

文章编号: 1000-7032(2016)07-0778-08

石墨烯应用于 GaN 基材料的研究进展

徐昌一*

(发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 石墨烯具有优异的光学、电学、机械等特性, 被视为新型材料的突破口; GaN 基材料具有直接宽禁带、热稳定性强、高功率等性质, 已经成为“继硅之后最重要的半导体材料”。将石墨烯与 GaN 基宽禁带半导体材料相结合, 发挥两种材料体系的优势, 将为光电子、微电子器件的发展带来新的契机。关于石墨烯与 GaN 基材料相结合的研究目前已经有所突破, 本文简要概述了近年来石墨烯与 GaN 基材料接触机理方面和石墨烯应用于 GaN 基材料器件方面的进展状态。

关 键 词: 石墨烯; GaN 材料; 石墨烯 GaN 接触

中图分类号: O484

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20163707.0778

Graphene Applied to GaN Based Materials

XU Chang-yi*

(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: xuchangyi19890718@163.com

Abstract: Due to its special structure, graphene has very good optical, electrical, mechanical and other properties, and it is regarded as a breakthrough of the new materials. Thanks to the wide band gap, thermal stability, high working power and other properties, GaN based materials have become “the most important, after the silicon semiconductor material.” It will bring great benefits for the photoelectric and microelectric devices if the graphene can be successfully combined with GaN based materials. There have already been some breakthroughs in the research of combination of graphene and GaN based materials. This paper briefly summarized recent findings of physical mechanisms of the contact between graphene and GaN-based materials and the researches of the applications of graphene to the GaN-based materials.

Key words: graphene; GaN-based materials; graphene contacts with GaN-based material

1 引 言

GaN 基材料属于宽禁带直接带隙半导体材料, 键合能很大, 具有良好的化学稳定性和热稳定性。理论上, GaN 可以与 AlN、InN 等形成组分连续可变的三元固溶体合金 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

和四元固溶体合金 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 。其禁带宽度在 0.7 ~ 6.2 eV 连续可调, 对应的波长从近红外覆盖到紫外波段。GaN 基材料有效地避免了 Si 材料间接带隙的不足, 该材料制造的 LED 寿命甚至可以超过 10 万小时, 而能耗仅为白炽灯的 10% ~ 20%。GaN 材料也可用于制备光探测器,

尤其在制备日盲紫外波段的光探测器方面可以发挥重要作用。利用 GaN 材料制备新型太阳能电池的相关研究也具有重要价值。GaN 材料在制造高频大功率器件和耐高温、抗辐照半导体微电子器件上也具有先天优势^[1-5]。然而, GaN 基材料到目前为止仍然存在很多不足, 人们一直在寻找能够解决 GaN 材料“高密度位错、工作速度慢、散热性能不良、高集成和互联难度大”这些问题的解决途径。

石墨烯的厚度仅为 0.34 nm, 是人类目前为止发现的最薄的二维材料。石墨烯中碳原子紧密排列构成蜂窝状苯六元环晶体结构^[6-7], 每个晶格中有 3 个 σ 键, 碳原子间以 sp^2 杂化方式牢固连接, 键长为 0.142 nm。每个碳原子贡献一个 p 轨道电子, 形成了垂直于晶面上的 π 键, π 电子可以自由活动。其电子结构能量很低, 在迪拉克点处电子和空穴的圆锥形能带相遇^[6-12]。

石墨烯的发现给解决 GaN 材料的这些问题带来了新的思路。首先, 石墨烯的优良导热性有望解决 GaN 微电子器件的散热问题: 石墨烯的导热系数为 $5\,300\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 是铜的 10 倍^[9-10]。若将石墨烯作为 GaN 器件的电极, 有望解决 GaN 材料器件的散热问题。其次, 石墨烯优良的导电性有望提高 GaN 材料器件的工作速度。石墨烯的电子迁移率非常高 ($200\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 是硅中电子迁移率的 100 倍以上, 同时石墨烯的电导率也可高达 10^6 S/m , 这些性能远远超过人类之前用来制造电子器件的绝大部分导电材料^[11], 因而若能成功实现应用, 将非常成功地解决 GaN 材料器件工作速度不足的问题, 而且可以进一步解决 GaN 材料器件的散热问题。

此外, 石墨烯的高透光性能有望改善 GaN 材料器件的透光性。石墨烯在可见光范围内的透光性为 97.7% 且透光分布均匀^[11-12], 与传统的 ITO 电极相比具有很大优势, 如果可以用石墨烯作为 GaN 基激光器、LED、探测器等光电器件的透明电极, 将大大提高 GaN 材料器件的透光性。

石墨烯的属性可调的性质有望改善 GaN 材料由于生长造成的缺陷。半导体属性的石墨烯其禁带宽度与石墨烯纳米带宽度成正比, 利用这一性质有望钝化 GaN 材料表面缺陷。

最后, 石墨烯超强的机械强度有望改善 GaN 材料器件的集成互联问题。石墨烯的抗拉强度可

以达到 $42\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, 是钢铁拉伸强度的 100 倍^[6-7], 可以用该性质有效改善 GaN 材料制备的光电子器件和微电子器件存在的集成互联问题。

2 石墨烯与 GaN 接触的物理机制

研究石墨烯与 GaN 接触的性质, 有利于设计出更好的石墨烯-GaN 器件。在接触的理论分析建模方面近年来有所突破。研究人员在石墨烯与 GaN 接触形成肖特基接触后电荷转移机理方面开展了深入的研究。

Tongay 等^[13]为了探究石墨烯与半导体接触的物理机制, 首次利用 CVD 生长法制备的单层石墨烯分别与 Si、GaAs、4H-SiC 以及 GaN 形成肖特基接触。他们利用热电子发射理论以金属-半导体接触形成肖特基势垒模型对上述几种接触样品进行计算, 发现实验结果与理论计算结果基本符合, 但总是存在误差, 说明热电子发射金属半导体肖特基模型可以粗略解释但并不完全适用于石墨烯与半导体接触。金属与半导体接触形成肖特基势垒和内建电场时, 费米能级仍然保持不移动。在反向偏压过高时, 石墨烯与半导体接触表现出了不同的性质。通过拉曼测试发现, G 峰与 2D 峰位置有所变化。拉曼光谱中 G 峰与 2D 峰受到石墨烯中费米能级的影响, 因而可以说明石墨烯的费米能级在接触后发生了移动。由于其态密度很低, 石墨烯的费米能级在石墨烯与半导体接触后伴随着界面电荷转移和电荷漂移从而影响到其位置。费米能级、功函数的变化导致石墨烯与半导体形成肖特基二极管的电流和肖特基势垒高度发生变化。

我国苏州纳米所的 Zhong 等^[14-15]在研究中发现, 石墨烯与 GaN 接触的物理机制与金属-GaN 材料接触不同。金属与半导体接触电荷的转移只发生在金属与半导体界面和半导体中。如图 1 所示, 石墨烯与 GaN 材料接触后, 由于态密度较低和线性态密度的特征, 正负电荷在石墨烯端的累积会使得单层石墨烯的功函数产生浮动, 石墨烯的费米能级会向着 GaN 材料的费米能级方向发生自适应移动。石墨烯与 GaN 材料界面间的电荷转移打破了石墨烯原有的电子和空穴平衡, 当电子从 n 型半导体转移到石墨烯时, 石墨烯的费米能级向 n 型 GaN 的费米能级方向得到抬升, 肖特基势垒降低; 石墨烯与 p

型 GaN 接触时,空穴从 GaN 材料向石墨烯转移,石墨烯受到空穴的影响费米能级降低,肖特基势垒同样降低。同时考虑到接触过程中产生的接触电势差以及表面态对接触势垒产生的影响等物理因素,最后该实验小组建立了针对石墨烯与半导体接触的肖特基势垒模型,并利用实验数据验证了该模型的可行性。

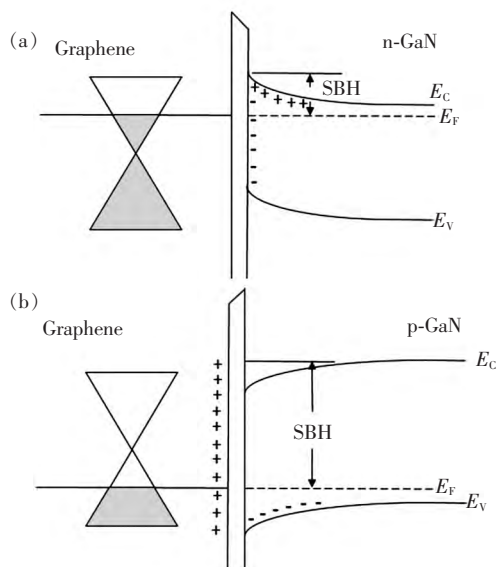


图 1 石墨烯与 GaN 材料接触的能带结构。石墨烯与 n 型 GaN 接触 (a); 石墨烯与 p 型 GaN 接触 (b)。

Fig. 1 Band structure of graphene contacts with GaN materials: graphene contacts with n-type GaN materials (a), graphene contacts with p-type GaN materials (b).

不但石墨烯与半导体接触其费米能级会发生漂移,而且石墨烯与金属的接触也会造成石墨烯费米能级的漂移,石墨烯端费米能级的漂移可以看作是金属接触对石墨烯进行 n 型或 p 型掺杂。一般来说,当石墨烯的功函数大于金属功函数时,对石墨烯发生电子掺杂,费米能级向上抬升,例如石墨烯与 Al、Ag、Cu 等金属接触;当石墨烯的功函数小于金属功函数时,对石墨烯发生空穴掺杂,费米能级向下移动,如石墨烯与 Au、Pt 等金属接触^[16]。因而在研究石墨烯与 GaN 材料接触的过程中,往往存在使用不同探针或是不同电极对石墨烯与 GaN 材料接触后的肖特基势垒高度的测量得出结果不同的情况。针对此种情况,应该在石墨烯与 GaN 材料接触发生费米能级漂移的模型中进一步考虑金属对石墨烯的掺杂作用。利用该性质,也可以对石墨烯与 GaN 材料接

触的肖特基势垒高度进行适当调节。

二维电子气很强是 GaN 材料的一大特点。Fisichella 等^[17]针对 GaN 材料的二维电子气对石墨烯与 GaN 材料接触的影响以及不同种类金属对石墨烯具有掺杂的作用,在纳米尺度上通过实验数据进行了详细的分析,从而较为完善地解释了石墨烯与 GaN 材料形成肖特基接触的内在物理机制,并总结了石墨烯与 GaN 材料接触后纵向电流传导规律。

进一步利用石墨烯受到金属掺杂的性质, Park 等^[18]在 Cr 与 AlGaIn/GaN 之间插入 CVD 法制备的单层石墨烯,获得了欧姆接触,并且避免了 AlGaIn/GaN 端面层二维电子气对电流传输产生的影响。这一方法操作简单,可以省掉高温退火等工艺。Cr 的功函数为 4.28 eV,与石墨烯接触后可以将石墨烯的功函数锁定在 4.28 eV。Cr 单独与 AlGaIn 接触形成肖特基势垒高度为 0.8 eV, Cr 与 AlGaIn/GaN 接触受到二维电子气的作用会产生高度为 0.3 V 的阈值电压。石墨烯单独与 AlGaIn/GaN 接触也呈现肖特基接触性质,而 Cr/graphene/AlGaIn/GaN 却表现出明显的欧姆接触特性(电阻率为 $2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)。在 Cr/graphene/AlGaIn/GaN 二极管中, $I-V$ 特性曲线表明二维电子气造成的阈值电压消失,说明 AlGaIn 中的势场为 0。Cr/graphene 表现出经过掺杂的 n 型 GaN 的性质,提供了与 AlGaIn/GaN 相近的功函数,因而在接触后形成了欧姆接触。

研究人员分析了石墨烯褶皱对 GaN 接触的影响,在这一新的方向得到了有趣的发现。褶皱可以作为载流子通道,在石墨烯与 GaN 材料接触过程中表现出欧姆接触的性质。用密度函数理论分析褶皱,发现不同方向褶皱(armchair 方向和 zigzag 方向)性质不同,并且褶皱会影响费米能级的上下移动,从而通过石墨烯的褶皱可以调节载流子输运性能。无论是质量多么良好的石墨烯,在生产、转移以及在与其它材料接触的过程中都会或多或少产生褶皱。往往由于褶皱的不确定性,人们在研究石墨烯时一般都排除褶皱寻找平坦位置进行研究。而 Zhong 等^[19]近来发现,利用石墨烯的褶皱可以与 n 型和 p 型 GaN 形成良好的欧姆接触。他们在测试中发现,石墨烯的褶皱可以形成载流子的传导通道改善电流传导并调节费米能级高度,从而使石墨烯与 GaN 呈现出欧姆

接触的特性;而石墨烯平整的部分却与 GaN 产生的是肖特基接触,电流传导性质不如褶皱的部位。如图 2 所示,石墨烯的不同形状的褶皱可以降低或提高局域功函数使得局域费米能级向着 n 或 p 型 GaN 方向转移。石墨烯的褶皱分为 arm-chair 和 zigzag 两种形状,通过态密度理论计算结果可知 zigzag 边缘形状的石墨烯的褶皱会明显地降低势垒高度,提高载流子通过势垒的概率从而形成了欧姆接触;而 armchair 形状褶皱则会抬高势垒高度。zigzag 方向褶皱可以降低局域功函数,石墨烯类似于发生 n 型掺杂,因而功函数与 n 型 GaN 的功函数相近,在 n 型 GaN 接触后降低了势垒高度,促进载流子在正向和反向偏压下通过石墨烯与 n 型 GaN 界面。armchair 方向褶皱的局域功函数上升,石墨烯类似于发生 p 型掺杂,因而功函数与 p 型 GaN 的功函数相近,在与 p 型 GaN 接触后降低了势垒高度,促进了载流子通过石墨烯与 p 型 GaN 界面。

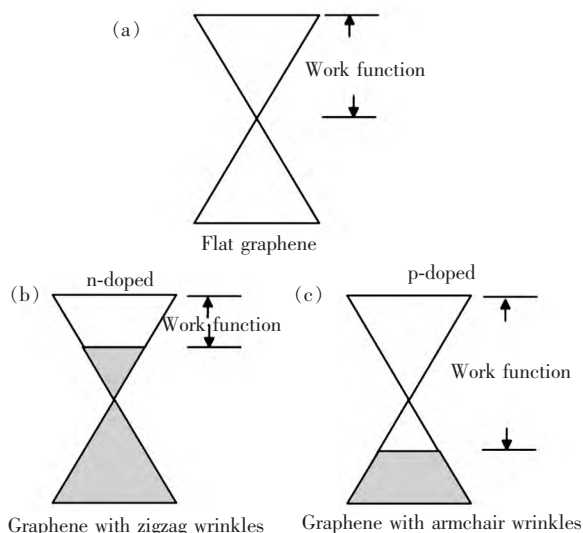


图2 平坦石墨烯能带结构(a); zigzag 形状褶皱的石墨烯功函数降低,相当于发生 n 型掺杂(b); armchair 形状褶皱的石墨烯功函数降低,相当于发生 p 型掺杂(c)。

Fig. 2 Energy band diagram of flat graphene (a). Energy band diagram of graphene with zigzag wrinkles, zigzag wrinkles decrease the work function, forming n-doped graphene (b). Energy band diagram of graphene with armchair wrinkles, armchair wrinkles raise the work function, forming p-doped graphene (c).

3 石墨烯在 GaN 基器件中的应用

在研究石墨烯与 GaN 接触的基础上,研究人

员还利用石墨烯对光具有良好的透射性、良好的电流传导性能、超强的机械强度以及优良的导热性等特点,将石墨烯应用于 GaN 基器件制备中,改善了器件的性能。

GaN 材料在较大功率工作状态下,容易产生较大热量,GaN 材料的工作电流会受到影响而产生漂移,使得工作效率降低。Tongay 等^[20]利用石墨烯的良好热稳定性和导热性以及机械性能,将石墨烯与 GaN 材料接触产生肖特基势垒,制备肖特基二极管。该肖特基二极管能够在 300 ~ 550 K 温度范围内正常工作,高于 650 K 时整流功能消失。将该二极管在 900 K 高温下退火后,他们发现二极管在室温环境下的整流作用有所增强。退火能够减弱杂质的作用,并且降低石墨烯与 GaN 形成的肖特基势垒高度,因而二极管的整流功能得到增强。Yan 等^[21]同样利用石墨烯优良的导热性,在 GaN 基大功率电压转换器上将石墨烯作为工作器件与散热片相互连接的导热带,起到了比金属导热带更好的导热效果,从而提高了电压转换器的工作效率,并且大大缩小了电压转换器的体积。

良好的透光性和导电性使得石墨烯在制备 GaN 材料光电器件中有望作为新型电极。

为了研究石墨烯的透光性与传统电极的透光性的优势,Weber 等^[22]对比测试了 8 nm 厚石墨烯、24 nm 石墨烯以及氧化铟锡(ITO) 3 个样品在可见光-紫外范围(200 ~ 800 nm)的透光性质。8 nm 厚石墨烯的透光性整体比 24 nm 厚度石墨烯的透光性要好,在 200 ~ 375 nm 光波段,ITO 的透光率不如两个石墨烯样品;而在 375 ~ 800 nm 波段,ITO 的透光性能在两个石墨烯样品之间——低于 8 nm 而高于 24 nm 石墨烯。因而可以确定,利用石墨烯代替传统的 ITO 作为光电器件的透明电极是有前景的。

Kim 等^[23]利用大面积 CVD 方式生长的石墨烯代替传统 GaN 紫外发光二极管的氧化铟锡电极(ITO),获得了具有更好的电流传导和发光性能的 LED。与传统 ITO 相比,石墨烯可以为 LED 提供更好的电流传导和紫外光透射率。他们首先做出一个与 Weber 等^[22]相类似的实验,并得到与其相吻合的结果,从而确定了利用单层石墨烯制作透明导电电极进行实验的可行性。他们采用腐蚀、转移等手段,将面积较大的石墨烯成功转移

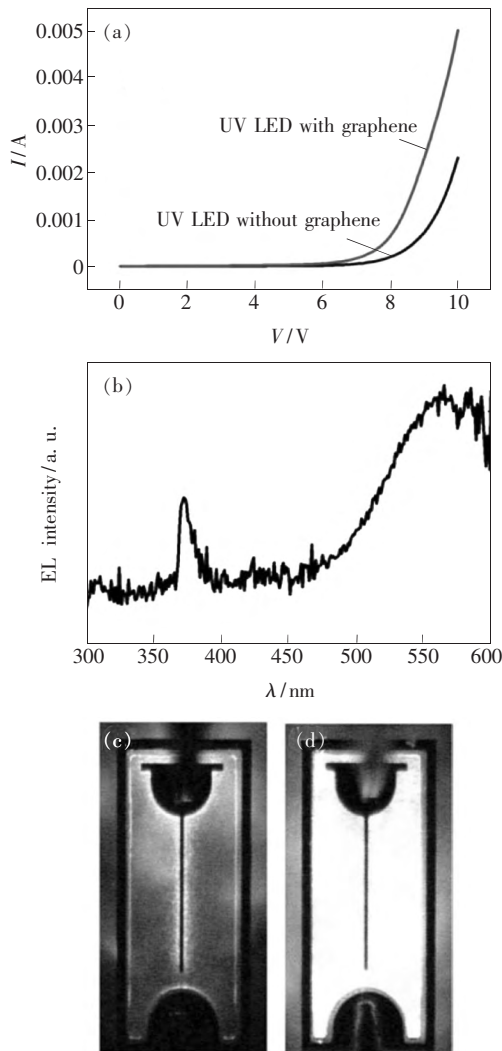


图3 (a) 有无石墨烯作为透明导电电极的紫外 LED 的 I - V 特性曲线; (b) 紫外 LED 的电致发光光谱; (c) 没有石墨烯作为透明导电电极的 LED 发光照片; (d) 石墨烯作为透明导电电极的 LED 发光照片^[23]。

Fig. 3 (a) I - V characteristics of UV LED with and without FLG-based transparent conductive electrode. (b) EL spectrum of UV LEDs. (c) Optical images of light emission of UV LEDs without LG-based transparent conductive electrode. (d) Optical images of light emission of UV LEDs with FLG-based transparent conductive electrode^[23].

到了 GaN 基底上,最后通过刻蚀工艺制备出紫外 LED。如图 3 可知,ITO 作为透明电极的 LED 发光位置只局限于电极边缘,而石墨烯作为透明电极的 LED 发光面积几乎覆盖了整个有石墨烯接触的部分。Lin 等^[24]将石墨烯作为透明导电电极应用于紫外-可见光双色探测器的设计当中。石

墨烯与 GaN 接触产生肖特基势垒,利用石墨烯的优良导电性和透光性,能够有效提高探测器的探测效率。并且利用石墨烯在可见光范围内受到光照会产生热电子从而对可见光有响应这一特点,可以实现紫外与可见光的双色探测功能。

Seo 等^[25]同样采用石墨烯作为透明导电电极(TCSE)制备氮化物深紫外 LED(380 nm),通过对比实验验证了石墨烯在紫外波段的透射率远远大于 ITO。在此基础上,他们又制备了另外两个样品:在 GaN 与石墨烯之间利用电子束蒸发和退火的方式获得金纳米簇;在 GaN 与石墨烯之间利用电子束蒸发金层。将这两种样品进行对比试验,最后得到在紫外投射性能、减少层间电阻、降低接触造成的肖特基势垒高度等综合特性上,含有金纳米簇石墨烯-GaN 紫外 LED 能进一步发挥更好的作用。该研究工作给石墨烯应用于 GaN 基材料 LED 的领域提出了新的发展方向,即在石墨烯与 GaN 材料之间插入金属层、金属纳米结构

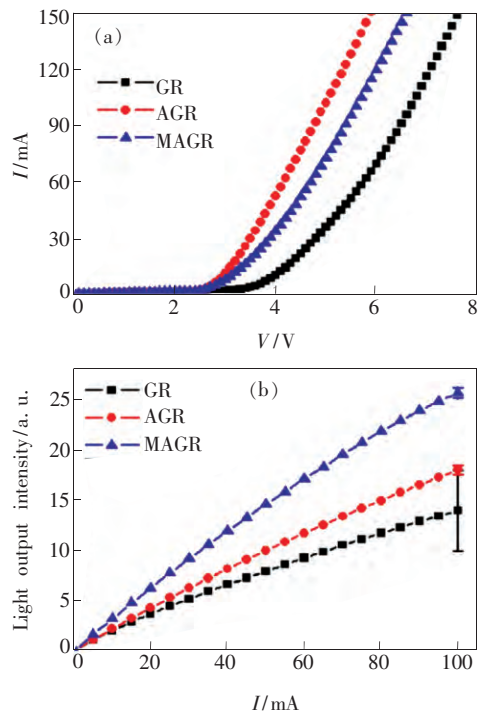


图4 只有石墨烯(GR)、全区域覆盖银纳米颗粒(AGR)、选择区域图形式覆盖银纳米颗粒(MAGR) 3 种样品的 I - V 特性 (a) 和光输出特性 (b)^[26]。

Fig. 4 I - V characteristics (a) and light output characters (b) of the only graphene covered(GR), all area graphene and silver nanoparticles covered(AGR), and selected area graphene and silver nanoparticles covered(MAGR) samples, respectively^[26].

等方式来改善石墨烯与 GaN 材料的接触。

Shim 等^[26]在设计 GaN 蓝光 LED 时,承接了将金属纳米结构应用于石墨烯-GaN 器件这一思想。该实验小组将石墨烯转移到 GaN 材料上作为透明导电电极后,在石墨烯上附着一层银纳米簇,利用光刻技术制备掩膜、ICP(Inductive coupled plasma etching)和 RIE(Reactive ion etching)等技术,制备了 3 种不同样品:只有石墨烯(GR);全区域覆盖银纳米颗粒(AGR);选择区域图形化覆盖银纳米颗粒(MAGR)。由图 4 可知,随着石墨烯上银纳米簇数量的增多,LED 的串联电阻响应减小。3 个样品的发光性能都比普通 ITO 电极 LED 要强,且 AGR 与 MAGR 所表现出的发光特性比只有石墨烯的样品的发光特性要强而且稳定。在 100 mA 电流注入时,MAGR 样品表现出最良好的输出特性,是 GR 样品的 1.7 倍,比 AGR

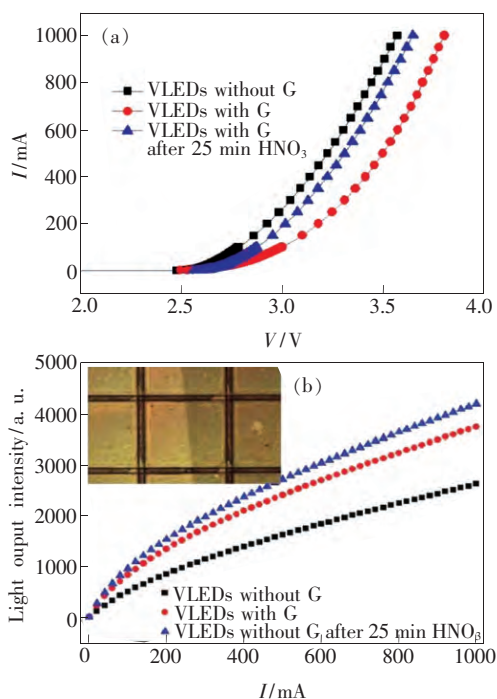


图5 (a) 有无酸处理的石墨烯电极 LED 的正向偏压 I - V 特性; (b) 经过酸处理的 LED 的不同正向偏压电流的光输出特性。插图: 被石墨烯部分覆盖的 LED 照片^[27]

Fig. 5 (a) Forward I - V curves of LEDs before and after acid doping. (b) Light output power of LEDs with different forward current. Inset shows the optical image of LED with partially coated graphene^[27].

样品高出 82%。银纳米簇本身起着传导电荷以及起到石墨烯间电荷传导桥梁的作用,增加了石墨烯层的电学传导性,增多了石墨烯电流的传输途径,因而利用自组装银纳米簇并且适当调节图形结构和纳米簇尺寸可以有效改善器件的电学和光学性能。

通过引入金属层、金属纳米结构等方式虽然可以有效改善石墨烯应用于 GaN 器件的电学、光学特性,但是在应用于制备较大型器件以及大规模生产过程中,由于工艺复杂导致制备过程依然存在困难。研究人员通过采用酸处理的方法,替代了如上复杂工艺,有效地改善了石墨烯-GaN 器件的性能。如图 5 所示,Das 等^[27]将石墨烯作为 GaN 太阳能电池的透明导电电极后,利用不同浓度的硝酸溶液对太阳能电池进行浸泡。结果发现,随着硝酸浓度增高太阳能电池性能逐渐增强,经过硝酸处理的太阳能电池样品的转换效率比没有经过硝酸处理的太阳能电池的转换效率高 3 倍以上。通过观察费米能级的移动可知硝酸发挥电催化作用对石墨烯产生类似 p 型掺杂导致费米能级移动,降低了电阻率和势垒高度,改善了太阳能电池石墨烯层与 GaN 层之间的载流子传输。如图 3 中所示,Wang 等^[28]同样利用硝酸对石墨烯作透明导电电极的 n 型和 p 型 GaN 发光二极管进行处理,实验结果表明利用硝酸进行 25 min 处理的 LED 光输出功率可提高 19%,酸处理可以有效提高 LED 的电导率和降低正向开启电压,提升电流电压特性,从而提高 LED 的发光效率。硝酸对石墨烯进行浸泡的过程中,电子从石墨烯向硝酸溶液转移,石墨烯发生 p 型掺杂,费米能级向更低的能量方向漂移,LED 的工作状态因而得到提高。

4 结 论

石墨烯与 GaN 基材料是两种具有重要研究价值以及优良性质的材料。将石墨烯应用于 GaN 基材料有望改善 GaN 基材料的不足,该领域的研究目前已经有所突破。未来利用石墨烯改善 GaN 材料将会制备出更优良的器件,进一步优化石墨烯与 GaN 材料接触的物理机理将会对该领域的研究提供有意义的指导和帮助。

参 考 文 献:

- [1] BERNARDINI F, FIORENTINI V, VANDERBILT D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides [J]. *Phys. Rev. B*, 1997, 56(16): R10024-R10027.
- [2] YU E T, DANG X Z, ASBECK P M, *et al.*. Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III-V nitride heterostructures [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1999, 17(4): 1742-1749.
- [3] GUO Q X, YOSHIDA A. Temperature dependence of band gap change in InN and AlN [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, 33(Part 1, 5A): 2453-2456.
- [4] WU J, WALUKIEWICZ W, SHAN W, *et al.*. Temperature dependence of the fundamental band gap of InN [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(7): 4457-4460.
- [5] MONROY E, GOGNEAU N, ENJALBERT F, *et al.*. Molecular-beam epitaxial growth and characterization of quaternary III-nitride compounds [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(5): 3121-3127.
- [6] HIRSCH A. The era of carbon allotropes [J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9(11): 868-871.
- [7] STANKOVICH S, DIKIN D A, DOMMETT G H B, *et al.*. Graphene-based composite materials [J]. *Nature*, 2006, 442(7100): 282-286.
- [8] BOLOTIN K I, SIKES K J, JIANG Z, *et al.*. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene [J]. *Solid State Commun.*, 2008, 146(9-10): 351-355.
- [9] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W Z, *et al.*. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. *Nano Lett.*, 2008, 8(3): 902-907.
- [10] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene [J]. *Nat. Mater.*, 2007, 6(3): 183-191.
- [11] NAIR R R, BLAKE P, GRIGORENKO A N, *et al.*. Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. *Science*, 2008, 320(5881): 1308-1308.
- [12] LEE C, WEI X D, KY SAR J W, *et al.*. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [13] TONGAY S, LEMAITRE M, MIAO X, *et al.*. Rectification at graphene-semiconductor interfaces: zero-gap semiconductor-based diodes [J]. *Phys. Rev. X*, 2012, 2(1): 011002-1-40.
- [14] ZHONG H J, LIU Z H, XU G Z, *et al.*. Self-adaptive electronic contact between graphene and semiconductors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(12): 122108-1-4.
- [15] ZHONG H J, XU K, LIU Z H, *et al.*. Charge transport mechanisms of graphene/semiconductor Schottky barriers: a theoretical and experimental study [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 115(1): 013701-1-9.
- [16] GIOVANNETTI G, KHOMYAKOV P A, BROCKS G, *et al.*. Doping graphene with metal contacts [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101(2): 026803-1-4.
- [17] FISICHELLA G, GRECO G, ROCCAFORTE F, *et al.*. Current transport in graphene/AlGaIn/GaN vertical heterostructures probed at nanoscale [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(15): 8671-8680.
- [18] PARK P S, REDDY K M, NATH D N, *et al.*. Ohmic contact formation between metal and AlGaIn/GaN heterostructure via graphene insertion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(15): 153501-1-5.
- [19] ZHONG H J, LIU Z H, SHI L, *et al.*. Graphene in Ohmic contact for both n-GaN and p-GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(21): 212101-1-5.
- [20] TONGAY S, LEMAITRE M, SCHUMANN T, *et al.*. Graphene/GaN schottky diodes: stability at elevated temperatures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(10): 102102-1-4.
- [21] YAN Z, LIU G X, KHAN J M, *et al.*. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors [J]. *Nat. Commun.*, 2012, 3: 827-835.
- [22] WEBER C M, EISELE D M, RABE J P, *et al.*. Graphene-based optically transparent electrodes for spectroelectrochemistry in the UV-Vis region [J]. *Small*, 2010, 6(2): 184-189.
- [23] KIM B J, LEE C, JUNG Y, *et al.*. Large-area transparent conductive few-layer graphene electrode in GaN-based ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(14): 143101-1-4.
- [24] LIN F, CHEN S W, MENG J, *et al.*. Graphene/GaN diodes for ultraviolet and visible photodetectors [J]. *Appl. Phys.*

- Lett.* , 2014 , 105(7) : 073103-1-6.
- [25] SEO T H , SHIN G , KIM B K , *et al.* . Enhancement of light output power in ultraviolet light emitting diodes using graphene film on self-assembled Au nanocluster by agglomeration process [J]. *J. Appl. Phys.* , 2013 , 114(22) : 223105-1-5.
- [26] SHIM J P , KIM D , CHOEM , *et al.* . A self-assembled Ag nanoparticle agglomeration process on graphene for enhanced light output in GaN-based LEDs [J]. *Nanotechnology* , 2012 , 23(25) : 255201-1-6.
- [27] DAS S , SUDHAGAR P , ITO E , *et al.* . Effect of HNO₃ functionalization on large scale graphene for enhanced tri-iodide reduction in dye-sensitized solar cells [J]. *J. Mater. Chem.* , 2012 , 22(38) : 20490-20497.
- [28] WANG L C , ZHANG YY , LI X , *et al.* . Improved transport properties of graphene/GaN junctions in GaN-based vertical light emitting diodes by acid doping [J]. *RSC Adv.* , 2013 , 3(10) : 3359-3364.



徐昌一(1989 -) ,男,辽宁鞍山人,
硕士研究生,2012 年于吉林大学获
得学士学位,主要从事石墨烯与
GaN 材料的研究。
E-mail: xuchangyi19890718@163.com