤光栅激光器整个谐振腔结构简单, 且由于光纤光栅为窄带反馈元件, 激光波长精确地由其 Bragg 波长确定, 实验发现, 激光器谱宽与输出功率无关。从实验光纤激光器输出激光光谱图来看, 很难发现存在漏光现象, 同时发现, 当对泵浦源进行温度控制改变输出中心波长时, 其对光纤激光器输出光谱影响甚微, 进一步说明光纤光栅选频特性好, 只输出特定波长激光。

3 结 论

考虑到光纤激光器的泵浦源 LD 的中心波长对掺杂光纤的吸收效率以及光纤激光器输出特性的影响, 利用半导体制冷技术对 LD 建立了严格的温度

控制系统, 通过精密控制 LD 的泵浦工作温度, 使输出中心波长接近 Yb^{3+} 吸收峰 975nm。同时采用光纤光栅作为掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的谐振腔, 实现了波长 1100nm, 功率 5W, 斜率效率约为 61% 的高功率全光纤化光纤激光器。采用光纤光栅做谐振腔不仅避免了光纤激光器复杂的光路调整、减小了系统各部分的耦合损耗, 而且结构简单、紧凑, 有利于光纤激光器的实用化和商品化。

参 考 文 献

- [1] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R *et al.* Electron Lett, 1999, 35(14): 1158~ 1160.
- [2] SUCHA G, EMDERT H. Laser Focus World, 2000, 36(8): 133~ 136.
- [3] GAPONTSEV V. Laser Focus World, 2002, 38(8): 83~ 87.
- [4] ASK H M, ARCHAMBAULT J L, HANNA D C *et al.* Electron Lett, 1994, 30(11): 863~ 865.
- [5] GOLDBERG L, COLE B, SNIFFER E. Electron Lett, 1996, 33(25): 2127~ 2129.
- [6] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C *et al.* IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049~ 1056.
- [7] EVEN P, RONCIN V, KERRINCKX B *et al.* Proc of SPIE, 2001, 4216: 22~ 31.
- [8] REICHEL V, UNGER S, HAGEMANN V *et al.* Proc SPIE, 2000, 3889: 160~ 169.
- [9] KASHYAP R, AMITAGE J R, WYATT R *et al.* Electron Lett, 1990, 26(11): 730.
- [10] SEJKA M, VAMING P, HUBNER J *et al.* Electron Lett, 1995, 31(17): 1445~ 1446.

(上接第 172 页)

3 总 结

受激喇曼散射作为产生新波长激光的手段得到了广泛的应用。实验中用 Nd:YAG 激光器四倍频输出作为氢气受激喇曼散射的泵浦源。一阶 Stokes 的光子转换效率达 15.7%, 二阶 Stokes 光子转换效率达 35.9% 的, 反一阶 Stokes 也有 0.36% 的能量转换效率。在 299nm, 341nm, 398nm, 239nm 波长的激光

输出能量分别为 3mJ, 6.1mJ, 2.8mJ, 0.8mJ。作者研究了 H_2 压力对受激喇曼散射输出能量的影响, 获得了相应的紫外激光输出, 并给出了相应的曲线。

参 考 文 献

- [1] HANER D A, MCDERMID I S. IEEE J Q E, 1990, 26(7): 1292~ 1298.
- [2] BISCHEL W K, DYER M J. J O S A, 1986, A3(5): 677~ 682.
- [3] CHU Zh P, SINGH U N, WILKERSON T D. Appl Opt, 1991, 30(30): 4350~ 4357.
- [4] de SCHOULEPNIKOFF L, MITEV V. Pure Appl Opt, 1997, 6: 277~ 302.