

文章编号: 0253-2239(2005)02-284-5

# Yb 掺杂对 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜光致荧光性能的影响\*

谭 娜 张庆瑜\*\*

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

**摘要:** 采用反应射频磁控溅射技术,通过调整溅射靶面上金属 Er 和 Yb 的面积比例制备出了不同 Yb 含量的 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,重点探讨了薄膜制备过程中 Er、Yb 成分比例控制的可靠性及 Yb 的掺杂浓度对 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜室温光致荧光谱强度及峰型的影响。利用卢瑟福背散射谱(RBS)和电子能谱(EDX)对薄膜成分进行的分析表明:薄膜中 Er、Yb 成分的比例与实际 Er、Yb 靶面积比基本一致。薄膜经过 1000 °C 退火 2 h 的室温光致发光谱表明:Yb 掺杂显著提高了薄膜的光致荧光强度,当 Yb/Er 靶面积比为 4:1 时,光致荧光强度和半峰全宽最大。研究结果表明:对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,合适的 Yb/Er 浓度,不仅可以显著改善薄膜的发光效率,而且可以增加频带带宽。

**关键词:** 薄膜; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜; Er/Yb 共掺; 光致荧光

中图分类号: O484 文献标识码: A

## Photoluminescence Performance as a Function of Ytterbium Doping Concentration from Er/Yb Co-Doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Films

Tan Na Zhang Qingyu

(State Key Laboratory for Material Modification by Laser, Ion and Electron Beams,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** Er/Yb co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films with variant Yb concentrations, which are controlled through adjusting the area ratio of Yb to Er in the surface of the target, are fabricated by radio-frequency (RF) reaction magnetron sputtering technique. The reliability of composition control of Er/Yb ratio in film preparation and the influence of Yb doping concentration on room temperature photoluminescence (PL) spectral intensity and distribution of Er/Yb co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films are mainly investigated. Rutherford backscattering spectroscopy (RBS) and energy dispersive X-ray analysis (EDX) are used to determine the composition of the films. It is shown that the concentration ratio of Yb to Er in the films accorded with the area ratio of Yb to Er in the surface of the target. The room temperature PL spectrum of the films after annealing at 1000 °C for 2 h shows that the PL intensity of Er<sup>3+</sup> can be enhanced by Yb doping. The PL intensity and full width at half maximum (FWHM) reaches its maximum when the area ratio of Yb to Er reaches to 4:1. The results of the research show that, as far as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films are concerned, appropriate concentration of Yb/Er not only improves the luminescence efficiency of the films, but also enhances the channel bandwidth.

**Key words:** thin films; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film; Er/Yb co-doped; photoluminescence

## 1 引 言

掺铒光纤放大器在石英单模光纤最低损耗窗口(波长 1.535 μm)处具有增益高、噪声低、频带宽、饱

和输出功率大等特点,在光纤通信系统中占有举足轻重的地位。随着掺铒光纤放大器的商品化,适用于光电集成和全光通信技术的掺铒平面光波导放大

\* 国家自然科学基金(50240420656)资助课题。

作者简介: 谭 娜(1976~),女,河北保定人,大连理工大学材料系博士研究生,主要从事光电功能薄膜方面的研究工作。  
E-mail: tan\_na@sina.com.cn.

\*\* 通信联系人。E-mail: qy Zhang@dlut.edu.cn.

收稿日期: 2004-05-31;收到修改稿日期: 2004-07-19

器已经成为本研究领域关注的热点<sup>[1~2]</sup>。然而,与掺铒光纤放大器有所不同的是为了确保光波导器件的紧凑性和在较短长度上获得足够的光学增益,一方面要比较严格地控制 Er<sup>3+</sup> 的掺杂浓度,另一方面通过 Yb 的掺杂而提高抽运光的吸收效率<sup>[3]</sup>。Yb 掺杂对 Er 掺杂薄膜的光致荧光(PL)特性的影响,既与 Yb 的绝对浓度有关,又与 Er/Yb 的相对比例有关。因此,研究一定 Er 浓度下,Er/Yb 掺杂比例对薄膜的光致荧光特性的影响,不仅对优化掺杂浓度,进而获得性能优异的掺 Er<sup>3+</sup> 光波导薄膜具有重要意义,而且对更加深入地揭示 Yb<sup>3+</sup> 的敏化机制具有一定的价值。

自从 1991 年 Mahmoud 等用离子交换法制作出光波导放大器以来,近十几年里经过大量的实验研究,已开发出多种制作技术,如离子注入、共溅射、化学气相沉积、脉冲激光沉积等等。顾刚等<sup>[5]</sup>采用射频磁控溅射技术制备了 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 SiO<sub>2</sub> 薄膜,证实 SiO<sub>2</sub> 薄膜的室温光致发光强度随 Yb<sup>3+</sup> 的掺入显著增加,当 Yb<sup>3+</sup> 的掺杂浓度是 Er<sup>3+</sup> 含量的 3 倍时达到最大值,并且说明发光强度的增加是由于 Yb<sup>3+</sup> 能量向 Er<sup>3+</sup> 传递所致。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 波导作为 Er 掺杂的基质材料,近年来逐渐受到各国学者的关注。因为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的波导制备技术已经比较成熟,而且在 Si 衬底上已经制备出高质量、低损耗的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 波导。同时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 波导的折射率比 SiO<sub>2</sub> 高,因此在波导中可以实现光模的高约束,从而提高抽运效率和放大倍数<sup>[2]</sup>。本实验采用反应射频磁控溅射方法制备出 Er/Yb 共掺的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导薄膜,重点探讨了薄膜制备过程中 Er、Yb 成分比例控制的可靠性及 Yb 的掺杂浓度对 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜室温光致荧光光谱强度及峰型的影响。

## 2 实验方法

实验采用反应射频磁控溅射技术,在 JGP450 超高真空磁控溅射设备上制备 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导薄膜。实验采用金属 Al 靶(纯度为 99.99%)作为溅射源,Al 靶直径 60 mm,厚 3 mm。Er 和 Yb 采用嵌入方式掺杂在 Al 靶中,通过调整 Al 靶面上金属 Er 和 Yb 的面积比制备出不同 Yb 含量的 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。基片选择 n 型(100)晶向的单晶硅,其厚度为 420 μm,电阻率为 2~4 Ω·cm。在薄膜沉积前,基片经超声波清洗 3~

5 min。实验工艺参量如下:基片温度保持在 400 °C,靶基距 60 mm,工作气压 1.0 Pa,氧气与氩气流量比 5:45,溅射功率 100 W,溅射时间 4 h。制备后的试样在马弗炉中 1000 °C 退火 2 h。

实验采用卢瑟福背散射谱(RBS)对样品进行厚度和成分分析,卢瑟福背散射谱分析是在北京大学重离子物理研究所的串列加速器上完成的,采用 2.0 MeV 的 α 作为探测束,背散射角 165°。样品成分的电子能谱(EDX)分析是在大连理工大学 JEM-5600LV 上完成的。荧光光谱在复旦大学光科学系检测,采用发射波长为 980 nm 的半导体激光器作为激光激发光源,利用半导体探测器探测薄膜的光致荧光光谱。

## 3 结果与讨论

### 3.1 薄膜成分分析

大量实验研究证实,Yb 的掺入可有效地提高薄膜对 980 nm 抽运光的吸收效率,显著增强薄膜的发光特性<sup>[4,5]</sup>。但 Yb 浓度过高又会使薄膜的发光效率降低<sup>[6]</sup>,因此选择合适的 Yb 掺杂浓度是至关重要的。我们通过调整 Al 靶面上 Er 和 Yb 的面积制备出了不同 Yb 掺杂量的 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光波导薄膜,其中 Er 和 Yb 在靶面上的面积比分别是 1:0、1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6。

图 1 是 Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的卢瑟福背散射谱分析结果。从图中可以看出:薄膜的主要成分为 Al、O、Er、Ar。Ar 的存在是由于在溅射沉积的过程中工作气体气氛中的 Ar 气吸附在薄膜的生长表面,被随后溅射沉积的膜层覆盖而滞留在薄膜中。同时,从卢瑟福背散射谱中可以看到:Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜中的 Er 在薄膜中的深度分布很均匀(Er 在沟道数 334~456 范围内产生的背散射产额基本保持水平),这与

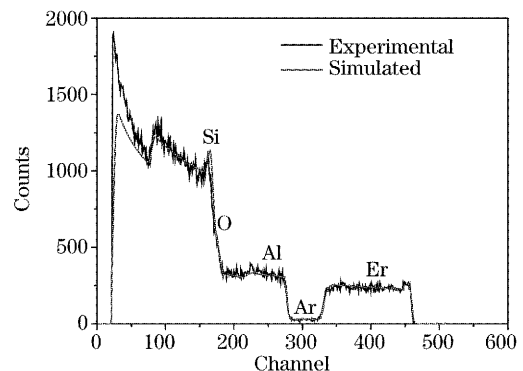


图 1 Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 试样的卢瑟福背散射谱  
Fig. 1 RBS spectrum of Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

利用加速器产生的高能稀土离子注入掺杂方法制备的Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光波导薄膜形成鲜明对比。高能稀土离子注入掺杂方法制备Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光波导薄膜的Er原子在薄膜中的深度分布呈现准高斯分布<sup>[2]</sup>,而且退火温度对其分布影响很小,因此限制了Er在单位截面上的有效利用。所以,制备出成分均匀的光波导薄膜可以有效地减少Er<sup>3+</sup>团簇的形成,降低浓度淬灭的发生。图2是Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜的成分深度分布图,根据成分分析给出的结果可以得知Er的原子数分数为0.012左右,Al+Er和O的原子数分数分别为0.4和0.6左右,说明薄膜的基本成分是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。此外,可以看到膜与基体界面清晰,这样有利于制备出高质量的光波导薄膜。

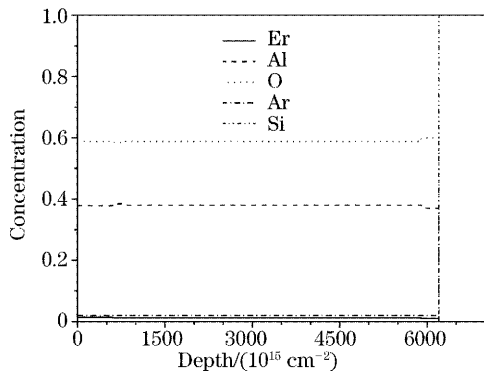


图2 Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的成分深度分布

Fig. 2 Depth profile of compositions in Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film

图3和图4是Yb/Er靶面积比为3:1样品的卢瑟福背散射谱和成分深度分布图。从图3中可以看出:由于Er/Yb共掺Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光波导薄膜中的Er和Yb两种元素质量非常接近,导致Er、Yb的卢瑟福背散射谱严重重叠,这对确定薄膜中Er、Yb的成分是非常不利的。因此,我们在卢瑟福背散射谱分析中,采用固定Er的原子数分数为0.012,通过调整Yb的浓度来拟合卢瑟福背散射谱,进而确定Yb在薄膜中的浓度。固定Er的浓度是依据薄膜制备过程中Er和Al的溅射面积不变为前提的。但是随着Yb的溅射面积的增加,薄膜中Er的绝对浓度和相对浓度均有所改变。因此,为了进一步确定Er、Yb的比例,我们对薄膜进行了电子能谱分析。

表1是Er/Yb共掺Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>光波导薄膜的成分分析结果。从表1中可以看出:两种分析方法所给出的结果的绝对含量差异比较大,但Er、Yb浓度的相对比例还是比较接近的,同时与Er、Yb靶面积比也比较接近。此外,我们注意到:卢瑟福背散射谱分

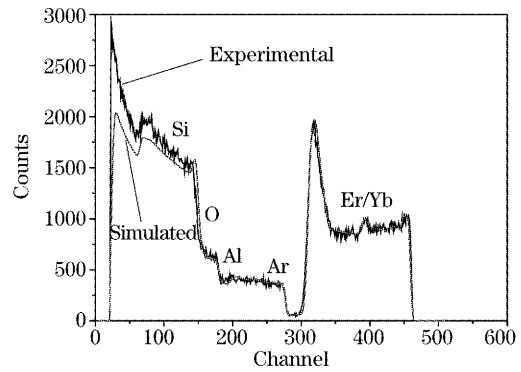


图3 Yb/Er比为3:1的卢瑟福背散射谱

Fig. 3 RBS spectrum of Er/Yb co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film with 3:1 of Yb/Er

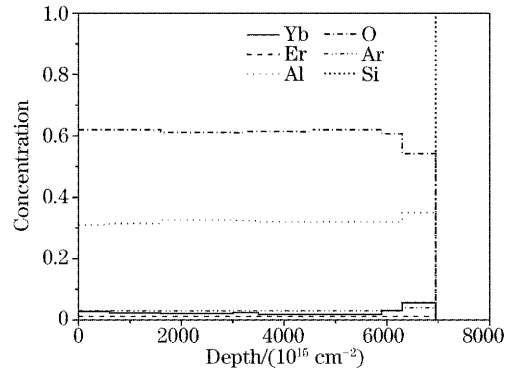


图4 Yb/Er比为3:1的成分深度分布

Fig. 4 Depth profile of compositions in Er/Yb co-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film with 3:1 of Yb/Er

析的Yb/Er相对比例比Yb、Er靶面积比系统偏低,而电子能谱给出的Yb/Er相对比例比Yb、Er靶面积比系统偏高。

对于两种分析的Yb/Er相对比例相关较大的现象,我们认为:卢瑟福背散射谱分析的Yb/Er相对比例比Yb、Er靶面积比系统偏低的原因是由于在卢瑟福背散射谱拟合过程中Er的原子数分数固定在0.012所导致的。实际上,在磁控溅射时,当溅射靶填入Yb金属后,靶面的金属溅射产额增加,Er的相对浓度应略有下降。因此Yb/Er相对比例应该是电子能谱分析结果比较可信,而Er、Yb的绝对浓度,应该是卢瑟福背散射谱的结果更加可信。因为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜是绝缘体,在电子能谱分析过程中,分析结果将受到表面电荷效应的影响而导致绝对定量的偏差,此外电子能谱对O的定量分析是不准确的。但由于Er、Yb之间的相对比例受表面电荷及其他成分的影响比较小,所以电子能谱所给出的Yb/Er比例是比较合理的。

表 1 不同 Er、Yb 含量薄膜的成分分析结果

Table 1 Analysis results of compositions in Er/Yb co-doped films with variant Yb concentrations

The area ratio of the target	RBS analysis			EDX analysis			
	S <sub>Yb</sub> :S <sub>Er</sub>	C <sub>Er</sub>	C <sub>Yb</sub>	C <sub>Yb</sub> :C <sub>Er</sub>	C <sub>Er</sub>	C <sub>Yb</sub>	C <sub>Yb</sub> :C <sub>Er</sub>
0:1		0.012	0.000	0.0:1.0	3.7	0.000	0.00:1.0
1:1		0.012	0.010	0.8:1.0	3.2	0.0045	1.41:1.0
2:1		0.012	0.025	2.1:1.0	5.0	0.0127	2.54:1.0
3:1		0.012	0.035	3.0:1.0	5.9	0.0212	3.59:1.0
4:1		0.012	0.044	3.7:1.0	6.4	0.0299	4.67:1.0
5:1		0.012	0.044	3.7:1.0	4.8	0.0286	5.96:1.0
6:1		0.012	0.055	4.6:1.0	4.5	0.0334	7.42:1.0

综上所述,我们认为:在反应射频磁控溅射制备 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的过程中,薄膜中 Er、Yb 成分的比例与实际的 Er、Yb 靶面积比是基本一致的。通过控制溅射靶面上的 Er、Yb 靶面积比例是可以实现薄膜中 Er、Yb 成分的准确控制的。此外,我们根据 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的密度(3.98 g/cm<sup>3</sup>),可以通过卢瑟福背散射谱估算出薄膜的厚度在 600~700 nm 范围内。

### 3.2 薄膜的发光特性

在本实验中,对于 Er-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,在 1.53 μm 附近的近红外区域所检测到的 Er<sup>3+</sup> 的特征发光峰极弱,几乎无法呈现 Er<sup>3+</sup> 的特征发光峰谱形,而 Er/Yb 共掺的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜均探测到比较强的光致荧光。图 5 是 Yb/Er 靶面积比分别为 1:1、2:1、3:1 时的光致荧光谱。从图中可以清晰看到,Er<sup>3+</sup> 的特征发光峰中心在 1.531 μm 处,并未随着 Yb 掺杂浓度的增加发生位移,同时,光致荧光的谱峰形状也没有发生显著变化,特征发光峰的半峰全宽(FWHM)均为 46 nm,发光峰强度随着掺杂量的增加略有提高。这说明此时 Yb<sup>3+</sup> 的作用主要是提高 980 nm 激光的抽运效率。

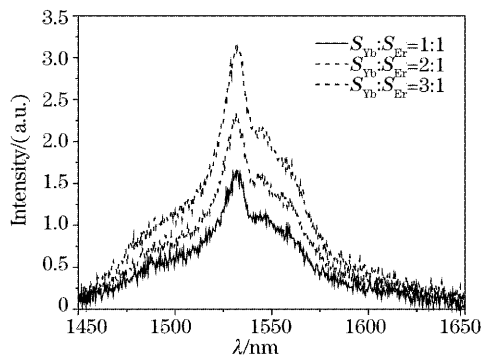


图 5 Yb/Er 靶面积比分别为 1:1, 2:1, 3:1 时的 Er/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的光致荧光谱

Fig. 5 PL spectrum of Er/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films with Yb/Er ratios of 1:1, 2:1, and 3:1

图 6 是 Yb/Er 靶面积比为 4:1 时制备的 Er/Yb

共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的光致荧光谱,其发光峰中心在 1.523 μm 处,半峰全宽为 60 nm。与低 Yb 含量的 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜相比,荧光强度增加近一个数量级,半峰全宽增加 30%。同时,我们注意到:光致荧光谱的展宽主要得益于 1490 nm 和 1510 nm 附近的子能级跃迁的增强。这一结果与我们在 Er/Yb 共掺 Si 基玻璃中的结果是相似的<sup>[7]</sup>。在 Si 基玻璃中,随着 Yb 的掺杂量的增加,导致 Er<sup>3+</sup> 的 1490 nm 处的吸收峰显著增强,从而导致光致荧光光谱的展宽。这一结果说明在此掺杂浓度下,Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 之间的相互作用,不仅显著提高了 Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> 之间的能量转移效率,而且改变了 Er<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级中的子能级分布。

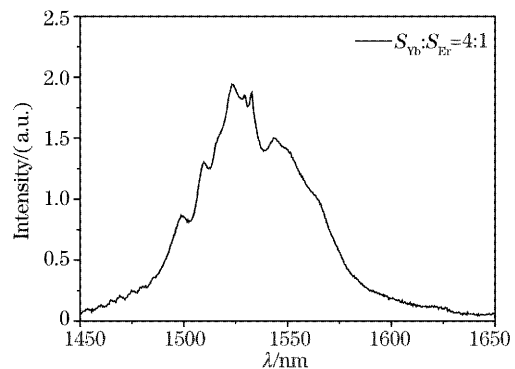


图 6 Yb/Er 靶面积比为 4:1 时的 Er/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的光致荧光谱

Fig. 6 PL spectrum of Er/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films with Yb/Er ratios of 4:1

图 7 为 Yb/Er 靶面积比分别为 5:1 和 6:1 时制备的 Er/Yb 共掺 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的光致荧光谱,发光峰位在 1.531 μm 处,半峰全宽仅有 8 nm,发光强度与低 Yb 浓度时接近。对于高 Yb 浓度时的荧光强度的下降,有人认为是因为过高的 Yb<sup>3+</sup> 浓度造成了从 Er<sup>3+</sup> (<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>) 到 Yb<sup>3+</sup> (<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>) 的能量反向传递<sup>[6]</sup>。另一种说法是过高的 Yb<sup>3+</sup> 浓度可能造成了“离子对”及“团簇”的出现。我们注意到:与 Er/Yb

共掺 Si 基玻璃的情况不同,Er/Yb 共掺  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜中光致荧光强度的降低伴随着荧光峰形的强烈变化。从图中可以看出:1490 nm 和 1550 nm 附近的子能级跃迁严重减弱,甚至消失;而且 1530 nm 附近的主能级跃迁也有比较大的变化。这一结果说明:在不同的掺杂基质中,Er<sup>3+</sup> 和 Yb<sup>3+</sup> 之间的相互作用对 Er<sup>3+</sup> 能级分布的影响是不尽相同的。

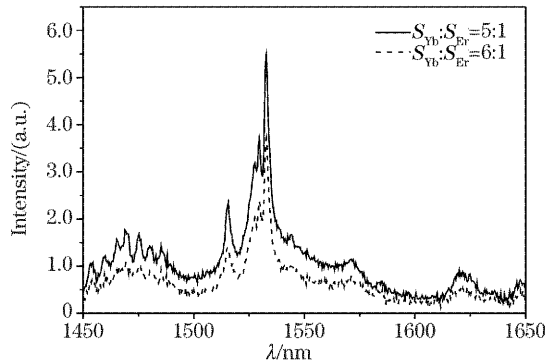


图 7 Yb/Er 靶面积比为 5:1 和 6:1 时的 Er/Yb- $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的光致荧光光谱

Fig. 7 PL spectra of Er/Yb- $\text{Al}_2\text{O}_3$  films with Yb/Er ratios of 5:1 and 6:1

图 8 是不同掺 Yb 浓度的 Er/Yb 共掺  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的光致荧光光谱的峰值强度和半峰全宽随 Yb/Er 靶面积比的变化。从图中可以看出:当 Yb/Er 靶面积比为 4:1 时,无论是峰值强度还是半峰全宽均是最大的,而且在 Yb/Er 靶面积比为 3:1 到 5:1 之间,光致荧光强度和谱峰形状发生了剧烈变化。这说明对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基质,光致荧光强度和谱峰形状对于 Yb/Er 浓度和比例极为敏感。同时也说明:合

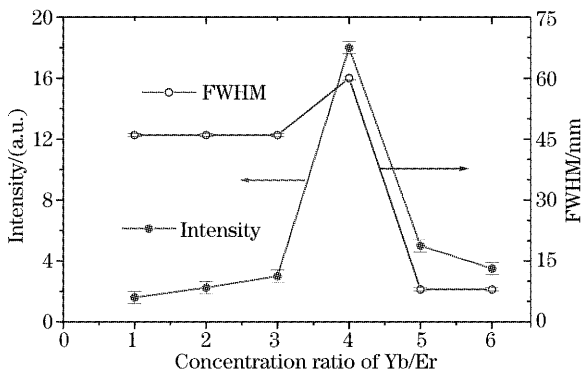


图 8 Er/Yb- $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的光致荧光光谱在 1.53  $\mu\text{m}$  处的发光强度的相对值和半峰全宽随 Yb/Er 靶面积比的变化

Fig. 8 PL intensities and FWHM of variant Er/Yb- $\text{Al}_2\text{O}_3$  films at 1.531  $\mu\text{m}$

适的 Yb/Er 浓度,不仅可以显著改善薄膜的发光效率,而且可以扩大通信的频带带宽。

## 4 结 论

1) 利用反应射频磁控溅射技术,通过调整靶面上金属 Er 和 Yb 的面积比制备出不同 Yb 含量的 Er/Yb 共掺  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜,薄膜中 Er、Yb 成分的比例与实际的 Er、Yb 靶面积比是基本一致的。

2) 薄膜经过 1000  $^{\circ}\text{C}$  退火 2 h 的室温光致发光光谱表明:Yb 掺杂显著提高了 Er<sup>3+</sup> 的光致荧光强度,当 Yb/Er 靶面积比为 4:1 时,光致荧光强度和半峰全宽最大。

3) 对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基质,光致荧光强度和谱峰形状对于 Yb/Er 浓度和比例极为敏感。合适的 Yb/Er 浓度,不仅可以显著改善薄膜的发光效率,而且可以增加频带带宽。

**致谢** 感谢复旦大学徐雷教授、刘丽英教授以及北京大学重离子物理研究所的颜莎副教授分别在在光致荧光测试和卢瑟福背散射谱分析方面所给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 P. G. Kik, A. Polman. Cooperative upconversion as the gain-limiting factor in Er doped miniature  $\text{Al}_2\text{O}_3$  optical waveguide amplifiers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(9): 5008~5012
- 2 A. Polman. Erbium implanted thin film photonic materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(1): 1~39
- 3 Chu-Chi Ting, San-Yuan Chen, Hsin-Yi Lee. Physical characteristics and infrared fluorescence properties of sol-gel derived Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> codoped  $\text{TiO}_2$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(3): 2102~2109
- 4 Gang Gu, P. P. Onga, Jinhua Cai *et al.*. Enhanced luminescence of silica thin films co-doped with Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> [J]. *Thin Solid Films*, 1999, **340**(1~2): 230~232
- 5 Chen Haiyan, Guan Zhonguo, Liu Yongzhi *et al.*. Studies on gain characteristics of silica waveguide amplifiers with high Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> concentrations[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(5): 391~394 (in Chinese)  
陈海燕,官周国,刘永智等.高浓度 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 掺杂硅酸盐玻璃波导放大器的增益特性研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(5): 391~394
- 6 Zhang Long, Lin Fengying, Qi Changhong *et al.*. Spectroscopic properties of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>-doped  $\text{LaLiP}_4\text{O}_{12}$  glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 757~761 (in Chinese)  
张龙,林凤英,刘长鸿等. Er<sup>3+</sup> 单掺及 Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> 双掺  $\text{LaLiP}_4\text{O}_{12}$  玻璃光谱性质研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 757~761
- 7 S. F. Li, Q. Y. Zhang, Y. P. Lee. Absorption and photoluminescence properties of Er-doped and Er/Yb co-doped soda-silicate laser glasses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(6): 4746~4750