

doi:10.3788/gzxb20184705.0516001

Er³⁺ 和 Eu³⁺ 共注入 GaN 的光学特性和能量传递机制

夏永禄^{1,2}, 王晓丹³, 曾雄辉², 王建峰², 赵岳¹, 徐科²

(1 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

(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)

(3 苏州科技大学 物理科学与技术系, 江苏 苏州 215009)

摘要:采用离子注入法在 GaN 薄膜中实现了 Er³⁺ 和 Eu³⁺ 离子的共掺杂,以阴极荧光光谱仪为主要表征手段,研究样品的光学特性和能量传递机理.在 300 K 温度下,Er³⁺ 和 Eu³⁺ 共掺杂 GaN 薄膜能够实现绿光和红光的同时发射.随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量的增加,Eu³⁺ 离子相关发光峰的强度减弱,Er³⁺ 离子对应的两个相关发光峰强度比值减小,表明 Er³⁺ 和 Eu³⁺ 离子之间发生了能量传递,能量传递的方向为 Eu³⁺ → Er³⁺.变温阴极荧光光谱显示,Er³⁺ 离子的²H_{11/2}和⁴S_{3/2}两个能态相关的跃迁峰相对强度比值随着温度升高而降低,主要是由两个能级之间的热耦合导致.改变 Er³⁺ 离子的掺杂剂量,能够调控 GaN:Er³⁺/Eu³⁺ 样品的光学色度坐标和色温,表明此材料可用于发光器件.

关键词:光电子学;GaN;阴极荧光;光学特性;能量传递

中图分类号:TQ174

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0516001-6

Optical Properties and Energy Transfer Mechanism in Er³⁺ and Eu³⁺ Co-doped GaN Films

XIA Yong-lu^{1,2}, WANG Xiao-dan³, ZENG Xiong-hui², WANG Jian-feng², ZHAO Yue¹, XU Ke²

(1 School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

(3 Department of Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

Abstract: The samples of Er³⁺ and Eu³⁺ co-doped GaN epitaxial films were prepared by ion implantation technique. Their optical properties and energy transfer mechanism were investigated using cathodoluminescence. For Er³⁺ and Eu³⁺ co-doped GaN films sample, the mixed color of green and red light can be realized at 300 K. Moreover, the emission intensity of Eu³⁺ ions and intensity ratio of Er³⁺ ions were decreased with the increase of Er³⁺ ions implantation dose, which proved the existence of the energy transfer from Eu³⁺ to Er³⁺ in the GaN host. The result of temperature-dependent cathodoluminescence spectra shows that the intensity ratio is decreased with the temperature increasing, which indicates there is a thermal coupling of ²H_{11/2} and ⁴S_{3/2} states of Er³⁺ ions. The calculated chromaticity coordinates and color correlated temperature can be tuned through adjusting the implantation dose ratio of Er³⁺ to Eu³⁺. This work shows Er³⁺ and Eu³⁺ co-doped GaN films are promising materials applied in optical devices.

Key words: Optoelectronics; GaN; Cathodoluminescence; Optical properties; Energy transfer

OCIS Codes: 160.2540; 160.4760; 160.5690; 160.6000

0 引言

稀土离子掺杂氮化镓(GaN)基质以其优异的光学特性、高效的发光效率等受到广泛关注,被广泛应用于

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61306004, 51002179)资助

第一作者:夏永禄(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为稀土离子掺杂氮化镓基质的光学特性. Email: ylxia2016@sinano.ac.cn

导师(通讯作者):曾雄辉(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为Ⅲ族氮化物半导体材料. Email: xhzeng2007@sinano.ac.cn

收稿日期:2017-12-20;录用日期:2018-01-26

<http://www.photon.ac.cn>

发光器件和显示器件^[1-2].与 Si 和 Ge 等窄禁带半导体基质材料相比^[3],GaN 基质利用其大的禁带宽度(~ 3.4 eV)能够有效抑制温度淬灭^[4-5]并拓宽稀土离子的发光波长范围.同时,稀土离子掺杂 GaN 具有较高的固浓度.稀土离子掺杂 GaN 基质的发光波长能够覆盖紫外到红外整个可见光范围.例如,稀土离子 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 、 Eu^{3+} 等单掺杂 GaN 基质能够分别获得蓝光、绿光和红光发射^[6-9].

理论上,多种稀土离子掺杂 GaN 基质能够获得混合色彩的光.目前,研究者利用两种方法实现稀土离子在 GaN 基质上的共掺杂.一种方法是稀土离子的选区掺杂.ZHANG L 等在同一衬底的垂直方向上生长了三层 GaN 薄膜,利用外延生长技术分别掺杂了 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 和 Eu^{3+} ,实现全色显示^[10].WANG Y Q 等利用掩模技术在 GaN 薄膜的不同区域分别注入 Tm^{3+} 、 Eu^{3+} 和 Er^{3+} ,均实现全色显示^[11].另一种方法是通过离子注入实现稀土离子的共掺杂.ROQAN I S 等研究了 Tm^{3+} 和 Er^{3+} 共掺杂 GaN 的光学特性^[12].WANG X D 等制备了 Pr^{3+} 和 Tm^{3+} 共掺杂 GaN,成功实现了红光和蓝光同时发射,并且证明了两种离子之间存在能量传递过程^[13].WANG X D 等又通过离子注入方法将 Pr^{3+} 、 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 离子掺入 GaN 基质,获得了红、绿和蓝三颜色光同时发射^[14].CHEN F F 等对比 Pr^{3+} 和 Er^{3+} 单掺杂和共掺杂 AlN 基质的光学特性,证明了 Er^{3+} 的 ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 Pr^{3+} 的 ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ 能级跃迁之间发生了共振能量传递^[15].先前科研人员对 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 离子单掺杂 GaN 基质的光学特性已经做了深入的研究^[16-20].然而, Er^{3+} 和 Eu^{3+} 共掺杂 GaN 基质的光学特性还未见文献报道.

本文利用离子注入技术在 GaN 薄膜上实现了 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 离子的共掺杂,并以阴极荧光(Cathodoluminescence,CL)光谱仪为主要表征手段,研究了样品的光学特性和能量传递机理.

1 实验方法

通过金属有机物化学气相沉淀方法在蓝宝石衬底的(0001)方向上外延生长 GaN 薄膜,GaN 薄膜的厚度为 $4 \mu\text{m}$.利用离子注入方法将稀土离子掺杂进入 GaN 晶格,离子注入的能量为 200 keV ,角度倾斜 10° .为了避免沟道效应, Eu^{3+} 离子的掺杂剂量为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,而 Er^{3+} 离子的掺杂剂量分别为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.随后,样品通过退火处理恢复离子注入损伤.其中,退火温度为 1000°C ,退火氛围为 NH_3 ,常压条件下退火 30 min .最后,利用 Quanta400FEG 场发射扫描电镜上配置的 MonoCL3+ 阴极荧光光谱仪测量样品的阴极荧光光谱,激发电压为 5 kV ,光谱波长测量范围为 $340 \sim 700 \text{ nm}$,测量温度范围为 $80 \sim 375 \text{ K}$.

2 结果与分析

稀土离子在 GaN 晶格中的位置对 GaN:RE 材料的光学性质和能量传递机制影响很大.目前比较常用的方法是利用卢瑟福背散射光谱研究稀土离子在 GaN 晶格中的结构特性.WAHL U 等利用卢瑟福背散射/沟道(RBS/C)技术研究了退火后样品中稀土离子的存在位置,结果显示所有的 Eu^{3+} 离子占据 Ga 离子格位的比例为 100% ,而所有的 Er^{3+} 离子占据 Ga 离子格位的比例为 78% ^[21].随后,MAKAROVA K 等研究原位生长的 GaN:Er 薄膜,发现 Er^{3+} 离子仅存在一种发光中心,结合理论计算,该发光中心来源于 Ga 格位^[22].因此,稀土离子掺杂 GaN 薄膜,在 GaN 晶格中主要占据 Ga 格位^[23-24].

图 1(a)为 GaN: $5 \times 10^{14} \text{ Eu}^{3+}$ 样品在 300 K 温度下的阴极荧光光谱.其中,主要的阴极荧光发光峰位于 623 nm ,对应 Eu^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 能级跃迁;其他次要发光峰分别位于 544 nm , 602 nm 和 666 nm ,分别对应着 Eu^{3+} 离子的 ${}^5\text{D}_1 \rightarrow {}^7\text{F}_1$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ 和 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$ 能级跃迁.图 1(b)为 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 离子共掺杂 GaN 基质的 CL 光谱.从图中可以观察到 Er^{3+} 离子的两个发光峰位于 539 nm 和 560 nm ,分别对应 Er^{3+} 离子的 ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 能级跃迁.与两种离子分别单掺杂 GaN 基质相比,共掺杂样品的稀土离子发光峰的位置并没有发生变化.另外,从 CL 光谱中可以看到 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 共掺杂 GaN 基质在 300 K 温度下能够实现绿光和红光的同时发射.

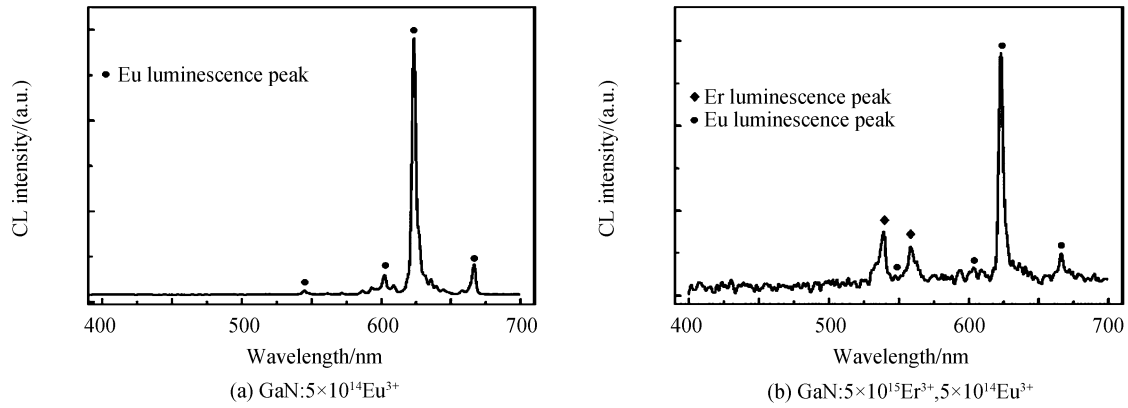


图1 样品在 300 K 下的 CL 光谱
Fig.1 CL spectra of samples at 300 K

图 2 显示了 GaN:5×10¹⁴Eu³⁺,*x*Er³⁺ 样品在温度 300 K 下的 CL 光谱.从图中可以得到随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量的增加,Eu³⁺ 离子相关发光峰的强度减弱,而 Er³⁺ 离子相关发光峰的强度先增强后减弱.当 Er³⁺ 离子的掺杂剂量达到 5×10¹⁵ cm⁻², Er³⁺ 离子相关发光峰强度减弱,这说明 Er³⁺ 离子可能产生了浓度淬灭^[25].另外,Eu³⁺ 离子相关发光峰减弱,可能是由于 Eu³⁺ 和 Er³⁺ 之间产生了能量传递,Eu³⁺ 离子将能量传递给 Er³⁺ 离子导致.

在一般情况下,Er³⁺ 离子的²H_{11/2}和⁴S_{3/2}能级处于热平衡,这两个能级布居仅与温度有关^[26].对于一个 Er³⁺ 离子系统,无论 Er³⁺ 离子获得多少能量,Er³⁺ 离子本身发射的 560 nm 和 539 nm 发光峰强度的比值是不变的,也不应该随着掺杂剂量变化.研究 Er³⁺ 离子的两个主要发光峰的发光峰强度比(*I*₅₆₀/*I*₅₃₉)随 Er³⁺ 离子掺杂剂量的变化关系.对于 Er³⁺ 离子单注入 GaN 基质,Er³⁺ 离子两个发光峰强度比值取决于 Er³⁺ 原子的晶体场环境^[27],随着 Er³⁺ 离子剂量改变,强度比值应保持不变.并且,CHEN S Q 等研究发现阴极射线能量很大,对于稀土离子的激发接近饱和激发^[28].表 1 为 Er³⁺ 离子掺杂剂量与其 Er³⁺ 离子发光峰强度比值之间的关系.当共注入 Eu³⁺ 后,Er³⁺ 离子 560 nm 发光峰与 539 nm 发光峰的强度比值随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量增加而逐渐降低.原因可能是由于 Eu³⁺ 离子的掺入打破了这个平衡,Eu³⁺ 离子通过交驰豫以及光再吸收作用实现与 Er³⁺ 离子之间的能量传递.这个过程导致了 Er³⁺ 离子的 560 nm 发光峰强度减弱,而 539 nm 发光峰强度增强,最终两个发光峰的强度随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量的增加而减少.

表 1 Er³⁺ 离子掺杂剂量对 560 nm 和 539 nm 发光峰强度比值的影响

Table 1 Effect of Er³⁺ ions content on the intensity ratio of 560 nm with respect to 539 nm of Er³⁺ ions

Eu ³⁺ /cm ⁻²	Er ³⁺ /cm ⁻²	<i>I</i> ₅₆₀ /(a.u.)	<i>I</i> ₅₃₉ /(a.u.)	<i>I</i> ₅₆₀ / <i>I</i> ₅₃₉
	1×10 ¹⁴	11 260	11 440	0.98
5×10 ¹⁴	1×10 ¹⁵	32 760	43 980	0.74
	5×10 ¹⁵	13 080	19 120	0.68

Eu³⁺ 和 Er³⁺ 离子之间的能量传递如图 3,传递通道为

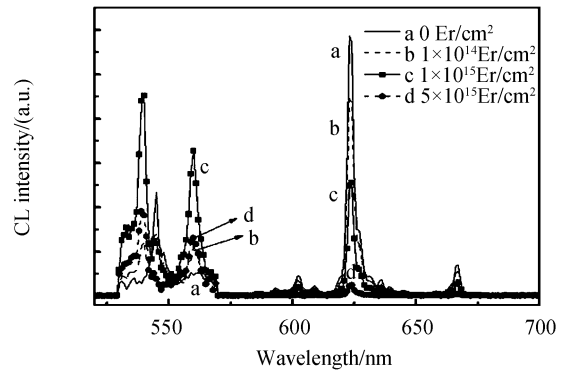
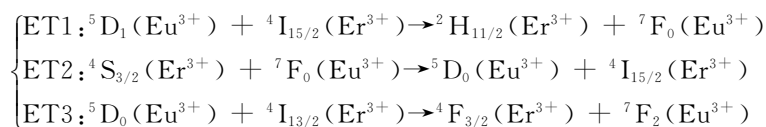


图 2 GaN:5×10¹⁴Eu³⁺,*x*Er³⁺ 样品在 300 K 下的 CL 光谱
Fig.2 CL spectra of GaN:5×10¹⁴Eu³⁺,*x*Er³⁺ samples at 300 K

一方面,在电子束激发下, Eu^{3+} 离子的基态电子跃迁到激发态 $^5\text{D}_1$ 能级上,由于 Eu^{3+} 离子的 $^5\text{D}_1$ 能级 (2.318 eV) 能量和 Er^{3+} 离子的 $^2\text{H}_{11/2}$ 能级 (2.301 eV) 能量相近,导致 Eu^{3+} 离子的 $^5\text{D}_1$ 能级和 Er^{3+} 离子的 $^2\text{H}_{11/2}$ 能级较容易发生共振能量传递.其中 Eu^{3+} 离子 $^5\text{D}_1$ 能级上的能量传递给 Er^{3+} 离子的 $^2\text{H}_{11/2}$ 能级,再经过辐射跃迁,促进了 Er^{3+} 离子 539 nm 发光峰强度,如过程 ET1.

另一方面,通过光子的再吸收过程, Eu^{3+} 离子吸收 Er^{3+} 离子产生的 560 nm 波长光子,激发电子从基态跃迁到激发态 $^5\text{D}_0$,消耗了 Er^{3+} 离子 560 nm 发光峰强度,如过程 ET2;并且, Er^{3+} 离子吸收 Eu^{3+} 离子产生的 623 nm 波长光子,通过能级跃迁,促进了 Er^{3+} 离子 539 nm 发光峰强度,如过程 ET3.能量传递过程导致 Er^{3+} 离子 560 nm 发光峰强度减弱,539 nm 发光峰强度增强,最终 Er^{3+} 离子两个发光峰的强度比值 (I_{560}/I_{539}) 随着 Er^{3+} 离子掺杂剂量的增加而减少.

图 4 呈现 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 掺杂剂量分别为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的样品随温度变化的 CL 光谱特性,温度范围为 80~375 K.从图中可以得到,在低温条件下,样品能够同时产生绿光和红光.低温条件下 Er^{3+} 离子的 539 nm 发光峰强度消失.当温度逐渐升高后,发光峰的强度逐渐增强,并逐渐高于 Er^{3+} 离子的 560 nm 发光峰强度.这是由于低温条件下, Er^{3+} 离子的 $^2\text{H}_{11/2}$ 能级没有热活化无法实现粒子数反转,导致其低温时发光峰消失.但是,随着温度升高, $^2\text{H}_{11/2}$ 能级逐渐活化,导致其 539 nm 发光峰强度逐渐增强.又因为 Er^{3+} 离子的 $^2\text{H}_{11/2}$ 能级和 $^4\text{S}_{3/2}$ 能级距离较近,高温时两个激发态能级之间产生热耦合^[8,29],最后导致 Er^{3+} 离子 539 nm 发光峰强度高于 560 nm 发光峰强度,并且温度继续升高,两个发光峰之间的强度比值持续增大.

图 5 展示了不同 Er^{3+} 离子掺杂剂量样品的色度坐标,其中,标准白光的色度坐标为 (0.333, 0.333),表格 2 呈现了各个样品的色度坐标和色温 (Color Correlate Temperatures, CCTs).所有样品的 CIE1931 色度坐标都在可见光区域.从图中可以得到,改变 Er^{3+} 离子的掺杂剂量,能够调制样品的光输出颜色.并且,随着 Er^{3+} 离子掺杂剂量的增加,样品的光输出颜色逐渐接近标准白光.这表明 $\text{GaN}:\text{Er}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ 材料有希望应用于发光器件.

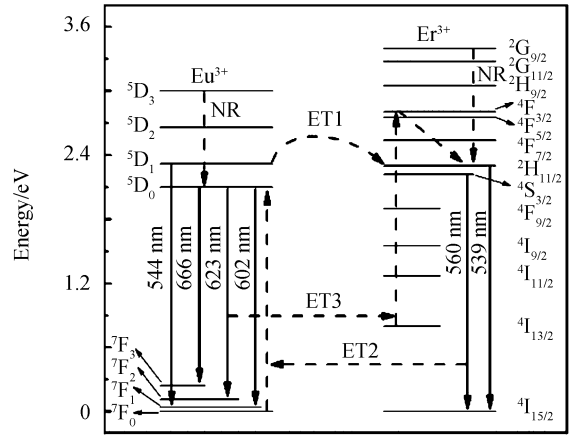


图 3 GaN 薄膜中 Er^{3+} 和 Eu^{3+} 离子的能量传递
Fig.3 Energy level transfer of Er^{3+} and Eu^{3+} in GaN film

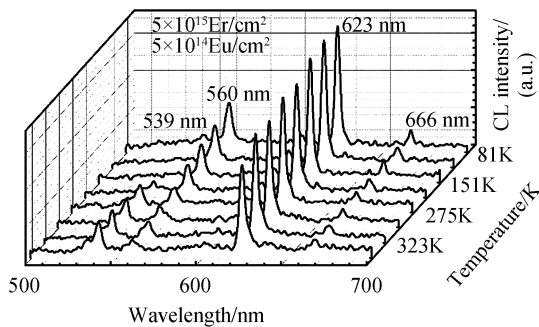


图 4 GaN: $5 \times 10^{14} \text{ Eu}^{3+}$, $5 \times 10^{15} \text{ Er}^{3+}$ 样品随温度变化的 CL 光谱
Fig.4 Temperature-dependent CL spectra of sample GaN: $5 \times 10^{14} \text{ Eu}^{3+}$, $5 \times 10^{15} \text{ Er}^{3+}$

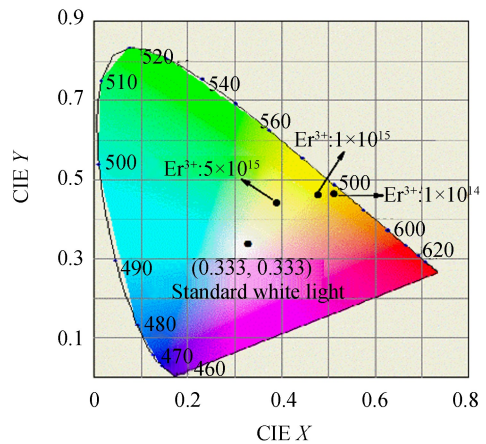


图 5 不同 Er^{3+} 离子掺杂剂量下样品的色度坐标
Fig.5 Chromaticity coordinates of samples with different Er^{3+} ions content

表 2 不同 Er³⁺ 离子掺杂剂量下样品的色度坐标和色温Table 2 Chromaticity coordinates and color correlate temperatures of samples with different Er³⁺ ions content

Er ³⁺ /cm ⁻²	Eu ³⁺ /cm ⁻²	CIE X	CIE Y	CCT/K
1×10 ¹⁴	5×10 ¹⁴	0.518	0.458	2 377
1×10 ¹⁵	5×10 ¹⁴	0.487	0.458	2 714
5×10 ¹⁵	5×10 ¹⁴	0.394	0.431	4 003

3 结论

采用离子注入方法在 GaN 薄膜样品上实现了 Er³⁺ 和 Eu³⁺ 离子的共掺杂.通过阴极荧光光谱研究了样品在不同温度和掺杂剂量下的光学特性.实验结果表明,在 300 K 温度下,GaN:Er³⁺/Eu³⁺ 样品能够同时产生绿光和红光.随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量的增加,Eu³⁺ 离子相关发光峰强度降低,并且 Er³⁺ 离子的 560 nm 发光峰和 539 nm 发光峰的强度比值减小,这表明 Er³⁺ 和 Eu³⁺ 离子之间发生了能量传递,能量传递方向为从 Eu³⁺ 离子到 Er³⁺ 离子.当 Er³⁺ 离子掺杂剂量达到 5×10¹⁵ cm⁻²后,Er³⁺ 离子相关发光峰强度减弱,产生了浓度淬灭效应.改变 Er³⁺ 离子掺杂剂量能够调制样品的光输出颜色.随着 Er³⁺ 离子掺杂剂量的增加,样品的发光颜色逐渐接近标准白光.GaN:Er³⁺/Eu³⁺ 样品有望应用于发光器件.

参考文献

- [1] ZAVADA J M, JIN S X, NEPAL N, *et al.* Electroluminescent properties of erbium-doped III-N light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(7):1061-1063.
- [2] PARK J H, STECKL A J. Laser action in Eu-doped GaN thin-film cavity at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(20):4588-4590.
- [3] PARK J H, STECKL A J. Demonstration of a visible laser on silicon using Eu-doped GaN thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(5):18.
- [4] FAVENNEC P N, L'HARIDON H, SALVI M, *et al.* Luminescence of erbium implanted in various semiconductors: IV, III-V and II-VI materials[J]. *Electronics Letters*, 1989, **25**(11):718-719.
- [5] NIU Ping-juan, WU Ying-lei, YU Li-yuan, *et al.* Optical properties of defects in GaN based LED irradiated by electron [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(7):798-803
牛萍娟,吴英蕾,于莉媛,等.电子辐照 GaN 基 LED 的缺陷光学性能研究[J]. *发光学报*, 2016, **37**(7):798-803.
- [6] LEE D S, STECKL A J. Selective enhancement of blue electroluminescence from GaN:Tm[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(1):55-57.
- [7] MO Ya-juan, WANG Xiao-dan, ZENG Xiong-hui, *et al.* Study on the mechanism of cathode fluorescence of Er ions implanted GaN thin films[J]. *Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals*, 2015, **44**(6):1569-1574.
- [8] MO Ya-juan, WANG Xiao-dan, YANG Ming-ming, *et al.* Temperature-dependent cathodoluminescence investigation of Er-implanted GaN thin films[J]. *Physica Status Solidi*, 2016, **253**(3):515-520.
- [9] FUJIWARA Y, DIEROLF V. Present understanding of Eu luminescent centers in Eu-doped GaN grown by organometallic vapor phase epitaxy[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **53**(53):05FA13.
- [10] ZHANG Lei, LIU Chang. White light emission from GaN stack layers doped by different rare-earth metals [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, **54**(2):02BA03.
- [11] WANG Y Q, STECKL A J. Three-color integration on rare-earth-doped GaN electroluminescent thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(4):502-504.
- [12] ROQAN I, TRAGERCOWAN C, HOURAHINE B, *et al.* Characterization of the blue emission of Tm/Er co-implanted GaN[C]. *Mrs Proceedings*, 2005, **892**:599-604.
- [13] WANG Xiao-dan, MO Ya-juan, YANG Ming-ming, *et al.* Cathodoluminescence properties of Pr, Tm co-implanted GaN thin films[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(5):1692-1700.
- [14] WANG Xiao-dan, MO Ya-juan, ZENG Xiong-hui, *et al.* Simultaneous emission of red, green, and blue in Pr, Er, and Tm co-implanted GaN thin films[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2017, **199**:567-570.
- [15] CHEN Fei-fei, WANG Xiao-dan, YANG Ming-ming, *et al.* Luminescence properties and energy transfer mechanism in Er³⁺ and Pr³⁺ co-implanted AlN films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8):0816001.
陈飞飞,王晓丹,阳明明,等. Er³⁺、Pr³⁺ 共掺杂 AlN 薄膜的发光特性和能量传递机理[J]. *光子学报*, 2017, **46**(8):0816001.
- [16] YANG Ming-ming, MO Ya-juan, WANG Xiao-dan, *et al.* Spectral properties of Pr³⁺, Tm³⁺ Co-doped AlN thin films [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, **31**(3):285-290.
阳明明,莫亚娟,王晓丹,等. AlN:Er 薄膜在不同退火温度下应力诱导的微观结构演变[J]. *无机材料学报*, 2016, **31**(3):285-290.

- [17] TANAKA M, MORISHIMA S, BANG H, *et al.* Low-energy charge-transfer state and optical properties of Eu^{3+} -doped GaN[J]. *Physica Status Solidi*, 2003(7):2639-2643.
- [18] HO V X, DAO T V, JIANG H X, *et al.* Photoluminescence quantum efficiency of Er optical centers in GaN epilayers [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**:39997.
- [19] O'DONNELL K P, EDWARDS P R, YAMAGA M, *et al.* Crystalfield symmetries of luminescent Eu^{3+} centers in GaN: The importance of the 5D₀ to 7F₁ transition[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(2):022102.
- [20] SINGH A K, O'DONNELL K P, EDWARDS P R, *et al.* Luminescence of Eu^{3+} in GaN(Mg, Eu): Transitions from the D-5(1) level[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**: 241105.
- [21] WAHL U, ALVES E, LORENZ K, *et al.* Lattice location and optical activation of rare earth implanted GaN[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2003, **105**(1):132-140.
- [22] MAKAROVA K, STACHOWICZ M, GLUKHANYUK V, *et al.* Spectroscopic studies of Er-centers in MOCVD grown GaN layers highly doped with Er[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2008, **146**(1-3):193-195.
- [23] LORENZ K, WAHL U, ALVES E, *et al.* High temperature annealing of rare earth implanted GaN films: Structural and optical properties[J]. *Optical Materials*, 2005, **28**(6):750-758.
- [24] SANNA S, SCHMIDT W G, FRAUENHEIM T, *et al.* Rare-earth defect pairs in GaN: LDA + U, calculations[J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(10):104120.
- [25] WANG J, FENG Y, LI R, *et al.* Luminescence and energy transfer properties of single-component $\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_2(\text{PO}_4)_3 : \text{Dy}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$, for warm white UV LEDs[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, **702**:120-125.
- [26] LEE C W, EVERITT H O, LEE D S, *et al.* Temperature dependence of energy transfer mechanisms in Eu-doped GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(12):7717-7724.
- [27] HERNANDEZ S, CUSCO R, ARTUS L, *et al.* Lattice order in thulium-doped GaN epilayers: In situ doping versus ion implantation[J]. *Optical Materials*, 2006, **28**(6 - 7):771-774.
- [28] CHEN S, DIERRE B, LEE W, *et al.* Suppression of concentration quenching of Er-related luminescence in Er-doped GaN[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(18):1026.
- [29] HOMMERICH U, SEO J T, ABERNATHY C R, *et al.* Spectroscopic studies of the visible and infrared luminescence from Er doped GaN[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2001, **81**(1-3):116.