

Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究

林治全 于春雷 何冬兵 冯素雅 张磊 陈丹平 胡丽丽

Stimulated emission and laser behaviors of Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped phosphate glass fiber

Lin Zhi-Quan Yu Chun-Lei He Dong-Bing Feng Su-Ya Zhang Lei Chen Dan-Ping Hu Li-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 164204 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.164204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光烧蚀材料等离子体反冲压力物理模型研究与应用

Research and application of plasma recoil pressure physical model for pulsed laser ablation material

物理学报.2017, 66(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134205>

单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报.2017, 66(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064201>

级联掺 Yb 增益光纤提高拍频信号信噪比的实验研究

Experimental study on increasing signal-to-noise ratio of a beat note by cascading an Yb-doped fiber in an Er-fiber comb

物理学报.2017, 66(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024206>

基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

物理学报.2016, 65(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤锁模激光器

Highly stable and self-started all-fiber Yb<sup>3+</sup> doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution

物理学报.2016, 65(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214207>

# Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐玻璃光纤的 发光与激光特性研究\*

林治全<sup>1)2)</sup> 于春雷<sup>1)†</sup> 何冬兵<sup>1)</sup> 冯素雅<sup>1)</sup> 张磊<sup>1)</sup> 陈丹平<sup>1)</sup> 胡丽丽<sup>1)</sup>

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 强激光材料重点实验室, 上海 201800)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年3月20日收到; 2017年6月5日收到修改稿)

以 970 nm 和 808 nm 半导体激光器作为抽运源, 从光纤长度和抽运功率两个方面, 探讨了 Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 摩尔浓度比约为 4 : 1 的共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性. 在 970 nm 抽运下, 光纤光谱以 Yb<sup>3+</sup> 离子的发光为主, 但 Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup> 能量传递会对光纤光谱(激光和受激放大自发辐射)产生调制作用, 调制作用随 970 nm 抽运功率或光纤长度的增加而显著, 甚至出现显著的双波长激光现象. 尽管玻璃样品中 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 的能量传递效率  $\eta_{Nd \rightarrow Yb}$  高达 64%, 但在 808 nm 抽运下, 激光峰始终在 1053 nm 附近产生, 且与 808 nm 抽运功率大小和光纤长度无关. 为解释这一现象, 推导了考虑 Nd<sup>3+</sup> 离子受激辐射的能量传递模型. 从理论模型来看, Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 能量传递作用随 Nd<sup>3+</sup> 离子受激辐射信号光强度的增加而迅速减弱, 这与该光纤实际测试的荧光光谱随 808 nm 抽运功率的变化规律相符合. 因此, 当采用 Nd<sup>3+</sup> 离子来敏化 Yb<sup>3+</sup> 离子时, 需要考虑 Nd<sup>3+</sup> 离子的受激辐射对 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 能量传递的抑制作用.

**关键词:** 光纤激光器, 磷酸盐玻璃光纤, Nd<sup>3+</sup> ↔ Yb<sup>3+</sup> 能量传递

**PACS:** 42.55.Wd, 42.70.Jk

**DOI:** 10.7498/aps.66.164204

## 1 引言

Nd<sup>3+</sup> 离子和 Yb<sup>3+</sup> 离子是获取高功率 1 μm 激光最常用的稀土离子. Nd<sup>3+</sup> 为四能级结构, 具有发射截面大、吸收谱线丰富、激光阈值低等特点; 而 Yb<sup>3+</sup> 则因基质引起的斯托克斯作用而产生准三能级或准四能级结构, 具有量子亏损小、调谐波长宽、荧光寿命长等特点. 由于 Nd<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 能级只是略高于 Yb<sup>3+</sup> 的 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级, 在共振能量传递或声子协助能量传递的作用下<sup>[1]</sup>, 可发生 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 能量传递过程, 这使得 Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺成为一种兼顾 Nd<sup>3+</sup> 离子和 Yb<sup>3+</sup> 离子优点的一种重要途径. 在世界上第一台激光器诞生后不久, Pearson 和 Porto<sup>[2]</sup> 就在硼酸盐玻璃中开展了基于 Nd<sup>3+</sup> 敏

化 Yb<sup>3+</sup> 的研究, 并在氙灯抽运下获得了 Yb<sup>3+</sup> 的激光输出. 至今, 已有大量的文献报道了不同基质下 Nd<sup>3+</sup> 敏化 Yb<sup>3+</sup> 的相关研究工作, 研究范围涉及玻璃、晶体和透明陶瓷等三大材料领域.

对 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 能量传递的研究可归纳为以下几个主要的应用方向: 宽调谐激光器和高功率激光器<sup>[3-6]</sup>、非线性晶体<sup>[7,8]</sup>, Pr<sup>3+</sup> 离子泵源<sup>[9,10]</sup>、太阳能电池<sup>[11-13]</sup> 以及超短脉冲放大<sup>[14]</sup>. 2005年, 德国 Jena 大学的 Limpet 研究小组采用 Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺石英光纤, 基于多波长抽运(808 nm/940 nm/976 nm) 获得了 1.3 kW 激光输出<sup>[4]</sup>. 这种抽运方案利用了 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> 能量传递来解决 Yb<sup>3+</sup> 离子抽运功率不足的问题. 但随着半导体技术的发展, 市面上已能获得高功率的 975 nm 激光二极管(LD)泵源, 因此基于 Nd<sup>3+</sup> 敏化 Yb<sup>3+</sup> 的

\* 国家自然科学基金(批准号: 61405215, 61505232)、中国科学院青年促进会和国家高技术研究发展计划(批准号: 2016YFB0402201)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [sdyclcy@163.com](mailto:sdyclcy@163.com)

抽运方案在如今的光纤激光器中已很少采用. 然而在基于晶体和透明陶瓷材料的高重复频率大能量激光器中, 用  $\text{Nd}^{3+}$  离子来敏化  $\text{Yb}^{3+}$  仍具有潜在的价值. 采用  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺一方面可以适当减小  $\text{Yb}^{3+}$  离子掺杂浓度<sup>[15]</sup>, 降低制备高质量晶体或透明陶瓷的难度, 提升材料的激光性能; 另一方面可采用大能量的脉冲氙灯作为泵源, 获取大能量脉冲<sup>[16]</sup>以及基于自非线性效应而产生的可见光激光<sup>[7,8]</sup>. 由于  $\text{Yb}^{3+}$  的激发态  $^2\text{F}_{5/2}$  与基态的能级间隙约为  $10000 \text{ cm}^{-1}$ , 该值正好与硅的能隙相当. 受新能源需求的推动, 基于  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递的太阳能电池也是当前的一个热点课题.  $\text{Nd}^{3+}$  在可见光波段具有多个吸收峰, 吸收太阳能的  $\text{Nd}^{3+}$  离子可通过双光子或三光子的量子裁剪将能传递给  $\text{Yb}^{3+}$  离子<sup>[17,18]</sup>, 从而获取量子效率大于1的高效太阳能电池<sup>[19]</sup>. 目前已报道  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递效率高达90%以上的材料, 包括晶体<sup>[20]</sup>、透明陶瓷<sup>[15,16]</sup>和玻璃<sup>[14,21]</sup>等. 最近, Schott公司推出的  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃, 其  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递效率宣称到达100%<sup>[14]</sup>. 由于  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺在  $1 \mu\text{m}$  的光谱较  $\text{Nd}^{3+}$  单掺的宽很多, 因此基于  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递的  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺材料是一种极具潜力的获取  $1 \mu\text{m}$  超短脉冲的新材料.

相较于  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递过程,  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程则很少受到关注. 1984年, 陈述春等在磷酸盐玻璃中观察到了  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程, 并揭示了温度对其传递效率的影响<sup>[22]</sup>. 1985年, 法国的 Lurin 等<sup>[12]</sup> 在硼酸盐玻璃中也观察到了该能量传递过程. 对  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程较为详细的讨论则是西班牙的 Jaque 等<sup>[7,8]</sup> 在  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺的  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  晶体中完成的. 基本结论是, 随温度和  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂浓度的增加,  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递效率显著增加, 而增加  $\text{Yb}^{3+}$  离子的掺杂浓度对能量传递的贡献则相对较小. 此外, de Sousa 等<sup>[11]</sup> 指出基质声子能量大有利于  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程的进行. 2005年, Jaque 等<sup>[23]</sup> 在  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂  $\text{Nd}_3\text{BWO}_9$  晶体中观察到了基于抽运功率和晶体温度的荧光开关效应, 即随抽运功率的增加或晶体温度的升高,  $\text{Yb}^{3+}$  离子的荧光强度迅速减弱而  $\text{Nd}^{3+}$  离子的则迅速增强, 从而出现  $\text{Yb}^{3+}$  离子荧光向  $\text{Nd}^{3+}$  离子荧光的切换. 该作者认为这是  $\text{Nd}^{3+} \leftrightarrow \text{Yb}^{3+}$

能量传递过程相互作用的结果, 源于强激光抽运导致的局部热载. 其后, Jaque 等<sup>[24]</sup> 在  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂  $\text{NdPO}_4$  晶体中也观察到类似的实验现象. 利用  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递对温度的敏感性, 哈尔滨工业大学的 Xu 等<sup>[25]</sup> 于2013年开展了基于  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺玻璃陶瓷进行光学测量方面的研究工作, 揭示了  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺玻璃陶瓷可用作高灵敏度和较高准确度的光学温度传感器. 2016年, 利用磷酸盐玻璃所具有的稀土离子溶解度高和声子能量大的特点, 我们拉制了摩尔浓度比约为 4:1 的  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤, 并在 970 nm LD 抽运下, 观察到了  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递产生  $\text{Nd}^{3+}$  离子激光的现象, 且激光阈值随光纤温度的升高而显著下降<sup>[26]</sup>.

本文在前期工作的基础上, 首先对比研究了  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃的光谱测试结果, 并计算了  $\text{Nd}^{3+} \leftrightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递效率; 其次采用空间耦合端面抽运的方式, 探讨了该光纤分别在 970 nm 和 808 nm 抽运下的发光和激光特性; 最后通过建立考虑受激辐射的能量传递理论模型, 对实验结果进行了解释.

## 2 理论背景

对于  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺体系, 选择不同的激发光源, 会出现不同的能量传递过程: 1) 当激发  $\text{Nd}^{3+}$  离子时(例如 808 nm 抽运), 体系中会出现  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递过程, 如图 1 所示; 2) 当激发  $\text{Yb}^{3+}$  离子时(例如 970 nm 抽运), 则出现  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程. 通常  $\text{Nd}^{3+}$  离子的  $^4\text{F}_{3/2}$  能级略高于  $\text{Yb}^{3+}$  的  $^2\text{F}_{5/2}$  能级(约  $1000 \text{ cm}^{-1}$ ), 因此室温下  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递效率要远大于  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递效率. 以上两种能量传递的发光过程, 都可采用抽运光激发的稀土离子随时间演化的退激发过程来描述. 下面以  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递过程为例来进行说明. 为简化起见, 以  $N_{\text{Nd1}}$ ,  $N_{\text{Nd2}}$  和  $N_{\text{Nd}}$  分别表示  $\text{Nd}^{3+}$  处于基态、激发态和总的粒子数密度, 满足  $N_{\text{Nd}} = N_{\text{Nd1}} + N_{\text{Nd2}}$ ; 以  $N_{\text{Yb1}}$ ,  $N_{\text{Yb2}}$  和  $N_{\text{Yb}}$  分别表示  $\text{Yb}^{3+}$  处于基态、激发态和总的离子数密度, 满足  $N_{\text{Yb}} = N_{\text{Yb1}} + N_{\text{Yb2}}$ . 弱激发条件下, 若忽略无辐射跃迁过程以及  $\text{Nd}^{3+}$  与  $\text{Nd}^{3+}$  相互间的能量传递,  $N_{\text{Nd2}}$  随时间  $t$  的演化过程如下<sup>[1]</sup>:

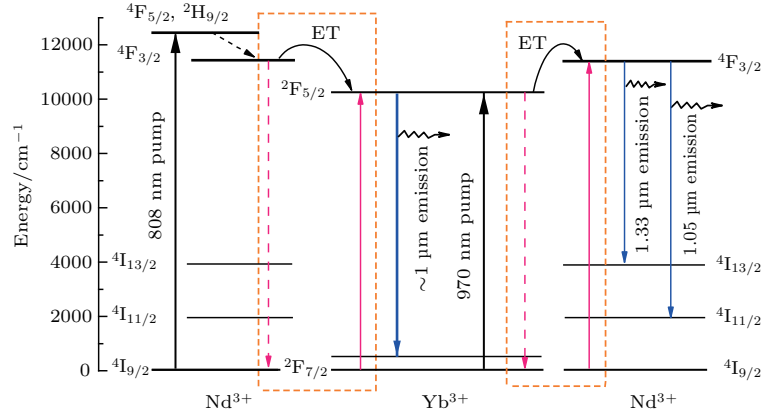


图1 (网刊彩色)  $\text{Nd}^{3+}$  离子与  $\text{Yb}^{3+}$  离子相互间在不同激发下的能量传递过程 (参见文献 [7] 和 [26])

Fig. 1. (color online) Energy transfer processes between  $\text{Nd}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  for different pump conditions (see Ref. [7] and [26]).

$$\frac{dN_{\text{Nd}^{3+}}}{dt} = -A_R N_{\text{Nd}^{3+}} - W_{\text{ET}} N_{\text{Yb}^{3+}} N_{\text{Nd}^{3+}}, \quad (1)$$

式中  $A_R$  为  $\text{Nd}^{3+}$  的自发辐射速率,  $W_{\text{ET}}$  为  $\text{Nd}^{3+}$  向  $\text{Yb}^{3+}$  的能量传递速率. 由 (1) 式可知, 随着时间的演化,  $\text{Nd}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  都参与发光, 二者在光谱上的相对强度表征了能量传递效率的大小. 此时,  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递效率  $\eta_{\text{Nd} \rightarrow \text{Yb}}$  为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Nd} \rightarrow \text{Yb}} &= \frac{W_{\text{ET}} N_{\text{Yb}^{3+}} N_{\text{Nd}^{3+}}}{A_R N_{\text{Nd}^{3+}} + W_{\text{ET}} N_{\text{Yb}^{3+}} N_{\text{Nd}^{3+}}} \\ &= 1 - \frac{\tau_{\text{Nd}/\text{Yb}}}{\tau_{\text{Nd}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\tau_{\text{Nd}} = 1/A_R$  为  $\text{Nd}^{3+}$  在其单掺体系中的荧光寿命,  $\tau_{\text{Nd}/\text{Yb}} = 1/(A_R + W_{\text{ET}} N_{\text{Yb}^{3+}})$  为  $\text{Nd}^{3+}$  在  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺体系中的荧光寿命, 二者都可通过荧光寿命测试得到. 同理, 对于  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递过程, 其能量传递效率  $\eta_{\text{Yb} \rightarrow \text{Nd}}$  为

$$\eta_{\text{Yb} \rightarrow \text{Nd}} = 1 - \frac{\tau_{\text{Nd}/\text{Yb}}}{\tau_{\text{Yb}}}, \quad (3)$$

式中  $\tau_{\text{Yb}}$  为  $\text{Yb}^{3+}$  在其单掺体系中的荧光寿命. 通过比较  $\tau_{\text{Nd}}$  和  $\tau_{\text{Nd}/\text{Yb}}$  的表达式, 不难发现,  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递过程的存在使得  $\text{Nd}^{3+}$  的寿命相对减少了. 显然, 减少的程度与能量传递速率  $W_{\text{ET}}$  大小有关. 通常,  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺体系中的  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递过程伴有声子的参与. 若考虑电偶极矩-电偶极矩相互作用模型, 则  $W_{\text{ET}}$  具有如下关系 [1,27]:

$$\begin{aligned} W_{\text{ET}}(T) &\propto \frac{1}{R^6} \frac{\exp(E_{\text{ph}}/kT)}{\exp(E_{\text{ph}}/kT) - 1} \\ &\times \int_0^\infty \frac{f_{\text{D}}(E \pm E_{\text{ph}}) f_{\text{A}}(E)}{E^2} dE, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $R$  是  $\text{Nd}^{3+}$  与  $\text{Yb}^{3+}$  之间的距离,  $E_{\text{ph}}$  是匹配声子的能量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $f_{\text{A}}(E)$  是

$\text{Yb}^{3+}$  的吸收截面谱型函数,  $f_{\text{D}}(E \pm E_{\text{ph}})$  是  $\text{Nd}^{3+}$  在声子参与下的发射截面谱型函数, 其中正号对应于湮灭声子过程, 负号对应于产生声子过程. 由 (4) 式可知,  $\text{Nd}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$  能量传递速率与稀土掺杂浓度、声子能量、环境温度以及  $\text{Nd}^{3+}$  (在声子协助下) 发射截面谱型函数和  $\text{Yb}^{3+}$  吸收截面谱型函数的重叠积分有关.

### 3 实 验

由实验室采用传统的激光玻璃单坩埚高温熔炼技术, 经配料、熔化、通气除水、搅拌、澄清、浇注成型、退火工艺流程, 分别熔制了纤芯玻璃 (G0)、内包层 (G1) 和外包层 (G2) 白玻璃, 用于制备双包层  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤; 熔制了  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂磷酸玻璃 (G3) 和  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂磷酸盐玻璃 (G4), 用于能量传递和发射截面计算. 玻璃的组分和折射率参数见表 1.

将熔制好的磷酸盐玻璃 G0, G3 和 G4 切割后进行磨片, 加工厚度为 0.5 mm, 用于荧光光谱和荧光寿命的测试. 测试所采用的泵源为脉冲氙灯和 975 nm LD 激光器, 测试仪器为 Edinburgh Instruments FLS 920, 测试温度为室温.  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐玻璃光纤的制备: 1) 将熔制好的磷酸盐玻璃 G0—G2 切割后加工成直径为 20 mm 的玻璃棒, 酸洗后经拉丝塔拉成直径为 1 mm 的玻璃小棒; 2) 借助六角模具, 将 1 mm 玻璃小棒排列出具有六角内包层结构的光纤预制棒; 3) 再经拉丝塔拉制出双包层磷酸盐玻璃光纤. 激光实验采用的是空间耦合抽运的方式, 详见 4.2—4.4 节.



表1 玻璃组分和折射率  
Table 1. The glass composition and refractive index.

Glass	Component/mol%	Refractive index
G0	69.2P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -6.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5.2 K <sub>2</sub> O-10.3BaO-4.1B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2.5Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.6Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5460
G1	67P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -6 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5 K <sub>2</sub> O-10BaO-4B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4.8La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3.2Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5448
G2	60P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -9 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -20 K <sub>2</sub> O-10BaO-1B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4996
G3	69.2P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -6.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5.2 K <sub>2</sub> O-10.3BaO-4.1B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2.5Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5456
G4	69.2P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -6.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5.2 K <sub>2</sub> O-10.3BaO-4.1B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.6Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5452

## 4 结果与讨论

### 4.1 Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐玻璃的荧光光谱及发射截面

图2(a)中实线所示为Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺玻璃样品G0在808 nm(脉冲氙灯)激发下的归一化荧光光谱. 作为参照, 图2(a)中虚线所示为Nd<sup>3+</sup>单掺玻璃样品G3在808 nm激发下的归一化荧光光谱. 通过二者光谱的比较不难发现, 共掺样品G0存在Yb<sup>3+</sup>离子在975 nm处的发光峰(源于<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>(Yb<sup>3+</sup>)), 且其荧光强度是Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm处的4倍, 这表明样品G0在808 nm激发下存在较强的Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>的能量传递过程. 严格说来, 该1053 nm处的发光不单属于Nd<sup>3+</sup>离子, 也包含Yb<sup>3+</sup>离子在该处的发光, 是二者叠加的结果. 图2(b)所示的归一化荧光光谱是Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺样品G0(红线)和Yb<sup>3+</sup>单掺样品G4(黑线)在975 nm LD激发下得到的. 比较两光谱, 尽管共掺样品G0的荧光光谱以Yb<sup>3+</sup>离子的发光为主, 但仍可观察到Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm(<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>)和1324 nm (<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)处的发光峰, 这表明共掺样品G0在975 nm激发下出现了Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递现象. 注意图2(b)中的插图是1300—1400 nm波长范围的局部放大示意图. 表2为玻璃样品G0, G3和G4的荧光寿命测试结果. 其中Nd<sup>3+</sup>寿命的测试波长为1053 nm, Yb<sup>3+</sup>寿命的测试波长为1006 nm. 利用(2)式计算得到共掺样品G0在808 nm激发下, Nd<sup>3+</sup>向Yb<sup>3+</sup>的能量传递效率约为64%; 利用(3)式计算得到共掺样品G0在975 nm激发下, Yb<sup>3+</sup>向Nd<sup>3+</sup>的能量传递效率约为4%. 值得强调的是, Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>能量传递效率与玻璃组分有关(见(4)式), 我们的G0样品

组分与文献[14]在其专利[28]中报道的组分有较大区别, 因此G0中64%的 $\eta_{Nd \rightarrow Yb}$ 较文献[14]报道的100%低.

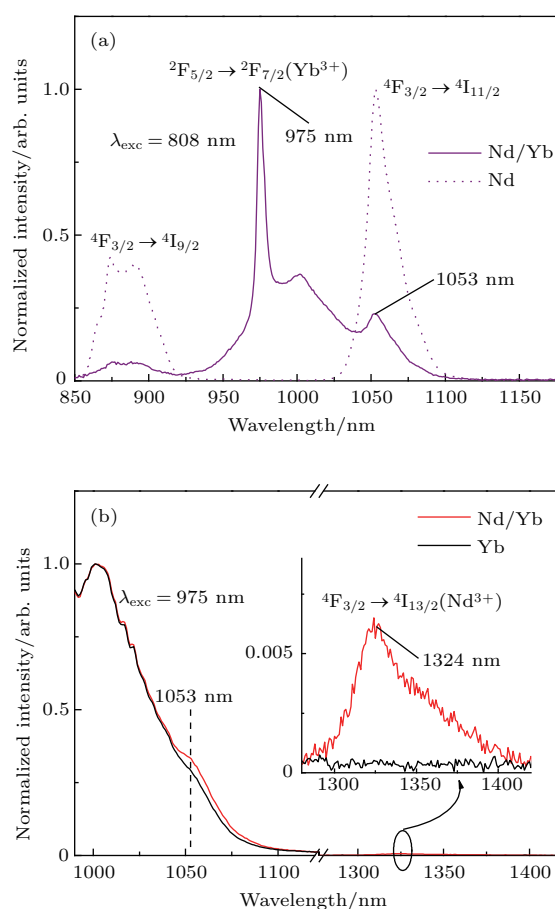


图2 (网刊彩色) (a) 室温下磷酸盐玻璃样品G0和G3在808 nm激发下的荧光光谱; (b) 室温下磷酸盐玻璃样品G0和G4在975 nm激发下的荧光光谱, 插图所示为1300 nm到1400 nm的局部放大

Fig. 2. (color online) (a) Room-temperature fluorescence spectra of phosphate glass sample G0 and G3 under 808 nm exciting; (b) room-temperature fluorescence spectra of phosphate glass sample G0 and G4 under 975 nm exciting, and the inset shows the local magnification from 1300 nm to 1400 nm.

表2 荧光寿命和能量传递效率  
Table 2. Fluorescence lifetime and energy transfer efficiency.

Sample	G3	G0	Sample	G4	G0
Pump wavelength	808 nm		Pump wavelength	975 nm	
Test wavelength	1053 nm		Test wavelength	1006 nm	
Lifetime ( $\tau$ )	$\tau_{Nd}$	$\tau_{Nd/Yb}$	Lifetime ( $\tau$ )	$\tau_{Yb}$	$\tau_{Nd/Yb}$
	287 $\mu$ s	104 $\mu$ s		1.64 ms	1.58 ms
$\eta_{Nd \rightarrow Yb}$	64%		$\eta_{Yb \rightarrow Nd}$	4%	

以G3和G4的光谱数据为基础, 采用Füchtbauer-Ladenburg公式<sup>[29]</sup>, 计算了Yb<sup>3+</sup>和Nd<sup>3+</sup>离子的发射截面, 计算结果如图3所示. 由图3可知, Nd<sup>3+</sup>离子发射截面较窄, 其发射截面峰位于1053 nm, 该值约为Yb<sup>3+</sup>离子在975 nm处的3倍. 相反, Yb<sup>3+</sup>离子发射截面比较宽, 在1000—1100 nm范围内随波长增加而逐渐减小. 图3中的蓝色虚线为Yb<sup>3+</sup>离子的吸收截面, 由G4样品的吸收光谱数据计算得到. 可以看出, Yb<sup>3+</sup>离子的吸收截面在1002—1045 nm范围内随波长增加而逐渐减小, 而在波长大于1045 nm的范围内则很弱, 基本可忽略.

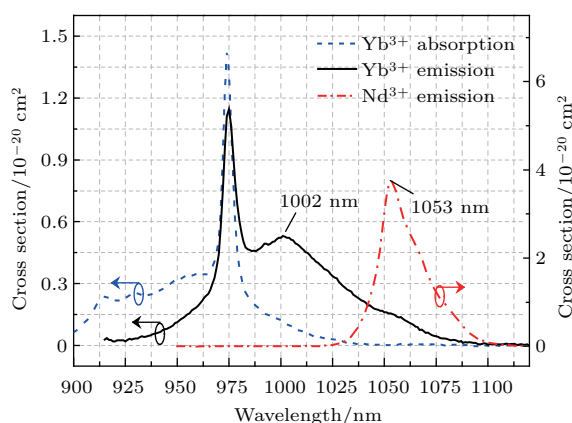


图3 (网刊彩色) Nd<sup>3+</sup>在G3中的发射截面以及Yb<sup>3+</sup>在G4中的吸收截面和发射截面

Fig. 3. (color online) Emission cross section of Nd<sup>3+</sup> in G3, and absorption and emission cross sections of Yb<sup>3+</sup> in G4.

### 4.2 970 nm 抽运下的激光特性

文献<sup>[26]</sup>探讨了由磷酸盐玻璃G0—G2控制的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺磷酸盐双包层玻璃光纤在970 nm抽运下的激光特性, 在长度为0.35 m的光纤中获得了1028 nm和1053 nm的双波长激光, 二者分别来自于Yb<sup>3+</sup>离子和Nd<sup>3+</sup>离子的受激辐射, 激光抽运阈值分别为4.3 W和31.5 W. 由于Yb<sup>3+</sup>离子的发射截面是波长的函数, 因此光纤长度导致振

荡激光波长的变化将反映出Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递与光纤长度的关系. 对此, 一根长度为0.7 m的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤用来进一步探讨该光纤在970 nm抽运下的激光特性. 图4为实验光路图, 其中, Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤的纤芯和内包层直径分别为17  $\mu$ m和260  $\mu$ m, 纤芯NA约为0.06. 光谱仪(AQ6370C Yokogawa)用于记录激光光谱.

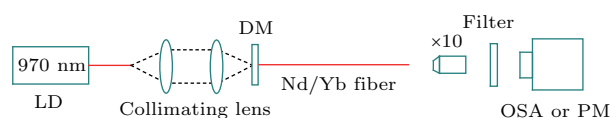


图4 (网刊彩色) 激光和放大自发发射(ASE)实验光路示意图 待测Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤的输出端切平角进行激光实验, 切6°角进行ASE实验; LD, 激光二极管; DM, 双色镜; OSA, 光纤光谱仪; PM, 功率计

Fig. 4. (color online) Simplified laser and ASE setup. Output end-face of the Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped fiber cuts cleave and 6 degree for laser and ASE operating, respectively. LD, laser diode; DM, dichroic mirror; OSA, optical spectrum analyzer; PM, power meter.

图5(a)是0.7 m长的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤随970 nm抽运功率变化的激光光谱. 该测试结果与0.35 m长的测试结果<sup>[26]</sup>类似, 随抽运功率的增加, 在1053 nm附近产生Nd<sup>3+</sup>离子的激光峰. 所不同的是, Yb<sup>3+</sup>离子的激光波长由0.35 m时的1028 nm红移到此时的1034 nm, 而1053 nm激光的抽运阈值则由31.5 W下降到此时的16.5 W, 下降了48%. 借助合适的滤光片, 将1053 nm激光分离出来, 测量其激光功率. 5(b)中的蓝色曲线所示为1053 nm激光功率随970 nm LD抽运功率的变化. 相较于总激光功率(即1034 nm和1053 nm激光的总功率), 1053 nm激光的功率要低很多. 在激光建立初期(抽运功率为16.5 W), 其功率约为总功率的1%. 但当抽运功率增加到31.7 W时, 其占比则提高到了12%. 注意到图5(b)所记录的1053 nm激光功率随970 nm抽运功率的增加是一个非线性快速增加的过程, 这表明: 随970 nm抽运功率的增加, 1053 nm激光的增益强于1036 nm激

光的增益. 这与图 3 中  $\text{Yb}^{3+}$  离子的发射截面随波长变化相矛盾 ( $\text{Yb}^{3+}$  离子在 1053 nm 处的发射截面是小于其在 1036 nm 处的发射截面), 因此这必然是  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$  能量传递增强的贡献.

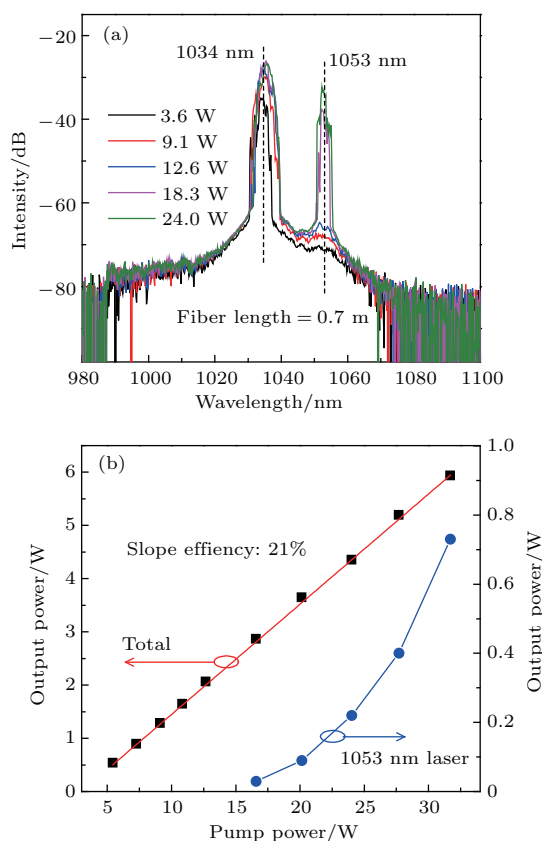


图 5 (网刊彩色) (a) 长度为 0.7 m 光纤随 970 nm LD 抽运功率变化的激光光谱; (b) 激光输出功率与 970 nm LD 抽运功率之间的关系

Fig. 5. (color online) (a) Laser spectra of the 0.7 m fiber with increasing 970 nm LD pump power; (b) laser output power versus 970 nm LD pump power.

由于能量传递速率与环境温度密切相关(见 (4) 式), 不难推测图 5(b) 中 1053 nm 对 970 nm 抽运功率增加的响应是由光纤温度在抽运过程中逐渐增加所导致的. 这可从我们的前期工作中 [26] 揭示的 1053 nm 激光阈值随光纤温度的升高而显著下降得到印证. 对于我们的  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺磷酸盐光纤, 热负荷主要为量子亏损和较大的背景损耗 (1.5 dB/m @1200 nm). 需要强调的是, 图 5(b) 中 1053 nm 激光不仅仅来自于  $\text{Nd}^{3+}$  离子的受激辐射, 也包含  $\text{Yb}^{3+}$  离子的受激辐射.

当采用的光纤长度大于 0.7 m 时, 1053 nm 激光的阈值会进一步减小. 例如, 对于长度为 0.9 m 的光纤, 当达到激光阈值时 ( $P_{970} = 2.8$  W), 将同时在 1036 nm 和 1053 nm 出现激光峰, 但随 970 nm

抽运功率的增加 (>7.2 W), 两激光峰会逐渐加宽而弥合在一起. 此时, 激光振荡的办法将不再适合于探讨  $\text{Nd}^{3+}$  离子和  $\text{Yb}^{3+}$  离子的发光特性. 但可采用 ASE 的办法来定性讨论.

### 4.3 970 nm 抽运下的 ASE

ASE 与振荡激光的区别在于 ASE 没有激光腔, 因此能很好地反映稀土离子的发光特点. 故此, 对  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤的输出端进行角度处理 (切  $6^\circ$  角) 来实现 ASE 运转. 仍采用图 4 所示的光路来进行实验. 这里选取了长度分别为 0.35, 0.9 和 5.0 m 的光纤来进行 ASE 实验.

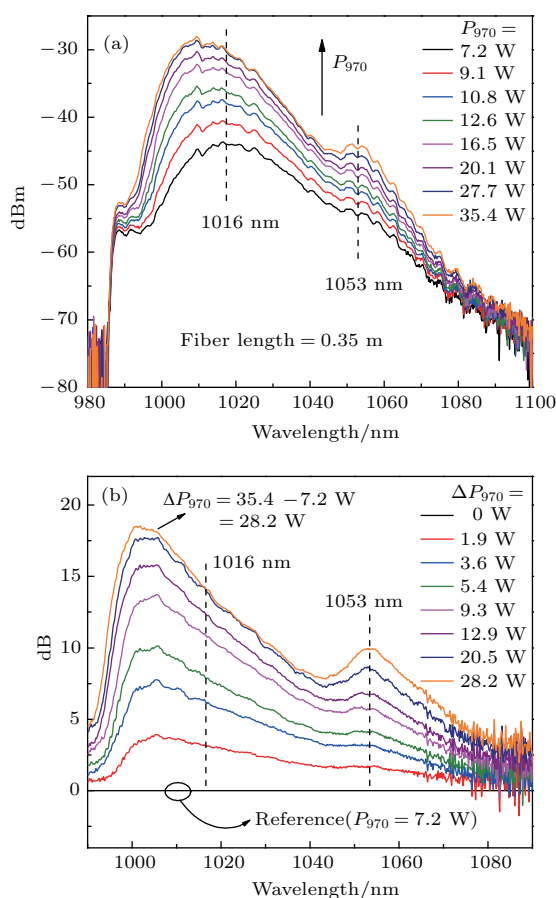


图 6 (网刊彩色) (a) 长度为 0.35 m 光纤随 970 nm LD 抽运功率变化的 ASE 光谱; (b) 计算的 ASE 光谱增益随 970 nm LD 抽运功率增加的变化, 计算以  $P_{970} = 7.2$  W 的 ASE 光谱强度作为参考

Fig. 6. (color online) (a) ASE spectra of 0.35-m-long fiber with increasing 970 nm LD pump power; (b) the calculated variation of ASE-gain with increasing 970 nm LD pump power. The ASE spectrum intensity of 7.2 W pump power ( $P_{970} = 7.2$  W) is selected as the reference in the calculation.

图 6(a) 是长度为 0.35 m 的  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤在 970 nm LD 抽运下的 ASE 光谱. 当抽运

功率为7.2 W时, 在1053 nm处可观察到一个小鼓包, 包含了Nd<sup>3+</sup>离子基于Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递的发光. 随970 nm抽运功率的增加, Yb<sup>3+</sup>离子的发光增强, 并且其ASE中心波长蓝移; 与此同时, Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm处的发光也显著增强. 图6(b)所示为以970 nm抽运功率为7.2 W时的ASE光谱作为参照计算的其他抽运功率相对于此的光谱增益. 不难发现, 1053 nm附近始终存在一个增益鼓包, 这是Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递的贡献. 此外, 1053 nm处的增益随ΔP<sub>970</sub>的增大而显著. 特别地, 当ΔP<sub>970</sub>大于9.3 W时(P<sub>970</sub> > 16.5 W), Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm处的增益变得特别显著. 结合4.2节对图5(b)的讨论结果, 这可归结于光纤温度在抽运过程中升高而导致的.

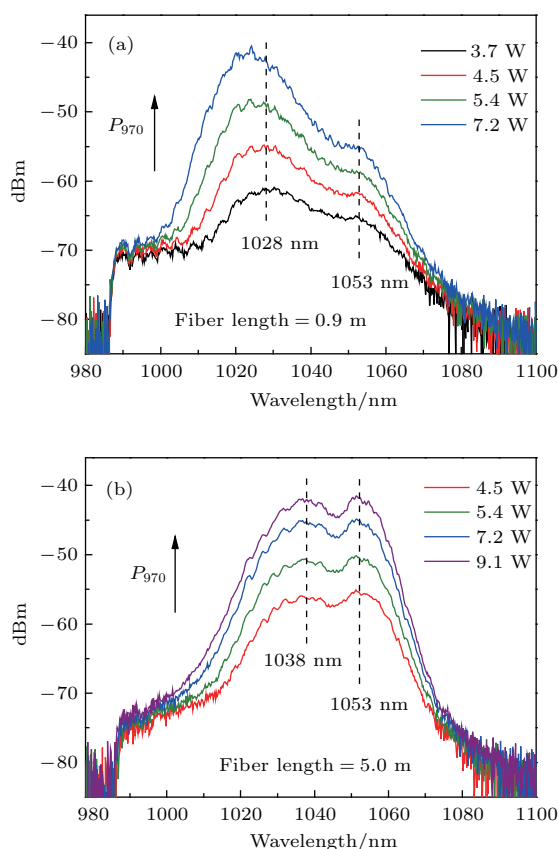


图7 (网刊彩色) 长度分别为0.9 m的光纤 (a) 和5.0 m的光纤 (b) 在不同970 nm LD抽运功率下的ASE光谱  
 Fig. 7. (color online) ASE spectra of 0.9-m-long fiber (a) and 5.0-m-long fiber (b) under different 970 nm LD pump power.

为探讨光纤长度对ASE光谱的影响, 将970 nm LD的抽运功率控制在10 W以下(消除光纤温度升高对光谱的影响). 图7(a)和图7(b)是光纤长度分别为0.9 m和5.0 m时的ASE光谱. 结合图7(a)、图7(b)和图6(a)的ASE光谱, 可得到

如下规律: 随光纤长度的增加, Yb<sup>3+</sup>离子的ASE发光中心向长波方向红移; 对应于Nd<sup>3+</sup>离子发射截面峰值位置的1053 nm附近的发光强度显著增强. 这一变化规律可从Yb<sup>3+</sup>离子发射截面随波长变化来解释: 一方面, Yb<sup>3+</sup>离子的发射截面(见图3)随波长的红移而减小(即辐射概率相对减小), 导致Yb<sup>3+</sup>离子上能级寿命相对增加, 由(2)式可知, 这将导致Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递效率相对增大; 另一方面, Yb<sup>3+</sup>离子发光中心的红移将增大Yb<sup>3+</sup>与Nd<sup>3+</sup>离子在发射截面上的差异, 进一步增强Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递对Yb<sup>3+</sup>离子发光的调制作用. 如果将的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺磷酸盐玻璃光纤视为Yb<sup>3+</sup>单掺光纤, 那么Nd<sup>3+</sup>离子的作用就是等效增大了光纤在1053 nm附近的发射截面, 从而对970 nm抽运下的光谱产生调制. 从4.2节和4.3节的实验结果来看, 该调制作用与抽运功率大小和光纤长度有关.

#### 4.4 808 nm 抽运下的激光特性

在4.1节中指出, Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺磷酸盐玻璃G0具有较高的Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>能量传递效率(约为64%). 由4.3节的讨论可知, 短光纤更利于Yb<sup>3+</sup>离子的发光. 对此, 选取长度为0.25 m的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤来进行808 nm抽运的激光实验. 实验所采用的光路与图4类似, 但泵源为808 nm LD激光器. 图8(a)所示为0.25 m长的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤随808 nm抽运功率变化的激光光谱. 当808 nm的抽运功率为1.5 W时(P<sub>808</sub> = 1.5 W)时, 在1053 nm处产生激光峰, 并且激光峰的位置几乎不随808 nm抽运功率的增加而变化. 对比测试其他光纤长度在808 nm抽运下的激光光谱, 发现该光纤只在1053 nm附近产生激光峰, 与808 nm的抽运功率和光纤长度无关(例如0.3 m/0.5 m/0.8 m/1.2 m等). 显然这与在970 nm抽运下的测试结果不同. 图8(b)记录了长度为0.05 m的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤在不同808 nm激发功率下的荧光光谱, 用于进一步探讨Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤的发光特性. 该光纤的输出端进行了切6°角处理. 图8(b)中Yb<sup>3+</sup>离子在975 nm和1003 nm处的发光强度随808 nm抽运功率的增加而缓慢增加, 呈现饱和的发光特点; 相反Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm处的发光则迅速增强. 当抽运功率为5.3 W时, 1053 nm与975 nm之间的强度差为10 dB. 显然, 当进行激光运转时, 必然在



1053 nm 附近产生激光.

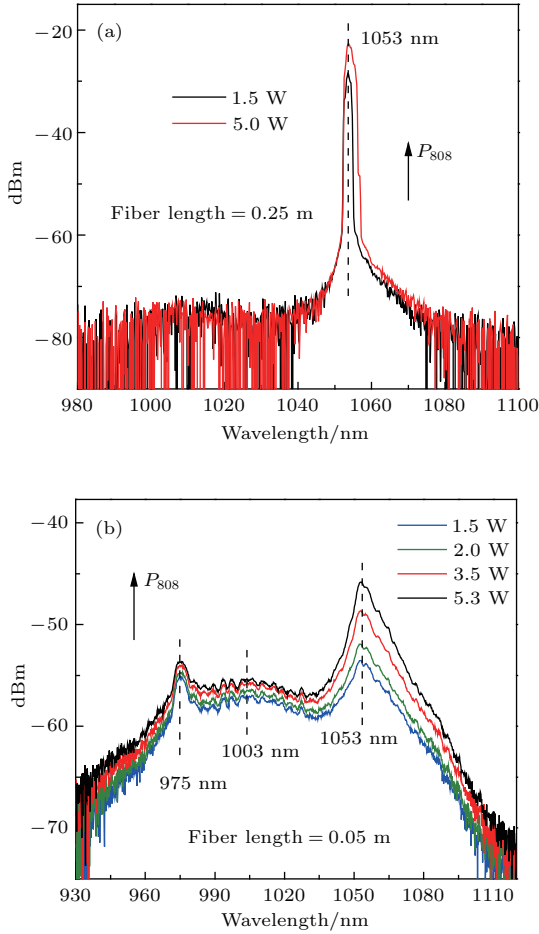


图8 (网刊彩色) (a) 长度为0.25 m的Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤随808 nm LD抽运功率变化的激光光谱; (b) 长度为0.05 m的共掺光纤随808 nm LD抽运功率增加的荧光光谱  
Fig. 8. (color online) Laser spectra of 0.25-m-long fiber (a) and fluorescence spectra of 0.05-m-long fiber (b) with increasing 808 nm LD pump power.

为从理论上探讨Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤在808 nm抽运下的光谱特性, 首先需要在(1)式的基础上考虑供体Nd<sup>3+</sup>离子的受激辐射, 此时(1)式改写为

$$\frac{dN_{Nd2}}{dt} = -A_R N_{Nd2} - W_R N_{Nd2} - W_{ET} N_{Yb1} N_{Nd2}, \quad (5)$$

其中 $W_R$ 为Nd<sup>3+</sup>的受激辐射跃迁速率, 与外界入射信号光的强度成正比. 此时Nd<sup>3+</sup>向Yb<sup>3+</sup>能量传递效率为

$$\eta_{Nd \rightarrow Yb}(W_R) = \frac{W_{ET} N_{Yb1}}{A_R + W_R + W_{ET} N_{Yb1}}. \quad (6)$$

对于 $W_R = 0$ 的情形, (6)式可化简为(2)式. 而对于 $W_R \neq 0$ 的情形, 显然随Nd<sup>3+</sup>离子受激

辐射速率的增加,  $\eta_{Nd \rightarrow Yb}(W_R)$ 逐渐减小. 假设Nd<sup>3+</sup>的受激辐射限于1053 nm处, 即 $W_R = \sigma_{em/1053} P_{1053} / h\nu S$ , 其中 $\sigma_{em/1053}$ 为Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm处的发射截面,  $P_{1053}$ 为光纤纤芯中1053 nm信号光的功率,  $h$ 为普朗克常数,  $\nu$ 为频率,  $S$ 为光纤纤芯的横截面积. 对于包层抽运, 低功率激光运转下的激发态粒子数是很低的, 即 $N_{Yb2} \ll N_{Yb1}$ , 由(2)式可得到如下关系式:

$$W_{ET} N_{Yb1} = \frac{\eta_{Nd \rightarrow Yb}}{1 - \eta_{Nd \rightarrow Yb}} A_R \approx W_{ET} N_{Yb1}. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得到

$$\eta_{Nd \rightarrow Yb}(P_{1053}) \approx \frac{\eta_{Nd \rightarrow Yb} A_R}{A_R + (1 - \eta_{Nd \rightarrow Yb}) \sigma_{em/1053} P_{1053} / h\nu S}. \quad (8)$$

将参数 $\eta_{Nd \rightarrow Yb} = 0.64$ ,  $A_R = 1448 \text{ s}^{-1}$ ,  $\sigma_{em/1053} = 3.76 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $\nu = 2.85 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ,  $S = 2.27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 代入(8)式得到

$$\eta_{Nd \rightarrow Yb}(P_{1053}) \approx \frac{927}{1448 + 32P_{1053}(\text{mW})}. \quad (9)$$

显然, (9)式揭示了Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>能量传递效率随Nd<sup>3+</sup>离子受激辐射光功率的增大而减小的变化规律, 二者的关系如图9所示. 因此, 图8(a)和图8(b)中所示的光谱随808 nm抽运功率增加的变化规律, 实质是供体Nd<sup>3+</sup>离子的受激辐射作用抑制Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>能量传递的结果. 同样, 对于Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤在970 nm抽运下情形, Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递效率也将受到Yb<sup>3+</sup>离子受激辐射的抑制. 但970 nm抽运功率的增加所

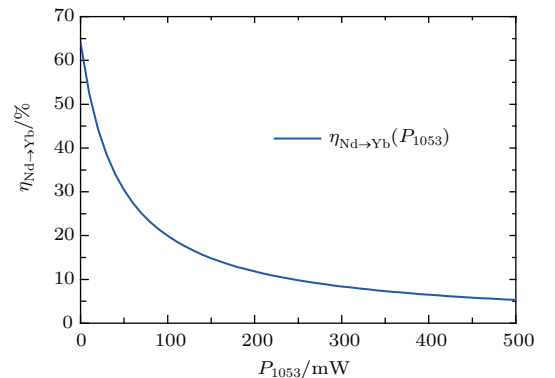


图9 Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>能量传递效率随Nd<sup>3+</sup>离子受激辐射信号光功率的变化规律.

Fig. 9. Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup> energy transfer efficiency with respect to the signal power of stimulated emission of Nd<sup>3+</sup> ions.

导致的光纤温度升高以及Nd<sup>3+</sup>离子所具有的发射截面大的特性等因素,对光纤中的Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递过程的促进作用能够克服Yb<sup>3+</sup>离子受激辐射的抑制作用,因此会出现明显的双波长激光现象.

## 5 结 论

以970 nm和808 nm半导体激光器作为抽运源,从光纤长度和抽运功率两个方面,探讨了Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>摩尔浓度比约为4 : 1的共掺磷酸盐玻璃光纤的发光和激光特性.选择不同波长的抽运源,该光纤将呈现不同的发光规律.在970 nm抽运下,光纤光谱以Yb<sup>3+</sup>离子的发光为主,但Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递会对光纤光谱产生调制作用,这种调制作用随970 nm抽运功率和光纤长度的增加而显著,甚至出现明显的双波长激光现象.相反,在808 nm抽运下,光纤光谱以Nd<sup>3+</sup>离子的发光为主,尽管玻璃样品荧光寿命测试结果表明,Nd<sup>3+</sup> → Yb<sup>3+</sup>的能量传递效率 $\eta_{Nd \rightarrow Yb}$ 约为64%.借助考虑Nd<sup>3+</sup>离子受激辐射的能量传递模型,认识到Nd<sup>3+</sup>离子的受激辐射对Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递具有很强的抑制作用,因此该共掺光纤在808 nm抽运下,光谱上以Nd<sup>3+</sup>离子的发光为主.同样,在970 nm抽运下,Yb<sup>3+</sup>离子的受激辐射也会对Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递产生抑制作用,但在抽运过程中,光纤温度升高对Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递的促进作用是主要的,所以光谱上出现Yb<sup>3+</sup> → Nd<sup>3+</sup>能量传递对Yb<sup>3+</sup>发光的调制现象.同时Nd<sup>3+</sup>离子在1053 nm附近的发射截面远大于Yb<sup>3+</sup>离子在该波长范围的发射截面可能也是一个重要因素.这个需要进一步的论证.

## 参考文献

- [1] Rivera-Lopez F, Babu P, Basavapoornima C, Jayasankar C K, Lavin V 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 123514
- [2] Pearson A D, Porto S P S 1964 *Appl. Phys. Lett.* **4** 202
- [3] Petit V, Camy P, Doualan J L, Moncorgé R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 051111
- [4] Reichel V, Moerl K W, Unger S, Jetschke S, Mueller H, Kirchhof J, Sandrock T, Harschack A, Liem A, Limpert J, Zellmer H, Tünnemann A 2005 *Proceedings of the XV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers* Bellingham, America, March 23, 2005 p404
- [5] Jetschke S, Reichel V, Moerl K, Unger S, Roepke U, Mueller H 2005 *Proceedings of Fiber Lasers II: Technol-*

- ogy, Systems, and Applications* Bellingham, America, April 22, 2005 p59
- [6] Limpert J, Liem A, Zellmer H, Tünnemann A 2003 *Electron. Lett.* **39** 645
- [7] Jaque D, Ramirez M O, Bausá L E, Solé J G, Cavalli E, Speghini A, Bettinelli M 2003 *Phys. Rev. B* **68** 035118
- [8] Ramirez M O, Jaque D, Bausá L E, Martín I R, Lahoz F, Cavalli E, Speghini A, Bettinelli M 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 093510
- [9] Galagan B I, Denker B I, Dmitruk L N, Motsartov V V, Osiko V V, Sverchkov S E 1996 *J. Quantum Elect.* **26** 99
- [10] Sugimoto N, Ohishi Y, Katoh Y, Tate A, Shimokozono M, Sudo S 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 582
- [11] de Sousa D F, Batalioto F, Bell M J V, Oliveira S L, Nunes L A O 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 3308
- [12] Lurin C, Parent C, Le Flem G, Hagenmuller P 1985 *J. Phys. Chem. Solids* **46** 1083
- [13] Lurin C, Parent C, Le Flem G 1985 *J. Less-Common Metals* **112** 91
- [14] George S A, Pucilowski A, Hayden, J S, Urruti E H 2016 *Proceeding of Advanced Solid State Lasers* Boston, Massachusetts, Oct. 31–Nov. 3, 2016 pJT2A. 18
- [15] Lupei V, Lupei A, Ikesue A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 111118
- [16] Lupei V, Lupei A, Gheorghe C, Hau S, Ikesue A 2009 *Opt. Lett.* **34** 2141
- [17] Borrero-González L J, Nunes L A O 2012 *J. Phys. : Condens. Matter* **24** 385501
- [18] Borrero-González L J, Nunes L A O, Bianchi G S, Astrath F B G, Baesso M L 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 013103
- [19] Yu D C, Zhang Q Y 2013 *Sci. China: Chem.* **43** 1431 (in Chinese) [禹德朝, 张勤远 2013 中国科学: 化学 **43** 1431]
- [20] Jia Z T, Arcangeli A, Tao X T, Zhang J, Dong C M, Jiang M H, Bonelli L, Tonelli M 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 083113
- [21] Sontakke A D, Biswas K, Sen R, Annapurna K 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2750
- [22] Chen S C, Mao S, Dai F M 1984 *Acta Phys. Sin.* **33** 515 (in Chinese) [陈述春, 茅森, 戴凤妹 1984 物理学报 **33** 515]
- [23] Jaque D, García Solé J, Macalik L, Hanuza J, Majchrowski A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011920
- [24] Jaque D, Solé J G, Speghini A, Bettinelli M, Cavalli E, Ródenas A 2006 *Phys. Rev. B* **74** 035106
- [25] Xu W, Zhao H, Zhang Z G, Cao W W 2013 *Sens. Actuator B: Chem.* **178** 520
- [26] Lin Z Q, Yu C L, He D B, Feng S Y, Chen D P, Hu L L 2016 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **28** 2673
- [27] Lou L R, Yin M, Li Q T 2014 *Fundamentals of Luminescence Physics: Optical Transition Processes in Solids* (Hefei: Press of University of Science and Technology of China) p152 (in Chinese) [楼立人, 尹民, 李清庭 2014 发光物理基础: 固体光跃迁过程 (合肥: 中国科学技术大学出版社) 第152页]
- [28] George S, Carlie N, Pucilowski S, Hayden J 2014 *US Patent* **14** 088 973
- [29] Payne S A, Chase L L, Smith L K, Kway W L, Krupke W F 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2619

# Stimulated emission and laser behaviors of Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped phosphate glass fiber\*

Lin Zhi-Quan<sup>1)2)</sup> Yu Chun-Lei<sup>1)†</sup> He Dong-Bing<sup>1)</sup> Feng Su-Ya<sup>1)</sup> Zhang Lei<sup>1)</sup>  
Chen Dan-Ping<sup>1)</sup> Hu Li-Li<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 20 March 2017; revised manuscript received 5 June 2017 )

## Abstract

The energy transfer phenomenon between Nd<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> generates the research interest in Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doping, because it provides a straight-forward way to combine the features of Nd<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> to develop some potential applications, such as solar cells, high energy pulse and tunable lasers. Substantial research work has been conducted to study the spectroscopic properties of Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> in different glasses, crystal and ceramic host materials. However, it is still not very clear about the laser properties of the Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doping system, especially the high rare-earth solubility phosphate glass. This work reports the stimulated emission and laser properties of an Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped phosphate glass fiber under singly 970 nm and 808 nm LD pumping. The molar doping ratio of Nd<sup>3+</sup> : Yb<sup>3+</sup> is 4 : 1. Using the free-space coupled method, the laser properties of the co-doped fiber under 970 nm pump are tested first in a laser cavity comprised of a butt-coupled dichroic mirror with high reflectivity ( $\geq 99.5\%$ ) and a cleaved fiber ended with  $\sim 4.6\%$  Fresnel reflectivity. It is found that with the increase of 970 nm pump power ( $P_{970}$ ) two discrete laser peaks and one peak located at 1053 nm with a larger threshold can be observed for fiber length equal to and less than 0.7 m. The 1053 nm laser is produced by Yb<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Nd<sup>3+</sup> energy transfer, and its lasing threshold decreases with increasing fiber length in this length region. Then, the amplified spontaneous emission (ASE) spectra for fiber lengths of 0.35 m, 0.9 m and 5.0 m under 970 nm pumping are tested by cutting 6° at the output port. The test results indicate that the Yb<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Nd<sup>3+</sup> energy transfer has a modulation effect on fiber spectrum, and the modulation becomes more obvious for a longer fiber length. A two-fold promotion mechanism is suggested to explain the modulation effect: 1) the reabsorption effect of Yb<sup>3+</sup> leading to relatively lifetime prolongation increases the Yb<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Nd<sup>3+</sup> energy transfer efficiency; 2) the red-shifted oscillator laser wavelength leads to a larger emission cross section difference between Nd<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>. Besides, the measurement results in 0.35-m-long fiber also suggest that the 1053 nm laser in fiber laser test may be due to a fiber temperature raising effect during the increase of  $P_{970}$ . The laser properties and ASE spectra of the fiber under 808 nm pumping have been studied in the same fiber test setup. However, the tested results are quite different from the 970 nm pumping case. Only one lasing peak at 1053 nm is detected, and it is found that the peak is not dependent on the 808 nm pump power ( $P_{808}$ ) nor the fiber length. To explain this phenomenon, one energy transfer model with taking into consideration the stimulated emission of Nd<sup>3+</sup> is derived. According to this theoretical model, Nd<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Yb<sup>3+</sup> energy transfer efficiency fast decreases with the increase of simulated emission intensity of Nd<sup>3+</sup>. This explanation is experimentally supported by a 0.05-m-long Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped phosphate glass fiber with varying  $P_{808}$ . Therefore, the adoption of Nd<sup>3+</sup> to sensitize Yb<sup>3+</sup> for developing some laser applications needs to consider the suppression effect of Nd<sup>3+</sup> stimulated emission on Nd<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Yb<sup>3+</sup> energy transfer.

**Keywords:** fiber lasers, phosphate glass fiber, Nd<sup>3+</sup>  $\leftrightarrow$  Yb<sup>3+</sup> energy transfer

**PACS:** 42.55.Wd, 42.70.Jk

**DOI:** 10.7498/aps.66.164204

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405215, 61505232), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFB0402201).

† Corresponding author. E-mail: [sdyclcy@163.com](mailto:sdyclcy@163.com)