

文章编号: 0253-2239(2005)03-364-5

掺铒碲-钨-钠玻璃基质的光谱性质研究*

陈宝玉 赵士龙 张德宝 胡丽丽

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 制备了用于离子交换法制备光波导器件的掺铒碲-钨-钠玻璃基质。应用扎得-奥菲而特(Judd-Ofelt)理论计算了玻璃样品的三个强度参量,由强度参量计算了 Er^{3+} 离子的自发跃迁几率、荧光分支比等光谱参量;应用麦克库珀(McCumber)理论,计算了 Er^{3+} 离子在 $1.5 \mu\text{m}$ 的受激发射截面,荧光测试发现 Er^{3+} 离子的荧光半峰全宽可达 65 nm 。比较了 Er^{3+} 离子在不同玻璃基质中的光谱特性。结果表明, Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中具有较高的受激发射截面和较宽的荧光半峰全宽,可以用于宽带光波导器件的制备。

关键词: 光学材料; 铒; 碲钨钠玻璃; 光谱性质; 离子交换; 光波导

中图分类号: TQ171.1⁺12 文献标识码: A

Spectroscopic Properties of Er^{3+} -Doped TeO_2 - WO_3 - Na_2O Glasses for Ion-Exchanged Waveguide Devices

Chen Baoyu Zhao Shilong Zhang Debao Hu Lili

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: A New Er^{3+} -doped TeO_2 - WO_3 - Na_2O glass for ion-exchanged waveguide devices has been fabricated and characterized. The measured absorption and emission spectra of the glass were analyzed by the Judd-Ofelt and McCumber theories. The intensity parameters are $\Omega_2 = 7.01 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_2 = 1.80 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_2 = 1.03 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. The glass has high and broadband absorption and stimulated emission cross-sections at $1.5 \mu\text{m}$. The maximum emission cross-section is $0.91 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ at $1.533 \mu\text{m}$, and a broad $1.5 \mu\text{m}$ emission spectrum of 65 nm full width at half maximum (FWHM) is demonstrated. Emission properties for $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} in different glasses are compared with each other. It is indicated that Er^{3+} -doped TeO_2 - WO_3 - Na_2O glasses will be a promising candidate for broadband ion-exchanged waveguide devices.

Key words: optical material; erbium; sodium-tungsten-tellurite glass; spectrum properties; ion-exchange; optical waveguide

1 引 言

近年来,由于波分复用技术(WDM)的应用和光通信网络趋于复杂化,集成光波导器件引起了人们的广泛重视。基于玻璃基质的光波导可以容易地和其他光电子元件集成,非常适合制备功能复杂的集成光路,在减小光光器件的成本和尺寸方面具有极大的潜力。在玻璃基质上实现光波导的方法中,离子交换法是最简单和有效的方法,已被广泛应用于无源波导器件的制备^[1]。铒掺杂玻璃基质在 $1.5 \mu\text{m}$ 可以实现光

增益,掺铒光纤放大器(EDFA)已在光通信领域获得了巨大的成功^[3]。集成光波导需要在小尺寸获得大的光增益,因此其铒离子掺杂浓度比掺铒光纤光栅高 10 倍以上^[4],需要特殊的稀土离子掺杂基质材料。磷酸盐玻璃被认为是优良的稀土离子掺杂基质,掺铒磷酸盐玻璃具有优良的光学和光谱性质,广泛用于离子交换波导器件^[5]。因为兼具以下优良的特性:较好的化学稳定性、较高的稀土离子掺杂浓度、较宽的红外透过范围($0.35 \sim 5 \mu\text{m}$)、较低玻璃熔制温度、较

* 上海市光科技项目(002261002)资助课题。

作者简介: 陈宝玉(1977~),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事集成光波导器件用基质材料的研究。E-mail: chenbymail@yahoo.com。

收稿日期: 2004-04-21; 收到修改稿日期: 2004-08-18

大的发射截面和荧光半峰全宽(FHWM)、较低的声子能量(约 780 cm^{-1})、较高的折射率和非线性特性^[5],最近,碲酸盐玻璃作为波导基质材料引起了人们的注意。

制备了一种新型的掺铒碲酸盐玻璃基质,选取具有较高转变温度的碲-钨系统,玻璃组分中引入一定量的 Na_2O ,因为 Na^+ 和 Ag^+ 离子有相似的离子半径,通过 $\text{Na}^+ - \text{Ag}^+$ 离子交换比较容易实现低损耗的光波导。应用扎得-奥菲而特(Judd-Ofelt)理论计算了跃迁振子强度、强度参量、自发辐射几率和荧光分支比,应用麦克库玻(McCumber)理论计算了受激发射截面,并对铒离子在不同玻璃基质中的光谱特性进行了比较。

2 实 验

选取 $60\text{TeO}_2 - 25\text{WO}_3 - 15\text{Na}_2\text{O}$ (摩尔分数)组分作为研究对象,本系统具有较好的化学稳定性、热稳定性和稀土离子溶解性。玻璃熔制所用原料均为特定分析纯。 Na_2O 以 Na_2CO_3 形式引入,称料 50 g 左右,混料均匀后,在电炉中采用刚玉坩埚熔制,熔制温度在 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,熔制过程采用氧化气对玻璃进行除水,澄清后,待玻璃液冷却到浇注温度后浇注在铜模上,然后放到退火炉中完成退火过程。退火温度为 $380 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 2 h 后,以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度降温至室温。将退火后的玻璃取出,切割抛光,制成 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的样品用于性质测试。

样品密度采用排水失重法测量, $\rho = 5.57 \text{ g}/\text{cm}^3$; 折射率采用椭偏仪测量, $n_d = 2.0418$; Perkin-Elmer Lambda 900UV/VIS/NIR 型分光光度计测定玻璃样品的吸收光谱,测量范围 $300 \sim 1800 \text{ nm}$,间隔 1 nm ; 用发射光波长 970 nm ,输出功率 500 mW 的半导体激光器做激发光源,采用法国 Jobin-Yvon 公司的 TIA550 型荧光光谱仪测量 Er^{3+} 离子在 $1400 \sim 1700 \text{ nm}$ 范围的荧光光谱和荧光寿命。所有测试均在室温下进行。

3 结果和讨论

3.1 吸收光谱性质

图 1 所示为 Er^{3+} 离子的吸收光谱,各吸收峰所对应的能级由图中标出。

Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中的紫外截止波长在 400 nm 附近,大于其在硅酸盐、磷酸盐玻璃中的截止波长。 Er^{3+} 离子较大的截止波长使得 Er^{3+} 离子

$^4F_{7/2}$ 以上的能级无法明显显现,但 Er^{3+} 离子的能级结构基本不随玻璃基质的改变而改变。

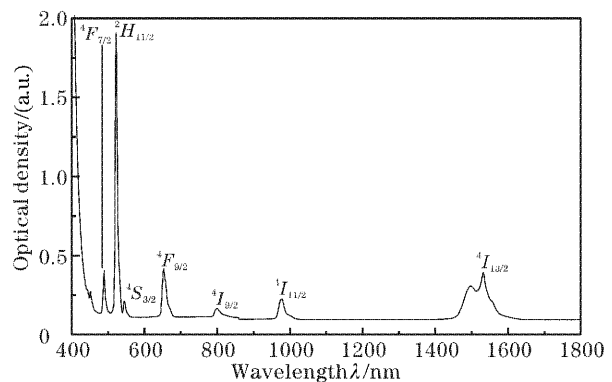


图 1 Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of Er^{3+} doped $\text{TeO}_2 - \text{WO}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ glass

3.2 光谱参量计算

根据吸收光谱,应用扎得-奥菲而特^[7,8]理论计算了 Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中的自发辐射跃迁几率、荧光分支比、辐射寿命等光谱参量,具体计算方法请参考文献^[9]。表 1 所示为计算所得的各能级理论振子强度与实验振子强度。它们之间的差别是很小的,说明了扎得-奥菲而特理论在该系统中的适应性是很好的。计算得到三个强度参量分别为 $\Omega_2 = 7.01 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1.80 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 1.03 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。其中 Ω_2 与 Er^{3+} 离子在玻璃基质中所处位置的极化程度和对称性有关^[10],极化度和非对称性越大, Ω_2 值越大; Ω_6 的大小与玻璃中 Er-O 键共价性的强弱有关,Er-O 键共价性越强, Ω_6 越小,反之, Ω_6 越大^[11]。

表 1 掺 Er^{3+} 碲-钨-钠玻璃中理论和实验振子强度

Table 1 Experimental and theoretical oscillator intensity of Er^{3+} in $\text{TeO}_2 - \text{WO}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ glass

Absorption	Energy / cm^{-1}	$\rho_{\text{exp}}/10^{-6}$	$\rho_{\text{calc}}/10^{-6}$
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	6527	2.464	$1.918(\rho_{\text{nd}})$ $0.629(\rho_{\text{ml}})$
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	10230	0.886	0.867
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	12500	0.476	0.563
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	15314	3.158	3.080
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	18349	0.552	0.584
$^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	19157	15.657	15.657
$^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	20450	2.409	2.613
Root mean-square deviation / 10^{-7}			

表 2 所示为 Er^{3+} 离子在不同基质玻璃中强度参量的比较,在碲-钨-钠玻璃中的 Ω_2 均大于其他玻璃基质中的值,说明碲-钨-钠玻璃中 Er^{3+} 离子所处位置有较大的极化度和非对称性,可能因为在碲-钨

系统玻璃中碲和钨具有不同的离子半径和价态,并且它们可各自形成不同的结构单元使得玻璃结构网络复杂化,Er³⁺离子所处位置的极化度和非对称性与其他玻璃基质相比都较大; Ω_6 的值与磷酸盐、氟化物玻璃相差不大,但大于锗酸盐和硅酸盐玻璃,小于氟磷玻璃,说明碲-钨-钠玻璃中Er-O键的共价性与磷酸盐、氟化物玻璃相近,比锗酸盐和硅酸盐玻璃要弱,稍强于氟磷玻璃。

表2 Er³⁺在不同玻璃基质中的扎得-奥菲而特强度参量比较
Table 2 Judd-Ofelt intensity parameters of Er³⁺ in different glasses

Glass	$\Omega_2/$ (10 ⁻²⁰ cm ²)	$\Omega_4/$ (10 ⁻²⁰ cm ²)	$\Omega_6/$ (10 ⁻²⁰ cm ²)
TeO ₂ -WO ₃ -Na ₂ O	7.01	1.80	1.03
Phosphate ^[12]	6.42	1.58	0.97
Germanate ^[13]	5.81	0.85	0.28
Silicate ^[13]	4.23	1.04	0.61
Fluorophosphate ^[13]	2.91	1.63	1.26
Fluoride ^[13]	2.91	1.27	1.11

根据扎得-奥菲而特理论分析,对于满足跃迁选择定则 $\Delta S = \Delta L = 0, \Delta J = 0, \pm 1$ 的能级间跃迁,存在磁偶极跃迁的贡献。为了获得宽带、发射平坦的荧光光谱,提高电偶极跃迁的相对贡献是一种有效的方法^[14]。因为磁偶极跃迁不依赖与配位场的性质,而电偶极跃迁是配位场的函数。Er³⁺离子1.5 μm 荧光源于能级 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 间的跃迁满足上

述选择定则,其电偶极跃迁的谱线强度可表示为

$$S^{\text{ed}}[^4I_{13/2}; ^4I_{15/2}] = 0.0188\Omega_2 + 0.1176\Omega_4 + 1.4617\Omega_6,$$

由上式可见, S^{ed} 的变化主要依赖与 Ω_6 的变化,提高 Ω_6 的值,可使电偶极跃迁的谱线强度得到有效增大。 Ω_6 的大小可以通过调整玻璃组分来改变,因此 S^{ed} 值的大小可随玻璃组分而改变。表3为Er³⁺离子在不同玻璃基质中1.5 μm 处发射的电偶极跃迁谱线强度相对贡献大小的比较。在碲-钨-钠玻璃中的 $S^{\text{ed}}/(S^{\text{ed}}+S^{\text{md}})$ 比值最大,表明Er³⁺离子在碲-钨-钠玻璃中的1.5 μm 荧光具有带宽宽和增益比较平坦的特性,原因在于碲-钨-钠玻璃中存在[TeO₃]₂、[TeO₄]和[WO₃]₂、[WO₆]多种玻璃结构网络单元。它们具有不同的空间立体构型和键强特性,玻璃结构变得十分复杂,两种不同类型的结构单元产生不同的斯塔克分裂,使得Er³⁺离子荧光光谱不均加宽增强,形成宽且平坦的1.5 μm 荧光光谱。

表4为碲-钨-钠玻璃中Er³⁺离子的自发辐射跃迁几率,荧光分支比和辐射寿命。实验测得Er³⁺离子荧光寿命 $\tau_{\text{meas}} = 4.0$ ms。与硅酸盐、磷酸盐玻璃相比,Er³⁺离子在碲-钨-钠玻璃中的辐射寿命和荧光寿命均较短,并且 $\tau_{\text{meas}} > \tau_{\text{rad}}$,这可能是由于该玻璃的折射率较大和较强的自吸收的缘故,测荧光样品厚度0.2 mm。

表3 不同玻璃基质中Er³⁺离子 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 能级跃迁的 $S^{\text{ed}}/(S^{\text{ed}}+S^{\text{md}})$ 比值

Table 3 The ratios of $S^{\text{ed}}/(S^{\text{ed}}+S^{\text{md}})$ for $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er³⁺ in different glasses

Glass	TeO ₂ -WO ₃ -Na ₂ O	Phosphate ^[15]	Silicate ^[15]	Germanate ^[15]
$S^{\text{ed}}/(S^{\text{ed}}+S^{\text{md}})$	0.746	0.652	0.675	0.568

表4 掺Er³⁺碲-钨-钠玻璃中自发辐射跃迁几率、荧光分支比及辐射寿命

Table 4 Predicted spontaneous radiative transition rates and lifetimes of Er³⁺ in TeO₂-WO₃-Na₂O glass

Transition	Average frequency / cm ⁻¹	A_{ed}/s^{-1}	A_{md}/s^{-1}	β	τ_{rad}/ms
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	6527	229.8	77.9	1.000	3.25
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10230	329.0		0.843	2.56
$^4I_{13/2}$	3703	43.7	17.4	0.112	
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	12500	384.6		0.785	2.04
$^4I_{13/2}$	5973	100.8		0.206	
$^4I_{11/2}$	2270	2.0	2.5	0.004	
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	15314	3141.5		0.898	0.286
$^4I_{13/2}$	8787	177.5		0.051	
$^4I_{11/2}$	5084	150.2	12.2	0.043	
$^4I_{9/2}$	2814	13.0	5.3	0.004	
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	18349	2115.6		0.655	0.310
$^4I_{13/2}$	11822	917.1		0.284	
$^4I_{11/2}$	8119	69.7		0.022	
$^4I_{9/2}$	5849	125.7		0.039	

3.3 荧光光谱性质

图 2 所示为 Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中荧光光谱。 Er^{3+} 具有较宽的荧光半峰全宽 ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$), 其值约为 65 nm, 这对于宽带波导器件非常有益。

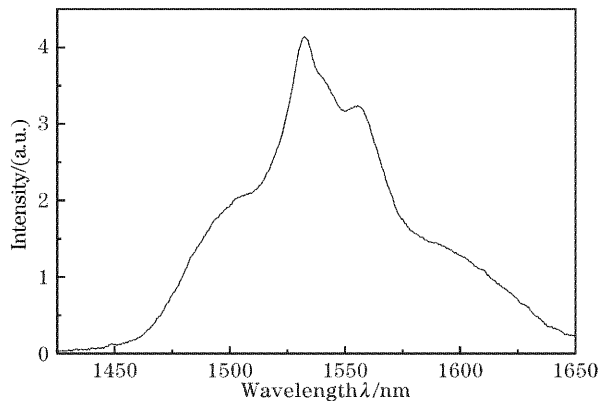


图 2 掺 Er^{3+} 碲-钨-钠玻璃的荧光光谱

Fig. 2 Fluorescence spectrum of Er^{3+} doped $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Na}_2\text{O}$ glass

根据麦克库玻理论^[16], 能级 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的发射截面可由能级 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁的吸收截面得到

$$\sigma_e(\nu) = \sigma_a(\nu) \exp[(\epsilon - h\nu)/kT],$$

式中 ν 为光频率, h 为普朗克常量, k 为玻耳兹曼常量, ϵ 是在温度 T 下把一个 Er^{3+} 离子从基态 $^4I_{15/2}$ 激发到能级 $^4I_{13/2}$ 所需的净自由能, 应用文献^[17]的方法计算求得 $\epsilon = 6552 \text{ cm}^{-1}$ 。

计算得到的受激发射截面如图 3 所示。 Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中有较大的峰值受激发射截面, 其值约为 $\sigma_e = 9.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

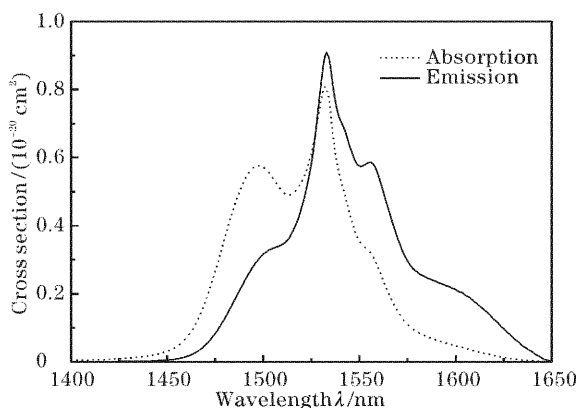


图 3 Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中吸收和受激发射界面

Fig. 3 Absorption and stimulated emission cross-sections of Er^{3+} doped $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Na}_2\text{O}$ glass

最大受激发射截面 (σ_e^{peak}) 和荧光半峰全宽 ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$) 是光波导器件实现宽带和高增益的必要前提。光波导器件的宽带特性可以用 σ_e^{peak} 与半峰

全宽的乘积来衡量, 乘积越大, 宽带特性越好。不同玻璃基质中 Er^{3+} 离子 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 发射的 $\sigma_e^{\text{peak}} \times \Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 值如表 5 所示。

表 5 不同玻璃基质中 Er^{3+} 离子 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 荧光性质比较

Table 5 Emission parameters for $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of Er^{3+} in different glasses

Glass	$\sigma_e^{\text{peak}} / (10^{-21} \text{ cm}^2)$	$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} / \text{nm}$	$\sigma_e^{\text{peak}} \times \Delta\lambda_{\text{FWHM}}$
$\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Na}_2\text{O}$	9.1	65	591.5
Phosphate ^[12]	7.7	40	308
Silicate ^[15]	5.5	40	220
Germanate ^[15]	5.7	53	301

由表 5 可以看出掺 Er^{3+} 碲-钨-钠玻璃具有较大的 $\sigma_e^{\text{peak}} \times \Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 值, 大于磷酸盐、硅酸盐和锗酸盐玻璃, 表明其宽带增益特性最好。

4 结 论

1) 应用扎得-奥菲而特理论计算得到了掺铒碲-钨-钠玻璃的三个强度参量, 其值分别为:

$$\Omega_2 = 7.01 \times 10^{-20} \text{ cm}^2,$$

$$\Omega_4 = 1.80 \times 10^{-20} \text{ cm}^2,$$

$$\Omega_6 = 1.03 \times 10^{-20} \text{ cm}^2.$$

在碲-钨-钠玻璃中 Er^{3+} 离子所处位置有较大的极化度和非对称性, Er-O 键的共价性与磷酸盐、氟化物玻璃中相近, 比锗酸盐和硅酸盐玻璃要弱, 稍强于氟磷玻璃。

2) Er^{3+} 离子在碲-钨-钠玻璃中具有较宽的荧光半峰全宽和较大的受激发射截面。对比 Er^{3+} 在不同基质玻璃中宽带特性发现: 掺铒碲-钨-钠玻璃的宽带特性好于磷酸盐、硅酸盐玻璃和锗酸盐玻璃基质, 在 $1.5 \mu\text{m}$ 处实现强并且宽化的荧光, 是一种实现宽带光波导器件的理想基质材料。

参 考 文 献

- Ramaswamy R V, Srivastava R. Ion-exchanged glass waveguides: a review[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 984~1002
- Zheng Jie, Ma Shaojie, Zhang Jiahua. Study on the properties of ion-exchange Erbium doped phosphate glass waveguides[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 446~448 (in Chinese)
郑杰, 马少杰, 张家骅. 离子交换铒掺杂磷酸盐玻璃波导特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 446~448
- Miniscalco W J. Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 234~250
- Wong S F, Pun E Y B, Chung P S. $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ codoped phosphate glass waveguide amplifier using $\text{Ag}^+\text{-Li}^+$ ion exchange[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 80~82
- Ramponi R, Osellame R, Marangoni M *et al.*. New Er-doped phosphate glass for ion-exchange active waveguides: accurate determination of the refractive index[J]. *Opt. Mater.*, 2000, **14**:

- 291~296
- 6 Wang J S, Vogel W M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices[J]. *Opt. Mater.*, 1994, **3**: 187~203
- 7 Judd B R. Optical absorption intensities of rare-earth ions[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(3): 750~761
- 8 Ofelt G S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions[J]. *J. Chem. Phys.*, 1962, **37**(3): 511~520
- 9 Yang J H, Dai S X, Hu L L *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} and Yb^{3+} codoped tellurite glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 210~215 (in Chinese)
杨建虎,戴世勋,胡丽丽等. Er^{3+} 和 Yb^{3+} 共掺碲酸盐玻璃的光谱性质[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 210~215
- 10 Tanabe S, Ohyagi T, Soga N *et al.*. Compositional dependence of Judd-Ofelt parameters of Er^{3+} ions in alkali-metal borate glasses [J]. *Phys. Rev. (B)*, 1992, **46**(6): 3305~3310
- 11 Tanabe S, Ohyagi T, Todoroki S *et al.*. Relation between the Ω_6 intensity parameter of Er^{3+} ions and the ^{151}Eu isomer shift in oxide glasses[J]. *Appl. Phys.*, 1993, **73**(12): 8451~8454
- 12 Chen B Y, Zhao S L, Hu L L. New chemically stable Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped phosphate glass for optical waveguide lasers and amplifiers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 699~701
- 13 Zou X, Izumitani T. Spectroscopic properties and mechanisms of excited state absorption and energy transfer upconversion for Er^{3+} -doped glasses [J]. *J. Non-Crys. Solids*, 1993, **162**: 68~80
- 14 Tanabe S. Optical transitions of rare earth ions for amplifiers; how the local structure works in glass[J]. *J. Non-Crys. Solids*, 1999, **259**: 1~9
- 15 Yang J H, Dai S X, Zhou Y F *et al.*. Spectroscopic properties and thermal stability of erbium-doped bismuth-based glass for optical amplifier[J]. *Appl. Phys.*, 2003, **93**(2): 977~983
- 16 McCumber D E. Theory of phonon-terminated optical masers[J]. *Phys. Rev.*, 1964, **134**(2A): A299~A306
- 17 Miniscalco W J, Quimby R S. General procedure for the analysis of Er^{3+} cross section[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 258~260