

文章编号: 1001-5078(2004)02-0149-04

# 国产 LD 泵浦掺 Yb 双包层光纤光谱特性研究

杜戈果, 阮双琛, 罗 烽, 郑敦之, 温智强, 朱 勤

(深圳大学工程技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘 要:**研究了国产掺 Yb 双包层光纤在国产 980nm 半导体激光器的泵浦下, 在不同条件下所产生的自发辐射谱、放大的自发辐射(ASE)谱和激光光谱。分析了 ASE 的特性, 与超荧光作了区别, 并分析了激光的模式竞争。一方面, 验证了国产双包层光纤的可行性; 另一方面, 通过对该实验的研究, 可以加深对激光形成的理解。

**关键词:**掺 Yb 双包层光纤; 二极管泵浦; 自发辐射; 放大的自发辐射; 激光; 超荧光

**中图分类号:** TN241

**文献标识码:** A

## Experimental Studies on Spectrum Characteristics of Homemade Yb-doped Double Cladding Fiber Pumped by Internal Diode Laser

DU Ge-guo, RUAN Shuang-chen, LUO Feng, ZHENG Dun-zhi, WEN Zhi-qiang, ZHU Qin

(College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Spectrum characteristics including spontaneous emission, amplified spontaneous emission and laser emission of homemade Yb-fiber double cladding fiber were studied experimentally in detail pumped by internal diode laser. Reasons of mode-competition in F-P cavity were analyzed. Results show the homemade Yb-fiber is feasible to make a fiber laser with better understanding to the formation of laser.

**Key words:** Yb-doped double cladding fiber; spectrum characteristics; diode laser pump; ASE, superfluorescence

### 1 引言

稀土  $\text{Yb}^{3+}$  离子产生激光的主要优点是: 能级结构简单、无激发态吸收、无浓度淬灭等。由于掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器具有很宽的吸收谱和发射谱, 所以在选择泵浦光源时有更大的灵活性, 同时激光输出波长的可调谐范围更宽, 因而逐渐引起了人们的关注<sup>[1-3]</sup>。特别是用半导体激光器(LD)抽运的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器具有稳定、全固化、小体积等特点, 激起了人们对它的研究热情。但 LD 激光与单模光纤的耦合效率较低, 而双包层光纤为这一问题的解决提供了途径。其纤芯采用相应激光波长的稀土掺杂技术, 大直径的内包层对泵浦波长是多模的, 外包层采用低折射率材料, 内包层的形状和直径能够与高功率激光二极管有效地耦合。这种结构可将泵浦光耦合到内包层, 使之在内包层和外包层之间来回

反射, 多次穿过单模纤芯被其吸收。

### 2 Yb 能级结构

$\text{Yb}^{3+}$  的能级与单电子结构相同, 基态为  $^2F_{7/2}$ , 第一激发态为  $^2F_{5/2}$ , 更高激发态在激光跃迁范围内显示无关。掺杂离子由于受宿主基质晶格电场的作用引起  $\text{Yb}^{3+}$  能级的 stark 分裂, 消除能级简并, 理论上基态  $^2F_{7/2}$  含 4 个 stark 子能级, 上激发态  $^2F_{5/2}$  含有 3 个 stark 子能级。这些分裂能级之间由于声子的产生和湮灭引起能量交换, 导致这些能级的均匀或

基金项目: 深圳市南山区科技局资助项目、深圳大学校内项目。

作者简介: 杜戈果(1971-), 女, 副教授, 博士, 1993 年毕业于清华大学获学士学位, 1999 年 1 月毕业于西安光学精密机械研究所获博士学位, 2001 年进入复旦大学物理系博士后站, 现在深圳大学从事本科生与研究生的教学工作和科研工作, 已发表学术论文近 30 篇, 主要研究领域包括光通信及光纤技术、半导体泵浦固体激光器等。

收稿日期: 2003-08-18

非均匀展宽,使得 stark 子能级的分裂不能完全分辨。图1给出室温下  $\text{GeO}_2$  石英玻璃中  $\text{Yb}^{3+}$  离子的吸收和发射截面<sup>[4]</sup>(实线为吸收截面,虚线为发射截面),图2是与之对应的  $\text{Yb}^{3+}$  离子的能级结构<sup>[1]</sup>。其中  $a \rightarrow d$  和  $a \rightarrow e$  的跃迁对应吸收谱中 974nm 和 910nm 的两个吸收峰, $d \rightarrow c$  和  $d \rightarrow b$  的跃迁对应从 1010nm  $\rightarrow$  1162nm 的准四能级激光跃迁, $d \rightarrow a$  的跃迁对应 974nm 的三能级跃迁。可以看到,整个发射谱覆盖一个宽达 230nm(950 ~ 1180nm) 的光谱区,在 975nm 和 1030nm 处各有一个发射峰,前者具有较大的发射截面,但后者相对平坦,相应的 3dB 带宽在 50nm 以上。

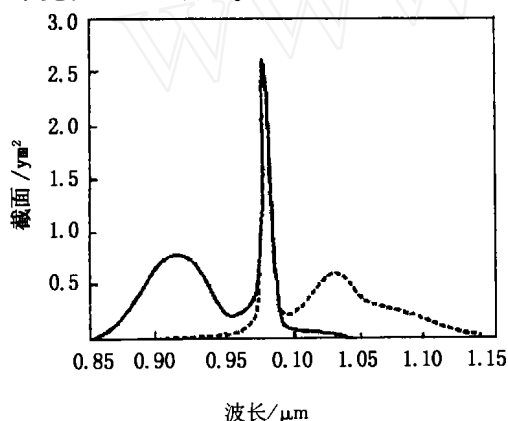
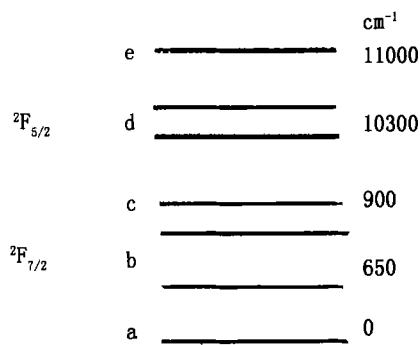


图1 室温下  $\text{Yb}^{3+}$  的吸收和发射截面



镱离子能级结构图

图2  $\text{Yb}^{3+}$  的能级结构

### 3 实验装置与结果

实验用的泵浦源为中国科学院半导体研究所生产的半导体激光器,发光区尺寸为  $200\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ,中心波长 973.7nm(18  $\mu\text{m}$ ),线宽 2.2nm;激光二极管驱动电源型号为 QW-2004(最大输出电流 2A)。图3为实验测量的激光二极管输出功率随泵浦源电流的变化曲线;LD 激光器的出射光为发散角很大的椭圆形不规则光斑,平行结平面和垂直结平面的角度分别为 7.8° 和 39°。

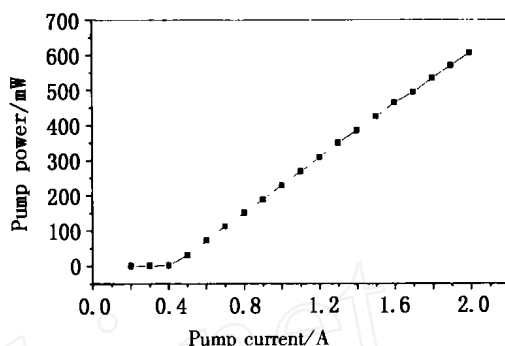


图3 激光二极管输出功率与工作电流的关系

本实验采用的掺 Yb 光纤为烽火通信科技股份有限公司生产的,光纤技术指标如下表:

| 纤芯直径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 内包层直径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 内包层数<br>值孔径     | 纤芯数<br>值孔径      | 吸收系数<br>(920nm 波长)     |
|---------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| $6.0 \pm 0.5$             | $12.0 \pm 0.5$             | $0.17 \pm 0.02$ | $0.17 \pm 0.02$ | $3 \sim 20\text{dB/m}$ |

实验采用光纤端面直接泵浦方式,把准直和聚焦两个物镜固定在同一个架子上且拧在同一个接口上,使两者成一体。经过各种参数物镜的组合实验,最后采用 60/0.80 的物镜作为准直镜、20/0.40 的物镜作为聚焦物镜。泵浦源输入电流 2A 时测得该 Yb 光纤的最大入纤功率为 13.3mW。实验装置如图4所示。测量用 AV6361 型光谱仪,最小分辨率 0.1nm,测量范围为 0.6 ~ 1.75 $\mu\text{m}$  和 Q8384 型光谱仪,最小分辨率 0.01nm,测量范围 0.6 - 1.7 $\mu\text{m}$ 。实验中所用光纤约长 10m。

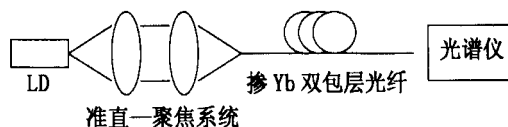


图4 实验装置示意图

在泵浦电流达 480mA 时观察到自发辐射谱如图5所示,在较大泵浦电流时观察到的光谱如图6所示。随着泵浦电流的增大,其荧光谱的强度和宽度以及峰值波长均发生变化,分别如图7、8、9所示(其中强度取自光谱图,仅表示相对值)。由于 Yb 的吸收峰与发射峰在 975nm 处相重合,实验采用的泵浦源波长在 975nm 附近,本文主要研究 1030nm 附近的发射谱。从图7看到,荧光强度随泵浦功率(电流)的增加,先呈线性增加的趋势,而后表现出指数增加的趋势,这一点符合放大的自发辐射的特点<sup>[5]</sup>;另外,从激光原理中知道,放大的自发辐射的谱线宽度随着距离和增益的增加而减小。图8中谱线宽度表现出先变窄又逐渐增大的趋势,这需要考虑 Yb 光纤的加宽机制。决定 Yb 石英光纤激光器

谱线加宽的机制有两种:离子配位场不均匀性引起的非均匀加宽和石英玻璃网络体热振动引起的均匀加宽。一般情况下非均匀加宽大于均匀加宽。对于非均匀加宽,由于谱线中心附近饱和程度较偏离中心频率处大,随着增益的增大,增益曲线及自发辐射

谱线均变宽,因此使放大的自发辐射谱宽再度变宽。

在准直镜与光纤之间加入二色镜后,随着泵浦功率的增加,在原来荧光谱的包络中分裂出许多带宽很小的光谱峰,荧光谱不再光滑,如图 10 所示。这是由于光纤输出端面与二色镜组成谐振腔而形成的自激振荡。图 11 是相同泵浦功率下先后两次扫描取样得到的光谱。可以看到,两次出现的光谱主峰波长并不相同,而且谱线强度也不同,表明谱线之间存在十分激烈的竞争。由于二色镜的反射带宽覆盖光纤激光器增益带宽的很大范围,而光纤端面也是一个宽带反射器,因此由光纤输出端面与二色镜组成的谐振腔内缺乏有效的选模机制,很容易引起腔内多个纵模的竞争。另外,由于实验中入纤功率较低,而光纤端面约 4 % 的反射使腔内阈值较高,在一个二色镜的情况下仅仅观察到了阈值附近的激光振荡,最终未能形成稳定的激光输出。

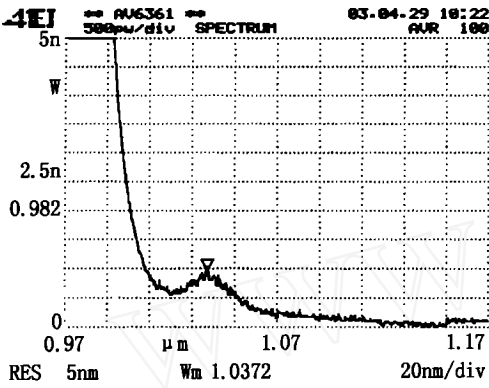


图 5 泵浦电流为 480mA 时的荧光谱

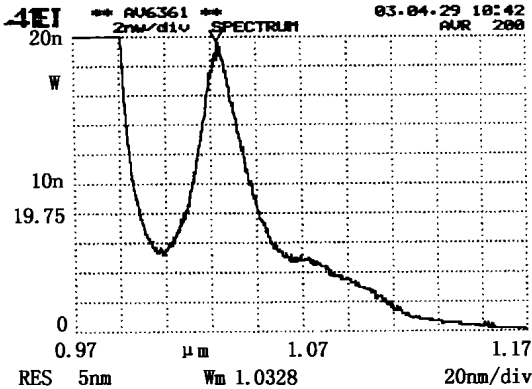


图 6 泵浦电流为 1A 时的荧光谱

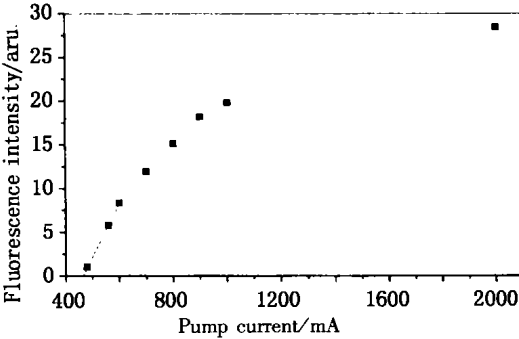


图 7 荧光强度随泵浦电流的变化

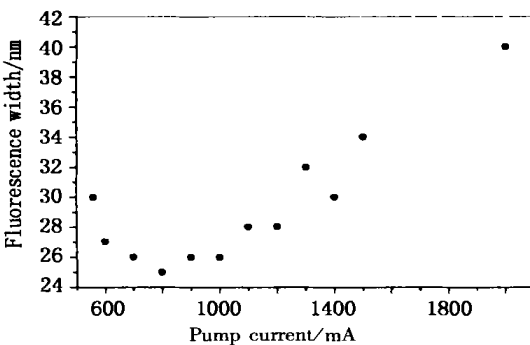


图 8 荧光谱宽度随泵浦电流的变化

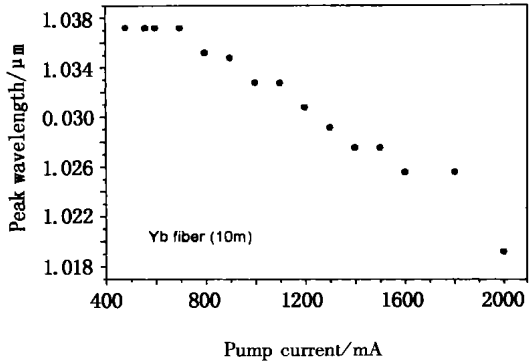


图 9 荧光谱峰值波长随泵浦电流的变化

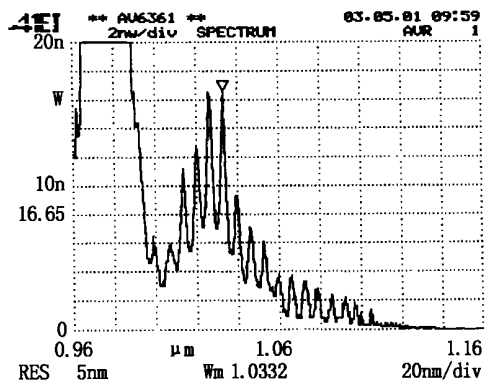


图 10 加二色镜后的输出光谱

鉴于此,在光纤末端又加入一个腔镜,将光纤端面与腔镜紧贴。前后腔镜为同一批镀膜的镜子,对泵浦光高透,在 975nm 处透过率大于 90 %,对 1050 ~ 1100nm 范围内的光反射率大于 98 %。两腔镜的高反射使腔内阈值降低观察到激光振荡,如图 12 所示。图示为两个不同模式的激光光谱(左图中心波长为 1038.4nm,带宽 0.468nm;右图中心波长为 1046.8nm,带宽 0.508nm)。因缺乏有效的选模机

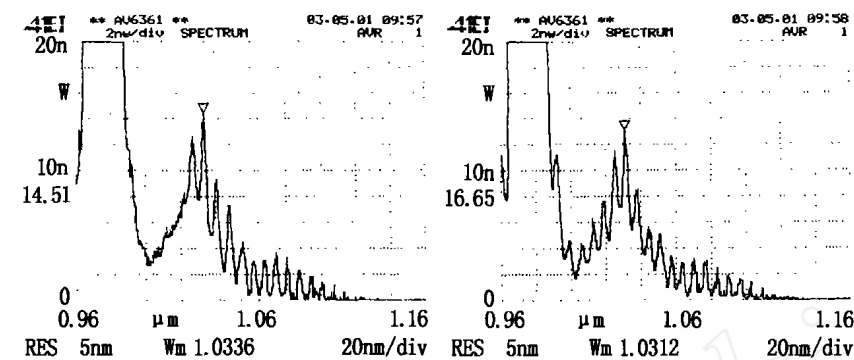


图11 相同泵浦功率下不同时刻输出光谱的比较

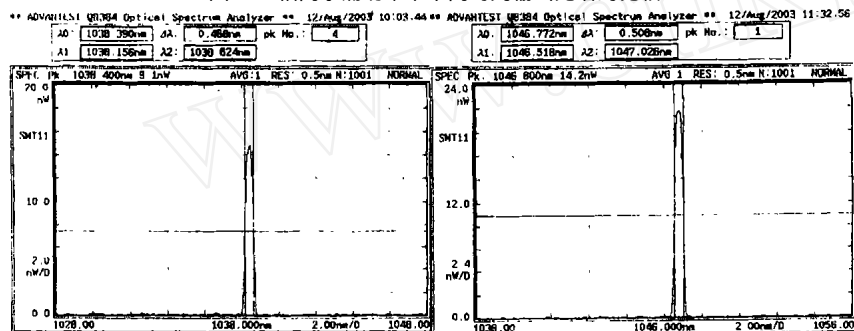


图12 两个不同模式的激光光谱

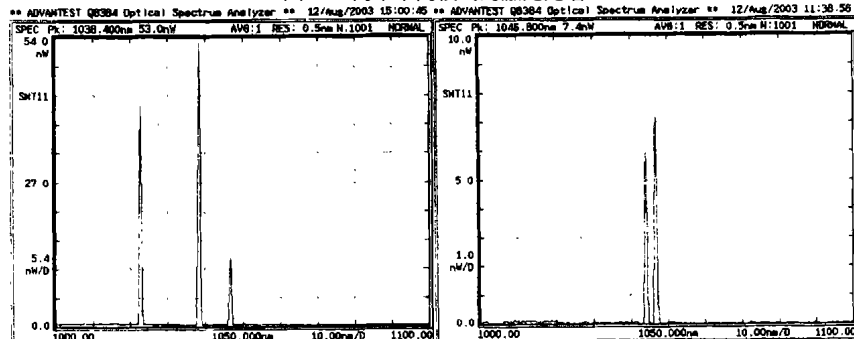


图13 激光器的多纵模

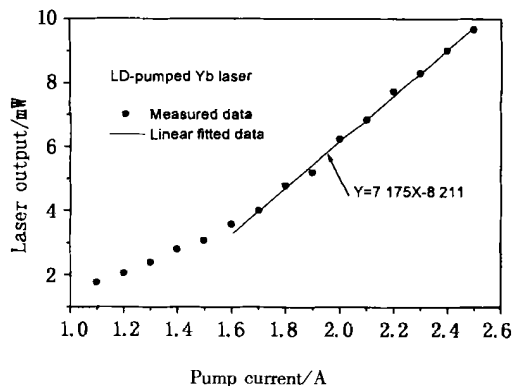


图14 输出功率随泵浦的变化

制,仍然有多纵模振荡,但与只有一个二色镜的情况相比,纵模数目已大大减少,如图13所示。测量输出功率与泵浦电流的关系如图14所示。所用功率计为LM-1型功率计,对波长有选择性,测量值虽不能准确反映激光器的功率,但可在一定程度上反

映功率关系。与图3的数值相比较,得到输出功率对泵浦功率的斜率效率约1.87%,对入纤功率的斜率约85.2%,最大光——光转换效率为54.8%。由于模式之间的竞争,激光器的平均输出功率存在波动,在某一泵浦功率下,测量了输出功率随时间的变化,见图15。另外,在输出光谱中均观察到较强的剩余泵浦光,这可能与实验选用的光纤长度较短有关。

#### 4 小结

通过国产LD泵浦国产掺Yb双包层光纤,详细地研究了放大的自发辐射谱的特性,分析了激光器中模式竞争的各种原因,对激光的形成有了更深入的理解。欲使激光器运行在波长稳定的连续输出状态,必须设法消除或减小F-P腔内振荡模式之间的竞争,如采用行波腔结构,消除空间烧孔效应;采用窄带腔镜或窄带光纤光栅作为腔镜,减小激光器的有效增益带宽等。

关于放大的自发辐射,在这里,要澄清一个问题,即超荧光与放大的自发辐射。有的文献中把随泵浦功率的增加发射谱变窄的行为称为超荧光是错误的;更有甚者,直接称超荧光是放大的自发辐射<sup>[6-7]</sup>。

从激光原理中得知<sup>[5]</sup>,当激励较强工作物质处于反转激发状态时,如果激励足够强,使小信号增益系数大于工作物质的内部损耗系数,则工作物质对自发辐射有放大作用,但由于不满足阈值条件,不能形成自激振荡,输出光是放大的自发辐射。

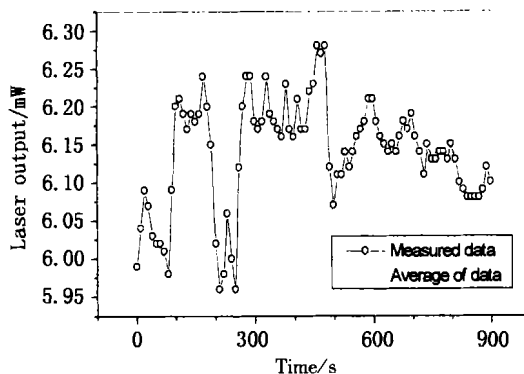


图15 激光输出功率的波动

(下转第156页)

5ps,得到如图4所示(a)压缩比与传输距离的关系;(b)峰值强度比与传输距离的关系。从图中可以看出当压缩比达到4、峰值强度比达到8.6时的光纤长度都是传输距离为10个色散长度处,对于 $T_{FWHM}$ 分别取1ps、2ps、3ps、4ps、5ps, $\xi$ 分别为160m、643m、1447m、2573m、4021m。

为满足绝热条件,EDFA中的增益值取值很小 $\mu=0.075$ ,由此孤子获得有效放大所需的放大器长度就会相对增大。由色散长度与输入脉宽的关系( $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ )可知,EDFA的长度必须随输入脉宽的增大而指数规律增大。而在DD-EDFA中,因色散渐减系数很小 $\theta=0.095$ , $\beta_2$ 值很缓慢得变小,故色散长度与输入脉宽的关系( $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ )仍旧近似满足。同时也可以这样理解,在常规光纤中,脉冲的初始宽度愈大,其演化周期愈大 $[Z_0 = \pi T_0^2/(2|\beta_2|)]$ ,而色散缓变光纤可看成许多短距离常规光纤的相加,因此,在色散缓变光纤的情况下,脉冲得到有效放大和压缩时所需的光纤长度随初始脉宽的增大而增大。所以在DD-EDFA中的传输情况与在EDFA中情况类似,为保证光孤子有效的放大和压缩效果,DD-EDFA的长度必须随输入脉宽的增大而指数规律增大。当 $T_{FWHM}$ 取10ps时,要达到压缩比为4,峰值强度比为8.6所需的光纤长度为1.

68km,所以对脉宽大于10ps的脉冲,运用绝热放大就很合适。

#### 4 结束语

对于光孤子放大,如何避免EDFA由于非线性效应引起的脉冲畸变是当前的研究热点。本文研究在DD-EDFA中光孤子脉冲绝热放大的方法。将一个皮秒级的光孤子脉冲耦合到DD-EDFA后,光脉冲由于光纤色散渐变以及光纤放大器光学放大两种效应而被有效放大变窄,峰值功率放大和脉宽压缩效果比单独运用其中一种效应得到的效果都好,并且可获得无畸变的高质量脉冲(脉座能量小于3%)。并研究了不同初始脉宽情况下具体情况。

#### 参考文献:

- [1] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. Second Edition, Boston: Mass Academic, 1995. 506 - 515.
- [2] Wen-hua Cao, P K A Wai. Amplification and compression of ultrashort fundamental solitons in an erbium-doped nonlinear amplifying fiber loop mirror [J]. Optics Lett, 2003, 28(4): 284 - 286.
- [3] 沈廷根, 龚敖川. 光纤放大器中的孤子传输特性[J]. 激光杂志, 1996, 17(2): 81 - 83.
- [4] 文双春, 徐文成. 变系数非线性 Schrodinger 方程孤子的演化[J]. 中国科学(A辑) 1997, 27(10): 949 - 953.

(上接第152页)

射。而超荧光是多原子合作辐射的一种基本光学效应,其强度与粒子反转密度的平方成正比<sup>[8]</sup>。它是既区别于自发辐射又有别于受激辐射的又一种基本辐射过程,是一种相干的自发辐射。在实际实验条件下,当介质的增益系数很大时,放大的自发辐射所表现出的谱线迅速变窄、发散角急剧变小的行为又与超荧光雷同,基于这个原因,人们很容易将二者混淆。

从目前报道来看,国内能够提供掺Yb双包层光纤的只有两家:中国电子科技集团公司第46所<sup>[9]</sup>和武汉邮科院烽火通信科技股份有限公司<sup>[10]</sup>,前者仅提供实验研究用,而后者有产品出售。但总的来说,比起国外大包层直径掺Yb双包层光纤,国内产品因包层直径较小,故还不能用于大功率光纤激光器。衷心希望国内同仁不懈努力,研制、生产出自己的大包层直径掺Yb双包层光纤,从而实现光纤激光器的大功率输出。

#### 参考文献:

- [1] D C Hanna, R M Percival, I R Perry, et al. Yb-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from

1.010 $\mu$ m to 1.62 $\mu$ m and 3-level operation at 974nm[J].

Journal of modern Optics, 1987, 37: 329 - 331.

- [2] V Dominic, S MacCormack, R Waarts, et al. 110W fiber laser[J]. Electron Lett., 1999, 35(14): 1158 - 1160.
- [3] A Hider, T Chartier. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. Optic Comm., 2000, 186(4): 311 - 317.
- [4] R Paschotta, J Nilsson, A C Tropper, et al. Ytterbium doped fiber amplifiers [J]. IEEE J. Quant. Electr., 1997, 33(77): 1049 - 1056.
- [5] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理 [M]. 第4版, 北京: 国防工业出版社, 2000: 202 - 206.
- [6] 陈一, 程瑞华, 沈红卫, 等. 掺石英光纤超荧光特性研究[J]. 科学通报, 1992, 3: 275 - 277.
- [7] 金振洪, 陆江. 超荧光光纤光源的工作特性[J]. 激光杂志, 2000, 21(5): 14 - 15.
- [8] 章若冰, 王清月. 激光物理导论 [M]. 天津大学出版社, 1988年: 451.
- [9] 宁鼎, 王文涛, 阮灵. 掺Yb<sup>3+</sup>双包层石英光纤的研制及其激光特性[J]. 中国激光, 2000, A27(11): 987 - 991.
- [10] 尹红兵, 李诗愈, 程淑玲, 等. 掺Yb<sup>3+</sup>石英光纤的制备及其激光性能[J]. 光通信研究, 1999, 5: 23 - 26.