

准分子激光辐照法改善 GaN 外延片性质并增强 GaN 基 LED 发光性能

谈浩琪¹ 赵艳¹ 徐晨² 蒋毅坚¹

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

²北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124

摘要 采用不同能量密度、脉冲数的 248 nm 准分子激光对表面为 p 型的 GaN 外延片进行辐照, 再对样品进行退火处理。对激光辐照前后以及退火前后的样品进行光致发光、阴极射线谱、X 射线光电子谱、霍尔效应、 I - V 曲线等表征。实验结果表明: 激光辐照和 N_2 气氛下退火相结合可以使 GaN 外延片的电学和发光性能均较辐照前有不同程度的提高。将改性后的 GaN 外延片封装成发光二极管(LED)器件, 研究了其发光性能与激光辐照能量密度和退火气氛的关系。改性后的 GaN 基 LED 器件的发光强度最高可增加约 37%, 说明 GaN 外延片电学和发光性能的改善将直接影响其封装成 LED 器件后的发光性能, 这对于提高 GaN 基 LED 的性能有重要意义。

关键词 材料; GaN; 发光二极管; 准分子激光辐照; 发光性质; 电学性质

中图分类号 TM23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1006004

Enhancing Luminescent Properties of GaN-Based LED and Improving Optical and Electrical Properties of GaN Epitaxial Wafers with Excimer Laser Irradiation

Tan Haoqi¹ Zhao Yan¹ Xu Chen² Jiang Yijian¹

¹*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

²*College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract The GaN epitaxial wafers with a p-GaN surface are irradiated with an excimer laser at different energy densities and pulse numbers. The laser irradiation induced changes in optical and electrical properties of GaN epitaxial wafers are examined using photoluminescence, cathode luminescence, X-ray photoelectron spectroscopy, Hall, I - V characterization. Experimental results show that under an appropriate laser irradiating condition and annealing treatment in N_2 , the luminescent and electrical properties of the samples are improved to different degrees. The irradiated and annealed samples are transformed into light emitting diode (LED) device with semiconductor packing process, and the relationship between the luminescent properties of LED and the laser energy density or annealing atmosphere are investigated. After laser irradiation and annealing treatment, the light output power of GaN-based LED increases at least about 37% compared with non-irradiated samples, which shows that the improvement of the electrical properties of GaN epitaxial materials plays important role in enhancing the luminescent properties of the LED device.

Key words materials; GaN; light emitting diode; excimer laser irradiation; luminescent properties; electrical properties

OCIS codes 160.6000; 160.3380; 140.2180; 230.3670

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51005005)、北京市自然科学基金 B 类重点项目(KZ201210005004)

作者简介: 谈浩琪(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事准分子激光辐照效应方面的研究。

E-mail: s201213007@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 蒋毅坚(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: yjjiang@bjut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

GaN作为第三代半导体材料,其电子饱和速率、击穿电场、导热率、带隙均高于前两代半导体材料Si和GaAs,非常适合用来制作蓝、绿光和紫外光发光二极管(LED)、电荷耦合器件(CCD)、高速存储器、大功率器件及要求暗电流比较低的光探测器^[1-4]。近年来,随着科技的迅猛发展,人们对于电子器件拥有高频率、宽带宽、高效率、大功率等优势的愿望更加迫切,而以GaN为代表的宽禁带半导体正可以在这些方面满足人类生产生活的需要,更是成为半导体材料研究领域的热点。

但是,GaN在生长衬底的选择和在生长过程中背景载流子浓度过高以及p型掺杂浓度较低的情况均在很大程度上制约了其在工业生产中的广泛应用^[5-7]。目前,采用各种方法生长出的GaN大多不可避免地含有一定数量的N空位缺陷(V_N),导致非掺杂GaN均为n型半导体,本底电子浓度在 $10^{14}\sim 4\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 左右,呈现出高电导的情况^[8-9]。而p型GaN属补偿材料,且一般均用Mg元素作为受主掺杂杂质。GaN中的H元素主要来自生长过程中 NH_3 分解产生的H,因此在金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)生长的GaN薄膜中,H的引入是无法避免的^[10]。目前GaN的受主杂质可控掺杂浓度仅在 $10^{11}\sim 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 之间^[11-13],这意味着外延生长的p型GaN的电学性能有较大的提升空间,这对于提高GaN基LED的发光性能也大有裨益。所以对于外延生长的GaN,需要采用一种新的有效的方法使其物理性能得到进一步的改善,以适应诸如LED等对于GaN各种性质的要求。近期也报道了不少关于解决此方面难题的研究。于莉媛等^[14]对GaN基LED外延片进行了电子束辐照实验,研究了不同能量的电子束辐照对GaN基LED发光性能的影响。结果表明:在1.5 MeV电子束辐照下,采用10 kGy剂量辐照时,LED的发光强度增加约25%;而在100 kGy剂量辐照时,LED的发光强度降低约16%,且电子束辐照可使原来色纯度不高的LED色纯度变好,而更高能量的辐照将会引起器件失效。但电子束辐照参数控制较为单一,难以将材料性质改善到最佳状态,且在特定局域表面对材料进行改性时的可选择性和可重复性较差。Lin等^[15]运用248 nm准分子激光辐照Mg掺杂的GaN外延层,辐照后GaN的空穴载流子浓度提升了两个数量级,他们将此归因于激光辐照将束缚Mg受主的Mg-H键打断,同时伴有氢化镓空位(V_{GaH_2})的形成以及Ga空位被Mg填隙所占据,从而激活Mg受主,改善材料的电学性质。但通过激光辐照的GaN其电学性质依然有改善的空间,可以通过退火的方法使其光学和电学性质得到进一步的改善。Wang等^[16]对准分子激光辐照前后p型GaN的光致发光谱、 $I-V$ 曲线、表面微结构等进行了研究,结果发现:辐照后样品的光学、电学性质均得到改善,并且其表面的结晶质量并没有被准分子激光所破坏,但并没有说明激光辐照对以GaN为基底的LED的发光性能可以产生何种影响。因此,采用激光辐照以及退火的方法对GaN进行光学和电学性质的改善以及对以其为基底的LED的发光性能的改善亟待探索。

本文采用248 nm准分子激光对表面为p型的GaN外延片进行辐照,并对辐照后的样品进行退火处理,以改善其电学和发光性能。将改性后的GaN外延片封装成LED器件,研究了其发光性能与激光辐照能量密度和退火气氛的关系,并对改性机理进行了简要分析。

2 实验

GaN外延片由美国Veeco[®]公司提供,厚度约为450 μm ,其最上层为380 nm厚掺Mg的p型GaN层。进行激光辐照实验前,将其剪裁成边长为10 mm的正方形,之后将样品分别依次浸入乙醇、丙酮和去离子水中超声清洗约5 min。

采用LP 305iF型准分子激光器在空气中对GaN样品进行激光辐照,激光波长为248 nm,重复频率为3 Hz和10 Hz,激光能量密度为300~800 mJ/cm^2 。

采用ActonSP2750型光谱仪测量光致发光谱,激发波长为325 nm,收集方式为背向散射;采用HL5500型霍尔测试仪测量GaN外延片的载流子浓度、迁移率和电阻率;采用Axis Ultra型能谱仪测量X射线光电子谱(XPS)。采用磁控溅射的方法在GaN外延片表面镀上Ni/Au(15 nm/50 nm)电极,用来测量欧姆接触。在对GaN外延片进行封装时,表面镀上Ni/Au(15 nm/300 nm)电极,采用电子束蒸发的方法在外延材料表面形成厚度为240 nm的氧化铟锡(ITO)薄膜,将Ti/Au合金作为电极连接半导体的p-n结两端,最后在室温下测量样品的LED发光性能。

3 结果与分析

3.1 发光性质

采用不同脉冲重复频率、脉冲数和能量密度的准分子激光分别对 GaN 外延片进行了激光辐照实验。图 1 为 GaN 外延片在不同参数下的准分子激光辐照前后的光致发光谱。由于 GaN 外延片大都采用 MOCVD 方法生长,其光致发光谱在同一材料不同位置的强度也会有所变化。经准分子激光辐照后,其峰位在 455 nm 的缺陷峰强度均较辐照前有所提升,其中从图 1(c)可以看到经过辐照后的缺陷峰强度较辐照前增加了约 4 倍,并且经辐照后没有出现峰位移动的情况。缺陷峰强度增加,说明经过准分子激光辐照后,GaN 表面非辐射复合中心减少,这对于提升 GaN 外延片的电学性质和在 LED 器件中的发光性能具有重要影响。图 1 中缺陷峰的半峰全宽(FWHM)也没有出现明显的变化,这反映出 GaN 表面的结晶质量没有发生变化,激光辐照没有破坏材料表面的晶体结构。此外,从图 1 中还可以看出峰位在 575 nm 的深能级发光峰的强度在激光辐照后得到了一定程度的增强,这意味着激光辐照后 GaN 内部的深能级复合增多,会降低 GaN 内部辐射复合的发生几率,使得 GaN 的电学性质以及以其为基底的 LED 器件的发光性能受到不利影响。但从图 1 中可以看出,虽然在激光辐照后深能级发光峰得到了一定程度的加强,但激光辐照前后深能级发光峰与辐射缺陷峰

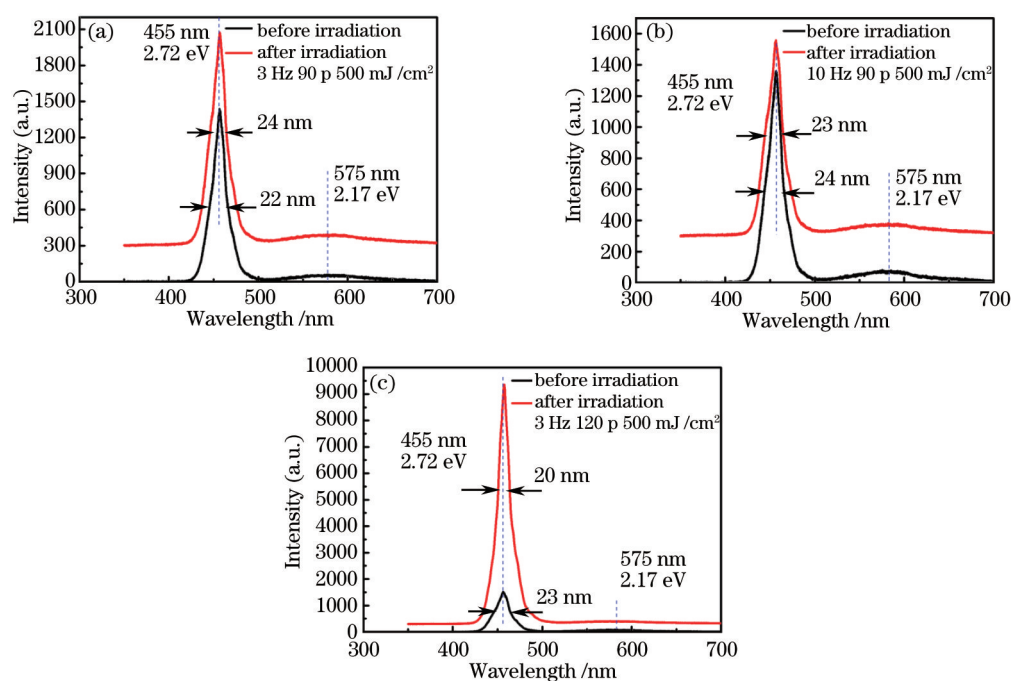


图 1 GaN 外延片在不同激光参数的准分子激光辐照前后的光致发光谱。

(a) 3 Hz, 500 mJ/cm², 90 个脉冲; (b) 10 Hz, 500 mJ/cm², 90 个脉冲; (c) 3 Hz, 500 mJ/cm², 120 个脉冲

Fig.1 Photoluminescent spectra of GaN epitaxial wafers before and after laser irradiation with different repetition rates, laser energy densities and pulse numbers. (a) 3 Hz, 500 mJ/cm², 90 pulses; (b) 10 Hz, 500 mJ/cm², 90 pulses; (c) 3 Hz, 500 mJ/cm², 120 pulses

上述光致发光实验中,激发光波长为 325 nm,接近 GaN 材料的本征峰位置。为此,测量了 GaN 的阴极射线发光谱。图 2 为 GaN 外延片在不同脉冲数下准分子激光辐照前后的阴极射线发光谱,脉冲激光能量密度为 400 mJ/cm²。从图中可以看出,对表面层为掺 Mg 的 p 型 GaN 外延片来说,当脉冲数为 60 时,由于激光辐照作用,使得样品内部的穿透位错,即在 GaN 材料中最常见的线缺陷数量减少,在阴极射线发光谱中可以观察到蓝色发光峰和材料本征峰的增强,以及可见光区内发光峰,即黄带发光峰的减弱。当脉冲数为 90 时,除了材料内部穿透位错密度的进一步降低,随着 Mg-H 键的逐步断裂导致 Mg 离子的大量激活,且因表面镓氧化物受到激光辐照作用的分解作用使得镓空位开始显现,从而使 Mg 离子取代了 Ga 离子的位置,出现镁填隙,使得蓝色发光峰的强度到达最大值;同时由于激光辐照,镓空位出现,镁受主被激活,导致黄带发光也随之增强。可以预见的是,当继续增加脉冲数后,阴极射线发光谱中的蓝色发光峰反而会明显减弱,这是由样品

内部镁填隙 Mg_{Ga} 和氮空位 V_N 复合体的浓度增加所引起的,原因是大剂量的激光辐照使得镁填隙与氮空位大量出现,同时这两种缺陷形式所带电荷相反、互相吸引,较容易进行复合,即发生了杂质能级间的复合发光,导致黄带发光峰出现了明显的升高。从图 2(b)还可以看出,即使黄带发光峰强度得到了加强,其强度与缺陷峰强度的比值还是较激光辐照前明显降低,说明在材料内部激子还是以蓝光复合发光为主。

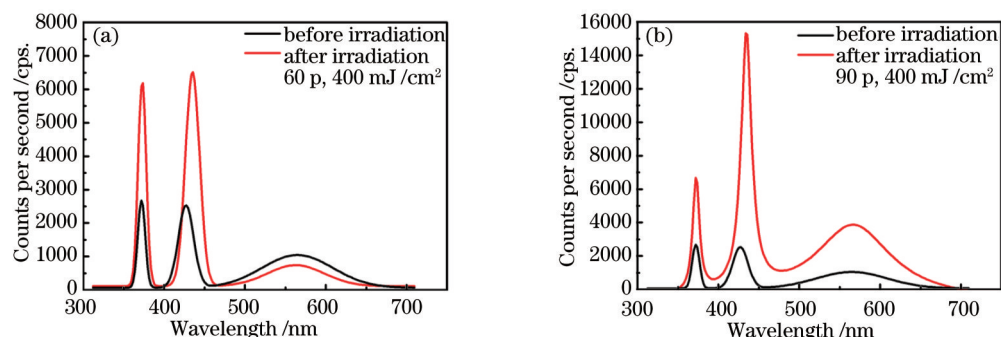


图 2 GaN 外延片在不同激光辐照脉冲数下准分子激光辐照前后的阴极射线发光谱。

(a) 400 mJ/cm², 60 个脉冲; (b) 400 mJ/cm², 90 个脉冲

Fig.2 Cathodoluminescence spectra of GaN epitaxial wafers before and after irradiation.

(a) 400 mJ/cm², 60 pulses; (b) 400 mJ/cm², 90 pulses

3.2 电学性质

表 1 给出了不同参数下准分子激光辐照前后 GaN 外延片的空穴载流子浓度、表面电阻率、载流子迁移率的测量值,激光脉冲重复频率为 3 Hz。可以看出:激光辐照后样品的空穴载流子浓度提高、表面电阻率降低,在 120 个脉冲数、500 mJ/cm² 条件下辐照的样品展现出较佳的电学性质。与空穴载流子浓度的变化相比,激光辐照后载流子迁移率的变化并不显著,而载流子迁移率反映了材料表面结晶质量的好坏,说明采用合适的激光辐照参数不会对样品表面的结晶质量造成很大影响。

248 nm 准分子激光的光子能量约为 5 eV,而 GaN 外延片表面束缚 Mg 受主的氢化物中的 Mg-H 键的键能只有约 0.5 eV,因此准分子激光辐照可以有效地重新激活被氢元素束缚的受主杂质,从而提高材料的电学性质。由于 GaN 会在其外延生长的过程中引入大量的 V_N 缺陷,会造成生长后的 GaN 本身具有很高的背景载流子浓度,使得 p 型掺杂变得很难进行。为此,文中提出解决方案是:将经过准分子激光辐照后的 GaN 外延片进行退火处理,以进一步提高载流子浓度、降低表面电阻率。退火温度设为 500 °C,保温时间为 1 min,升降温速率为 100 °C/h。

表 1 不同参数下准分子激光辐照前后 GaN 外延片的电学性质

Table 1 Electrical properties of GaN epitaxial wafers before and after laser irradiation with different energy densities and pulse numbers

	Hole concentration /cm ⁻³	Sheet resistance /(Ω/sq)	Carrier mobility /(cm ² /V·s)
Before irradiation sample	4.81×10 ¹⁷	15 k	1.81
90 pulses, 400 mJ/cm ² sample	8.32×10 ¹⁷	7.5 k	1.51
120 pulses, 500 mJ/cm ² sample	9.87×10 ¹⁷	7.1 k	1.42
120 pulses, 400 mJ/cm ² sample	8.54×10 ¹⁷	7.7 k	1.37

表 2 激光辐照后的 GaN 外延片在不同气氛下退火处理后的样品的电学性质

Table 2 Electrical properties of irradiated GaN epitaxial wafers before and after annealing in different atmospheres

	Hole concentration /cm ⁻³	Sheet resistance /(Ω/sq)	Carrier mobility /(cm ² /V·s)
Before annealing sample	8.54×10 ¹⁷	7.7 k	1.37
O ₂ -annealing sample	6.38×10 ¹⁷	8.1 k	1.81
N ₂ - annealing sample	1.81×10 ¹⁸	2.8 k	2.62

表 2 列出了对激光辐照后的 GaN 外延片在不同气氛下退火处理后样品的电学性质。可以看出:N₂气氛下退火的样品,其空穴载流子浓度和载流子迁移率约是退火前的两倍,表面电阻率也有所下降,说明 N₂气氛下退火减少了 GaN 中的 V_N 从而提升了材料的电学性能;而在 O₂气氛下退火的 GaN,其空穴载流子浓度下降、电阻率升高,这是由于退火中在样品表面产生了氧化物层,从而影响了 GaN 外延片的电学性能。

GaN外延片与金属电极的欧姆接触会直接影响以GaN为基底的LED器件的发光性能。图3(a)显示激光辐照前后及退火处理的GaN外延片与Ni/Au电极欧姆接触的*I-V*曲线,激光脉冲重复频率为3 Hz,辐照脉冲数为90个,激光能量密度为400 mJ/cm²。从图中可以看出,激光辐照前后样品的*I-V*曲线均显示为整流特性,说明GaN与金属的欧姆接触并未达到较好的状态;而对激光辐照后的样品再进行退火处理后的*I-V*曲线则显示为线性关系,说明经过退火处理的样品其表面电阻率和载流子浓度等电学性质得到了进一步的改善。图3(b)显示激光辐照的GaN样品在不同气氛下退火后的*I-V*曲线。从图中可以看出:经过退火后样品的*I-V*曲线均显示为线性关系,并且在N₂气氛下退火后的样品比在空气中和O₂气氛下退火的样品显示出更好的电学特性。在2V的正向偏压下,其正向电流可以达到约55 μA,高于在O₂以及空气中退火的样品。与图3(a)比较可以发现:在O₂气氛下退火的样品的欧姆特性反而较激光辐照前有所降低,原因是在O₂气氛下退火时,虽然退火温度只有500 °C,但无法避免V_N空位的进一步生成,增加了背景载流子浓度,使得样品的电学性能有所降低。

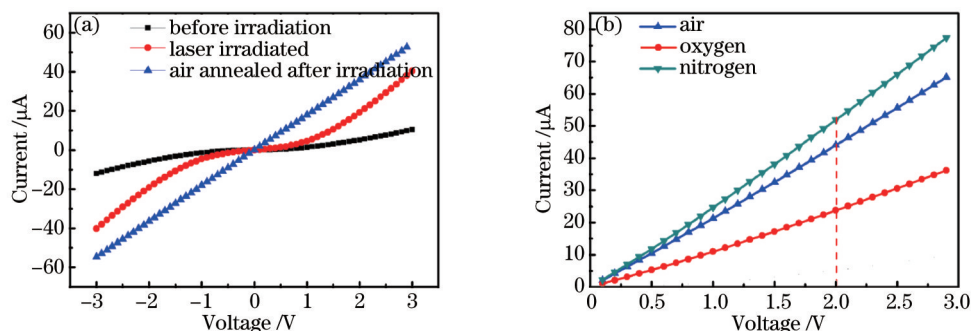


图3 激光辐照前后及辐照后热退火处理的GaN外延片与金属电极Ni/Au的欧姆接触*I-V*特性。

(a) 激光辐照前后以及空气中热退火处理; (b) 激光辐照后在不同气氛下热退火处理

Fig.3 *I-V* characteristics of Ni/Au ohmic contacts on the as-grown, laser-irradiated and annealed GaN epitaxial wafers.

(a) As-grown, laser-irradiated, and annealed in air after laser irradiation; (b) annealed in different atmospheres after laser irradiation

3.3 X射线光电子谱

图4为不同参数下激光辐照前后GaN外延片在Ga 2p附近的X射线光电子谱,激光脉冲频率为3 Hz,激光脉冲数分别为90、120个,激光能量密度分别为400、500 mJ/cm²。

从图4(a)可以看出,经准分子激光辐照后其Ga 2p的芯能级峰向低端能级位移了约0.8 eV,这意味着GaN表面的费米能级会在准分子激光辐照后向价带顶移动,又由于费米能级的位置变化会反映出材料内部载流子浓度的变化,从而说明激光辐照会提高GaN表面的空穴载流子浓度。从图4(a)中的分峰结果可知,激光辐照前后GaN表面均含有Ga-O键,而氧化物层,尤其在外延材料分层界面处的氧化物层的厚度对于材料与电极间的欧姆接触特性有很大影响。可以看出,经过准分子激光辐照,Ga氧化物含量有了较明显的降低,从而

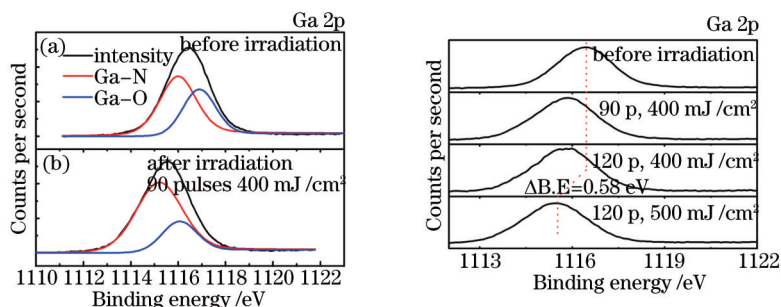


图4 不同参数下激光辐照前后GaN外延片Ga 2p峰附近的X射线光电子谱。(a)经90个脉冲,400 mJ/cm²的准分子激光辐照前后的GaN材料Ga 2p峰的X射线光电子谱分峰图; (b)经不同准分子激光参数辐照后的Ga 2p峰的X射线光电子谱

Fig.4 Ga 2p XPS spectra of the GaN epitaxial wafers before and after laser irradiation with different irradiation parameters.

(a) Deconvolution of the Ga 2p XPS peak spectra of the GaN epitaxial wafers before and after laser irradiation with 90 pulse numbers and 400 mJ/cm² energy density; (b) Ga 2p XPS spectra of the GaN epitaxial wafers with different laser energy densities

大大提升了 GaN 外延片与金属电极的欧姆接触效果,降低了空穴注入的势垒高度,增加了空穴注入的效率,提高了器件的工作寿命。图 4(b)是在不同的激光辐照参数下辐照 GaN 外延片后,样品的 Ga 2p 峰的 X 射线光电子谱。可以看出,在图示所有辐照条件下,激光辐照后 Ga 2p 峰均向低能级端移动,说明其费米能级都向价带顶移动,材料的载流子浓度等电学性质得到了改善。

3.4 LED 的发光性能

为了将提升 GaN 外延片的发光和电学性能与以其为基底的 LED 的发光性能联系起来,将激光辐照、及激光辐照并退火后的 GaN 外延片通过封装工艺制成 LED 灯珠,并测试其主要电压电流特性以及发光性能。图 5 为激光辐照 GaN 外延片制成的 LED 器件的正向偏压(正向电流为 20 mA)和反向漏电流(反向电压为 5 V)与激光辐照能量密度间的关系曲线,激光辐照脉冲数为 90,脉冲重复频率为 3 Hz。

从图 5 中可以看出,当激光辐照能量密度在 600 mJ/cm²以下时,LED 器件正向偏压和反向漏电流均随着脉冲能量密度的增加而降低,这说明此时激光辐照作用会改善 LED 器件的电学性能,使得在相同的注入电流下,产生更小的正向压降,这对于提高 LED 器件的发光效率有重要意义,并且反向漏电流的降低说明金属与半导体间的欧姆接触特性变好,提升了 LED 器件整体的发光特性以及工作时的稳定性,这里要说明的是,还对以未辐照的 GaN 外延材料为基底的 LED 器件做了电流电压特性的测试,测试结果为:当正向电流为 20 mA 时,LED 器件的正向偏压为 4.6 V;当反向电压为 5 V 时,LED 器件的反向漏电流为 0.38 μA,说明经过准分子激光辐照作用后 LED 的电学特性得到了改善。

从图中可以看出当激光辐照能量密度达到 600 mJ/cm²时,反向漏电流随着激光能量密度的增加,改善趋于停滞,这意味着在激光辐照能量密度为 600 mJ/cm²时,由于激光脉冲能量达到了 GaN 材料表面的热损伤阈值,使得材料表面的结晶质量降低,其许多电学和光学性质都受到了不利影响,相应的 LED 器件的电学和发光性能亦会受到影响。

图 6 显示激光辐照及激光辐照并退火后的 GaN 外延片制成的 LED 灯珠的发光性能与激光辐照能量密度的关系曲线,激光辐照脉冲数为 90,脉冲重复频率为 3 Hz。从图中可以看出:三条测试曲线与纵轴的交点即表示为未经过辐照作用样品的 LED 光出射功率,当激光能量密度小于 600 mJ/cm²时,LED 的光出射功率得到了改善,并随着能量密度的增大而提高;但当激光能量密度大于 600 mJ/cm²时,LED 的光出射功率明显下降,这是因为过高的激光辐照能量密度破坏了 GaN 表面的结晶质量,影响了 LED 的发光性能。从图 6 还可看出:激光辐照后在 N₂气氛下退火的 GaN 外延片制成的 LED 的发光功率比未经激光辐照且未退火后的提高约 37%;而激光辐照后在 O₂气氛下退火的 GaN 外延片制成的 LED 的发光功率较激光辐照但未退火的在能量密度 400 mJ/cm²以上范围明显下降。从图中得知,在对 GaN 进行辐照后,分别在 O₂与在 N₂下的退火出现了不同的结果。在 N₂下退火的样品的发光功率进一步得到了提升,而在 O₂下退火的样品的发光功率较辐照后的样品甚至出现了下降的现象。退火的结果反映了在不同气氛下进行的退火会影响 GaN 材料表面氮空位(V_N)

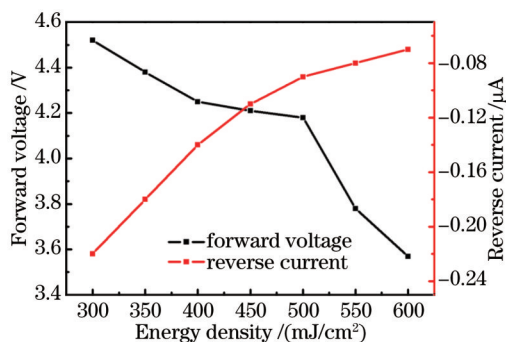


图 5 经过封装工艺制成的 LED 器件的正向偏压和反向漏电流与激光辐照能量密度间的关系曲线

Fig.5 Forward current - voltage and reverse current characteristics of the LED irradiated with different laser energy densities

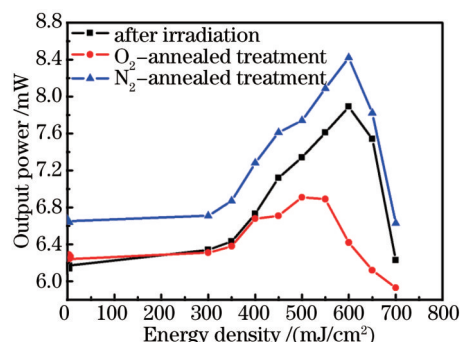


图 6 经辐照后的样品与在不同气氛下退火后的样品的发光性能(正向电流为 20 mA)与辐照能量密度(辐照激光脉冲数为 90,脉冲重复频率为 3 Hz)的关系曲线

Fig.6 Light output power (forward current 20 mA) of the samples with different laser energy densities (3 Hz, 90 pulses) and annealing treatment in different atmospheres

缺陷密度以及表面氧化物含量。当材料在 N_2 下进行退火时,会使材料表面氮空位缺陷密度降低,进而使得材料的载流子补偿效应减弱,使得空穴载流子浓度得到提升;而当材料在 O_2 下进行退火时,表面残留的氧化物会使得材料的各项电学特性变差,进而影响以其为基底的LED器件的发光性能。

4 结 论

采用248 nm准分子激光辐照了GaN外延片,并对辐照后的样品进行了退火处理;研究了激光辐照以及退火对GaN外延片电学和发光性能以及以其为基底的LED发光性能的影响。结果表明:激光辐照与在 N_2 气氛下退火相结合的方法可以较大幅度地提升GaN外延片的电学与发光性能以及LED器件的发光性能,经测试,其LED器件的光出射功率与未进行辐照与退火处理的样品相比可提升约37%。其改性机理主要是:准分子激光会打断GaN外延片中的Mg-H键,从而激活受主杂质; N_2 气氛下退火会使 V_N 空位缺陷密度下降,导致材料背景载流子浓度降低,使GaN电学性质得到改善。

参 考 文 献

- 1 Pearton S J, Zolper J C, Shul R J, *et al.*. GaN: Processing, defects, and devices[J]. *J Appl Phys* 1999, 86(1): 1-78.
- 2 Reshchikov M A, Morkoc H. Luminescence properties of defects in GaN[J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(6): 061301.
- 3 Rhode S K, Horton M K, Kappers M J, *et al.*. Mg doping affects dislocation core structures in GaN[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 111(2): 025502.
- 4 Chen Xinlian, Kong Fanmin, Li Kang, *et al.*. Improvement of light extraction efficiency of GaN-based blue light-emitting diode by disorder photonic crystals[J]. *Acta Phys Sinica*, 2013, 62(1): 017805.
陈新莲, 孔凡敏, 李 康, 等. 无序光子晶体提高GaN基蓝光发光二极管光提取效率的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(1): 017805.
- 5 Lin Y J, Liu W F, Lee C T. Excimer-laser-induced activation of Mg-doped GaN layers[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(14): 2515-2517.
- 6 Xie Shiyong, Zheng Youdou, Chen Peng, *et al.*. Photoluminescence of Mg-implanted GaN[J]. *Chinese J Semiconductors*, 2002, 23(2): 149-152.
谢世勇, 郑有焯, 陈 鹏, 等. 氮化镓注镁(Mg: GaN)的光致发光[J]. *半导体学报*, 2002, 23(2): 149-152.
- 7 Zhou Maiyu, Zhou Lei, Zheng Nan, *et al.*. Investigation on properties of p-i-n structured GaN photodetectors[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0117001.
周脉鱼, 周 蕾, 郑 南, 等. p-i-n结构GaN光电探测器性能的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0117001.
- 8 Bennett S E. Dislocations and their reduction in GaN[J]. *Mater Sci Tech Lond*, 2010, 26(9): 1017-1028.
- 9 Kim D J, Kim H M, Han M G, *et al.*. Effects of KrF (248 nm) excimer laser irradiation on electrical and optical properties of GaN: Mg [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2003, 21(2): 641-644.
- 10 Pearton S J, Deist R, Ren F, *et al.*. Review of radiation damage in GaN-based materials and devices[J]. *J Vac Sci Technol A*, 2013, 31(5): 050801.
- 11 Wang G H, Wong T C, Wang X C, *et al.*. Reduced contact resistance and improved surface morphology of Ohmic contacts on GaN employing KrF laser irradiation[J]. *Jap J Appl Phys*, 2011, 50(4S): 04DF06.
- 12 Oh M S, Hwang D K, Lim J H, *et al.*. Low resistance nonalloyed Ni/Au Ohmic contacts to p-GaN irradiated by KrF excimer laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(4): 042107.
- 13 Zhao Man, Zhao Mei, Fan Xiuying, *et al.*. Effects of thermal annealing on the properties of GaN metal-semiconductor-metal UV photodetectors[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 822-825.
赵 曼, 赵 梅, 范秀英, 等. 热退火对氮化镓金属-半导体-金属结构紫外光电探测器性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 822-825.
- 14 Yu Liyuan, Niu Pingjuan, Xing Haiying, *et al.*. Influence of electron beam irradiation on the luminescence properties of GaN-based LED[J]. *Chinese J Luminescence*, 2012, 33(8): 869-872.
于莉媛, 牛萍娟, 邢海英, 等. 电子束辐照对GaN基LED发光性能的影响[J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 869-872.
- 15 Wang X C, Lim G C, Liu W, *et al.*. Effects of 248 nm excimer laser irradiation on the properties of Mg-doped GaN[J]. *Appl Surf Sci*, 2005, 252(5): 2071-2077.

栏目编辑: 张浩佳