

石墨烯在光电器件中的应用

陈伟, 李福山, 郭太良

福州大学物理与信息工程学院, 福州 350002

摘要 讨论了近年来石墨烯在太阳能电池、有机发光二极管以及场致发射器件方面的应用研究。石墨烯是碳的同素异形体的一种, 是二维的薄膜材料, 具有独特的导电特性及机械弯曲性能, 可以作为太阳能电池、有机发光器件的柔性电极; 石墨烯与有机聚合物材料复合可以形成大的给体受体界面, 有利于太阳能电池中激子的扩散速率、载流子迁移率的提高, 可以作为有机太阳能电池的电子受体材料; 石墨烯具有一维尖锐的刀口状边缘, 具有大的电场增强系数, 同时由于石墨烯自身的良好导电能力, 可以作为场致发射器件中的电子传导与电场发射材料。石墨烯在光电器件中应用的深入研究有望突破目前光电技术的发展瓶颈, 是一个极具前景的新研究领域。

关键词 石墨烯; 太阳能电池; 有机发光二极管; 场致发射器件

中图分类号 TM242, TN364, TN383

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.004

Applications of graphene in optoelectronic devices

CHEN Wei, LI Fushan, GUO Tailiang

College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

Abstract The graphene is an allotrope of carbon, a 2D thin film material with unique optical, electrical and mechanical properties. Recently, the optoelectronic devices using the graphene are extensively investigated. This paper reviews the applications of the graphene in solar cells, organic light-emitting diodes, and field emission devices. The graphene can serve as the flexible electrode for solar cells and organic light-emitting diodes due to its excellent conductivity and mechanical properties. The graphene can be used as an electron acceptor for organic solar cells for the honeycomb graphene can form a large donor acceptor interface with the organic polymer material, which might improve the exciton's diffusion rate and the electron's mobility. The graphene has a high charge mobility and sharp edges, and is endowed with the great field enhancement factor and can be used as electron conductive and electron emission materials.

Keywords graphene; solar cells; organic light-emitting diode; field emission device

自2004年英国曼彻斯特大学Geim研究小组^[1]首次制备出稳定的石墨烯以来, 有关石墨烯的制备及应用得到广泛关注及研究^[2]。

石墨烯是碳家族中单层碳原子构成的蜂巢晶格结构的二维薄膜材料。碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角型晶格结构^[3]。石墨烯的能带结构如图1^[4]所示, 导带及价带呈现线性色散关系并与由布里渊区六角顶点组成费米面相交, 呈现出金属或零带隙半导体性质。

石墨烯具有优异的力学、光学、热学和电学等性能。力

学性能: 单层石墨烯的厚度为0.335 nm, 碳碳键的长度仅为0.142 nm, 碳原子之间柔韧连接使石墨烯在原子面受外力时保持稳定的晶格结构。电学性能: 石墨烯中相邻碳原子 p_z 轨道电子云碰撞形成大 π 共轭平面^[5], 产生的离域 π 电子可以自由移动, 因此石墨烯具有良好的导电性, 在室温条件下具有非常高的电子迁移率, 哥伦比亚大学的Bolotin证明石墨烯具有 $250000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的电子迁移率^[6], 且迁移率在温度为10~100 K几乎没变化^[7,8]。光学性能: 石墨烯几乎是完全透明的, 单层石墨烯对可见光的吸收率仅2.3%^[9], 5层石墨烯样品的透

收稿日期: 2015-01-07; 修回日期: 2015-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61377027); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA030303); 福建省自然科学基金项目(2013J01233)

作者简介: 陈伟, 博士研究生, 研究方向为纳米电子材料与器件, 电子信箱: wchen@fzu.edu.cn; 李福山(通信作者), 教授, 研究方向为纳米电子材料与器件, 电子信箱: fushanli@hotmail.com

引用格式: 陈伟, 李福山, 郭太良. 石墨烯在光电器件中的应用[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 34-38.

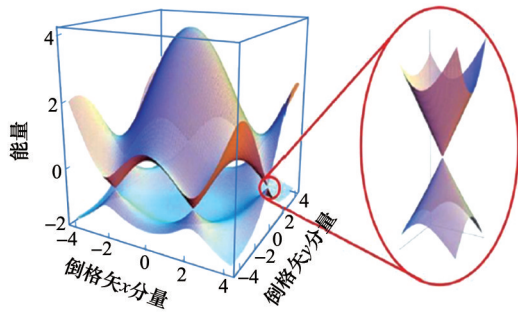


图1 石墨烯的能带结构示意图

Fig. 1 Electronic dispersion in the honeycomb lattice

光率可达90%^[10]。热学特性:石墨烯的热导率高达5300 W/(m·K),是铜的13倍^[6]。另外,单原子层石墨烯材料理论表面积可达2630 m²/g^[7,11]。

零带隙二维石墨烯材料具有高载流子迁移率、较好的电子传输能力、大比表面积以及高透光等特性,可应用于诸多领域。本文主要讨论近年来石墨烯在太阳能电池、有机发光二极管以及场致发射器件等方面的应用研究。

1 石墨烯在太阳能电池中的应用

1.1 石墨烯应用于太阳能电池电极

石墨烯具有高迁移率、高透光率、高电导率,而且较低的载流子浓度使反射率低,更容易穿过更大波长范围的光,相比ITO、FTO、AZO等氧化物透明导电材料,可透过大部分红外线^[12]。Kasry等^[13]利用HNO₃对CVD化学气相沉积制备的石墨烯薄膜进行P型掺杂制备出8层石墨烯,薄膜的方块电阻为90 Ω/sq,透光率为80%,与传统的透光电极性能相近。Lee等^[14]利用含氟聚合物对CVD制备的石墨烯进行掺杂获得高性能的柔性透光电极。因此,石墨烯成为太阳能电池透明导电电极新的替代材料。

1) 石墨烯应用于染料敏化太阳能电池(DSSC)电极。在染料敏化电池中石墨烯与TiO₂之间有很好的物理吸附、电荷传输相互作用,可以减少光电子的复合^[15,16],被用作替代铂金的光阳极对电极。Wang等^[17]采用提拉法制备的石墨烯,其电导率为550 S/m,在1000~3000 nm的光波长范围内的透光率大于70%,用作DSSC电池电极,光电能量转换效率为0.26%。Hong等^[18]在ITO上旋转涂敷法制备聚苯乙烯磺酸掺杂的石墨烯/PEDOT:PSS复合材料作为染料敏化太阳能电池的对电极,在可见光下的透过率为80%,光电能量转换效率达到4.5%,与相同条件下铂电极作为对电极的6.3%光电能量转化效率已具有可比性。

2) 石墨烯应用于有机太阳能电池(OSC)电极。Wang等^[19]采用PBASE有机分子非共价修饰制备的石墨烯作为阳极,用于Glass/graphene/PEDOT:PSS/P₃HT:PCBM/LiF/Al结构的太阳能电池,光电能量转化效率为1.71%。Liu等^[20]采用金

掺杂的石墨烯作为有机太阳能电池的倒置阳极,通过与PEDOT:PSS结合,120℃热处理20 min,使石墨烯上形成p型掺杂,方块电阻为470 Ω/sq,光电能量转换效率为1.98%。Park等^[21]采用CVD化学气相沉积制备的3层石墨烯膜作为有机太阳能电池的阳极,方块电阻为300 Ω/sq,在550 nm处透过率为92%,用于Graphene/PEDOT/DBP/C₆₀/BCP/Al结构的电池,光电能量转换效率达到3.01%。

1.2 石墨烯应用于太阳能电池缓冲层

PEDOT:PSS是传统的空穴传输层,呈酸性,对ITO电极会产生腐蚀,引起铜迁移到活性层中而使电池性能下降。石墨烯的替代使用可以提高电池器件的稳定性及寿命。Li等^[22]在有机太阳能电池中以氧化石墨烯代替PEDOT:PSS作为缓冲层,用于ITO/GO/P₃HT:PCBM/Al结构的太阳能电池,当氧化石墨烯厚度为2 nm时,光电能量转换效率达到3.5%。Yin等^[23]利用氧化石墨烯和PEDOT:PSS复合材料作为P₃HT:PCBM体系有机太阳能电池的缓冲层,光电能量转换效率达到3.8%。Liu^[24]等将Cs₂CO₃与GO上的COOH连接,获得聚合物太阳能电池的阴极缓冲层材料,用于ITO/PEDOT:PSS/P₃HT:PCBM/GOCs/Al正型结构的太阳能电池,光电能量转换效率达到3.08%;用于ITO/GO/P₃HT:PCBM/GOCs/Al正型结构的太阳能电池,光电能量转换效率达到3.67%。

1.3 石墨烯应用于太阳能电池活性层

蜂窝状的石墨烯与有机聚合物材料复合可以形成大的给体受体界面,有利于电池中激子的扩散速率及载流子迁移率的提高,消除由于电荷传输路径被破坏产生二次聚集,因此石墨烯将是有机太阳能电池电子受体材料的很好选择。

Liu等^[25]采用异氰酸苯酯功能化后的单层石墨烯(SPF Graphene)作为受体,以P₃HT作为给体,研究发现电子在给受体界面处发生强烈的作用,产生了很强的能量转移,器件获得开路电压0.72 V、短路电流密度4.0 mA/cm²、光电能量转化率1.1%的性能。Guo等^[26]采用石墨烯与CdS量子点插层的薄膜作为受体材料,采用ITO电极,器件的光电能量转换效率为1.6%。Liu等^[27]将石墨烯作为受体,聚噻吩作为电子给体,两种材料共混做成太阳能电池的活化层,光电能量转换效率为1.4%。Yu等^[28]将质量比12%的石墨烯与C₆₀混合,在C₆₀-G:P₃HT有机太阳能体系中作为活性层,光电能量转化效率为1.22%。Miao等^[29]将掺杂双三氟甲烷磺酰亚胺的单层石墨烯做在硅片上,形成肖特基结太阳能电池,光电能量转换效率达到8.6%。Wang等^[30]采用石墨烯及二氧化钛纳米片材料,在钙钛矿太阳能电池中作为电子的收集层,光电能量转化效率达到15.6%。

1.4 石墨烯量子点应用于太阳能电池

无缺陷的石墨烯是零带隙的半导体材料,但在光电领域应用时一般需要引入带隙。近年来,在将石墨烯二维材料转为零维石墨烯量子点方面开展了研究。石墨烯量子点(GQDs)具有边缘效应和量子效应,它的电子、光电特性因GQDs的大小和官能团不同而不同。石墨烯量子的这种特性

使得其在太阳能电池方面也有相关的应用。

Yang等^[31,32]采用GQDs与Cs₂CO₃混合材料作为太阳能电池器件缓冲层,用于ITO/GQDs-Cs₂CO₃/P₃HT:PCBM/V₂O₅/Au结构,光电能量转化效率达到3.23%。Gao等^[33]利用石墨烯量子点独特的能带结构,以及光产生的电子空穴对在结的表面能够有效形成分离的特点,研制出基于c-Si/GQDs异质结的太阳能电池,光电能量转换效率达到6.63%。Li等^[34]采用电解石墨方式制备GQD,以GQD为受体材料与给体材料P₃HT结合作为有机太阳能的活性层,应用于ITO/PEDOT:PSS/P₃HT:GQDs/Al结构,光电能量转化效率为1.28%。Kim等^[35]通过还原氧化石墨烯得到GQD,并将GQD加入PTB7/PC₇₁BM作为太阳能电池的活性层,光电能量转换效率达到7.6%。

李福山课题组^[36]采用双壁碳纳米管裁剪获得尺寸均匀分布的石墨烯量子点DGQs,制作了P₃HT:PCBM:GQDs三元体系聚合物太阳能电池,光电能量转换效率达到5.24%。由于GQD独特的能带结构有助于共混结构薄膜的电荷输运,提高了太阳能电池的光电能量转换效率。

2 石墨烯在有机发光二极管中的应用

石墨烯的高透过率使其适合于作为有机发光二极管(OLED)的透明导电电极。石墨烯层数越少透过率越高,但表面电阻也越高,单层石墨烯的方块电阻高达600 Ω/sq,而功函数只有4.30 eV。通过将石墨烯与无机介质材料或聚合物半导体材料混合,可以使石墨烯从介电材料中获得载流子,从而降低表面电阻率,使石墨烯作为显示器件的透明导电电极成为可能。

祝晓钊^[37]通过在石墨烯表面添加氧化钛、PEDOT:PSS混合物,将石墨烯的方块电阻降低为86 Ω/sq,并将功函数提高至5.12 eV,基于该复合透明导电电极制作的OLED器件,其电流效率与以ITO为电极的OLED器件几乎同等。Wu等^[38]在石英玻璃上旋涂7 nm厚的功能化石墨烯水溶性液体,热处理后作为OLED器件的阳极,制作了graphene/PEDOT:PSS/NPD/Alq₃/LiF/Al结构的OLED器件,开启电压4.5 V,当电压达到11.7 V时其亮度为300 cd/m²。

Jens等^[39]在石墨烯表面采用热蒸发方式制备MoO₃金属氧化物作为OLED的电极,获得4层掺杂的石墨烯,方块电阻为30 Ω/sq,发现采用graphene/MoO₃/CBP顺序结构有利于阳极电荷有效注入OLED器件中,而相比ITO薄膜,石墨烯层低的光吸收降低了电极光吸收,从而提高了器件的电流效率。

李福山课题组^[40]通过在PET基底上转移CVD化学气相沉积制备石墨烯薄膜,在经过硝酸处理的石墨烯薄膜上喷涂80 nm的PEDOT:PSS,150℃热处理后获得石墨烯/PEDOT:PSS复合导电薄膜,方块电阻为350 Ω/sq。利用该薄膜电极制作出柔性橙黄色有机发光二极管器件,电压12 V时,器件的电流效率最大值为0.9 cd/A,在10 mm的弯曲曲率半径下弯曲100次后,器件的发光亮度无明显改变。

李福山课题组^[41]采用CVD化学气相沉积方法制备石墨烯,磁控溅射银及掺铝氧化锌,在PET衬底上制作了石墨烯/银/掺铝氧化锌复合结构的柔性电极,发现制作的绿光有机发光二极管器件获得1.46 cd/A的高电流效率,经过10 mm弯曲测试后仍然具有稳定的发光性能。因此,石墨烯在柔性电极材料方面具有广阔的发展前景。

石墨烯作为有机发光器件的功能层也有相关研究。郭颂等^[42]采用共蒸掺杂的方法,将氧化石墨烯作为电子传输层,与作为发光层的Alq₃共蒸镀掺杂制作的有机发光器件,发光亮度是无掺杂器件的1.2倍,电流效率比无掺杂器件高1倍。

3 石墨烯在场致发射器件中的应用

石墨烯具有大长径比、高电导率和特殊的片状结构等特点,特别是石墨烯纳米片具有一维尖锐的刀口状边缘,电场增强系数大,因此石墨烯也被应用在基于量子隧穿效应的场致发射(FED)器件中作为电子传导与电场发射的材料^[43-45]。

Ding等^[44]采用石墨烯与二氧化锡复合材料作为场发射阴极,结果表明石墨烯改善了二氧化锡纳米材料的场发射特性。Deng等^[46]采用石墨烯纳米片和碳纳米管混合物作为场发射材料,获得稳定的场发射性能,发射电流密度大于20 mA/cm²。Sharma等^[47]采用离子修饰的多层石墨烯作为场发射材料获得较好的场发射性能,器件的开启电压为2.1 V/μm。

李福山课题组^[48,49]研究发现,通过引入石墨烯可以提高四针型氧化锌的场发射性能。涂覆有石墨烯的四针型氧化锌呈现出比纯四针型氧化锌更低的工作电压,更好的稳定性和更均匀的发射。氧化石墨烯的引入提高了氧化锌与电极之间的机械连接和电子传导,因此提高了场发射性能^[48]。还研究了利用悬浮石墨烯薄膜作为表面传导的场发射器件,悬浮的石墨烯平行于栅电场导致石墨烯边缘产生强电场,通过在四针型氧化锌纳米结构上沉积氧化镁薄膜使器件在小于150 V的低工作电压下获得30%的高发射效率^[49]。

4 结论

石墨烯由于其高透过率、高电子迁移率、大比表面积等特性,使其在光电器件方面具有广阔的应用前景,目前已有大量的应用研究。这些研究充分展示了石墨烯相比其他材料的独特优势,但随着对于石墨烯自身特点认识的进一步深入,在光电应用方面的一些不足也显现出来,比如在OLED应用中与有机材料功函数不匹配的问题等,这些问题还需要加大研究力度,从材料、器件等不同角度提出更多的技术方案予以解决。总体而言,石墨烯与光电器件的结合有望能够突破光电技术瓶颈,是一个极具前景的新研究领域。

参考文献(References)

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306: 666-669.

- [2] Ferrari A C, Bonaccorso F, Falco V, et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems[J/OL]. *Nanoscale*, 2014[2014-12-30]. <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/nr/c4nr01600a>.
- [3] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183-191.
- [4] Neto A H C, Guinea F, Peres N M R, et al. The electronic properties of graphene[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 109-158.
- [5] 朱宏伟, 徐志平, 谢丹, 等. 石墨烯——结构、制备方法与性能表征[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
Zhu Hongwei, Xu Zhiping, Xie Dan, et al. Graphene—structure, preparation methods and characterization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [6] 邹鹏, 黄德欢. 石墨烯及其应用[J]. *科学*, 2014, 66(1): 29-32.
Zou Peng, Huang Dehuan. Graphene and its applications[J]. *Science*, 2014, 66(1): 29-32.
- [7] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 016602.
- [8] Chen J H, Jang C, Xiao S, et al. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂[J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(4): 206-209.
- [9] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene[J]. *Science*, 2008, 320: 1308-1308.
- [10] Novoselov K S A, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438: 197-200.
- [11] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene[J]. *Solid State Communications*, 2008, 146(9): 351-355.
- [12] Bi H, Huang F, Liang J, et al. Transparent conductive graphene films synthesized by ambient pressure chemical vapor deposition used as the front electrode of CdTe solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(28): 3202-3206.
- [13] Kasry A, Kuroda M A, Martyna G J, et al. Chemical doping of large-area stacked graphene films for use as transparent, conducting electrodes[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(7): 3839-3844.
- [14] Lee W H, Suk J W, Lee J, et al. Simultaneous transfer and doping of CVD-grown graphene by fluoropolymer for transparent conductive films on plastic[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1284-1290.
- [15] Zhang H, Lü X, Li Y, et al. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst[J]. *ACS Nano*, 2009, 4(1): 380-386.
- [16] Kim S R, Parvez M K, Chhowalla M. UV-reduction of graphene oxide and its application as an interfacial layer to reduce the back-transport reactions in dye-sensitized solar cells[J]. *Chemical Physics Letters*, 2009, 483(1): 124-127.
- [17] Wang X, Zhi L, Müllen K. Transparent, conductive graphene electrodes for dye-sensitized solar cells[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(1): 323-327.
- [18] Hong W, Xu Y, Lu G, et al. Transparent graphene/PEDOT-PSS composite films as counter electrodes of dye-sensitized solar cells[J]. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10(10): 1555-1558.
- [19] Wang Y, Chen X, Zhong Y, et al. Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(6): 063302.
- [20] Liu Z, Li J, Sun Z H, et al. The application of highly doped single-layer graphene as the top electrodes of semitransparent organic solar cells[J]. *ACS Nano*, 2011, 6(1): 810-818.
- [21] Park H, Howden R M, Barr M C, et al. Organic solar cells with graphene electrodes and vapor printed poly(3,4-ethylenedioxythiophene) as the hole transporting layers[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(7): 6370-6377.
- [22] Li S S, Tu K H, Lin C C, et al. Solution-processable graphene oxide as an efficient hole transport layer in polymer solar cells[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(6): 3169-3174.
- [23] Yin B, Liu Q, Yang L, et al. Buffer layer of PEDOT: PSS/graphene composite for polymer solar cells[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, 10(3): 1934-1938.
- [24] Liu J, Xue Y, Gao Y, et al. Hole and electron extraction layers based on graphene oxide derivatives for high-performance bulk heterojunction solar cells[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(17): 2228-2233.
- [25] Liu Q, Liu Z, Zhang X, et al. Organic photovoltaic cells based on an acceptor of soluble graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(22): 223303.
- [26] Guo C X, Yang H B, Sheng Z M, et al. Layered graphene/quantum dots for photovoltaic devices[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(17): 3014-3017.
- [27] Liu Z, Liu Q, Huang Y, et al. Organic photovoltaic devices based on a novel acceptor material: Graphene[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(20): 3924-3930.
- [28] Yu D, Park K, Durstock M, et al. Fullerene-grafted graphene for efficient bulk heterojunction polymer photovoltaic devices[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011, 2(10): 1113-1118.
- [29] Miao X, Tongay S, Petterson M K, et al. High efficiency graphene solar cells by chemical doping[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2745-2750.
- [30] Wang J T W, Ball J M, Barea E M, et al. Low-temperature processed electron collection layers of graphene/TiO₂ nanocomposites in thin film perovskite solar cells[J]. *Nano Letters*, 2013, 14(2): 724-730.
- [31] Yang H B, Dong Y Q, Wang X, et al. Cesium carbonate functionalized graphene quantum dots as stable electron-selective layer for improvement of inverted polymer solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(2): 1092-1099.
- [32] Yang H B, Dong Y Q, Wang X, et al. Graphene quantum dots-incorporated cathode buffer for improvement of inverted polymer solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 117: 214-218.
- [33] Gao P, Ding K, Wang Y, et al. Crystalline Si/graphene quantum dots heterojunction solar cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(10): 5164-5171.
- [34] Li Y, Hu Y, Zhao Y, et al. An electrochemical avenue to green-luminescent graphene quantum dots as potential electron-acceptors for photovoltaics[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(6): 776-780.
- [35] Kim J K, Park M J, Kim S J, et al. Balancing light absorptivity and carrier conductivity of graphene quantum dots for high-efficiency bulk heterojunction solar cells[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(8): 7207-7212.
- [36] Li F, Kou L, Chen W, et al. Enhancing the short-circuit current and power conversion efficiency of polymer solar cells with graphene quantum dots derived from double-walled carbon nanotubes[J]. *NPG Asia Materials*, 2013, 5(8): e60.
- [37] 祝晓钊. 有机光电器件的界面调控与修饰[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
Zhu Xiaozhao. Interface control and modification of organic optoelectronic devices[D]. Suzhou: Suzhou University, 2013.
- [38] Wu J, Agrawal M, Becerril H A, et al. Organic light-emitting diodes on solution-processed graphene transparent electrodes[J]. *ACS Nano*,

- 2009, 4(1): 43-48.
- [39] Meyer J, Kidambi P R, Bayer B C, et al. Metal oxide induced charge transfer doping and band alignment of graphene electrodes for efficient organic light emitting diodes[J/OL]. Scientific Reports, 2014 [2014-12-29]. http://www.nature.com/srep/2014/140620/srep05380/full/srep05380.html?WT.ec_id=SREP-639-20140624.
- [40] 吴晓晓, 李福山, 吴薇, 等. 基于石墨烯/PEDOT:PSS叠层薄膜的柔性OLED器件[J]. 发光学报, 2014, 35(4): 486-490.
Wu Xiaoxiao, Li Fushan, Wu Wei, et al. Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT:PSS conductive film[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(4): 486-490.
- [41] Li F, Lin Z, Zhang B, et al. Fabrication of flexible conductive graphene/Ag/Al-doped zinc oxide multilayer films for application in flexible organic light-emitting diodes[J]. Organic Electronics, 2013, 14(9): 2139-2143.
- [42] 郭颂, 杜晓刚, 刘晓云, 等. 氧化石墨烯作为共蒸镀掺杂材料在OLED中的应用[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 595-599.
Guo Song, Du Xiaogang, Liu Xiaoyun, et al. Graphene oxide as doping material for assembling OLEDs via thermal co-evaporation with NPB and Alq₃[J]. Organic Electronics, 2013, 34(5): 595-599.
- [43] Zhai T, Li L, Ma Y, et al. One-dimensional inorganic nanostructures: Synthesis, field-emission and photodetection[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(5): 2986-3004.
- [44] Ding J, Yan X, Li J, et al. Enhancement of field emission and photoluminescence properties of graphene-SnO₂ composite nanostructures[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(11): 4299-4305.
- [45] 李智军, 张晖, 薛河. 石墨烯纳米片及其场发射性能研究[J]. 化工新型材料, 2010, 37(4): 1-3.
Li Zhijun, Zhang Hui, Xue He. Graphene nanoflak (GNFs) and their electron emission[J]. New Chemical Materials, 2010, 37(4): 1-3.
- [46] Deng J H, Cheng L, Wang F J, et al. High current density and longtime stable field electron transfer from large-area densely arrayed graphene nanosheet-carbon nanotube hybrids[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(23): 21558-21566.
- [47] Sharma H, Agarwal D C, Sharma M, et al. Structure-modified stress dynamics and wetting characteristics of carbon nanotubes and multilayer graphene for electron field emission investigations[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(15): 12531-12540.
- [48] Wu C, Li F, Zhang Y, et al. Enhanced field emission performance of tetrapod-liked zinc oxide nanoneedles by coating with graphene oxide sheets[J]. Current Nano Science, 2012, 8(1): 23-25.
- [49] Wu C, Li F, Zhang Y, et al. A surface-conducted field emission device with suspended graphene cathodes[J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 432-436.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



第13届全国博士生学术年会征集论文

由中国科协常委会青年工作专门委员会主办的第13届全国博士生学术年会,将于2015年5月在广州召开。欢迎有意参会的高年级博士生以第一作者提交与年会专题相符或相近的论文。

第13届全国博士生学术年会包括4个专题。

- 1) 智能制造装备(由中国机械工程学会承办):智能设计与制造、智能制造工艺与装备、智能控制与智能制造系统、智能制造服务。
- 2) 新能源(由中国可再生能源学会承办):太阳能发电技术、风力发电技术、生物质能发电技术、可再生能源发电并网技术。
- 3) 新材料(由中国材料研究学会承办):能源与环境材料、高性能结构材料、电子材料、特种功能材料、材料制备与性能评价。
- 4) 物联网(由中国电子学会承办):传感器、通信网络、智能信息处理、嵌入式、信息安全。

拟参会的博士生请于2015年3月31日前,登陆全国博士生学术年会报名系统(<http://bssnh.cast.org.cn>),提交论文全文。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/16204153.html>。