

掺铒镉铝硅酸盐玻璃的 Judd-Ofelt 理论分析与光谱特性

宋昭远¹, 邵秋峰², 冯伟健¹, 黄艳茹¹, 张雷¹, 张磊磊¹

(1. 辽宁石油化工大学理学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要:以掺杂光子晶体光纤为介质的光纤激光器一直受到科研工作者的广泛关注, 应用于光子晶体光纤纤芯的掺稀土元素玻璃的制备成为研制掺稀土光子晶体光纤的关键问题。利用高温熔融工艺制备掺铒镉铝重金属硅酸盐玻璃样品, 测试了其吸收光谱、荧光光谱和荧光寿命。采用 Judd-Ofelt 理论, 计算了样品的强度参数 $\Omega_t (t=2,4,6)$ 以及铒离子的理论和实验振子强度、自发辐射几率、荧光分支比和荧光辐射寿命等参数, 利用测得的荧光光谱计算了铒离子能级 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的受激发射截面及荧光半高宽。结果表明: 掺铒镉铝重金属硅酸盐玻璃具有较大的受激发射截面和比较宽的荧光半高宽, 量子效率较高, 达 92.6%, 与相关文献中的铒掺杂玻璃相比, 具有良好的激光激发性能, 有望在研制掺稀土光子晶体光纤中得到应用。

关键词: Er³⁺ 离子; 荧光光谱; Judd-Ofelt 理论; 受激发射截面

中图分类号: O433.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0220001

Judd-Ofelt theory analysis and spectroscopic properties of Er³⁺-doped cadmium aluminium silicate glass

Song Zhaoyuan¹, Shao Qiufeng², Feng Weijian¹, Huang Yanru¹, Zhang Lei¹, Zhang Leilei¹

(1. College of Science, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
2. Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Photonic crystal fiber lasers have been paid much attention by many researches, and the preparation of photonic crystal fiber cores becomes the key problem in the study of the photonic crystal fibers. Er³⁺ doped aluminium-cadmium heavy-metal silicate glass sample was prepared by the method of high temperature melting. Its absorption and fluorescence spectra were measured. Using the Judd-Ofelt theory, its intensity parameter $\Omega_t (t=2,4,6)$, the oscillator strength and spontaneous radiation probability of the Er³⁺ ion, fluorescence branching ratio, and the fluorescence lifetime were theoretically calculated. Using the fluorescence spectrum, the stimulated emission cross section of the ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ transition and the full width at half maximum (FWHM) of the fluorescence band were also measured. The result demonstrates that the Er³⁺ doped aluminium-cadmium heavy-metal silicate glass sample possesses a large stimulated emission cross section, a wide fluorescence FWHM, and high quantum efficiency of 92.6%. These parameters clearly indicate that this kind of silicate glass has a good laser excitation property and is expected to be applied in the study of the doped photonic crystal fibers.

Key words: Er³⁺ ion; fluorescence spectrum; Judd-Ofelt theory; stimulated emission cross section

收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61307110; 21403101; 11404154); 辽宁省自然科学基金(2013020151)

作者简介: 宋昭远(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事特种光纤及稀土掺杂光电材料方面的研究。Email: zysong815@163.com

0 引言

光纤激光器是以掺杂稀土元素(Yb、Er、Nd、Ho、Tm等)的光纤作为增益介质的一种具有光束质量高、散热好、结构紧凑等优点的高功率固体激光器,是当前研究最为活跃的激光技术领域^[1-2]。而光子晶体光纤的出现,更是为具有超大模面积、宽带单模传输、大幅度可调色散等优点的高功率光子晶体光纤激光器的发展提供了契机^[3-4]。目前制备光子晶体光纤激光器中的掺杂纤芯通常采用改进的化学气相沉积和溶液掺杂或纳米颗粒直接沉积等方法制备^[5],这些制备方法虽然相对来说比较成熟,但是系统昂贵且工艺复杂。随着软玻璃光子晶体光纤研究的快速进展^[6-9],稀土离子掺杂的硅酸盐玻璃以其热稳定性好以及声子能量低等优点有望成为掺杂光子晶体光纤的纤芯材料,且其掺杂浓度高、单位长度增益大,可望得到比石英基质的光子晶体光纤更优异的特性^[10]。掺杂Er³⁺离子的光学材料,由于其激光波段处于眼睛的安全区域,多年来一直受到科研工作者的重视,Er³⁺离子掺杂的玻璃和晶体材料,已非常广泛地应用到光纤通信、激光和相关光传输等领域。同时,Er³⁺离子掺杂的氧化物玻璃由于其增益带宽宽,能满足宽带放大器的需求,已成为光纤材料研究的热点,采用488 nm Ar⁺离子激光器和980 nm 半导体激光器等激发并产生1550 nm 近红外发射在光通讯上已取得非常广泛的应用。硅酸盐石榴石是一类适于稀土和过渡族离子掺杂且稳定的玻璃基质材料,而镉铝硅酸盐玻璃可以在较低的温度下形成光学透明的玻璃。

文中制备了掺杂Er³⁺离子的重金属镉铝硅酸盐玻璃,测试了其吸收光谱、荧光发射光谱及荧光寿命;理论计算了其发光特性,包括基态 J 和激发态 J' 间的理论振子强度、实验振子强度、自发辐射几率、荧光寿命、强度参数 Ω_t ($t=2,4,6$),以及受激发射截面和荧光有效线宽等参数,分析了其激光性能及量子效率,并与相关文献中的Er³⁺离子掺杂的不同基质玻璃进行了光谱性能及激光性能比较,为掺杂光子晶体光纤的制备提供了理论和实验依据。

1 实验

1.1 样品制备

采用高温熔融工艺制备玻璃样品,玻璃的组成为(mol%):40SiO₂-14Al₂O₃-39.6CdO-2Li₂O(Li₂CO₃)-2K₂O(K₂CO₃)-2Na₂O(Na₂CO₃)-0.4Er₂O₃。原料SiO₂、Al₂O₃、CdO、Li₂CO₃、K₂CO₃、Na₂CO₃为分析纯,纯度大于99.6%,Er₂O₃的纯度为99.99%。按摩尔百分比精确称取50 g原料,在玛瑙研钵中研磨且均匀混合后,放入100 ml的氧化铝刚玉坩埚中,并加上盖子,放入已升温到850℃的电炉中1 h,然后以每分钟5℃的升温速率升温至1150℃,在此温度下保温2 h,再升高温度到1350℃且在此温度保温2 h。取出后倒在已经预加热到300℃的铁板上,快速放入已升温到600℃的马弗炉中退火2 h,经过缓慢自然降至常温后再取出。将获得的玻璃经过研磨、抛光及切割,得到长宽各为30 mm、厚为2 mm的玻璃样品。

1.2 样品测试

利用排水法测试玻璃样品的密度($\rho=4.22\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),折射率利用阿贝尔折射仪测试($n_d=1.6627$),Er³⁺离子浓度(N)经计算为 $21.26/10^{20}\text{ ion cm}^{-3}$ 。样品的吸收光谱采用岛津UV-3600分光光度计来测定,其波长范围为185~3300 nm。样品的荧光光谱用TIAX550型荧光光谱仪测试,用970 nm LD为泵浦光源,测试Er³⁺离子能级⁴I_{13/2}的荧光辐射寿命,由示波器直接读出。在常温下进行以上所有测试。

2 结果和讨论

2.1 吸收光谱

图1为Er³⁺离子掺杂玻璃样品的吸收谱图,共11个吸收峰,Er³⁺的特征吸收峰中心波长分别为1534、978、800、651、543、521、488、451、407、378、365 nm,这些峰值波长分别为Er³⁺的基态⁴I_{15/2}到各个激发态⁴I_{13/2}、⁴I_{11/2}、⁴I_{9/2}、⁴F_{9/2}、⁴S_{3/2}、²H_{11/2}、⁴F_{7/2}、⁴F_{5/2}(⁴F_{3/2})、²H_{9/2}、⁴G_{11/2}、⁴G_{9/2}的吸收跃迁,其中378 nm和521 nm的吸收峰较强,其紫外透过极限为320 nm。

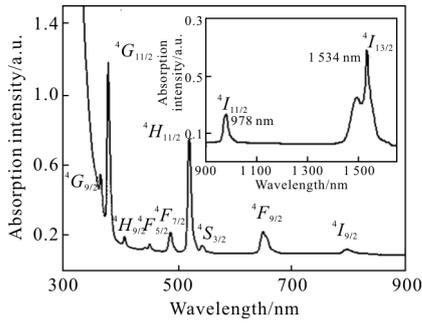


图 1 玻璃样品的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectrums of the glass samples

2.2 Judd-Ofelt 理论分析

依据 Judd-Ofelt(J-O)理论模型^[11-12],利用吸收光谱计算玻璃样品的一系列光谱参数,其结果见表1、表3。表1是经计算得到的Er³⁺离子在镉铝硅酸盐玻璃中的J-O强度参数Ω_t(t=2,4,6),以及吸收光谱中各种跃迁的理论振子强度(f_{cal})和实验振子强度(f_{exp})。3个J-O强度参数的关系是Ω₂>Ω₄>Ω₆,Er³⁺离子在各种基质玻璃中的J-O强度参数^[13]如表2所示。Ω₂与Er³⁺离子超敏跃迁有关,玻璃结构中稀土离子的极化和不对称环境对超敏跃迁有显著的影响,玻璃结构的不对称性和稀土离子的极化性越高,相应的超敏跃迁也越强,Ω₂也越大,玻璃基质的共价性也越强。Ω₆值与Er³⁺离子所在基质玻璃的粘度和刚

表 1 玻璃吸收光谱参数

Tab.1 Absorption spectral parameters of the glass

Transition	Wavelength/nm	f _{exp} /10 ⁻⁶	f _{cal} /10 ⁻⁶
⁴ I _{15/2} → ⁴ I _{13/2}	1534	2.181	1.748(f ^{cd})+0.526(f ^{md})
⁴ I _{15/2} → ⁴ I _{11/2}	978	0.730	0.830
⁴ I _{15/2} → ⁴ I _{9/2}	800	0.379	0.474
⁴ I _{15/2} → ⁴ F _{9/2}	651	2.800	2.871
⁴ I _{15/2} → ⁴ S _{3/2}	543	0.331	0.659
⁴ I _{15/2} → ² H _{11/2}	520.5	10.601	10.262
⁴ I _{15/2} → ⁴ F _{7/2}	488	2.222	2.709
⁴ I _{15/2} → ⁴ F _{5/2}	451	0.601	0.801
⁴ I _{15/2} → ² H _{9/2}	406.5	0.581	0.996
⁴ I _{15/2} → ⁴ G _{11/2}	377.5	17.123	18.124
⁴ I _{15/2} → ⁴ G _{9/2}	364.5	0.403	0.881
		Ω ₂ =5.91×10 ⁻²⁰ cm ²	Ω ₄ =2.04×10 ⁻²⁰ cm ²
		Ω ₆ =1.57×10 ⁻²⁰ cm ²	δ _{ms} =4.92×10 ⁻⁷

性有关。从表2可看出,镉铝硅酸盐玻璃的Ω₂、Ω₆均大于其他六种玻璃,说明镉铝硅酸盐玻璃中的Er³⁺离子受到周围离子较强的极化作用,且其周围环境的非对称性比较高,Er-O键具有比较强的共价性,粘度和刚性也很强。这可能是由于阳离子Cd²⁺、Al³⁺、Li⁺、Na⁺造成玻璃中晶场环境的不同所致^[14]。

表 2 Er³⁺离子在不同基质玻璃中 J-O 强度参数

Tab.2 J-O intensity parameters of Er³⁺ ions in different glasses

Glass	Ω ₂ /×10 ⁻²⁰ cm ²	Ω ₄ /×10 ⁻²⁰ cm ²	Ω ₆ /×10 ⁻²⁰ cm ²
Aluminate	5.60	1.60	0.61
Gemanate	5.81	0.85	0.28
Silicate	4.23	1.04	0.61
Tellurite	4.74	1.62	0.64
Fluorophosphate	2.91	1.63	1.26
Fluoroindate	2.17	2.31	0.89
This work	5.91	2.04	1.57

表3是经计算得出的一系列发射光谱性能参数,有自发辐射几率A_{ed}、A_{md},荧光分支比β和辐射

表 3 玻璃发射光谱参数

Tab.3 Emission spectral parameters of the glass

Transition	Wavelength/nm	A _{ed} /s ⁻¹	A _{md} /s ⁻¹	β	τ _{cal} /ms
⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1 534	158.68	46.92	1.00	4.86
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	978	210.66	-	0.85	4.01
→ ⁴ I _{13/2}	2 704	25.31	13.21	0.15	-
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	800	180.71	-	0.72	3.97
→ ⁴ I _{13/2}	1 657	68.19	-	0.27	-
→ ⁴ I _{11/2}	4 437	-	2.70	0.01	-
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	651	2 065.62	-	0.87	0.42
→ ⁴ I _{13/2}	1 129	108.18	-	0.04	-
→ ⁴ I _{11/2}	1 938	99.69	-	0.04	-
→ ⁴ I _{9/2}	3 544	4.07	122.08	0.05	-
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{15/2}	543	1 698.64	-	0.68	0.40
→ ⁴ I _{13/2}	843	691.57	-	0.27	-
→ ⁴ I _{11/2}	1 225	54.187	-	0.02	-
→ ⁴ I _{9/2}	1 716	82.52	-	0.03	-
² H _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	520.5	9 189.69	-	1.00	0.11
⁴ F _{7/2} → ⁴ I _{15/2}	488	4 184.51	-	1.00	0.24

寿命 τ_{cal} 等。从表 3 可知, Er^{3+} 在镉铝硅酸盐玻璃中 $^4I_{13/2}$ 能级上的辐射寿命为 4.86 ms, 相比其他基质玻璃偏低, 这可能是由于镉铝硅酸盐玻璃有较高的折射率($n_d=1.6627$)。另外, 在制备玻璃样品过程中没有采取除 OH-措施, 也可能使荧光寿命降低^[15]。

2.3 荧光光谱和受激发射截面

图 2 所示为 Er^{3+} 掺杂镉铝硅酸盐玻璃的荧光发射光谱, 中心波长约为 1 534 nm, 根据 J-O 理论, Er^{3+}

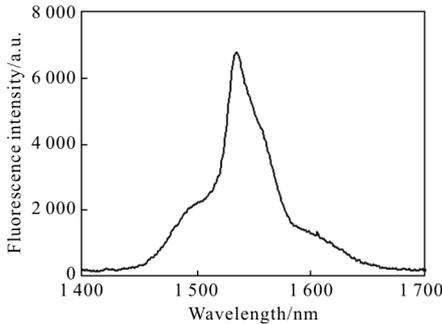


图 2 玻璃样品的荧光发射谱

Fig.2 Fluorescence spectra of the glass samples

离子在波长为 1.55 μm 处的荧光发射能级 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 间的跃迁满足选择定则, 那么它的电偶极跃迁的谱线强度(S_{ed})可表示为:

$$S_{\text{ed}}[^4I_{13/2}, ^4I_{15/2}] = 0.019\Omega_2 + 0.118\Omega_4 + 1.462\Omega_6 \quad (1)$$

而为了获得平坦且宽的荧光发射谱, 电偶极辐射跃迁的贡献就得增加, 由公式(1)可知 S_{ed} 值的大小主要由 J-O 强度参数 Ω_6 来决定, 而笔者制备的玻璃样品的 Ω_6 值(1.57)比较大, 这对宽带光纤激光器的研制是非常有利的。

稀土掺杂激光材料的辐射跃迁量子效率 η 可表示为^[13]:

$$\eta = \tau_{\text{exp}} / \tau_{\text{cal}} \quad (2)$$

式中: τ_{exp} 为经实验测试得到的荧光寿命; τ_{cal} 为利用 J-O 参数 Ω_i 理论计算得到的荧光寿命, 经实验测试得到的荧光寿命 $\tau_{\text{exp}}=4.5$ ms, Er^{3+} 能级 $^4I_{13/2}$ 的量子效率 η 可达到 92.6%。

根据 McCumber 理论^[15], 能级 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁发射截面可以从计算能级 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 的吸收截面获得, 激光玻璃中稀土离子的吸收截面直接从测量的吸收光谱中计算得到:

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = 1.1\sigma_{\text{abs}}(\lambda)\exp[(E_0 - hc\lambda^{-1})/KT] \quad (3)$$

式中: λ 为波长; h 为 Planck 常数; K 为玻耳兹曼常数; E_0 为零线能量, 即 $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 两能级之间最低

Stark 子能量之间的能量差; $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ 为吸收截面:

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = 2.303[\log(I_0/I)]/NI \quad (4)$$

式中: I_0 为入射光强度; I 为透射光强度; $\log(I_0/I)$ 为吸收度; l 为样品厚度; N 为 Er^{3+} 离子浓度($\text{ions} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

由公式(3)计算得出峰值发射截面 $\sigma_{\text{emi}}=8.21 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ 。评价激光玻璃介质的激光性能是由受激发射截面 σ_{emi} 和荧光寿命 τ_{cal} 来决定, σ_{emi} 越大越容易产生激光, τ_{cal} 越大, 粒子在该能级上驻留的时间就越长, 就更容易实现粒子数反转。评价光纤激光器的增益性能常以 $\sigma_{\text{emi}} \times \text{FWHM}$ 的乘积大小来决定, 两者的乘积越大, 其放大性能就越好, 其中 FWHM(full width at half maximum)为荧光半高宽^[15]。由于 Er^{3+} 离子荧光发射谱线不太对称, 所以采用有效线宽 $\Delta\lambda_{\text{eff}}$ 来代替 FWHM, 更能准确反映发射谱的带宽特性, $\Delta\lambda_{\text{eff}}$ 的定义为:

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = \int \frac{I(\lambda)}{I_p} d\lambda \quad (5)$$

式中: $I(\lambda)$ 为波长 λ 处的荧光强度; I_p 为峰值波长处的荧光强度, 经计算 $\Delta\lambda_{\text{eff}}$ 约为 66 nm。

表 4 为 Er^{3+} 离子在不同玻璃基质中的受激发射截面、荧光半高宽以及它们的乘积, 从表中可以看出, 文中所制备的 Er^{3+} 掺杂镉铝硅酸盐玻璃的 $\sigma_{\text{emi}} \times \text{FWHM}$ 均大于其他基质玻璃, 因此认为其具有良好的激光性能, 为笔者制备掺杂光子晶体光纤打下了良好的基础。

表 4 不同组分 Er^{3+} 掺杂玻璃中 FWHM、 σ_{emi} 及 $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$ 值的比较

Tab.4 FWHM, σ_{emi} and $\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}$ of Er^{3+} doped glasses with different composition

Glass	FWHM/nm	$\sigma_{\text{emi}}/10^{-21}\text{cm}^2$	$\text{FWHM} \times \sigma_{\text{emi}}/10^{-27}\text{cm}^3$
Germanate glass ^[16]	42	5.7	23.94
Phosphate glass ^[17]	53.16	6.17	32.8
Phosphate glass ^[18]	34	6.03	20.5
Tellurite glass ^[19]	72	5.62	40.46
Gallogermanate glass ^[20]	54	7.78	42
Cadmium glass	66	8.21	54.19

3 结论

(1) 应用 J-O 理论计算了 Er^{3+} 掺杂镉铝硅酸盐

玻璃样品的强度参数 Ω , 分别为 $\Omega_2=5.91 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4=2.04 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6=1.57 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 其中 Ω_2 和 Ω_6 参数均大于相关文献中基质玻璃的对应参数, 该样品玻璃理论上具有很强的共价性和刚性。

(2) Er^{3+} 掺杂镉铝硅酸盐玻璃样品具有比较宽的荧光半高宽, 比较大的受激发射截面, 与相关文献中的掺杂玻璃比较发现, 该样品的带宽特性均大于锗酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、碲酸盐玻璃和镱锗酸盐玻璃, 同时该样品 Er^{3+} 能级 $^4I_{13/2}$ 的量子效率可达到 92.6%。在中心波长为 1 534 nm 处能够实现强而宽的荧光发射及高的量子效率, 说明制备的 Er^{3+} 掺杂镉铝硅酸盐玻璃具有良好的激光性能, 有望在研制掺杂光子晶体光纤中得到应用。

参考文献:

- [1] Hong Kuobin, Yang Chunchieh, Lu Tenchang. Blue-violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 559-571. (in Chinese)
洪国彬, 杨钧杰, 卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 559-571.
- [2] Tian Xiaojian, Shang Zuguo, Gao Bo, et al. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
田小建, 尚祖国, 高博, 等. 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 982-987.
- [3] Chen Yue'e, Wang Yong, Qu Peixin. Affection of alkali metals, alkaline earth metals of Yb^{3+} doped silicate laser glass on physical and optical properties [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1738-1743. (in Chinese)
陈月娥, 王勇, 曲培新. 碱金属碱土金属对 Yb^{3+} 掺杂硅酸盐激光玻璃的物理和光学特性影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1738-1743.
- [4] Feng Dejun, Huang Wenyu, Ji Pengyu, et al. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1097-1101. (in Chinese)
冯德军, 黄文育, 纪鹏宇, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1097-1101.
- [5] Han Ying, Hou Lantian, Xia Changming, et al. Investigation on the fabrication and luminescence characteristics of Yb^{3+} and Al^{3+} co-doped silicate glasses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 0542121-0542126. (in Chinese)
韩颖, 侯蓝田, 夏长明, 等. 铋铝共掺石英玻璃的制备及其发光特性的研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(5): 0542121-0542126.
- [6] Jiang Linghong, Zheng Yi, Hou Lantian, et al. Design of highly birefringent SF57 soft glass PCF with low effective mode area [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, 33(3): 222-226.
- [7] Cao Fengzhen, Zhang Peiqing, Dai Shixun, et al. Dispersion properties of chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid-IR supercontinuum spectrum generation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1150-1155. (in Chinese)
曹凤珍, 张培晴, 戴世勋, 等. 用于产生超连续谱的硫系光子晶体光纤的色散特性 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1150-1155.
- [8] Liu Yongxing, Zhang Peiqing, Dai Shixun, et al. Simulation study of chalcogenide glass photonic crystal fiber parametric amplifier in mid-IR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 511-516. (in Chinese)
刘永兴, 张培晴, 戴世勋, 等. 中红外硫系光子晶体光纤参量放大特性模拟研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 511-516.
- [9] Wang Xingjun, Zhou Zhiping. Research progress of Er silicate compound light source materials and devices for silicon photonics application [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 274-280. (in Chinese)
王兴军, 周治平. 硅基光电集成用铒硅酸盐化合物光源材料和器件的研究进展 [J]. 中国光学, 2014, 7(2): 274-280.
- [10] Wang Lingling, Guo Yanyan, Tan Fang, et al. Preparation of ytterbium-doped photonic crystal fiber core material and numerical simulation of optical fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3718-3723. (in Chinese)
王玲玲, 郭艳艳, 谭芳, 等. 掺铒光子晶体光纤纤芯材料制备及光纤数值模拟 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3718-3723.
- [11] Judd B R. Optical absorption intensities of rare earth ions [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1962, 127(3): 750-761.
- [12] Ofelt G S. Intensities of crystal spectra of rare earth ions [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1962, 37(3): 511-520.
- [13] Shi Mengjing, Cai Tianzhi, Zhang Lei, et al. Spectroscopic properties and Judd-Ofelt theory analysis of Er^{3+} doped ZBLALip based glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 410-414. (in Chinese)
石梦静, 蔡添志, 张磊, 等. 掺铒氟化物玻璃 ZBLALip 光谱性质和 Judd-Ofelt 理论分析 [J]. 红外与激光工程,

- 2007, 36(6): 410–414.
- [14] Huang Lihui, Liu Xingren, Xu Mai. Optical transitions of Er^{3+} in $\text{Cd}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ glass [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2001, 22(4): 362–366. (in Chinese)
黄立辉, 刘行仁, 徐迈. $\text{Cd}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 玻璃中 Er^{3+} 的光学跃迁 [J]. 发光学报, 2001, 22(4): 362–366.
- [15] Chen He, Liu Yuehui, Zhou Yuefen, et al. Study on preparation and spectral properties of Er^{3+} -doped tellurite glass[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(2): 166–170. (in Chinese)
陈鹤, 刘粤惠, 周跃芬, 等. 掺铒碲酸盐玻璃的制备和光谱性能 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(2): 166–170.
- [16] Zhang Yong, Ren Guozhong, Yang Qibin, et al. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped germanium bismuthate glass [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(5): 999–1002. (in Chinese)
张勇, 任国仲, 杨奇斌, 等. Er^{3+} 掺杂的锗铋酸盐玻璃光谱性质的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 999–1002.
- [17] Wang Lingling, Yu Fengxia, Tan Fang, et al. Spectral properties of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ high doped rare phosphorus based active fiber material [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35 (1): 90–95. (in Chinese)
王玲玲, 于凤霞, 谭芳, 等. 高 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 掺杂的磷基有源光纤材料的光谱性质 [J]. 发光学报, 2014, 35(1): 90–95.
- [18] Linganna K, Rathaiah M, Vijaya N, et al. 1530 μm luminescence properties of Er^{3+} -doped K–Sr–Al phosphate glasses [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(4): 5765–5771.
- [19] Zheng Jian, Cheng Yin, Wu Zhongqing, et al. Effects of heat treatment on near infrared luminescent properties of Er^{3+} -doped tellurite glasses [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(10): 1924–1930. (in Chinese)
郑健, 成茵, 吴钟晴, 等. 热处理对掺 Er^{3+} 碲酸盐玻璃近红外发光性能的影响 [J]. 光电子激光, 2015, 26(10): 1924–1930.
- [20] Shi D M, Zhao Y G, Wang X F, et al. Effects of alkali ions on thermal stability and spectroscopic properties of Er^{3+} -doped gallogermanate glasses [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2011, 406(3): 628–632.