

# 氟化物玻璃在两束激光作用下的上转换 三维立体显示

刘名扬 张瑞萍

(装甲兵工程学院基础部, 北京 100072)

**摘要** 研究了两束激光作用下的上转换三维(3D)立体显示,所用材料为 ZBLAN:Pr,Yb 氟化物玻璃。所用的两束激光是波长分别为 960 nm(半导体激光器)和 820 nm(Ti 宝石激光器)。对  $\text{Pr}^{3+}$  离子双频上转换发光进行了研究,分析了上转换发光强度与抽运光强度和离子掺杂浓度的关系,从而得出了实现较清晰双频上转换 3D 立体图像的实验条件。ZBLAN 玻璃为双频上转换 3D 立体显示的基质材料,主要由于其有非常好的声子光谱——声子频率小于  $580\text{ cm}^{-1}$ ;当激光强度很小时,上转换荧光强度将随着两抽运激光强度的增加而线性增加;ZBLAN 玻璃中  $\text{Pr}^{3+}$  离子和  $\text{Yb}^{3+}$  离子的最佳掺杂摩尔分数为 0.5% 和 1.5%。

**关键词** 材料;三维立体显示;双频上转换;ZBLAN 玻璃

中图分类号 O482.31;O433.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1006003

## Up-Conversion Three-Dimensional Volumetric Display of Fluoride Glass under Two Beams of Lasers

Liu Mingyang Zhang Ruiping

(Department of Fundamental Courses, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract** Two beams of pumping up-conversion three-dimensional (3D) volumetric display which is based on a ZBLAN:Pr, Yb fluoride glass are investigated. The lasers employed are infrared semiconductor laser with wavelength 960 nm and tunable Ti gem laser with wavelength of 820 nm, respectively. The two frequency up-conversion luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$  ion is investigated. The relation between up-conversion fluorescence intensity, pumping lasers intensity, and ion doped concentration is analyzed, and the experimental conditions to realize the clear two frequency up-conversion 3D display are therefore obtained. ZBLAN glass is selected as two-frequency up-conversion 3D volumetric display foundation material for it has perfect phonon spectrum whose maximum phonon frequency is  $580\text{ cm}^{-1}$ ; up-conversion fluorescence intensity increases linearly with augment of two beams of pumping lasers intensity when lasers intensity are very weak; optimal doped concentration of  $\text{Pr}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  ions are 0.5% and 1.5% mole fraction, respectively.

**Key words** material; three-dimensional display; two-frequency up-conversion; ZBLAN glasses

**OCIS codes** 160.5690; 140.5560; 160.2750; 190.7220

### 1 引 言

稀土元素频率上转换发光是基于吸收多个光子后自发辐射的一种荧光现象<sup>[1~13]</sup>,在近几年的发光材料研究中,频率上转换发光越来越受到科技工作者的重视。上转换发光有一系列广泛的应用,例如:激光、三维(3D)立体显示、生物应用、荧光防伪、成像、存储、温度传感器和交通等。双频上转换 3D 立

体显示<sup>[7,8]</sup>是其中的新应用之一,双频上转换 3D 立体显示克服了已有的 3D 显示技术的更新频率低、动态显示困难、图形分辨率低、3D 跟踪范围小的缺点,是一种自体视的、全新的 3D 立体显示技术。它不仅可以再现各种事物的立体图像,而且还可以显示经计算机处理的高速运动物体的立体图像。要得到清晰的上转换图像,对上转换材料有一定的要求。

收稿日期: 2011-05-16; 收到修改稿日期: 2011-06-02

基金项目: 总装基础科学创新项目(2009ZB016)资助课题。

作者简介: 刘名扬(1977—),男,讲师,主要从事光学方面的研究。E-mail: lmy771204@126.com

首先,两抽运激光的波长都在红外;同时还要求相对这两级抽运激光的单频双光子或单频多光子的上转换效率很低,这样才能避免产生非寻址点的暗亮线。由于ZBLAN氟化物玻璃有很好的发光性能,截止声子能量较低,且又能拉制成光纤或制成大块固体材料而有利于激光或3D立体显示的操作,本文以ZBLAN氟化物玻璃为基质材料对 $\text{Pr}^{3+}$ 双频上转换发光进行了研究,分析了上转换发光强度与抽运光强度和离子掺杂浓度的关系。

## 2 $\text{Pr}^{3+}$ , $\text{Yb}^{3+}$ 共掺上转换发光

频率上转换3D立体显示的基本原理是利用两束相互垂直的红外激光交叉作用于上转换材料上,如图1所示,经过上转换材料的两次共振吸收,发光中心电子被激发到高激发能级,再向下能级跃迁就可能产生可见光的发射,这样的上转换材料空间中的一个点就是一个发光的亮点。如果使两束激光的交叉点依照某种轨迹在上转换材料中做3D空间的寻址扫描,那么两束激光的交叉点所扫描的地方应当是一条可以发射可见荧光的亮带,即可以显示出同激光交叉点运动轨迹相同的3D立体图形。

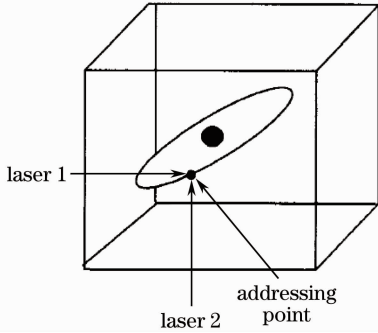


图1 双频上转换3D立体显示原理

Fig. 1 3D display principle of two-frequency up-conversion

实验所用的样品是稀土离子掺杂的氟化物玻璃,这种玻璃由 $\text{ZrF}_4$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{PrF}_3$ 和 $\text{YbF}_3$ 共熔后慢慢冷却得到的透明玻璃体,玻璃体经研磨、抛光后即成待用样品,简称ZBLAN:Pr, Yb玻璃。ZBLAN玻璃是一种五重的氟锆酸盐玻璃,主要成分为 $\text{ZrF}_4$ ,但是单独的 $\text{ZrF}_4$ 很难形成玻璃态。碱土金属离子的引入形成玻璃至关重要,其中最有利的是加入 $\text{BaF}_2$ 。镧系氟化物的引入对玻璃态的氟锆酸盐稳定性也有很好的作用,经过测试发现 $\text{LaF}_3$ 的效果最好,加入 $\text{AlF}_3$ 可以减小玻璃的结晶趋势,加入 $\text{NaF}$ 有两个作用,首先它可以有

效地扩大玻璃系统的成玻区域,另外还可以用它来调节玻璃的折射率。

所用的两束激光分别来自红外半导体激光器和可调谐掺Ti宝石激光器,半导体激光器的波长是960 nm;Ti宝石激光器的输出波长是820 nm,将两束激光的交叉点作用于ZBLAN:Pr, Yb玻璃,交叉点就是显示的寻址点,寻址点的发光亮度由两束抽运激光强度来控制。在实际操作中,固定960 nm激光的强度,通过改变820 nm的激光强度来实现寻址点的灰度控制。荧光收集系统采用SPEX的Fluorolog-2型荧光分光光度计,吸收光谱用UV365分光光度计测量。

图2是 $\text{Pr}^{3+}$ 和 $\text{Yb}^{3+}$ 在ZBLAN玻璃中的吸收光谱和各吸收峰所对应的能级。从图中可以看出 $\text{Pr}^{3+}$ 在Ti宝石激光器的激发范围内(814~924 nm)没有基态吸收; $\text{Yb}^{3+}$ 在810~1072 nm这一红外波段内有一宽度很大的吸收峰,并且除了这一吸收峰(能级 $^2\text{F}_{5/2}$ )外, $\text{Yb}^{3+}$ 其他的能级都处在紫外区域,因此在激光作用下, $\text{Yb}^{3+}$ 不存在激发态吸收。图3是根据吸收光谱得出的 $\text{Pr}^{3+}$ 和 $\text{Yb}^{3+}$ 的能级图。从图3可以看出, $\text{Yb}^{3+}$ 的 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级和 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^1\text{G}_4$ 能级能量相当,两能级之间可以发生相互作用,产生能量的传递,因此 $\text{Yb}^{3+}$ 对 $\text{Pr}^{3+}$ 具有增敏作用。由于 $\text{Yb}^{3+}$ 具有结构简单的能级,离子相互作用过程很简单,所以增敏作用效果很好。从图3可以看出, $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^3\text{P}_2$ ,  $^3\text{P}_1$ ,  $^3\text{P}_0$ 的吸收峰几乎是重叠的,它们的能量很接近,所以下面统称为 $^3\text{P}$ 能级。

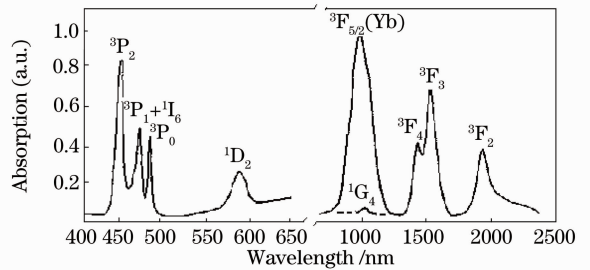


图2  $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of  $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped ions

ZBLAN玻璃中的 $\text{Pr}^{3+}$ 和 $\text{Yb}^{3+}$ 的双频上转换过程如图4所示。由图2的吸收谱可知,在两束抽运激光作用下, $\text{Pr}^{3+}$ 的基态吸收很弱,基态吸收主要是 $\text{Yb}^{3+}$ 产生的。 $\text{Yb}^{3+}$ 吸收第一束抽运激光(波长为960 nm的半导体激光)的能量跃迁到 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级, $\text{Yb}^{3+}$ 的 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级与 $\text{Pr}^{3+}$ 的 $^1\text{G}_4$ 能级能量相差不多,它们之间发生相互作用,产生能量传递, $\text{Yb}^{3+}$ 将能量传递给 $\text{Pr}^{3+}$ , $\text{Pr}^{3+}$ 获得能量跃迁到 $^1\text{G}_4$ 能级,又由

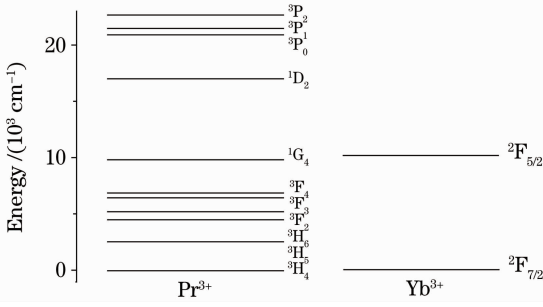

 图3 Pr<sup>3+</sup>和Yb<sup>3+</sup>的能级结构图

 Fig. 3 Energy level structure of Pr<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>

于<sup>3</sup>P能级和<sup>1</sup>G<sub>4</sub>能级之间的能量差与第二束激光的能量相匹配,所以,在第二束激光(Ti 宝石激光)的作用下,处于<sup>1</sup>G<sub>4</sub>能级的Pr<sup>3+</sup>产生激发态吸收,跃迁到<sup>3</sup>P能级。处于<sup>3</sup>P能级的Pr<sup>3+</sup>向下辐射,就产生了上转换发光。

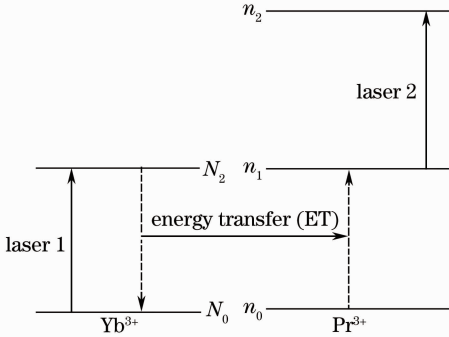

 图4 Pr<sup>3+</sup>和Yb<sup>3+</sup>的双激光抽运上转换激发过程

 Fig. 4 Two lasers pumping up-conversion process of Pr<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>

### 3 上转换荧光强度和激发光功率的关系

要深入了解Pr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:ZBLAN玻璃中Pr<sup>3+</sup>上转换荧光产生的动力学过程,则需要建立描述系统动力学过程的速率方程。

对于图4描述的整个上转换过程,可以用一组简单的速率方程模型来描述

$$\begin{cases} \frac{dN_0}{dt} = -R_1 N_0 + N_1 p + TN_1 n_0; \\ \frac{dn_0}{dt} = n_1 q_{10} + n_2 q_{20} - TN_1 n_0; \\ \frac{dn_1}{dt} = -n_1 q_{10} - R_2 n_1 + n_2 q_{21} + TN_1 n_0; \\ \frac{dn_2}{dt} = R_2 n_1 - n_2 q_2; \\ N_0 + N_1 = N; \quad n_0 + n_1 + n_2 = n; \end{cases} \quad (1)$$

式中 $R_1, R_2$ 是两抽运激光的抽运速率; $N_0, N_1$ 分别

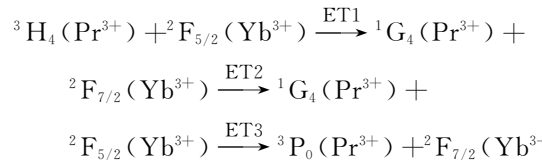
是Yb<sup>3+</sup>的<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>, <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>能级的布居数, $n_0, n_1, n_2$ 分别是Pr<sup>3+</sup>的<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>1</sup>G<sub>4</sub>, <sup>3</sup>P能级的布居数。 $p$ 是N<sub>1</sub>能级的布居衰减率; $q_{ij}$ 是从能级 $i$ 到能级 $j$ 的布居衰减率; $q_i$ 是能级 $i$ 全衰减率; $T$ 是Pr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>之间的能量传递率。

根据速率方程(1)式可以得到稳态速率方程,解稳态速率方程可以得到当激光强度很小时,上转换荧光强度将随着两抽运激光强度的增加而线性增加,即:

$$L \propto I_1 I_2. \quad (2)$$

根据(2)式可知,为了增加上转换荧光强度,可以通过增加两束激光强度来实现。由(2)式可知,当固定960 nm的半导体激光器的激光强度时,寻址点的发光强度和820 nm激光强度关系是线性的,当820 nm激光强度增强时,寻址点的发光亮度增强,反之,寻址点的发光亮度降低。由(2)式可知,当固定820 nm的Ti 宝石激光器的激光强度时,960 nm激光单频双光子上转换发光引起的非寻址点的暗亮和960 nm激光强度也成线性关系,非寻址点暗亮也随着960 nm激光强度的增加而变亮。因此可通过降低960 nm激光强度克服其在ZBLAN:Pr, Yb<sup>3+</sup>玻璃中的单频上转换发光,来增加图像的清晰度。

通过分析可知,为了使图像清晰,可以加大820 nm激光强度,同时减少960 nm激光强度。但是减少960 nm激光强度一方面可以降低非寻址点的暗亮,另一方面,根据(2)式知这会引入双频上转换荧光强度的降低,使图像的亮度降低,这里可通过选用声子能量低的基质材料来保证图像清晰度。由能级图3可以知道,Pr<sup>3+</sup>的<sup>1</sup>G<sub>4</sub>能级和<sup>3</sup>P<sub>0</sub>能级间隔与Yb<sup>3+</sup>的<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>能级和<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>能级间隔的失配率 $\Delta E$ 约为1200 cm<sup>-1</sup>,所以在能量传递过程



中要有声子参与ET3能量传递过程,声子辅助的能量传递几率 $P \propto \exp\left(\frac{-\Delta E}{h\omega}\right)$ 。当声子能量降低时, $P$ 也跟着降低。ZBLAN玻璃有非常好的声子光谱(截止声子频率 $< 580 \text{ cm}^{-1}$ ),这是由于ZBLAN玻璃主要成分是锆、钡等重金属阳离子和阴离子氟,其基本的振动模频率相对于硅玻璃很小,使得材料的声子带边能量也相当低,这也是其红外透明截止频

率小的主要原因。同时低的声音能量也导致了掺杂到材料中的稀土离子能级间的多声子无辐射弛豫速率很低,使得这些稀土离子的辐射有高的量子效率,许多硅玻璃掺杂材料中无法探测到的稀土离子能级跃迁发光,在氟锆酸盐玻璃中都能观察到。正是由于这个特点,再加上本身不错的化学和机械性能,稀土离子掺杂的氟锆酸盐玻璃作为激光材料尤其是上转换激光材料得到了广泛的关注和深入的研究。当单频上转换在 ZBLAN 玻璃中发生时,需要有 3 个声子参与上转换过程,双频上转换强度将明显高于单频上转换强度。选用声子能量较小的 ZBLAN 玻璃,再适当地降低 960 nm 抽运激光的强度,可以大大降低单频上转换发光的强度。这种方法对提高信噪比具有实用价值。

#### 4 稀土离子的掺杂浓度对上转换荧光强度的影响

$\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  之间的能量传递主要由离子之间的相互作用来完成。因为  $\text{Yb}^{3+}$  的  $^2\text{F}_{5/2}$  能级和  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^1\text{G}_4$  能级的能量很匹配,它们之间的能量传递方式是一种能量的共振转移。离子间要发生相互作用,离子之间的距离就很重要了。在均质玻璃中,稀土离子之间的距离主要由离子的浓度来决定。因此稀土离子的掺杂浓度会对双频上转换荧光强度产生一定的影响。由图 5 可知,在 ZBLAN 玻璃中  $\text{Pr}^{3+}$  的最佳掺杂摩尔分数为 0.5%。在此基础上,图 6 给出了  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂浓度与双频上转换荧光强度之间的关系。由图 6 可以看出,随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的增加,荧光强度开始增大,说明  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的增高使稀土离子之间的能量传递作用增强。当  $\text{Yb}^{3+}$  浓度降低时,离子之间的距离太远,不能产生有效的能量转移; $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  之间的能量传递有很多种形式,当  $\text{Yb}^{3+}$  摩尔分数超过 1.5% 时,荧光强度随  $\text{Yb}^{3+}$  的增

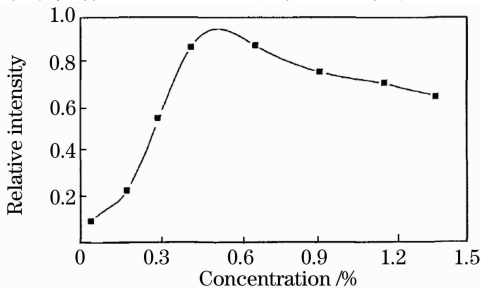


图 5 寻址点的发光亮度与  $\text{Pr}^{3+}$  的掺杂浓度之间的关系  
Fig. 5 Relation between addressing spot luminescence intensity and doped concentration of  $\text{Pr}^{3+}$

加反而减小。

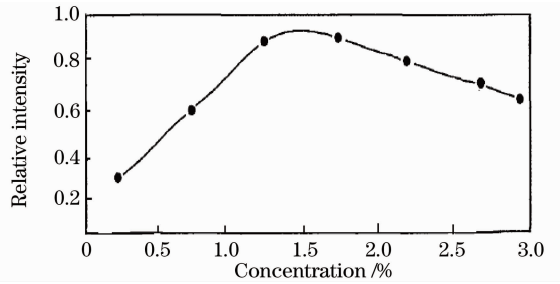
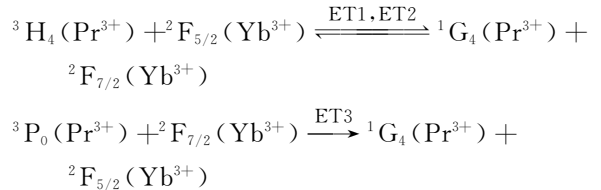


图 6  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂浓度与双频上转换荧光强度之间的关系

Fig. 6 Relation between doped concentration of  $\text{Yb}^{3+}$  and two-frequency up-conversion fluorescence intensity

1991 年, J. Y. Allain 等<sup>[14]</sup> 深入研究了  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  之间的能量传递方式, J. Y. Allain 介绍了 5 种能够发生在这两种离子之间的能量传递, 图 7 给出了其中 3 种, 具体作用过程为



当  $\text{Yb}^{3+}$  的浓度太高时, 会使反向能量传递  $\text{ET2}'$  和另外的能量传递  $\text{ET3}'$  出现,  $\text{ET2}'$  的出现使得  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^1\text{G}_4$  能级的布居数减少, 上转换荧光强度也随之降低; 能量传递  $\text{ET3}'$  的出现, 也同样会减少需要的荧光强度。另外,  $\text{Yb}^{3+}$  的浓度太高, 也会使  $\text{Yb}^{3+}$  之间的相互作用增强,  $\text{Yb}^{3+}$  激发态的寿命减少, 从而减少了  $\text{Yb}^{3+}$  对  $\text{Pr}^{3+}$  的能量传递作用。

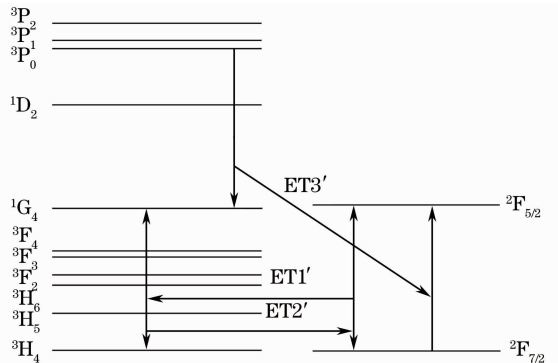


图 7  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  之间的能量传递

Fig. 7 Energy transfer between  $\text{Pr}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$

通过实验和分析可知, ZBLAN 玻璃中  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  的最佳掺杂摩尔分数是 0.5% 和 1.5%。图 8 给出了几种不同样品在 960 nm 和 820 nm 激光共同激发下交叉点的荧光光谱的对比。进一步证明了前面得出的 ZBLAN 玻璃中  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  的最佳掺



杂浓度的正确性。

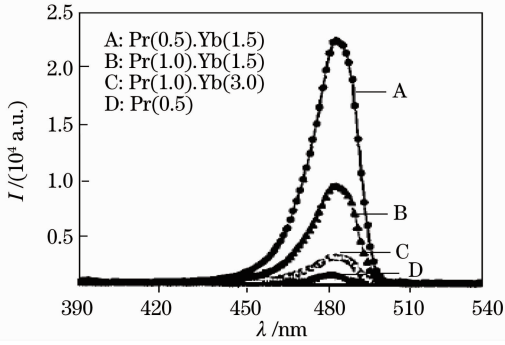


图 8 不同样品的荧光光谱的对比

Fig. 8 Fluorescence spectrum of different specimens

## 5 结 论

选择组分为 ZBLAN 玻璃为双频上转换 3D 立体显示的基质材料,主要是由于它具有非常好的声子光谱(截止声子频率 $<580\text{ cm}^{-1}$ )。在 ZBLAN 玻璃中双掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Pr}^{3+}$  代替  $\text{Pr}^{3+}$ ,通过  $\text{Yb}^{3+}$  对  $\text{Pr}^{3+}$  的增敏作用,可以有效增加  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^1\text{G}_4$  能级的布局,提高上转换发光的强度。通过建立速率方程模型可知,当激光强度很小时,上转换荧光强度将随着两抽运激光强度的增加而线性增加,即  $L \propto I_1 I_2$ ;  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^1\text{G}_4$  能级有较长的发光寿命,能较好地实现荧光发射,增加频率上转换 3D 立体显示的可视性。稀土离子的掺杂浓度对双频上转换荧光强度产生一定的影响,ZBLAN 玻璃中  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Yb}^{3+}$  的最佳掺杂摩尔分数为 0.5% 和 1.5%。

## 参 考 文 献

- Ding Qinglei, Xiao Siguo, Zhang Xinghua *et al.*. The upconversion luminescent of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  powers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5140~5144  
丁庆磊,肖思国,张向华等. 980 nm 激发下  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  粉末的上转换发光特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5140~5144
- Jin Zhe, Nie Qihua, Xu Tiefeng *et al.*. Energy transfer and upconversion luminescence of  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped lanthanum-zinc-lead-tellurite glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2261~2267  
金哲,聂秋华,徐铁峰等.  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺碲铅铋镉玻璃的能量传递和上转换发光[J]. *物理学报*, 2007, **56**(4): 2261~2267
- Dai Shixun, Li Xujie, Nie Qihua *et al.*. Upconversion luminescence in  $\text{Yb}^{3+}$  sensitized  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped tellurite glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(9): 5518~5525  
戴世勋,厉旭杰,聂秋华等.  $\text{Yb}^{3+}$  敏化的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺碲酸盐玻璃的上转换发光研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(9): 5518~5525

- Luo Jianqiao, Sun Dunlu, Zhang Qingli *et al.*. Upconversion luminescence in  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped  $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  laser crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7712~7716  
罗建乔,孙敦陆,张庆礼等.  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺  $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  晶体的上转换发光[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12): 7712~7716
- Gan Zongsong, Yu Hua, Li Yanming *et al.*. Investigation on upconversion luminescence of  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  codoped oxy-fluorosilicate glass ceramics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5699~5704  
甘棕松,余华,李妍明等.  $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺氟氧硅酸盐玻璃陶瓷蓝色上转换发光研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5699~5704
- Dong Liqiang, Huang Shihua, Jia Xiaoxia *et al.*. Studies on the dynamic process of upconversion green emission from  $\text{Er}^{3+}$  under square wave excitation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 2061~2066  
董力强,黄世华,贾晓霞等. 方波激发下  $\text{Er}^{3+}$  上转换绿光发光动力学过程的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 2061~2066
- Chen Xiaobo, Song Zengfu. Study on two frequency excitation upconversion in  $\text{Pr}(0.5)\text{Yb}(3):\text{ZBLAN}$ [J]. *Science in China G*, 2006, **36**(2): 164~171  
陈晓波,宋增福.  $\text{Pr}(0.5)\text{Yb}(3):\text{ZBLAN}$  双频激发上转换的研究[J]. *中国科学 G 辑*, 2006, **36**(2): 164~171
- Zhang Ruiping, Chen Xiaobo, Kang Dongguo. Computer dynamic simulation for three dimensional display based on two-frequency up-conversion [J]. *J. Beijing Normal University*, 2004, **40**(1): 48~51  
张瑞萍,陈晓波,康洞国. 双频上转换三维立体显示实时动态模拟[J]. *北京师范大学学报*, 2004, **40**(1): 48~51
- Li Chenxia, Kang Juan, Zheng Fei *et al.*. Upconversion luminescence of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped oxyfluoride silicate glass ceramics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1184~1189  
李晨霞,康娟,郑飞等.  $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺的氧氟硅酸盐微晶玻璃上转换发光[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1184~1189
- Gao Xubo, Dong Xiangting, Fan Lijia *et al.*. Fabrication and characterization of  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  nanofibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1517~1522  
高续波,董相廷,范立佳等.  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  发光纳米纤维的制备与表征[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1517~1522
- Liu Qibin, Qu Wei. Effect of doping on microstructure and properties of  $\text{BaTiO}_3$  ceramics sintered by wide-band laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2409~2412  
刘其斌,曲微. 掺杂对宽带激光烧结  $\text{BaTiO}_3$  陶瓷组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2409~2412
- Yu Chunlei, He Dongbing, Wang Guonian *et al.*. The effects of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  doping concentration on  $2\ \mu\text{m}$  wavelength luminescence in germanium glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3143~3147  
于春雷,何冬兵,汪国年等. 碲酸盐玻璃中  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  掺杂浓度对  $2\ \mu\text{m}$  发光的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3143~3147
- Su Xingyu, Ju Haidong, Ye Renguang *et al.*. Luminescence properties of  $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2:\text{Eu}^{2+}$  phosphors codoped with  $\text{Dy}^{3+}$  or  $\text{Gd}^{3+}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 844~848  
苏醒宇,鞠海东,叶仁广等.  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  ( $\text{Gd}^{3+}$ ) 共掺杂  $\text{CaSi}_2\text{N}_2\text{O}_2$  荧光粉发光性质[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 844~848
- J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poignant. Energy transfer in  $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  doped fluorozirconate fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(12): 1012~1014