文章编号：1004-0609(2009)10-1860-06

$SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3$(M=Y, La, Gd)玻璃的制备和发光

左成钢，李秀英，肖卓豪，龙卧云，朱立刚，卢安贤

(中南大学 材料科学与工程学院，长沙，410083)

摘 要：采用传统熔体冷却技术制得了新型 $SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3$(M=Y, La, Gd)发光玻璃。对玻璃密度、紫外−可见光区的透过性能以及荧光发射进行了检测。结果表明：$SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$(SZBS)玻璃在可见光区具有高透过性能，稀土氧化物的引入增强了玻璃在可见光区的透过率。SZBS 玻璃的激发主峰位于 221 nm 附近，发射光谱则是峰值位于 410、475 和 502 nm 附近的宽带，且蓝绿光强于紫外光发射，紫外光和蓝绿光发射分别归属于 ZnO 激子复合发光、Zn 间隙原子的复合发光以及电子和深俘获的空穴复合发光。在 SZBS 玻璃组成中引入稀土氧化物造成激发峰红移并能增强玻璃的蓝绿光发射。

关键词：闪烁玻璃；$SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$；稀土氧化物；光致发光

中图分类号：TQ 171.1 **文献标识码**： A

Preparation and luminescence of $SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3$(M=Y, La, Gd) glasses

ZUO Cheng-gang, LI Xiu-ying, XIAO Zhuo-hao, ZHU Li-gang, LU An-xian

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: $SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3$(M=Y, La, Gd) luminescence glasses were prepared by conventional melt quenching technology. Density, UV-VIS transmission spectra and fluorescence spectrum of the glasses were investigated. $SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$(SZBS) glass has high transmission capability in visible light region. The excitation peak of SZBS glass locates around 221 nm. The photoluminescence spectrum of SZBS glass is a broad band with peaks around 410, 475 and 502 nm, which are attributed to the exciton emission of ZnO, interspaceal Zn atoms recombination luminescence, electron and deep captured hole recombination process, respectively. Besides the excitation peak appears red-shift, the transmission ratio of glasses improves and the blue-green photoluminescence enhances with rare earth oxides(Y_2O_3, La_2O_3, Gd_2O_3) introduced into SZBS glass.

Key words: scintillating glass; $SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$; rare earth oxide; photoluminescence

高能物理、核物理、放射物理、地球物理、核医学和工业探测等领域需要性能优异的闪烁体。作为闪烁体中的闪烁玻璃因其制备方法简单、化学组分可调、成本低廉等优点而日益受到重视[1−2]。人们研究的闪烁玻璃多以 Ce^{3+}离子为发光中心，究其原因，是和 Ce^{3+}发光的快速衰减有关(ns 级)。但是，Ce^{3+}离子掺杂时发生的明显浓度猝灭效应、发光易受基质玻璃光碱度影响以及熔制须采用还原气氛等因素制约了掺 Ce^{3+}闪烁玻璃的研究和发展。近年来，n 型宽带隙(室温下 3.37 eV)半导体 ZnO 由于具有优异的物理化学性质，在光

基金项目：国家自然科学基金资助项目(E0202 50672134)
收稿日期：2008-11-10；**修订日期**：2009-02-19
通信作者：卢安贤，教授，博士；电话：0731-88830351；E-mail: luanxian@mail.csu.edu.cn

电导、压电、光波导、发光器件、激光器等方面有广阔的应用前景，促使人们对它开展进一步研究。在此过程中，ZnO 的高效激子复合发光以及快速衰减等优良的光学性质得到了闪烁体研究工作者的广泛关注，人们开始制备以 ZnO 为发光中心的闪烁玻璃并对该新型闪烁玻璃的发光性质进行了大量的研究[3−10]。

稀土离子具有较紧密的电子层结构，场强大，配位数高，因此稀土氧化物在玻璃中通常不能进入玻璃网络，只能是位于结构网络的间隙。将稀土氧化物引入玻璃基质中不仅可以增加玻璃的密度，而且可以改善玻璃的光学性质。然而，在以 ZnO 为发光中心的玻璃基质中引入稀土氧化物并研究它们对基质玻璃发光的影响的文献还很少。为此，本文作者将稀土氧化物 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3 引入到 SrO-ZnO- B_2O_3-SiO_2(SZBS)玻璃系统中，采用传统的熔体冷却技术制备新型的 SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3(M=Y, La, Gd)发光玻璃，并对所得玻璃的发光性能进行研究。

1　实验

制备玻璃所用原料为分析纯的 $SrCO_3$(引入 SrO)、ZnO、H_3BO_3(引入 B_2O_3)、SiO_2 以及高纯稀土氧化物 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3(99.999%)。玻璃的组成如表 1 所列。

计算并准确称量制备玻璃所需的各组成氧化物，研磨混合均匀从而制得混合料。然后，将混合料放入刚玉坩埚在硅碳棒电炉中进行熔融，熔制温度为 1 300~1 320 ℃，保温时间为 2~3 h。最后，将熔融的玻璃液浇注于预热的不锈钢模具上成型，送入预热到 650 ℃的马弗炉内退火处理 2 h 后关闭电炉使其自然冷却至室温。

玻璃的密度采用 Archimedes 法测量，蒸馏水作浸没介质。玻璃的透射光谱以及荧光光谱测试分别在 HITACHI U−3310 Spectrophotometer、HITACHI F−4500 Spectrophotometer 上进行，玻璃试样为通过加工制得的 40 mm×20 mm×2 mm 两大面抛光的玻璃片。透射光谱测试时采用的狭缝为 2 nm，扫描速度为 120 nm/min，空气作背景。荧光光谱测试使用 150 W 的氙灯作激发源，狭缝为 5 nm，光电倍增管电压为 700 V，扫描速度为 1200 nm/min。以上测试均在室温下进行。

2　结果与讨论

2.1　密度

通常说来，玻璃的密度主要取决于玻璃各组分的摩尔质量以及其在玻璃组成中的含量。由表 1 中玻璃的密度值可知，稀土氧化物 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3 引入 SZBS 玻璃后，玻璃的密度明显增大。这种变化自然和 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3 比 SrO 的摩尔质量要大有关系。其次，由于与 Sr^{2+}相比，稀土离子 Y^{3+}、La^{3+}、Gd^{3+} 所带电荷要高但离子半径较小，因此具有较大的场强。在稀土氧化物 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3 引入玻璃后，场强较大的 Y^{3+}、La^{3+}、Gd^{3+}与 O^{2-}的结合力将比 Sr^{2+}的强，造成稀土氧化物所能给出的游离氧变少，这不利于[ZnO_4]四面体的形成，从而会使玻璃的网络结构产生一定程度的改变，玻璃中得以产生相对较多的[ZnO_6]八面体。由于[ZnO_4]四面体结构比较疏松，[ZnO_6]八面体结构则较为致密，因此玻璃中的[ZnO_6]八面体含量的相对增加使得玻璃的密度得到了一定程度地提高。值得注意的是，玻璃 SG-2 相对于玻璃 SG-1 在密度上呈现出较大的增加。这种变化除了上述所说原因外，应该还和 Y_2O_3 的晶体结构有关[11]。如图 1 所示，Y_2O_3 晶体中存在有空位缺陷。当 Y_2O_3 引入玻璃后，其他氧化物组分所提供的氧离子就会进入这些空位缺陷，进而会造成玻璃中的 Y_2O_3 的堆积密度大过其所处

表 1　玻璃的组成和密度

Table 1　Composition in mole percentage and density of some glass

Sample No.	x/%							Ability to glass forming	Density/(g·cm^{-3})
	SrO	ZnO	B_2O_3	SiO_2	Y_2O_3	La_2O_3	Gd_2O_3		
SG-1	30	20	35	15				Glass forming	3.2060
SG-2	25	20	35	15	5			Glass forming	3.5395
SG-3	25	20	35	15		5		Glass forming	3.6237
SG-4	25	20	35	15			5	Glass forming	3.6851

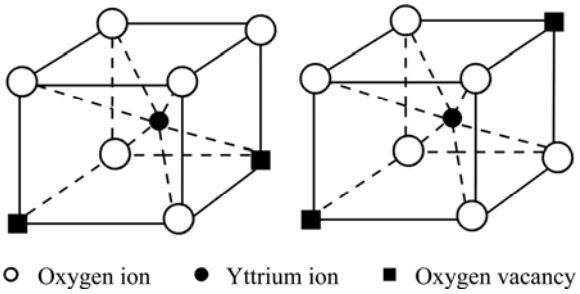

图1 氧化钇晶体的空位缺陷

Fig.1 Vacancy defects in structure of Y_2O_3 crystalline

晶体状态时的堆积密度，宏观上也就表现为增大了玻璃的密度。

2.2 透射光谱

在本研究中，所制得的以ZnO为发光中心的玻璃样品均呈无色透明，这表明玻璃的吸收边位于紫外区。图2所示为玻璃样品的紫外−可见光透射光谱。由图2可知，所有玻璃样品在紫外−可见光区的透过率均超过了80%，并且引入稀土氧化物得到的玻璃SG-2~玻璃SG-4玻璃的透过率高于玻璃SG-1。高透过率有利于减少玻璃对发射光的自吸收。

按照 TAUC 公式计算玻璃样品的非晶态半导体光学能隙，对高吸收系数区进行外推得到 x 轴截距，由此求得玻璃样品的光学能隙。从图 2 可知，SZBS 玻璃的吸收边能量较高，超过了 ZnO 晶体的光学带隙(370 nm)[8]。众所周知，玻璃的紫外−可见吸收是电子跃迁造成的。对于氧化物玻璃而言，其在紫外区的吸收在于氧离子中电子的激发。因此，氧离子与不同阳离子间的化学键特性对氧化物玻璃的紫外吸收起到了至关重要的作用。SZBS 玻璃相对石英玻璃来说，由

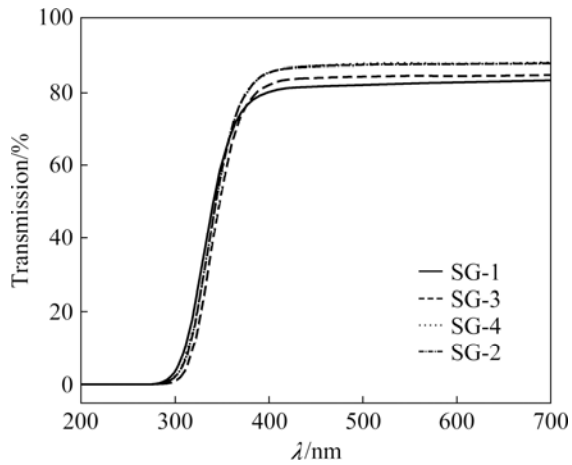

图 2 玻璃 SG-1~SG-4 的透射光谱

Fig.2 UV-VIS transmission spectra of glass SG-1−glass SG-4

于网络外体的加入使得体系中部分桥氧键断裂成非桥氧键，键强减小，氧离子的价电子跃迁所需能量降低，从而导致了玻璃的紫外吸收边向低能方向移动。但是，这种移动毕竟是有限度的。由于 SiO_2、B_2O_3 在 SZBS 玻璃中含量较多，因此 ZnO 在玻璃中可能主要作为网络外体存在，少量则参与了玻璃网络的形成。而少量参与玻璃网络的 ZnO 产生了[ZnO_4]四面体，使 Zn—O—Si 键得以形成。由于 Si 的电负性大于 Zn，因此 Zn—O 键比 Si—O 键的离子性更强。于是，Zn—O—Si 与 Zn—O—Zn 键两者相比较，Zn—O—Si 键中的 O^{2-}的价电子需更大能量才能够跃迁到更高的能级，从而造成 SZBS 玻璃的紫外吸收边能量大于 ZnO 晶体的光学带隙。

由图2还可以知道，引入稀土氧化物Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3后制得的玻璃样品的吸收边与SZBS玻璃的相比都有明显红移，且SG-3玻璃样品的红移最大。吸收边发生红移的一个原因在于引入的各元素的原子量。原子量增大，玻璃对紫外线的吸收本领相应增大。另外，由于稀土离子Y^{3+}、La^{3+}、Gd^{3+}的离子场强大于Sr^{2+}，提供游离氧的能力相对变弱，玻璃中的游离氧含量的降低对ZnO参与网络是不利的，于是就造成了在玻璃网络中的[ZnO_4]四面体数量减少，从而导致玻璃中的非桥氧浓度增加，引起玻璃吸收边出现红移。在上述稀土离子中，由于La^{3+}具有最大的离子半径，这可能是使玻璃SG-3的吸收边具有更小能量的原因。

2.3 光致发光光谱和激发光谱

ZnO 的发光峰常出现在紫外和可见光区。根据实验报道[12−13]已发现的 ZnO 的光致发光峰主要有：356~400 nm 左右的紫外发射峰，450 nm 左右的蓝色发射峰，510 nm 左右的绿色发射峰以及 650 nm 左右的红色发射峰。ZnO 粉体的紫外发光强度一般较弱，峰较尖锐，由激子复合发光引起，衰减很快，为亚纳秒级；可见光区的发射峰则较宽，但峰位受制备工艺影响，由电子和深俘获的空穴复合发光引起，光衰减较慢，为微秒级。在 ZnO 晶体中，由于存在着大量的本征缺陷(氧空位和Zn填隙)使得激子复合发光几率大为降低，结果紫外区的发光弱于可见区的发光。但是，紫外区的发光和可见区的发光是互相竞争的，采用合适的方法可以降低 ZnO 中氧空位缺陷的浓度，从而实现激子发光增强。

图 3 所示为 254 nm 的紫外光激发下 SZBS 玻璃的光致发光光谱。由图 3 可知，SZBS 玻璃在紫外和可见光区均有光发射，发光呈现出宽谱带特征，跨度很大，主峰位于 475 nm 处，在主峰左右则各有一肩峰出

现在 410 和 502 nm 附近。在 SZBS 玻璃中，玻璃的蓝绿光发射占主要成分，其发光光谱形状与文献[3−7]报道有明显差别。这可能是由于 SZBS 玻璃中网络形成体 SiO_2 和 B_2O_3 含量较高，使得 ZnO 以网络外体形式存在居多造成的，因此 SZBS 玻璃的发光在很大程度上呈现出与 ZnO 晶体发光类似的特点。从光谱形状来看，SZBS 玻璃的光致发光光谱应该是由多种不同类型的发光叠加而成的，对玻璃的宽发光带进行 Gauss 拟合，发现该发光带包括峰值在 382、468 和 531 nm 的发光。对上述 3 个发光峰的出现，相应的发光机理是不同的。玻璃在 382 nm 处的紫外光发射，与 ZnO 的能隙相对应，是激子复合发光引起的[4−5]。对于 ZnO 晶体的蓝光发射，吴莉莉等[14]认为可能是由于微量氧空位形成的浅施主能级向价带的跃迁引起的，但 FANG 等[15]和朋兴平等[16]则认为是通过 Zn 间隙原子的复合发光。由于 SZBS 玻璃中 ZnO 主要以网络外体形式存在，因此我们认为玻璃在 468 nm 处的蓝光发射很可能是由 Zn 间隙原子的复合发光引起的。SZBS 玻璃的绿色荧光，我们认为可能是通过 O 空位的发光，即为氧空位形成的施主能级向价带跃迁，这与黄运华等[17]报道的 ZnO 晶体的绿光发射机理类似。

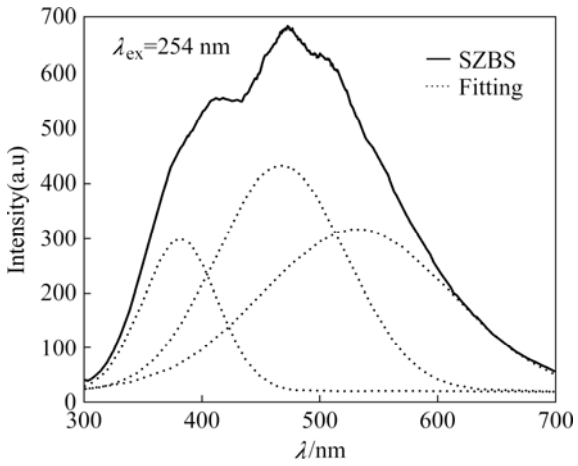

图 3　SZBS 玻璃的光致发光光谱

Fig.3　Photoluminescence spectrum of glass SZBS

图 4 所示为用 254 nm 的紫外光激发玻璃 SG-1~SG-4 所得的光致发光光谱。由图 4 可知，所有样品在紫外和可见光区均有光发射。玻璃 SG-2、SG-3 与 SG-1 的光致发光光谱类似，发射峰形状、位置基本相同，只是发光强度增加。玻璃 SG-4 则除了在 475 和 502 nm 处出现发射峰外，在 317 和 625 nm 附近处也有发射峰。为便于讨论，可将光致发光光谱划分成 *A*、*B*、*C*、*D* 4 个区。其中，*B* 和 *C* 区是所有样品都具有的，*A* 和 *D* 区则为玻璃 SG-4 所独有。*B* 和 *C* 区的发光显然是

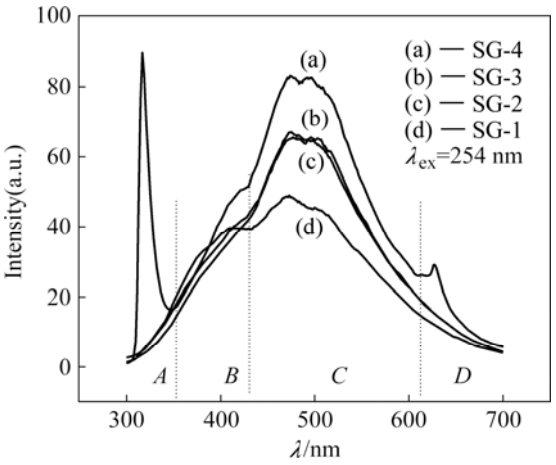

图 4　玻璃 SG-1~SG-4 的光致发光光谱

Fig.4　Photoluminescence spectra of glass SG-1−glass SG-4

由玻璃中含有的 ZnO 引起，*B* 区归属于 ZnO 激子复合发光，*C* 区则是 Zn 间隙原子的复合发光以及电子和深俘获的空穴复合发光。从 *B* 和 *C* 区的发光强度来看，玻璃在 *C* 区的强度明显要高于 *B* 区，可能的原因有：一是 ZnO 在玻璃中产生的参与网络的[ZnO_4]四面体单元很少；二是玻璃中可能存在着的大量本征缺陷(氧空位和 Zn 填隙)造成了激子复合发光的几率降低，结果紫外区的发光比在可见光区的相对要弱；三是由于激子浓度依赖于激发密度，故而高密度激发有利于紫外光发射，但本研究中的激发源（氙灯）的激发密度较低，结果使得激子发射强度降低，也可造成紫外区的发光弱于可见光区的发光[18]。由图 4 还可以知道，玻璃的发光强度还和玻璃的组成有一定关系，稀土氧化物的加入能够在一定程度上增强 *B* 和 *C* 区的蓝绿光发射，这可能和稀土离子的场强或能够向 ZnO 转移能量有关。另外，样品 SG-4 在 *A* 和 *D* 区内的发光为 Gd^{3+} 的发射。其中，峰值位于 317 nm 较尖锐的紫外光发射峰对应于 Gd^{3+} 的 *f-f* 跃迁 $^6P_J \rightarrow {}^8S_{7/2}$ 发射，而峰值位于 625 nm 红光发射峰则归属于 Gd^{3+} 的 *f-f* 跃迁 $^6G_J \rightarrow {}^6P_{3/2}$(J=5/2, 11/2, 9/2)发射。

图 5 所示为在 475 nm 蓝光监控下玻璃样品 SG-1~SG-4的激发光谱。由图5可知，所有样品的激发峰均为宽带。其中，玻璃SG-1的激发主峰位于221 nm 左右，玻璃SG-2~SG-4激发主峰则在250 nm附近。与玻璃SG-1相比，玻璃SG-2~SG-4的激发峰位置移向了长波区。显然，这种变化和在玻璃组成中引入稀土氧化物有关。稀土离子的高场强由此而造成稀土氧化物提供的游离氧相对偏少，进而会对Zn^{2+}、O^{2-}所处的微

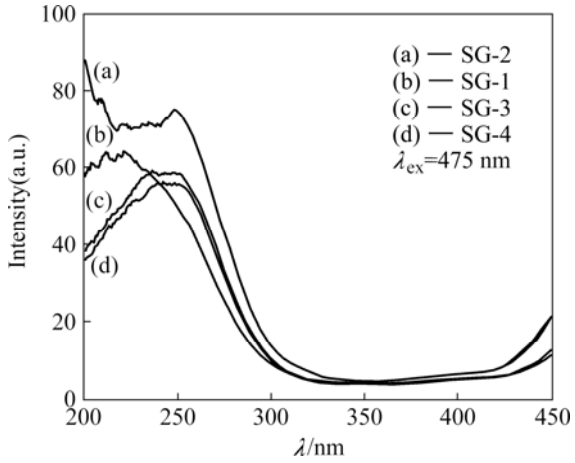

图 5 玻璃 SG-1~SG-4 的激发光谱

Fig.5 Excitation spectra of glass SG-1−glass SG-4

环境产生微扰，玻璃网络中的一部分[ZnO_4]四面体会转变成为[ZnO_6]八面体，玻璃内的[ZnO_4]四面体和[ZnO_6]八面体的相对含量也随之改变，结果导致晶体场减弱，能级间距减小，从而使得激发峰位置产生“红移”。

3 结论

1) SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2 玻璃在可见光区具较高透过性，发光强度高，以蓝绿光发射为主，在紫外光区、蓝光区和绿光区的发光分别归属于激子复合发光、Zn 间隙原子的复合发光以及电子和深俘获的空穴复合发光。

2) 稀土氧化物 Y_2O_3、La_2O_3、Gd_2O_3 的引入能够提高玻璃的密度，增强玻璃在紫外−可见光区的透过率并对提高玻璃的荧光发射强度有积极作用。

3) SrO-ZnO-B_2O_3-SiO_2-M_2O_3(M=Y, La, Gd)玻璃在可见光区的高透过性能及其高强度荧光发射使之成为一种很有应用发展前景的闪烁玻璃。

REFERENCES

[1] 赵宏生, 周万城. 闪烁玻璃的研究进展[J]. 材料导报, 2001, 15(1): 26−29.
ZHAO Hong-sheng, ZHOU Wan-cheng. Progress in research on scintillating glasses[J]. Materials Review, 2001, 15(1): 26−29.

[2] 赵凤刚, 汪国年, 胡丽丽. 闪烁玻璃的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25 (5): 123−127.
ZHAO Feng-gang, WANG Guo-nian, HU Li-li. Progress in research on scintillating glasses[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(5): 123−127.

[3] 陈国荣, 张永辉, 杜永娟, 聂家相, 马丁·尼克. 一种快速闪烁玻璃及其制备方法. 中国, CN1526673A[P]. 2004−09−08.
CHEN Guo-rong, ZHANG Yong-hui, DU Yong-jun, NIE Jia-xiang, NIKL M. A rapid scintillating glass and the synthesized method. China, CN1526673A[P]. 2004−09−08.

[4] 张永辉. 以氧化锌为发光中心的新型超快速闪烁玻璃的制备及光学性能[D]. 上海, 华东理工大学, 2003.
ZHANG Yong-hui. Preparation and optical properties of the novel superfast scintillating glasses using zinc oxide as the emission center[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2003.

[5] 张俊标. 氧化锌闪烁玻璃的性能与结构[D]. 上海, 华东理工大学, 2005.
ZHANG Jun-biao. ZnO containing scintillating glasses: Their properties and structure[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2005.

[6] NIKL M, PEJCHAL J, RAO J H, ZHANG J, CHEN G, BEITLEROVA A, YOSHIKAWA A, FUKUDA T. Photoluminescence of ZnO-aggregates in oxide glasses[J]. Optical Materials, 2007, 29: 552−555.

[7] CHEN G R, NIKL M, NATASHA S, ALENA B, RAO J H, YANG Y X, ZHANG Y H, JIANG X W, ZHU C S. Photoluminescent properties of nanocrystallized zinc borosilicate glasses[J]. Radiation Measurements, 2004(38): 771−774.

[8] CHO S L, MA J, KIM Y K, SUN Y, WONG G K L, KETTERSON J B. Photoluminescence and ultraviolet lasing of polycrystalline ZnO films prepared by the oxidation of the metallic Zn[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(18): 2761−2763.

[9] QIAN G J, NIKL M, BEI J F, PEJCHAL J, BACCARO S, GIORGI R, CECILIA A, CHEN G R. Temperature dependence of photoluminescence in ZnO-containing glasses[J]. Optical Materials 2007(30): 91−94.

[10] QIAN G J, BACCARO S, GUERRA A, LIANG X L, YUAN S L, IURLARO G, CHEN G R. Gamma irradiation effects on ZnO-based scintillating glasses containing CeO_2 and/or TiO_2[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 262: 276−280.

[11] 迟玉山, 沈菊云, 陈学贤. 含 Y_2O_3 玻璃的弹性模量[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(1): 135−138.
CHI Yu-shan, SHEN Ju-yun, CHEN Xue-xian. Elastic module of glasses containing Y_2O_3[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(1): 135−138.

[12] VANHEUSDEN K, SEAGER C H, WARREN, W L, TALLANT D R, VOIGT J A. Correlation between photoluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors[J]. Applied Physics Letters,

1996, 68(3): 403−405.

[13] LOOK D C, REYNOLDS D C, FANG Z Q, HEMSKY J W, SIZELOVE J R, JONES R L. Point defect characterization of GaN and ZnO[J]. Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology, 1999, 66(1): 30−32.

[14] 吴莉莉, 吕　伟, 伦　宁, 吴佑实. 纳米氧化锌的制备与光学性能表征[J]. 山东大学学报: 工学版, 2005, 35(2): 1−4.
WU Li-li, LÜ Wei, LUN Ning, WU You-shi. Preparation of crystal ZnO nanopowders and characteristics of optical property[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2005, 35(2): 1−4.

[15] FANG Z B, WANG Y Y, XU D Y, TAN Y S, LIU X Q. Blue luminescent center in ZnO films deposited on silicon substrates[J]. Optical Materials, 2004, 26(3): 239−242.

[16] 朋兴平, 兰　伟. 谭永胜, 佟立国, 王印月. Cu 掺杂氧化锌薄膜的发光特性研究[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2705−2709.
PENG Xing-ping, LAN Wei, TAN Yong-sheng, TONG LI-guo, WANG Yin-yue. Photoluminescent properties of Cu-doped ZnO thin film[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2705−2709.

[17] 黄运华, 张　跃, 贺　建, 戴　英, 顾有松, 纪　箴, 展晓元, 周　成. 氧化锌纳米带的低温无催化热蒸发制备及其表征[J]. 物理化学学报, 2005, 21(3): 239−243.
HUANG Yun-hua, ZHANG Yue, HE Jian, DAI Ying, GU You-song, JI Zhen, ZHAN Xiao-yuan, ZHOU Cheng. Fabrication, structures and optical property of ZnO nanobelts prepared by a novel Zn-powder evaporation technique[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2005, 21(3): 239−243.

[18] 刘中仕, 荆西平, 宋宏伟, 范丽波. ZnO 荧光粉中紫外发射和绿色发射之间的关系[J]. 物理化学学报, 2006, 22(11): 1383−1387.
LIU Zhong-shi, JING Xi-ping, SONG Hong-wei, FAN Li-bo. The relationships between UV emission and green emission in ZnO phosphor[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2006, 22(11): 1383−1387.

(编辑　何学锋)