

不同掺杂元素对 GaN 基材料发光性能影响研究进展

赵君芙,邵桂雪,李天保,梁建,许并社

太原理工大学材料科学与工程学院;新材料界面科学与工程教育部重点实验室,太原 030024

摘要 由于 GaN 材料本身具有的极大优越性,如大禁带宽度、高临界场强、高热导率、高载流子饱和速率、高异质结界面二维电子气浓度等,决定了 GaN 基材料及其器件在发光半导体材料领域中的重要地位,而高质量 GaN 的掺杂制备一直是研究者关注的热点。本文根据近几年国内外对掺杂 GaN 基材料的研究成果,总结概括了 IIA 族、过渡族以及稀土族元素对 GaN 的掺杂,分析讨论了不同掺杂元素对 GaN 基材料发光性能的影响,并以 Mg 掺杂 GaN 为例,对比了各种掺杂技术的优缺点。

关键词 GaN;IIA 族金属掺杂;过渡族掺杂;稀土掺杂;光致发光

中图分类号 TN304

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.09.013

Effects of Various Dopant on Photoluminescence of GaN Based Materials

ZHAO Junfu, SHAO Guixue, LI Tianbao, LIANG Jian, XU Bingshe

Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education; College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract Gallium Nitride (GaN)-based materials have great advantages, such as direct and large band-gap, high critical field strength and thermal conductivity, high carrier saturation velocity, and high mobility and concentration of two-dimensional electron gas at hetero-junction interface, the advantages determine that the GaN-based materials and devices play an important role in the area of light-emitting semiconductor materials. Thus, the preparation of high quality GaN-based materials doped with various elements has become one of interesting research topics. The recent advanced researches and developments are reviewed and it mainly focuses on doped GaN-based materials, including GaN doped with group IIA elements, the transition elements, and the rare-earth elements; and also the effects of different dopant on the growth and optical properties of GaN-based materials are analyzed. Moreover, the advantages and disadvantages of various doping technologies have been further compared by taking Mg-doped GaN as a typical example.

Keywords GaN; IIA-doped; transition-doped; rare-earth-doped; photoluminescence

0 引言

III-V 族化合物 GaN 作为第三代半导体材料,具有禁带宽度大、击穿场强大、介电常数小、电子漂移饱和速度高、衬底的绝缘性能和导热性能良好等优点,已成为目前世界上最先进的半导体材料之一。由于 GaN 室温禁带宽度为 3.4eV,载流子带间跃迁产生辐射波短,掺杂后,不仅可以在高温、高频、大功率和高密度集成下工作,还可使发光波长移至可见区域,因此,GaN 基材料是制备紫外到可见光范围内光电子器件的理想材料。早期研究还发现,禁带宽度越宽,稀土发光

的猝灭越弱^[1],当稀土掺杂宽禁带 GaN 的淬灭温度降低,制作器件所使用的温度范围就可增大,具有很高的实用价值。但由于多种原因,p 型掺杂的 GaN 材料性能仍达不到理论设计水平,严重阻碍了 GaN 基器件的发展^[2]。

近年来,对 GaN 基材料光电性能的要求不断提升,选用何种掺杂元素,如何提高 GaN 的掺杂制备技术成为研究者关注的热点。本文根据国内外近 10 年来关于不同掺杂元素对 GaN 基材料光学性能影响的研究近况,总结概括 IIA 族、过渡族以及稀土族元素对 GaN 的掺杂和掺杂后对 GaN 基材料发

收稿日期:2010-10-13;修回日期:2011-03-07

基金项目:山西省回国留学人员科研项目(2008-37);山西省回国留学人员重点科研资助项目(2009-03)

作者简介:赵君芙,副教授,研究方向为半导体纳米薄膜材料的制备及性能研究,电子信箱:junfuzhao@yahoo.com;许并社(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:E63080002GJ,E491101261S),教授,研究方向为新材料及界面科学与工程,电子信箱:xubs@tyut.edu.cn

光性能的影响,并以 Mg 掺杂 GaN 为例,讨论对比了各种掺杂技术的优劣。

1 IIA 族元素掺杂 GaN

IIA 族元素中的 Be 和 Mg 是获得 p-GaN 常用的掺杂剂,原因是它们的价电子比 Ga 元素少一个,有获得一个电子完成共价键的倾向。通常 Be 和 Mg 可取代 Ga 原子而处在晶格点上,表现为受主杂质,并能引入浅受主能级。在早期研究中,由于 Be 的电离能比 Mg 低,Be 被认为是比较好的 p 型掺杂剂。例如 Yu 等^[3]将 Be 植入 GaN:Mg 中,发现植入 Be 后,Mg 的激活能大约降低了 30%,从而导致载流子浓度随着 GaN 生长而增加。目前使用最为广泛的 IIA 族元素为 Mg,这主要是由于 Mg 离子的半径与 Ga 离子的半径很相近,更容易掺杂到氮化镓晶体中,特别是能使掺杂后的 GaN 产生蓝光,所以 Mg 被认为是 GaN 的最佳 p 型掺杂剂。因此,近年来不同掺杂方法对 GaN:Mg 影响的研究越来越受到关注和重视。表 1 总结了几种掺杂方法对 GaN:Mg 光学性能的影响。

表 1 不同掺杂方法对 Mg 掺杂 GaN 基材料光学性能的影响

Table 1 Effects of various doping technologies on photoluminescence of Mg-doped GaN based materials

掺杂方法	光学性能	参考文献
MOCVD	轻掺,紫外光 380.14nm(3.26eV),两个光学声子波 390.44nm(3.096eV);Mg 浓度升高,近带边激发光消失,在 413.17nm(3.0eV)出现强的蓝光;退火前后,PL 谱变化不大	[4]
APCVD	宽峰约在 2.7eV,与重掺 GaN 的带边发射峰一致;加载电压加大,CL 谱中的蓝光发射峰的强度下降	[5]
MBE	Mg 浓度升高,3.27eV 处峰值强度变化不大,但 2.9eV 处峰强度很低	[6]

由表 1 可知,不同掺杂方法和掺杂浓度对 Mg 掺杂 GaN 光学性能的影响不同,掺杂 Mg 后 GaN 的 PL 谱都不同程度地出现了蓝移。其中采用金属有机化学气相沉积法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition,MOCVD)得到的 GaN:Mg 薄膜空穴浓度高,光强度高,并且制备反应温度低,不需要退火^[4],是目前应用最为广泛的掺杂技术。常压化学气相沉积法(Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition,APCVD)制备工艺虽然简单,但是反应温度比采用 MOCVD 高,且获得样品的纯度不高^[5]。采用分子束外延法(Molecular Beam Epitaxy,MBE)得到的样品 PL 谱的峰强度不高^[6]。

除了掺杂方法对 Mg 掺杂 GaN 的光学性能有影响外,选用不同的衬底也会影响其光学性能。例如 Reshchikov 等^[7]在相同条件下,于不同衬底上(GaN:Si、蓝宝石和 AlN)制备了表面形貌为三角锥形的 GaN:Mg 薄膜。从图 1^[7]可以看出,在 AlN 和蓝宝石衬底上,GaN:Mg 薄膜在 3.25eV 处出现了非结构的带峰;而在 GaN:Si 衬底上,GaN:Mg 薄膜不仅在 3.28eV 处发

现了紫光,还在 2.9eV 处发现了蓝光。出现紫光是由于浅施主能级到浅受主能级(Mg)跃迁造成,而出现蓝光峰主要是由于 GaN:Si 衬底在制备过程中含有 Zn 杂质,即在 GaN:Si 衬底里浅施主能级向 Zn 受主能级跃迁造成的^[7]。该结果表明,衬底的选择直接影响着 Mg 掺杂 GaN 基材料的发光性能,尤其选用 GaN:Si 衬底对 GaN:Mg 薄膜的光学性能影响较大。

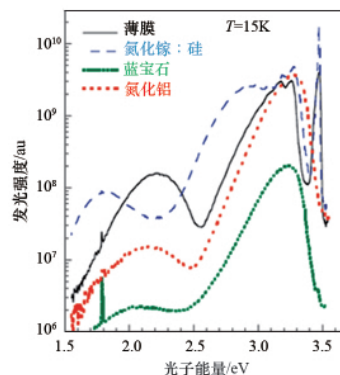


图 1 GaN:Mg 薄膜与在 GaN:Si、蓝宝石和 AlN 衬底上生长的三角锥 GaN:Mg 薄膜的低温 PL 谱, $P_{exc}=0.04W/cm^2$

Fig. 1 Low-temperature PL spectra obtained from GaN:Mg thin film and pyramidal GaN:Mg thin films deposited on GaN, Sapphire, and AlN substrates. $P_{exc}=0.04W/cm^2$

此外,对 Mg 掺杂后的 GaN 采用不同方式的退火处理也将影响到 GaN:Mg 薄膜的光学性能。目前,国内外多采用 MOCVD 掺杂生长 GaN 薄膜,但由于 H 容易使 Mg 钝化,直接生长掺 Mg 的 GaN,其电阻率高,发光性能也不好,必须经过脱氢使 Mg 激活。早在 2000 年,Xu 等^[8]通过研究脉冲准分子激光退火(PLA)和快速热退火(RTA)对 Mg 掺杂立方体 GaN 发光性能的影响,发现经过 RTA 退火能够恢复经 PLA 处理后试样的发光强度。近年来,Hwang 和 Yang^[9]采用两步快速热退火研究了 Mg 掺杂后 GaN 的 PL 光谱。其过程为:在 750℃退火 1min 后,再在 600℃退火 5min,两步退火均在纯氧或空气中。结果表明,GaN:Mg 在纯氧中退火后的电化学性能比在空气中退火后的要好。图 2^[9]给出了 GaN:Mg 未经退火处理和经两种退火方式处理后得到的 PL 谱图。由图 2 可知,采

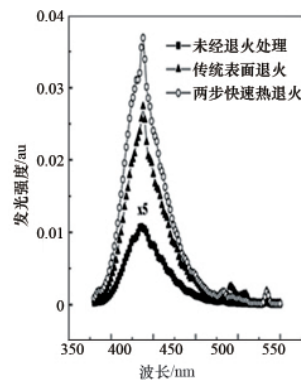


图 2 纯氧中退火后的 GaN 试样的 PL 谱

Fig. 2 PL spectra for GaN samples annealed in a pure O₂ ambient

用两步 RTA 退火处理的 PL 谱的峰强度要比传统表面 CFA 退火处理的 PL 谱的峰强度高,且大都集中在 438nm。这主要是由于相比一步退火,两步退火使其内部存在的氢原子进一步脱氢使 Mg 激活^[9]。通过与一步法 RTA 和 CFA 法比较,两步法 RTA 处理能够改善 Mg 掺杂 GaN 的电化学性能和光学性能,对生产具有高的电化学和光学性能的 p 型半导体器件具有重要意义。最近,Shi 等^[10]研究了氨化时间对 Mg 掺杂 GaN 发光性能的影响,发现在 900°C 下氨化 15min 后,样品的发光性能最好,在 359nm(3.45eV)有一个非常强的发射峰。

综上所述,掺杂技术与 Mg 掺杂浓度、衬底选择、退火工艺及氨化处理均能不同程度地影响 GaN 基材料的发光性能,若要获得高质量和高发光性能的 Mg 掺杂 GaN 基材料,就必须充分考虑以上这些因素。

2 过渡族元素掺杂 GaN

过渡族在带系中可产生受主能级,能非常有效地构成重组中心^[11]。因此,过渡族元素对 GaN 的掺杂研究较早,例如 IIB 族 Cd 掺杂 GaN 可在 2.64—2.85eV 之间产生一个蓝光带^[12-15],而其他过渡元素,如 Ag、Pt、V、Cr、Fe、Hg 等掺杂也会对 GaN 的光学性能有所影响^[16-22]。其中 Stötzler 等^[17]的研究证实了 Cd 掺杂 GaN 的蓝光带集中在 2.7eV,并发现 Ag 掺杂 GaN 在 1.52eV 产生了一个很深的发光带,由 4 个单一跃迁组成。Stötzler 等^[18]采用离子注入法成功地制备出放射性元素¹⁹¹Pt 掺杂 GaN,发现了接近红外线的辐射,主要由 2 个 Pt 在 1.461 和 1.446eV 单一跃迁组成。此外,掺杂 Cr 和 Fe 的 GaN 可在接近红外的区域发射光^[18-19]。Souissi 等^[20]掺 V 在 2.6eV 处发现了强度很高的蓝光,且发光强度随掺 V 浓度的提高而增大,而黄光带却明显减少,蓝光光峰的位置随激发强度的减少而向强度低的位置移动。随后 Touati 等^[21]在掺 V 的研究中又在 0.821eV 处发现了红外光峰,且该峰强度随掺杂浓度增大而增大。Zhou^[22]采用化学气相反应法首次制备出 Hg 掺杂的 GaN 纳米线,并在 3.7eV 处发现了一个新的接近紫外光峰。这一结果对提高 p 型 GaN 基半导体的发光水平是一重大突破。

近年来,由于 Mn 掺杂 GaN 具有较高的居里温度,Mn 掺杂 GaN 研究也受到广泛关注^[23]。如 2008 年,Yoon 和 Myoung^[24]研究了 Mn 掺杂 GaN 的光学性能,通过 PL 谱分析发现在 1.86、2.34 和 3.29eV 分别出现了较高的红光、黄光和蓝光峰。2010 年,刘文军等^[25]采用类似 delta 掺杂方法成功合成了 Mn 掺杂 GaN 单晶纳米条,通过 PL 谱测量发现 Mn 掺杂 GaN 纳米条的发光峰有较大红移。该结果与 2008 年郭俊梅等^[26]采用溶胶-凝胶方法制备的掺 Mn 的 GaN 粉末的本征峰随 Mn 质量分数增加而略有红移有所不同。由此可以看出,对于过渡族同种元素的掺杂,采用不同的掺杂方法和改变掺杂元素的浓度,都将直接影响掺杂 GaN 基材料的发光性能。

3 稀土族元素掺杂 GaN

近年来,尽管对稀土元素掺杂 GaN 的研究仍然是一个很

新的领域,但其进展特别是 Er 掺杂 GaN 的发展非常迅速。稀土掺杂 GaN 基材料在实际应用中占有主导地位,主要是由 GaN 本身性质所决定的,即前面所提到的直接宽带隙、好的化学性质、热稳定性、优良的高场输运性质,再加上 GaN 本身发紫外光使得掺稀土 GaN 基材料的发光范围从紫外扩展到红外波段,并且和其他 III 族氮化物相同,GaN 对高浓度缺陷的存在不敏感,而缺陷的存在对于激发稀土发光非常重要。另外,稀土掺杂 GaN 基材料是一种非常有发展前景的材料,在器件中的应用也非常广泛,值得高度关注和深入研究。

由于 GaN 中掺入不同的稀土元素可以得到从紫外到红外波段的不同光带,稀土元素掺杂 GaN 的研究主要集中在镧系各种稀土元素,如 Ce、Tb、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm 和 Yb 等,对掺杂后 GaN 光学性能的影响,如光致发光(PL)、阴极发光(CL)和电致发光(EL)等。例如 Aldabergenova 等^[27]将 Ce³⁺、Tb³⁺ 和 Eu³⁺ 掺杂到 GaN 中发现了很强的红光、绿光和蓝光。而 Lorenz 等^[28]将 Tm 植入 GaN 中在 477nm 处发现了蓝光,且在 804nm 处发现了近红外光。Song 等^[29]掺 Pr 发现了红光,并且研究了发光强度与退火温度的关系,得到了在 1050°C 以前发光强度随温度增大而提高,而在 1050°C 以后相反。与此同时,Er 掺杂 GaN 的研究也比较深入和系统,发展尤为迅速。Er³⁺ 在 1540nm 处的发光是对应于光纤通信中光损失最小的波段,且 Er³⁺ 在 1540nm 处的发光是 4f 壳层内跃迁的结果,由于受到 5s²5p² 外壳层电子的屏蔽,发光峰的能量位置基本不受基体材料的影响,也不依赖于激发光的强度和所处的环境温度^[30],所以掺 Er 的 GaN 基半导体材料的研究已备受关注。选择不同的衬底和退火工艺对 Er 掺 GaN 发光性能的影响不同。例如宋淑芳等^[31]研究 Er 掺 GaN 的光致发光特性,发现在 Si 衬底上外延生长的 GaN 样品的峰值在 1539nm 处的 PL 强度只有蓝宝石衬底上外延生长 GaN 样品的 30%,但采用 MOCVD 和 MBE 制备的 GaN 的 PL 谱形状基本一致。该结果说明衬底对 Er 掺杂 GaN 光学性能的影响比选用不同掺杂方法的影响大。最近,Pan 等^[32]利用平面磁控溅射制备了 GaN:Er 薄膜,通过紫外可见光检测器可观察到 3.74eV 的光学带隙,并且观察到了绿光。

4 展望

为了发展新型 GaN 基材料和提高其相关器件的使用性能,选用何种类型的掺杂剂、采用何种掺杂技术是制备高质量和高发光性能 GaN 基材料的关键所在。本文在总结概括 IIA 族、过渡族以及稀土族元素对 GaN 掺杂的基础上,分析讨论了不同掺杂元素对 GaN 基材料发光性能的影响。首先在 IIA 族元素中重点介绍了 Mg 对 GaN 的掺杂,如掺杂技术和 Mg 掺杂浓度、衬底选择、退火工艺及氨化处理对 Mg 掺杂 GaN 基材料发光性能的不同影响。其次在过渡族元素中主要介绍了 Cd、Ag、Pt、V、Cr、Fe、Hg 和 Mn 等元素对 GaN 的掺杂,不同元素可导致掺杂后的 GaN 发出不同波段的光,如 GaN:Cd 为蓝光,GaN:Pt 为红外光,GaN:Cr 和 GaN:Fe 同为红外光,GaN:Ag

为紫外光, 而 GaN:V 则由于采用不同的掺杂方法分别得到了蓝光、黄光和红外光。此外, Mn 掺杂 GaN 可得到较高的红光、黄光和蓝光峰。同种元素的掺杂, 若采用不同的掺杂方法和改变掺杂元素的浓度, 都将直接影响到掺杂 GaN 基材料的发光性能。最后在稀土族元素中简单介绍了镧系各种稀土元素, 如 Ce、Tb、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm 和 Yb 对掺杂后 GaN 光学性能的影响。其中 GaN:Ce 与 GaN:Pr 均为红光, GaN:Tb 与 GaN:Er 均为绿光, 而 GaN:Eu 与 GaN:Tm 则均为蓝光。由此可知, 不同元素的掺杂直接影响着 GaN 基材料的发光性能。由于 GaN 具有重要器件特性和巨大的固态光源需求潜力, 尤其在 20 世纪 90 年代 GaN 薄膜材料生长技术取得质的飞跃后, 成功地解决了器件所用的高质量薄膜材料的生长, 初步实现了 p 型 GaN 掺杂, 获得了符合器件要求的 p 型 GaN 薄膜, 解决了 GaN 基固溶体 InGaN、AlGaIn 的生长工艺, 为发展 GaN 基蓝、绿色 LED 和蓝光 LD 以及各种 FET 和光探测器的制备奠定了材料基础, 从而为新器件的开发和研究打开了光明之门, 使 GaN 基材料及其器件的发展成为国内外化合物半导体研究的热点。虽然目前国内外 p 型 GaN 掺杂技术仍处于初级阶段, 但随着掺杂技术的优化及其器件制备工艺的日趋成熟, 不仅会研制出更为理想、性能更为优异的 GaN 基材料及其器件, 也必将促进 GaN 基蓝、绿光 LED 技术的不断发展, 并促成一个更为广阔的新型固态照明市场。

参考文献 (References)

- [1] Favennec P N, Haridon H L, Salvi M, *et al.* Luminescence of erbium implanted in various semiconductor: IV. III-V and II-VI materials[J]. *Electron Letters*, 1989, 25(11): 718-719.
- [2] Xie S Y, Zheng Y D, Chen P, *et al.* P-type doping of GaN [J]. *Research & Progress of SSE*, 2001, 21(2): 204-211.
- [3] Yu C C, Chu C F, Tsai J Y, *et al.* Investigation of beryllium implanted P-type GaN[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2001, 82(1-3): 82-84.
- [4] Guarneros C, Sánchez V. Magnesium doped GaN grown by MOCVD[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2010, 174(1-3): 263-265.
- [5] Lee S H, Ahn S H, Kima K C, *et al.* Growth of Mg-doped GaN microcrystals using MgCl₂ in direct reaction of Ga and NH₃ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 249(3-4): 396-403.
- [6] Alves H, Böhm M, Hofstaetter A, *et al.* Compensation mechanism in MOCVD and MBE grown GaN:Mg [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, 308-310: 38-41.
- [7] Reshchikov M A, Shahedipour-Sandvik F, Messer B J, *et al.* Defect-related photoluminescence in Mg-doped GaN nanostructures [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2009, 404(23-24): 4903-4906.
- [8] Xu D, Yang H, Li S F, *et al.* Pulsed excimer laser annealing of Mg-doped cubic GaN[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 209(1): 203-207.
- [9] Hwang J D, Yang G H. Activation of Mg-doped P-GaN by using two-step annealing[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(10): 4694-4697.
- [10] Shi F, Zhang D D, Xue C S. Influence of ammoniating time on the microstructure of Mg-doped GaN nanowires [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2010, 167(2): 80-84.
- [11] Milnes A G. Deep impurities in semiconductors[M]. New York: Wiley, 1973.
- [12] Ilegems M, Dingle R, Logan R A. Luminescence of Zn- and Cd doped GaN[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(9): 3797-3800.
- [13] Lagerstedt O, Monemar B. Luminescence in epitaxial GaN:Cd[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(5): 2266-2272.
- [14] Pankove J I, Hutchby J A. Photoluminescence of ion-implanted GaN[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(12): 5387-5390.
- [15] Khasanov I Sh, Kuznetsov A V, Gippius A A, *et al.* Cathodoluminescence of GaN doped by the ion implantation method [J]. *Sov Phys Semicond*, 1983, 17(2): 187-190.
- [16] Stötzler A, Weissenborn R, Deicher M, *et al.* Identification of Ag and Cd photoluminescence in ¹¹¹Ag-doped GaN[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 1999, 273-274: 144-147.
- [17] Stötzler A, Deicher M. Collaboration I. Photoluminescence in platinum doped GaN[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2003, 340-342: 377-380.
- [18] Birkhahn R, Garter M, Steckl A J. Red light emission by photoluminescence and electroluminescence from Pr-doped GaN on Si substrates [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(15): 2161-2163.
- [19] Baur J, Maier K, Kunzer M, *et al.* Infrared luminescence of residual iron deep level acceptors in gallium nitride (GaN) epitaxial layers [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(7): 857-859.
- [20] Souissi M, Chine Z, Bchetnia A, *et al.* Photoluminescence of V-doped GaN thin films grown by MOVPE technique[J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(1): 1-4.
- [21] Touati H, Souissi M, Chine Z, *et al.* Near-infrared photoluminescence of V-doped GaN[J]. *Microelectronics Journal*, 2008, 39(12): 1457-1460.
- [22] Zhou S M. Near UV photoluminescence of Hg-doped GaN nanowires[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2006, 33(2): 394-397.
- [23] Dietl T, Ohno H, Matsukura F, *et al.* Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors [J]. *Science*, 2000, 287(5455): 1019-1022.
- [24] Yoon I T, Myoung J M. Optical investigation of ferromagnetic Ga_{1-x}Mn_xN layers grown on sapphire (0001) substrates[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2008, 40(9): 3009-3013.
- [25] 刘文军, 薛成山, 石锋, 等. Mn 掺杂 GaN 纳米条的制备和性质的研究 [J]. *山东科学*, 2010, 23(1): 28-31.
- [25] Liu Wenjun, Xue Chengshan, Shi Feng, *et al.* *Shandong Science*, 2010, 23(1): 28-31.
- [26] 郭俊梅, 刘清华, 赵瑞斌, 等. Mn 掺杂 GaN 粉末的制备和性质研究 [J]. *半导体技术*, 2008, 33(6): 483-487.
- [26] Guo Junmei, Liu Qinghua, Zhao Ruibin, *et al.* *Semiconductor Technology*, 2008, 33(6): 483-487.
- [27] Aldabergenova S B, Osvet A, Frank G, *et al.* Blue, green and red emission from Ce³⁺, Tb³⁺ and Eu³⁺ ions in amorphous GaN and AlN thin films[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, 299-302: 709-713.
- [28] Lorenz K, Alves E, Wahl U, *et al.* Implantation and annealing studies of Tm-implanted GaN[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2003, 105(1-3): 97-100.
- [29] Song S F, Chen W D, Su F, *et al.* Structure and photoluminescence studies of Pr-implanted GaN [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 267(3-4): 400-404.
- [30] 徐光宪. 稀土[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [30] Xu Guangxian. Rare earth[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995.
- [31] 宋淑芳, 陈维德, 陈长勇, 等. 掺铟 GaN 薄膜光致发光的研究[J]. *中国稀土学报*, 2002, 20(6): 535-538.
- [31] Song Shufang, Chen Weide, Chen Changyong, *et al.* *Journal of the Chinese rare earth society*, 2002, 20(6): 535-538.
- [32] Pan X J, Zhang Z X, Jia L, *et al.* Room temperature visible green luminescence from a-GaN:Er film deposited by DC magnetron sputtering[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 458(1-2): 579-582.

(责任编辑 代丽)