

## Dy<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>共掺氮化铝薄膜结构与发光特性

罗璇 孟河辰 王晓丹 陈子航 曾雄辉 高晓冬 郑树楠 毛红敏

### Structure and cathodoluminescence properties of Dy<sup>3+</sup> and Tb<sup>3+</sup> doped AlN films

LUO Xuan, MENG He-chen, WANG Xiao-dan, CHEN Zi-hang, ZENG Xiong-hui, GAO Xiao-dong, ZHENG Shu-nan, MAO Hong-min

引用本文:

罗璇, 孟河辰, 王晓丹, 陈子航, 曾雄辉, 高晓冬, 郑树楠, 毛红敏. Dy<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>共掺氮化铝薄膜结构与发光特性[J]. 中国光学, 2024, 17(4): 733–741. doi: 10.37188/CO.2023–0219

LUO Xuan, MENG He-chen, WANG Xiao-dan, CHEN Zi-hang, ZENG Xiong-hui, GAO Xiao-dong, ZHENG Shu-nan, MAO Hong-min. Structure and cathodoluminescence properties of Dy<sup>3+</sup> and Tb<sup>3+</sup> doped AlN films[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 733-741. doi: 10.37188/CO.2023-0219

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0219>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 金属离子Bi<sup>3+</sup>掺杂Lu<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub>: x%Ho<sup>3+</sup>荧光粉的发光性能

Luminescence properties of Bi<sup>3+</sup> doped Lu<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub>: x%Ho<sup>3+</sup> metal ion phosphors

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 528 <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0222>

#### Ag@SiO<sub>2</sub>纳米核壳结构对铒碲发光玻璃的发光增强机制

Luminescence enhancement mechanism of Er<sup>3+</sup> ions by Ag@SiO<sub>2</sub> core-shell nanostructure in tellurite glass

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 224 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0142>

#### Ag@SiO<sub>2</sub>核壳纳米颗粒对Eu-PMMA薄膜的发光增强效应

Luminescence enhancement effect of Ag@SiO<sub>2</sub> coreshell nanoparticles on Eu-PMMA films

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1341 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0013>

#### 电致发光的完全悬空超薄硅衬底氮化镓基蓝光LED器件的制备与表征

Fabrication and characterization of an LED based on a GaN-on-silicon platform with an ultra-thin freestanding membrane in the blue range

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 153 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0148>

#### 钕敏化多层壳纳米结构的增强型染料敏化上转换发光

Enhanced dye-sensitized up-conversion luminescence of neodymium-sensitized multi-shell nanostructures

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 418 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0097>

#### 紫外偏振敏感的CsPbBr<sub>3</sub>纳米薄膜的可见光发射

Visible light emission of ultraviolet polarization sensitive CsPbBr<sub>3</sub> nano-films

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 202 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0152>

文章编号 2097-1842(2024)04-0733-09

## Dy<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> 共掺氮化铝薄膜结构与发光特性

罗璇<sup>1</sup>, 孟河辰<sup>1</sup>, 王晓丹<sup>1\*</sup>, 陈子航<sup>1</sup>, 曾雄辉<sup>2\*</sup>, 高晓冬<sup>2</sup>, 郑树楠<sup>2</sup>, 毛红敏<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏苏州 215009;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏苏州 215123)

**摘要:**通过离子注入方法,首次将 Dy<sup>3+</sup>和 Tb<sup>3+</sup>共掺入氮化铝 (AlN) 薄膜,并研究了其晶体结构、阴极荧光和能量传递机制。拉曼光谱 (Raman) 和 X 射线衍射 (XRD) 结果显示,在 Tb<sup>3+</sup>剂量一定的情况下,Dy<sup>3+</sup>的注入会导致晶格内部压应力增大,随着 Dy<sup>3+</sup>的持续注入,一部分点缺陷发生复合,内部部分压应力会得到释放。阴极荧光光谱 (CL) 显示,高剂量 Tb<sup>3+</sup>注入下,随着 Dy<sup>3+</sup>剂量的增加,Tb<sup>3+</sup>的发射强度与 Dy<sup>3+</sup>的发射强度呈现出不同的变化趋势。进一步分析表明可能存在 Tb<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>至 Dy<sup>3+</sup>的<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>→<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>的共振能量传递。通过研究发现在不同 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>注入剂量下,样品的发光颜色在黄绿色与橙黄色之间转变,色温在 4042~5119K 范围变化。由上述研究结果可知,通过改变 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>共注入的剂量比可以有效调控材料的发光色坐标与色温。

**关键词:**镱离子;铽离子;氮化铝;发光特性;能量传递

中图分类号:TN304.3

文献标志码:A

doi: 10.37188/CO.2023-0219

## Structure and cathodoluminescence properties of Dy<sup>3+</sup> and Tb<sup>3+</sup> doped AlN films

LUO Xuan<sup>1</sup>, MENG He-chen<sup>1</sup>, WANG Xiao-dan<sup>1\*</sup>, CHEN Zi-hang<sup>1</sup>, ZENG Xiong-hui<sup>2\*</sup>,

GAO Xiao-dong<sup>2</sup>, ZHENG Shu-nan<sup>2</sup>, MAO Hong-min<sup>1</sup>

(1. School of Physical Science and Technology, Suzhou University of

Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of

Sciences, Suzhou 215123, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiaodanwang@mail.usts.edu.cn; xhzeng2007@sinano.ac.cn

**Abstract:** For the first time, Tb<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup> co-doped AlN films were prepared using ion implantation, and their crystal structure, cathodoluminescence properties and energy transfer mechanism were investigated. Ra-

收稿日期:2023-12-07; 修订日期:2023-12-26

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目 (No.61974158, No.61306004); 江苏省自然科学基金 (No. BK20191456, No. BK20221263); 江苏省“十四五”光学工程重点学科项目资助 (No. 2021135); 江苏省研究生科研创新计划项目资助 (No. KYCX22\_3266)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61974158, No.61306004); Natural Science Fund of Jiangsu Province (No. BK20191456, No. BK20221263); Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX22\_3266)

man scattering and X-ray diffraction results indicate that ion implantation of  $\text{Dy}^{3+}$  has caused increased compressive stress within the internal lattice when the dosage of  $\text{Tb}^{3+}$  remains constant. Continuous implantation led to the recombination of some point defects, resulting in a partial release of internal compressive stress. Cathodoluminescence spectra demonstrated that with high-dose  $\text{Tb}^{3+}$  implantation, the emission intensities of  $\text{Tb}^{3+}$  and  $\text{Dy}^{3+}$  exhibited different trends with increasing  $\text{Dy}^{3+}$  dosage. We propose the existence of a resonance energy transfer from  $\text{Tb}^{3+}$  ions  $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_6$  to  $\text{Dy}^{3+}$  ions  $^6\text{H}_{15/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$  in AlN films. Finally, we observe that under different implantation dose of  $\text{Dy}^{3+}$  ions to  $\text{Tb}^{3+}$  ions, the emission color of the sample shifts between yellow-green and orange-yellow, with color temperatures ranging from 4042 to 5119K. Adjusting the dose ratio of  $\text{Dy}^{3+}$  to  $\text{Tb}^{3+}$  enables effective control of chromaticity coordinates and color temperatures.

**Key words:** dysprosium ions; terbium ions; aluminum nitride; luminescent properties; energy transfer

## 1 引言

近年来,具有较宽禁带宽度的氮化铝 (AlN) 薄膜材料受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。AlN 作为超宽禁带半导体材料,其具有禁带宽度大 (6.2eV), 热导率高、击穿场强大的优点<sup>[4-5]</sup>。AlN 作为稀土发光元素的基质材料,能够有效抑制温度猝灭,提高发射效率。由于 5s 和 5p 壳层完全充满,三价稀土离子的 4f 层电子受到最外层屏蔽作用,发出的光色纯度高且稳定;且不同种类的稀土离子具有独特的能级分布,能够吸收和发射不同波长的光,通过不同稀土离子的合理选择和组合,可实现波长可调<sup>[6]</sup>。研究发现改变  $\text{Tb}^{3+}$  与  $\text{Dy}^{3+}$  共注入的剂量比可以有效调控材料的发光颜色与色温,对制备发光可调光电子材料和器件有一定的指导意义。

在不同的掺杂剂中,镧系稀土元素中的三价  $\text{Dy}^{3+}$  在  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$  (582 nm) 跃迁处产生强烈的黄光<sup>[1]</sup>,现阶段主要应用于激光器<sup>[7-9]</sup>中;  $\text{Tb}^{3+}$  的主要发光峰位于 383 nm、542 nm 处,表现为蓝光和绿光发射<sup>[10]</sup>。目前,已有多个文献报道 AlN 掺杂  $\text{Tb}^{3+}$  材料,并对其物理和发光性能进行了研究。2013 年, Benz 等人<sup>[11]</sup>为了抑制 Tb-Tb 相互作用中的交叉驰豫过程,采用了增加激发态离子和基态离子间的距离的方式,使得单掺 Tb 离子的样品实现了绿光和蓝光之间的发射。2015 年, Guerra 等人<sup>[12]</sup>研究了利用 PL 表征非晶氮化铝 (a-AlN) 掺杂  $\text{Tb}^{3+}$  的能量传递机制,认为 e-h 对以缺陷或带尾态形式复合,未将能量传递给  $\text{Tb}^{3+}$ 。此外,对于 AlN 掺杂  $\text{Dy}^{3+}$  材料也有相关研究。例

如,2016 年, Wang 等人<sup>[13]</sup>通过固相法制备了 AlN 掺杂  $\text{Dy}^{3+}$  荧光粉,表现出了  $\text{Dy}^{3+}$  明显的蓝光与黄光发射。2020 年,马海等人<sup>[14]</sup>通过离子注入法将  $\text{Dy}^{3+}$  单掺以及  $\text{Dy}^{3+}$  与  $\text{Eu}^{3+}$  共掺入 AlN 薄膜材料中,实现了绿色到橙黄色发光以及色温的有效调控。对于  $\text{Tb}^{3+}$  和  $\text{Dy}^{3+}$  共掺材料,  $\text{Dy}^{3+}$  通常作为敏化剂掺入基质中,如氟化物晶体<sup>[15]</sup>、磷酸盐玻璃<sup>[16]</sup>、碲锗钡酸盐玻璃<sup>[17]</sup>等,可增强激活剂  $\text{Tb}^{3+}$  的发射。然而目前还未有  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  共掺入 AlN 薄膜材料的结构与光学性质的研究报道。

为了深入研究 AlN:  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  的结构与发光性能,本工作将  $\text{Dy}^{3+}$  与  $\text{Tb}^{3+}$  通过离子注入法共掺入 AlN 薄膜中,并通过退火处理激活稀土离子。利用 X 射线衍射谱 (X-Ray Diffraction, XRD) 和拉曼散射 (Raman scattering) 表征样品中的应力变化,利用阴极荧光 (Cathodoluminescence, CL) 表征材料的发光特性,最后探讨了  $\text{Dy}^{3+}$  与  $\text{Tb}^{3+}$  之间的能量传递机制。

## 2 实验方法

本研究使用了金属有机化学气相沉积法 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD), 在蓝宝石 (0001) 衬底制备厚度为 5  $\mu\text{m}$  的 AlN 薄膜,并通过离子注入法注入了不同剂量的  $\text{Dy}^{3+}$  和  $\text{Tb}^{3+}$  (见表 1), 注入能量为 200 keV。为减小沟道效应,离子注入束相对于 AlN 薄膜 (0002) 面法线倾斜约 10°。所有注入后的样品均在氨气气氛中常压 1040 °C 下进行 2 h 退火。利用高分辨 X 射线衍射 (HRXRD) 和拉曼光谱表征样品退

火后的应力变化。通过安装在 Quanta400FEG 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 上的 MonoCL3+ 阴极发光光谱仪测量发光性能。

表 1 AlN: Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup> 样品中离子注入剂量

Tab. 1 Ion implantation dose in AlN: Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup> samples

Sample	Tb <sup>3+</sup> (at/cm <sup>2</sup> )	Dy <sup>3+</sup> (at/cm <sup>2</sup> )
S1	5×10 <sup>14</sup>	1×10 <sup>14</sup>
S2	5×10 <sup>14</sup>	5×10 <sup>14</sup>
S3	5×10 <sup>14</sup>	1×10 <sup>15</sup>
S4	1×10 <sup>15</sup>	1×10 <sup>14</sup>
S5	1×10 <sup>15</sup>	5×10 <sup>14</sup>
S6	1×10 <sup>15</sup>	1×10 <sup>15</sup>

### 3 结果与讨论

#### 3.1 拉曼与 X 射线衍射表征

图 1(a) 与 1(b) (彩图见期刊电子版) 为不同剂量下 Tb<sup>3+</sup> 和 Dy<sup>3+</sup> 共注入 AlN 时, 样品 S1~S6 的拉曼谱。对于所有样品, 光谱显示在 247.2 cm<sup>-1</sup>、

661.3 cm<sup>-1</sup> 和 892.0 cm<sup>-1</sup> 处分别对应 E<sub>2</sub>(low)、E<sub>2</sub>(high) 和 A<sub>1</sub>(low), 为典型的纤锌矿 AlN 声子模<sup>[18]</sup>。另外, 417.9 cm<sup>-1</sup>、751.6 cm<sup>-1</sup> 处与蓝宝石衬底有关。E<sub>2</sub>(high) 通常用来表示 AlN 中的应力变化。本文 S1~S6 样品均为 MOCVD 法生长的 AlN 薄膜, 如图 1(a) 所示, S1 的样品 E<sub>2</sub>(high) 峰位值 (660.9051 cm<sup>-1</sup>) 大于自支撑 AlN 样品 E<sub>2</sub>(high) 峰位值 (659.9 cm<sup>-1</sup>), 表明离子注入引入了压应力<sup>[19-20]</sup>。图 1(a) 表明对于 S1 至 S3 样品, 随着 Dy<sup>3+</sup> 剂量的增加, E<sub>2</sub>(high) 声子模蓝移, 说明注入量的增加使得晶格内部的压应力增大。图 1(b) 表明, 对于样品 S4 至 S6, 随着 Dy<sup>3+</sup> 剂量的增加, 由于总注入剂量较高, 在较高的注入剂量下晶格内部压应力趋于饱和, E<sub>2</sub>(high) 峰位几乎没有变化。S3 样品与 S6 样品结果对比可知, S6 样品 E<sub>2</sub>(high) 峰位值 (661.3958 cm<sup>-1</sup>) 小于 S3 样品 E<sub>2</sub>(high) 峰位值 (661.8866 cm<sup>-1</sup>)。原因为更高 Tb<sup>3+</sup> 注入剂量下, 离子注入使得层内会形成堆垛层错 (stacking faults, SFs) 或团簇<sup>[21]</sup>, 而注入剂量的增加使得堆垛网络更加密集, 为空位和间隙原子向表面迁移提供了通道, 并形成可以松弛应力的扩展缺陷, 内部压应力减小<sup>[22-23]</sup>。

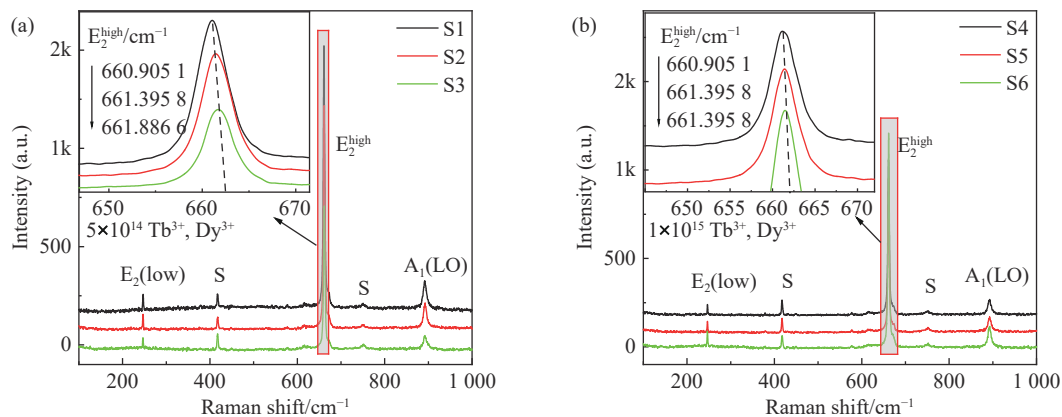


图 1 (a) 样品 S1~S3 及 (b) S4~S6 的 Raman 光谱。插图给出了 E<sub>2</sub>(high) 随着不同剂量 Dy<sup>3+</sup> 注入下的变化趋势

Fig. 1 Raman spectra of (a) S1, S2, S3 samples and (b) S4, S5, S6 samples. The inset shows the trend of E<sub>2</sub>(high) changes with different doses of Dy<sup>3+</sup>

图 2(a) 与 2(b) (彩图见期刊电子版) 为 Tb<sup>3+</sup> 与 Dy<sup>3+</sup> 共掺 AlN 薄膜退火后的联动扫描曲线。可见, 与未掺杂 AlN 的 Bragg 峰相比 (2θ=36.02°), 所有样品 (0002) 峰位均向低角度偏移, 说明离子注入引入了压应力<sup>[24-25]</sup>。以样品 S1, S2, S3 为例, 保持 Tb<sup>3+</sup> 剂量为 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 不变, Dy<sup>3+</sup> 剂量从

1×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 增加到 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup>, (0002) 峰位继续向低角度偏移, 晶面间距增大, 晶格膨胀, 内部压应力增强。Dy<sup>3+</sup> 剂量从 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 增加到 1×10<sup>15</sup> at/cm<sup>2</sup> 时, 峰位逐渐往高角度偏移, 内部压应力得到部分释放, 压应力减小, 与 Raman 结果一致。样品 S4, S5, S6 也表现出类似的变化趋势。

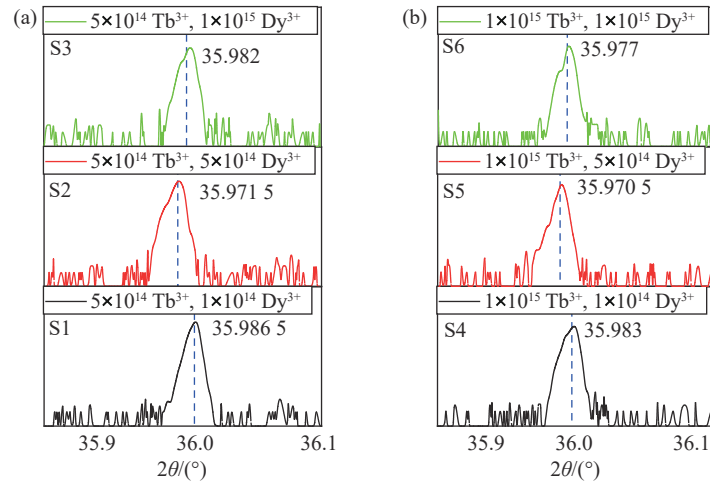


图 2  $Tb^{3+}$ 和 $Dy^{3+}$ 注入 AlN 薄膜 (a) S1~S3 及 (b) S4~S6 X 射线衍射图, 虚线标出了 Bragg 峰位置变化

Fig. 2 X-ray diffractograms of  $Tb^{3+}$  and  $Dy^{3+}$  implanted AlN films. (a) S1-S3 samples; (b) S4-S6 samples. The dashed line indicates the change in Bragg peak position

### 3.2 阴极荧光光谱分析

图 3(a), 3(b) (彩图见期刊电子版) 分别为  $Tb^{3+}$

与  $Dy^{3+}$  共掺 AlN 薄膜的室温 CL 光谱。

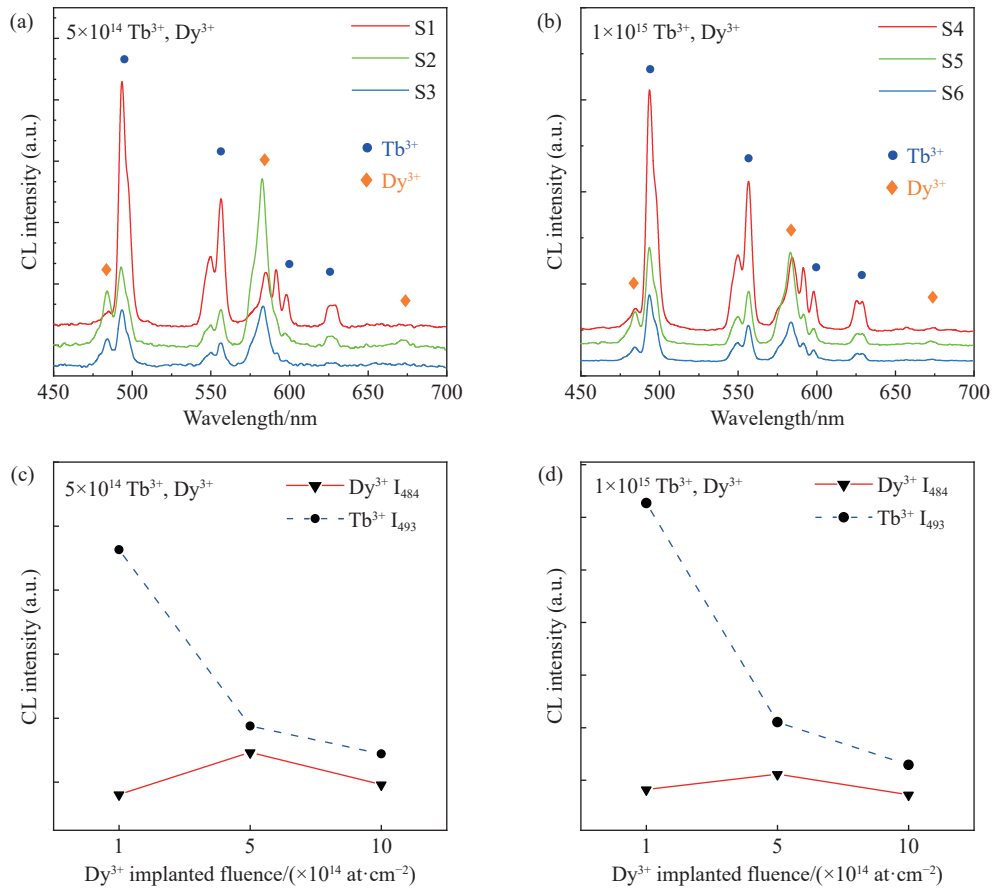


图 3 不同剂量下,  $Tb^{3+}$ 与 $Dy^{3+}$ 注入 AlN 的 CL 光谱图。 (a) S1~S3 样品; (b) S4~S6 样品。 (c), (d)  $Tb^{3+}$  发光峰 ( $I_{493}$ ) 和  $Dy^{3+}$  发光峰 ( $I_{484}$ ) 积分强度变化趋势

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) spectra of AlN with different dosages of  $Tb^{3+}$  and  $Dy^{3+}$  injected. (a) S1-S3 samples; (b) S4-S6 samples. (c), (d) The variation trend of integrated intensities of  $Tb^{3+}$  emission peak ( $I_{493}$ ) and  $Dy^{3+}$  emission peak ( $I_{484}$ )

从图3(a)与3(b)中可以看出, Tb<sup>3+</sup>的发光峰位于493 nm、556 nm、591 nm、626 nm, 分别对应 Tb<sup>3+</sup>的<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>、<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>5</sub>、<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub>、<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>3</sub><sup>[26-29]</sup>。Dy<sup>3+</sup>的发光峰位于484 nm、582 nm、672 nm, 分别对应 Dy<sup>3+</sup>的<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>、<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub>、<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>6</sup>H<sub>11/2</sub>跃迁<sup>[16, 30-31]</sup>。Dy<sup>3+</sup>最强峰位于582 nm处, 属于超灵敏跃迁<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub>, 其发射强度随着晶体场环境变化较为明显<sup>[13]</sup>。Tb<sup>3+</sup>位于493 nm的禁戒电偶极跃迁<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>占主导地位, 说明 Tb<sup>3+</sup>处于非反演对称格位。分别用493 nm和484 nm处发光峰的强度来表示 Tb 和 Dy 的发光变化趋势。如图3(c), 3(d)所示, 当 Dy<sup>3+</sup>剂量从 1×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 增加到 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 时, Tb<sup>3+</sup>强度迅速减弱, 而 Dy<sup>3+</sup>相关峰强度增加; 继续增大 Dy<sup>3+</sup>剂量, Dy<sup>3+</sup>与 Tb<sup>3+</sup>发光峰强度均下降。

为了进一步分析 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>间的能量传递方式, 图4(彩图见期刊电子版)给出了 AlN: Dy<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>的能级跃迁图。在 高能电子束的激发下, Tb<sup>3+</sup>发光中心被激发, Tb<sup>3+</sup>吸收能量从<sup>7</sup>F<sub>6</sub>基态能级跃迁到较高的<sup>5</sup>D<sub>3</sub>激发态能级, 能量通过无辐射弛豫(non-radiative relaxation NR)的方式从较高的<sup>5</sup>D<sub>3</sub>激发态能级跃迁至较低<sup>5</sup>D<sub>4</sub>激发态能级, 然后辐射弛豫回<sup>7</sup>F<sub>6</sub>、<sup>7</sup>F<sub>5</sub>、<sup>7</sup>F<sub>4</sub>、<sup>7</sup>F<sub>3</sub>态, 分别对应图4中493、556、591、626 nm的辐射跃迁<sup>[32]</sup>。Dy<sup>3+</sup>吸收能量从<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>基态跃迁至<sup>4</sup>F<sub>15/2</sub>能级, 并弛豫回较低激发态<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>能级, 通过辐射弛豫回<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>、<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub>、<sup>6</sup>H<sub>11/2</sub>态, 分别对应图4中的484、582、672 nm辐射跃迁。由于 Dy<sup>3+</sup>(<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>→<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>)能级差为 2.562 eV, Tb<sup>3+</sup>(<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>)能级差为 2.515 eV, 因此, Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>可能会发生近共振能量转移(Near Resonance Energy Transfer NRET)。上述能量传递机制与 Dy<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>共掺锌铅氟硼磷酸盐玻璃体系报道类似<sup>[33]</sup>, 可能实现 Tb<sup>3+</sup>向 Dy<sup>3+</sup>的能量传递: <sup>5</sup>D<sub>4</sub>[Tb<sup>3+</sup>] + <sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>[Dy<sup>3+</sup>]→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>[Tb<sup>3+</sup>] + <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>[Dy<sup>3+</sup>]。因此随着 Dy<sup>3+</sup>注入剂量的增加, Tb<sup>3+</sup>的发光强度持续降低。当 Dy<sup>3+</sup>的注入剂量从 1×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 增加到 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 时, Dy<sup>3+</sup>的发光强度增加; 当 Dy<sup>3+</sup>的注入剂量从 5×10<sup>14</sup> at/cm<sup>2</sup> 增加到 1×10<sup>15</sup> at/cm<sup>2</sup> 时, Dy<sup>3+</sup>的发光强度降低, 可能与浓度猝灭有关。

敏化剂和激活剂间的非辐射能量转移机制可以用交换相互作用和电多极相互作用来解释<sup>[34]</sup>。为了进一步分析 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>间的能量转移机制, 计算了相邻 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>间的平均距离的临界值

$R_c$ , 并估算了掺杂浓度  $N_p$ , 如下式所示<sup>[35]</sup>:

$$N_p = \frac{\phi_i}{\Delta R_p(2\pi)^{1/2}} \approx \frac{0.4\phi_i}{\Delta R_p}, \quad (1)$$

$$C_p = \frac{N_p}{N_p + N_t}, \quad (2)$$

$$R_c = 2 \left( \frac{3V}{4\pi C_p N} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

式(1)中  $\phi_i$  为总离子注入剂量 ( $\sim$  at/cm<sup>2</sup>),  $N_p$  为注入浓度 ( $\sim$  at/cm<sup>3</sup>),  $\Delta R_p$  为注入离子散布深度范围 (cm), 约为 11.8 nm (用 SRIM 软件模拟所得)。式(2)中  $N_t$  为 AlN 中的 Al 原子浓度, 约为 4.786×10<sup>22</sup> at/cm<sup>3</sup>。式(3)中,  $V$  为原胞体积,  $C_p$  为 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>总浓度 ( $\sim$ %),  $N$  为原胞中的阳离子数 (取  $V=4.1784 \times 10^{-22}$  nm<sup>3</sup>,  $N=2$ )。估算得到的  $R_c$  值如表2所示。

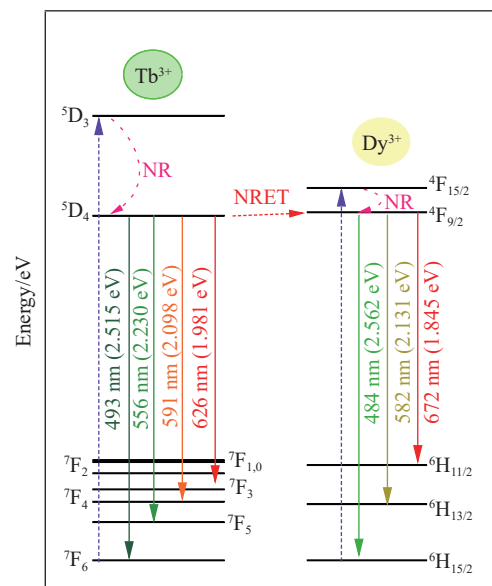


图4 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>间能级跃迁示意图

Fig. 4 Energy transfer mechanism in the Tb<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup>

表2 平均注入剂量  $C_p$ , 临界距离  $R_c$  计算结果

Tab. 2 Calculation results of average injection dose  $C_p$  and critical distance  $R_c$

Sample	Tb <sup>3+</sup> / (at·cm <sup>-2</sup> )	Dy <sup>3+</sup> / (at·cm <sup>-2</sup> )	$C_p$ / (% atom fraction)	$R_c$ (nm)
S1	5×10 <sup>14</sup>	1×10 <sup>14</sup>	0.4219	2.11448
S2	5×10 <sup>14</sup>	5×10 <sup>14</sup>	0.7012	1.78531
S3	5×10 <sup>14</sup>	1×10 <sup>15</sup>	1.0480	1.56149
S4	1×10 <sup>15</sup>	1×10 <sup>14</sup>	0.7708	1.72986
S5	1×10 <sup>15</sup>	5×10 <sup>14</sup>	1.0480	1.56149
S6	1×10 <sup>15</sup>	1×10 <sup>15</sup>	1.3927	1.42028

由表 2 可见最小的临界距离约为 1.42028 nm, 已远远大于相互作用的临界距离(0.5~0.8 nm)<sup>[36]</sup>, 这说明 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>间的共振能量传递机制可能是电多极-电多极相互作用<sup>[37]</sup>。

根据 Dexter 的电多极相互作用能量转移公式和 Reisfeld 近似<sup>[38-39]</sup>, 可以进一步分析电多极子相互作用, 关系式为:

$$\frac{\eta_0}{\eta} \approx \frac{I_0}{I} \propto C_p^{n/3}, \quad (4)$$

其中  $\eta_0$  和  $\eta$  分别为 Tb<sup>3+</sup>未掺杂 Dy<sup>3+</sup>和掺杂 Dy<sup>3+</sup>时的发光量子效率,  $n$  为多极相互作用参数, 当

$n = 6, 8$  或  $10$  时, 分别对应于电偶极子-电偶极子、电偶极子-电四极子以及电四极子-电四极子相互作用<sup>[33,40]</sup>。其中  $I_0$  指的是掺杂 Dy<sup>3+</sup>之前敏化剂 Tb<sup>3+</sup>的本征发光强度,  $I$  指的是 Dy<sup>3+</sup>掺杂后的敏化剂 Tb<sup>3+</sup>的发光强度,  $C_p$  为 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>总浓度。

Tb<sup>3+</sup>为  $1 \times 10^{15}$  at/cm<sup>2</sup> 时, 离子间距更近, 相互作用效果更显著<sup>[23]</sup>。为了更好地分析 Dy<sup>3+</sup>与 Tb<sup>3+</sup>间的相互作用, 取 Tb<sup>3+</sup>位于 493 nm 处最强峰代表 Tb<sup>3+</sup>的发射强度, 并进行了线性拟合。结果如图 5 所示, 可见, 当  $n=6$  时,  $R^2=0.9751$ , 线性拟合度最好。因此电偶极子-电偶极子相互作用可能是 Tb<sup>3+</sup>到 Dy<sup>3+</sup>能量传递机制。

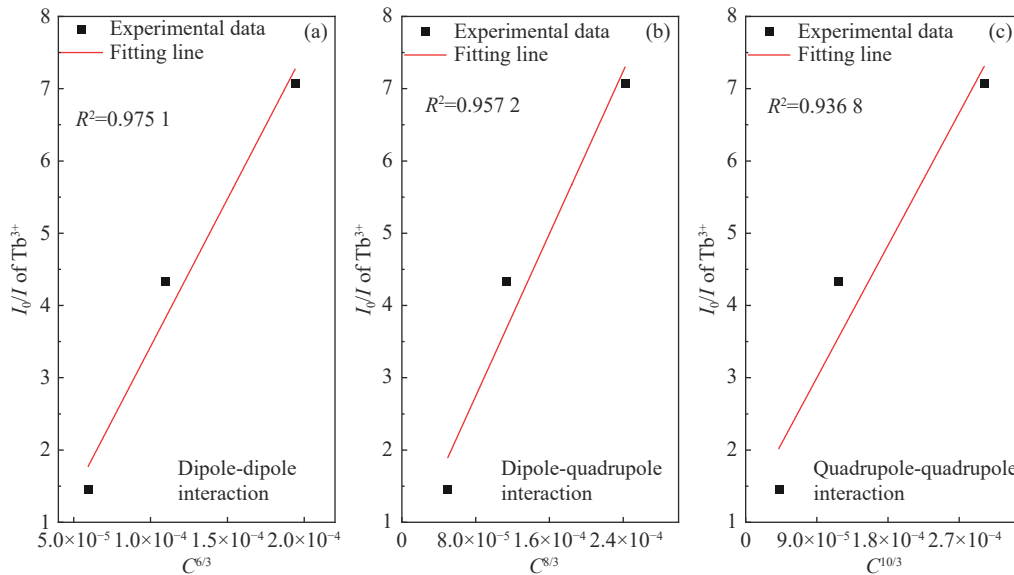


图 5  $I_0/I$  与  $C_p^{n/3}$  ( $n = 6, 8$  和  $10$ ) 的线性拟合, 当  $n = 6$  时观察到最佳拟合结果

Fig. 5 Linear fitting between  $I_0/I$  and  $C_p^{n/3}$  ( $n = 6, 8, 10$ ), with the best fitting result observed when  $n = 6$

利用 McCamy 近似公式<sup>[41]</sup> 计算色温:

$$CCT = -449n^3 + 3525n^2 - 6823n + 5520.33, \quad (5)$$

其中,  $n=(x-x_e)/(y-y_e)$ ,  $n$  为倾斜线的倒数,  $(x_e, y_e)$  为收敛中心,  $x_e=0.332, y_e=0.186$ 。计算结果如表 3 所示。

表 3 不同剂量的 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>注入样品时的色度坐标与色温

Tab. 3 Luminescent chromaticity coordinates and color temperature of AlN: Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup> with different doses of Tb<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup> ions

Sample	Tb <sup>3+</sup> /(at·cm <sup>-2</sup> )	Dy <sup>3+</sup> /(at·cm <sup>-2</sup> )	CIE co-ordinates		CCT/K
			$x$	$y$	
S1	$5 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{14}$	0.3446	0.3939	5119.6625
S2	$5 \times 10^{14}$	$5 \times 10^{14}$	0.3775	0.3701	4042.5739
S3	$5 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{15}$	0.3506	0.3566	4817.7583
S4	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{14}$	0.3560	0.4158	4845.6823
S5	$1 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{14}$	0.3685	0.3714	4310.2723
S6	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{15}$	0.3422	0.3506	5110.9489

图6(彩图见期刊电子版)所示,在不同 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>注入剂量下,样品的发光颜色在黄绿色与橙黄色之间转变,色温在 4042~5119 K 间变化。

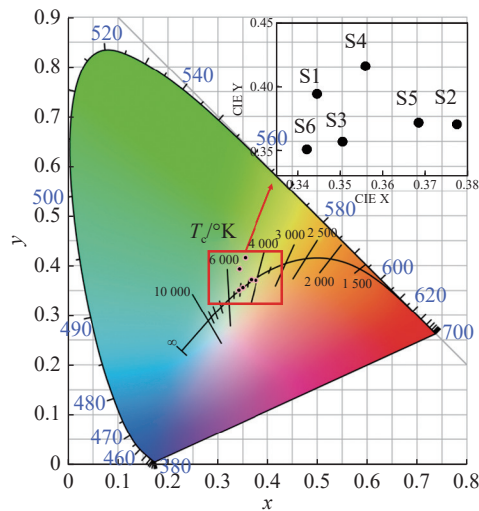


图6 AlN: Tb<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>样品发光色度坐标图

Fig. 6 The CIE chromaticity diagram of the Tb<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup> co-doped AlN films

由于 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>的发光强度和离子浓度密切相关,故通过改变离子注入的剂量,可以对离子的浓度进行调控,从而改变 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>的发光强

度。综上所述,可以通过改变剂量比例能有效调控样品的发光颜色与色温。

## 4 结 论

本文采用离子注入法制备了 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>共掺 AlN 薄膜,并研究了其注入剂量对内部应力和发光特性的影响。拉曼和 XRD 结果显示,离子注入导致晶格内部压应力增大,而持续注入后,一部分点缺陷发生复合,内部压应力得到释放。阴极荧光光谱显示, Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>的特征峰分别位于 493 nm(<sup>5</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>6</sub>)和 582 nm(<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub>)。 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>可能存在能量传递为<sup>5</sup>D<sub>4</sub>[Tb<sup>3+</sup>]+<sup>6</sup>H<sub>15/2</sub>[Dy<sup>3+</sup>] $\rightarrow$ <sup>7</sup>F<sub>6</sub>[Tb<sup>3+</sup>]+<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>[Dy<sup>3+</sup>]。经计算, Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>之间的作用方式是电偶极子-电偶极子相互作用。通过计算色度坐标与色温发现,在不同 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>注入剂量下,样品的发光颜色在黄绿色与橙黄色之间转变,色温在 4042~5119 K 间变化。因此,改变 Tb<sup>3+</sup>与 Dy<sup>3+</sup>共注入的剂量比可以有效调控材料的发光颜色与色温,对制备发光可调光电子材料和器件有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 唐连波,付大友,陈琦,等. 碳量子点增强气液相化学发光检测二氧化碳[J]. *应用化学*, 2022, 39(8): 1294-1302.  
TANG L B, FU D Y, CHEN Q, *et al.*. Enhanced gas-liquid chemiluminescence by carbon dots for determination of carbon dioxide[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(8): 1294-1302.
- [2] CARDOSO J P S, CORREIA M R, VERMEERSCH R, *et al.*. Europium-implanted AlN nanowires for red light-emitting diodes[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(1): 972-984.
- [3] 丁寒. 基于 NaYF<sub>4</sub>: Yb, Er 上转换发光纳米材料的掌印和足迹增强显现[J]. *分析化学*, 2023, 51(11): 1774-1782.  
DING H. Enhanced Development of Palmprints and Footprints Based on NaYF<sub>4</sub>: Yb, Er Upconversion Luminescent Nanomaterials[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(11): 1774-1782.
- [4] 郑天程,李月,刘钰铃,等. Cs<sub>2</sub>ZnCl<sub>4</sub>:Ce<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>的合成及其多模发光性能[J]. *应用化学*, 2023, 40(12): 1613-1622.  
ZHENG Tian-Cheng, LI Yue, LIU Yu-Ling, *et al.*. Synthesis and Multi-Mode Luminescence Properties of Cs<sub>2</sub>ZnCl<sub>4</sub>:Ce<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(12): 1613-1622.
- [5] LI D B, JIANG K, SUN X J, *et al.*. AlGaN photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(1): 43-110.
- [6] 王俊荣,孙倩倩,朱国庆,等. 稀土掺杂正交发光纳米晶:从基础到前沿应用[J]. *应用化学*, 2023, 40(11): 1475 - 1493.  
WANG Jun-Rong, SUN Qian-Qian, ZHU Guo-Qing, *et al.*. Rare-Earth-Doped Orthogonal Luminescent Nanocrystals: From Fundamentals to Frontier Applications[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(11): 1475 - 1493.
- [7] 王晓莹,涂昊宇,李琪,等. 基于石墨烯掺杂的 CuMOF/Cu(OH)<sub>2</sub> 纳米棒阵列自支撑电极的制备及用于葡萄糖检测[J]. *分析化学*, 2023, 51(9): 1441-1451.  
WANG X Y, TU H Y, LI Q, *et al.*. Efficient Electrochemical Sensor for Glucose Detection Based on Self-Supporting Electrode of Graphene Doped CuMOF/Cu(OH)<sub>2</sub> Nanorod Arrays[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 51(9): 1441-1451.



- [8] DING SH J, LI H Y, ZHANG Q L, *et al.*. The investigations of Dy: YAG and Dy, Tb: YAG as potentially efficient GaN blue LD pumped solid state yellow laser crystals[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 237: 118174.
- [9] 胡萍, 刘晓萌, 田颖, 等. 直接泵浦中红外 Dy: PbGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> 激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2022, 43(12): 1905-1914.  
HU P, LIU X M, TIAN Y, *et al.*. Research progress of directly pumped mid-infrared Dy: PbGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(12): 1905-1914. (in Chinese).
- [10] 龚宏波, 胡伟晔, 黄秋婷, 等. 基于表面增强拉曼光谱技术对负电性分子的高灵敏定性分析[J]. *分析化学*, 2023, 51(7): 1213-1221.  
GONG H B, HU W Y, HUANG Q T, *et al.*. Highly Sensitive Qualitative Analysis of Electronegative Molecules Based on Surface-enhanced Raman Spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 51(7): 1213-1221.
- [11] BENZ F, STRUNK H P, SCHAAB J, *et al.*. Tuning the emission colour by manipulating terbium-terbium interactions: terbium doped aluminum nitride as an example system[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(7): 073518.
- [12] GUERRA J A, MONTAÑEZ L, WINNACKER A, *et al.*. Thermal activation and temperature dependent PL and CL of Tb doped amorphous AlN and SiN thin films[J]. *Physica Status Solidi C*, 2015, 12(8): 1183-1186.
- [13] WANG W, WANG X B, ZHANG P, *et al.*. Near-white emission observed in Dy doped AlN[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(60): 54801-54805.
- [14] 马海, 王晓丹, 李祥, 等. Eu<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>共注入 AlN 薄膜结构和发光特性研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(8): 0831001.  
MA H, WANG X D, LI X, *et al.*. Structure and luminescence properties of Eu<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup> Co-implanted AlN films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0831001. (in Chinese).
- [15] BOLOGNESI G, PARISI D, CALONICO D, *et al.*. Yellow laser performance of Dy<sup>3+</sup> in co-doped Dy, Tb: LiLuF<sub>4</sub>[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6628-6631.
- [16] SUN Y, YU F, LIAO M S, *et al.*. Visible emission and energy transfer in Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup> co-doped phosphate glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, 103(12): 6847-6859.
- [17] 贾珂, 曾佳汇, 韩甜甜, 等. Dy<sup>3+</sup>单掺、Tb<sup>3+</sup>单掺和 Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup>共掺碲锗酸盐玻璃的发光性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(15): 1516012.  
JIA K, ZENG J H, HAN T T, *et al.*. Luminescent performance study on Dy<sup>3+</sup>-doped, Tb<sup>3+</sup>-doped and Tb<sup>3+</sup>/Dy<sup>3+</sup> codoped TeO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub>-BaO glasses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(15): 1516012. (in Chinese).
- [18] RONG X, WANG X Q, CHEN G, *et al.*. Residual stress in AlN films grown on sapphire substrates by molecular beam epitaxy[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2016, 93: 27-31.
- [19] SUMATHI R R. Bulk AlN single crystal growth on foreign substrate and preparation of free-standing native seeds[J]. *CrystEngComm*, 2013, 15(12): 2232-2240.
- [20] KALLEL T, DAMMAK M, WANG J, *et al.*. Raman characterization and stress analysis of AlN: Er<sup>3+</sup> epilayers grown on sapphire and silicon substrates[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2014, 187: 46-52.
- [21] RUTERANA P, CHAUVAT M P, LORENZ K. Mechanisms of damage formation during rare earth ion implantation in nitride semiconductors[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(11S): 11NH02.
- [22] WEI W W, PENG Y, WANG J B, *et al.*. Temperature dependence of stress and optical properties in AlN films grown by MOCVD[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(3): 698.
- [23] WANG D, WANG X D, MA H, *et al.*. Structure and cathodoluminescence properties of Dy<sup>3+</sup> and Eu<sup>3+</sup> co-doped AlN films[J]. *Optical Materials*, 2022, 128: 112366.
- [24] SARON K M A, HASHIM M R, FARRUKH M A. NH<sub>3</sub>-free growth of GaN nanostructure on n-Si (111) substrate using a conventional thermal evaporation technique[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 349(1): 19-23.
- [25] 李嘉豪, 韩军, 邢艳辉, 等. 不同 Mo 层厚度的 AlN/Mo/Sc<sub>0.2</sub>Al<sub>0.8</sub>N 复合结构上 MOCVD 外延 GaN[J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 1077-1084.  
LI J H, HAN J, XING Y H, *et al.*. GaN grown on sputtered AlN/Mo/Sc<sub>0.2</sub>Al<sub>0.8</sub>N composite structure with different Mo thickness[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(6): 1077-1084. (in Chinese).
- [26] HSOUNA N, BOUZIDI C. White luminescence and energy transfer studies in Tb<sup>3+</sup>-Eu<sup>3+</sup> co-doped phosphate glasses[J]. *Solid State Sciences*, 2022, 134: 107053.
- [27] WANG Q SH, LI J H, ZHANG W, *et al.*. Synthesis, and photoluminescence and magnetic properties of Tb-doped AlN single-crystalline nanobelts[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 236: 118089.
- [28] RODRIGUES J, FIALHO M, MAGALHAES S, *et al.*. Luminescence properties of MOCVD grown Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N layers

- implanted with Tb[J]. *Journal of Luminescence*, 2019, 210: 413-424.
- [29] 白海斌,陈昕,沙雪竹,等. NaGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Tb<sup>3+</sup>荧光粉的温度及浓度依赖发光与荧光动力学温度传感[J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1770-1778.
- BAI H B, CHEN X, SHA X ZH, *et al.*. Temperature- and concentration-dependent luminescence and fluorescence dynamic temperature sensing of NaGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Tb<sup>3+</sup> phosphors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(10): 1770-1778. (in Chinese).
- [30] CAO R P, CHEN C P, CHENG F R, *et al.*. Synthesis and luminescence properties of Eu<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup> co-doped Ca<sub>3</sub>Bi(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> single-phase phosphor[J]. *Journal of Luminescence*, 2023, 257: 119731.
- [31] 方高阳,王燕,游振宇,等. Sr<sub>3</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: Dy<sup>3+</sup>/RE<sup>3+</sup>(RE=Tb, Eu)晶体的生长、发光性质及能量传递[J]. *发光学报*, 2022, 43(11): 1721-1732.
- FANG G Y, WANG Y, YOU ZH Y, *et al.*. Crystal growth, spectral properties and energy transfer mechanisms of Sr<sub>3</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: Dy<sup>3+</sup>/RE<sup>3+</sup>(RE=Tb, Eu) crystals[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(11): 1721-1732. (in Chinese).
- [32] LUO X, WANG X D, MENG H CH, *et al.*. Structure and cathodoluminescence properties in Tb<sup>3+</sup> and Eu<sup>3+</sup> doped AlN films[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2024, 221(4): 2300625.
- [33] VIJAYAKUMAR M, VISWANATHAN K, MARIMUTHU K. Structural and optical studies on Dy<sup>3+</sup>: Tb<sup>3+</sup> co-doped zinc leadfluoro-borophosphate glasses for white light applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 745: 306-318.
- [34] JIAO Y H, WU X L, REN Q, *et al.*. Photoluminescence and energy transfer of a color tunable phosphors: Sr<sub>3</sub>La(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: Ln<sup>3+</sup> (Ln = Dy, Eu, Tb) for warm white light UV-excited WLEDs[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 470-479.
- [35] NASTASI M, MAYER J W. *Ion Implantation and Synthesis of Materials* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [36] SU L M, LIU Y J, LI G H, *et al.*. Multicolor emission leading by energy transfer between Dy<sup>3+</sup> and Eu<sup>3+</sup> in wolframite InNbTiO<sub>6</sub>[J]. *Journal of Luminescence*, 2020, 227: 117578.
- [37] 李敏,孙晓园,范小暄,等. Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: Tb<sup>3+</sup>荧光粉的发光特性[J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1940-1949.
- LI M, SUN X Y, FAN X X, *et al.*. Photoluminescence properties of Sr<sub>6</sub>Lu<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>O<sub>15</sub>: Tb<sup>3+</sup> phosphor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(11): 1940-1949. (in Chinese).
- [38] DEXTER D L. A theory of sensitized luminescence in solids[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(5): 836-850.
- [39] MILLER M P, WRIGHT J C. Multiphonon and energy transfer relaxation in charge compensated crystals[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1979, 71(1): 324-338.
- [40] VIDYADHARAN V, MOHAN P R, JOSEPH C, *et al.*. Luminescent characteristics of UV excited Sr<sub>0.5</sub>Ca<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub>: Pr<sup>3+</sup> reddish-orange phosphor[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, 170: 38-43.
- [41] MCCAMY C S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates[J]. *Color Research & Application*, 1992, 17(2): 142-144.

#### 作者简介:



王晓丹(1980—),女,辽宁锦州人,教授,硕士生导师,2008年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,现为苏州科技大学物理科学与技术学院教授,主要从事光功能材料的制备、性能表征及光电器件方面的研究。E-mail: [xiaodanwang@mail.usts.edu.cn](mailto:xiaodanwang@mail.usts.edu.cn)



曾雄辉(1976—),男,湖南湘潭人,研究员,博士生导师,2005年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,现为中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究员,主要从事宽禁带半导体材料制备、物性和结构研究。E-mail: [xhzheng2007@sinano.ac.cn](mailto:xhzheng2007@sinano.ac.cn)