

全无机 ZnO 纳米棒/SiO₂ 电致发光器件的研究

葛 林 徐建萍 张晓松 罗程远 王丽师 李梦真 任志瑞 陈义鹏 王有为
石庆良 朱明雪 李 岚

(天津理工大学材料物理研究所显示材料与光电器件省部共建教育部重点实验室, 天津 300384)

摘要 采用化学溶液法在氧化铟锡(ITO)衬底上合成 ZnO 纳米棒,以不同的速度将无定形 SiO₂ 材料旋涂于 ZnO 纳米棒,制备了结构为 ITO/ZnO/ZnO 纳米棒/SiO₂/Al 全无机电致发光器件。借助能谱(EDS)和吸收光谱,发现当转速从 3000 r/min 降低到 500 r/min 时, SiO₂ 的附着量逐渐增多。比较了旋涂速度对器件的电致发光光谱的影响,发现对于同一旋涂速度形成的器件,紫外发光强度随电压的增大而增强,可见区的发射则逐渐减弱;而不同旋涂速度下获得的器件的紫外发光强度显示出随电压升高先增大后减小的趋势,当旋涂速度为 1000 r/min 时,紫外发射最强,可见区发光几乎消失;*I-V* 曲线测量显示随着转速的降低,器件的启亮电压变大,最大工作电流逐渐变小。结合光致发光(PL)图谱和能级结构图分析认为, SiO₂ 除了能钝化 ZnO 纳米棒表面缺陷,还具有改善载流子在发光层的平衡和增大电子注入能量的作用,其较高的势垒对发光层内的电子具有限制作用,提高了在活性层中的电子和空穴的复合率。此外, SiO₂ 的加速作用也有助于提高高能态缺陷能级的电子密度及复合几率。

关键词 光电子学; ZnO 纳米棒; 全无机发光二极管; 电致发光器件; SiO₂ 表面修饰

中图分类号 O471.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0823004

Study on All-Inorganic Light Emitting Devices Based on ZnO Nanorods with Modification of SiO₂

Ge Lin Xu Jianping Zhang Xiaosong Luo Chengyuan Wang Lishi Li Mengzhen
Ren Zhirui Chen Yipeng Wang Youwei Shi Qingliang Zhu Mingxue Li Lan

(Key Laboratory of Display Materials and Photoelectric Devices, Ministry of Education of China,
Institute of Material Physics, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract ZnO nanorods are synthesised by the chemical solution method on indium tin oxide (ITO) substrate. The all-inorganic light emitting devices, with the structure of ITO/ZnO/ZnO nanorods/SiO₂/Al, are obtained with various amount of SiO₂ by different spin-coating speeds. According to energy dispersive spectrum (EDS) and absorption spectrum, the modification amount of SiO₂ shows a gradual increase when the casting speed is reduced from 3000 r/min to 500 r/min. The electroluminescent (EL) spectra of devices, influenced by the casting speed, are measured and compared. For each spin coating speed, the EL intensity of devices shows obvious enhancement in the ultraviolet (UV) range with the applied voltage increasing, which is weakened simultaneously in visible region. The luminescent intensity in UV range enhances obviously when the casting speed increases to 1000 r/min and then declines gradually. At the same time, the visible emission disappears. The *I-V* curves reveal that the additional SiO₂ modification drives up the turn-on voltage of the device monotonically and leads to a decline of maximum operating current. The discussion based on photoluminescence (PL) spectra and the energy level diagram suggests that, besides surface passivation of ZnO nanorods by SiO₂, the high barrier between ZnO and SiO₂ induces electron accumulation and suppresses non-radiative recombination at ZnO layer. And the SiO₂ on the surface of ZnO nanorods helps to improve the electron density and then the recombination rate at the higher levels of ZnO.

收稿日期: 2013-03-04; **收到修改稿日期**: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(60977035, 10904109, 60907021)、科技创新体系及条件平台建设计划(10SYSYJC28100)

作者简介: 葛 林(1987—), 男, 硕士, 主要从事半导体纳米材料与发光器件方面的研究。E-mail: jsgelin@163.com

导师简介: 李 岚(1964—), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: lilan@tjut.edu.cn(通信联系人)

Key words optoelectronics; ZnO nanorods; all-inorganic light-emitting diode; electroluminescent devices; surface modification of SiO₂

OCIS codes 040.1240; 160.4236; 160.6000; 230.3670; 260.7190

1 引 言

宽带隙半导体材料 ZnO 的激子束缚能高达 60 meV,在常温下就可以实现激子复合和短波长的光发射,在紫外固体激光器^[1-2]和电致发光器件(EL)中^[3]具有潜在的应用前景。作为一种天然的 n 型半导体,ZnO 本身具有较多的施主缺陷且其形成能远低于受主,容易对掺入的受主形成自补偿效应,因此实现较高载流子浓度的 p 型 ZnO 尚有难度,电场驱动下的紫外发光多通过异质结实现^[4],但是其紫外发射效率尚不尽人意。

具有异质结构的 p-n 结 ZnO 材料^[5-8]为实现紫外发光器件提供了更多的选择,其中由聚合物^[9]或者有机小分子^[10]与纳米结构 ZnO 形成的异质结结构的发光器件被广泛报道。Chang 等^[9]报道了 ZnO 纳米线/聚合物发光器件,在较低的电压下同时观察到了 383 nm 处的紫外发射和可见区的发射。Zhao 等^[11]将聚合物对苯乙炔(MEH-PPV)作为电子注入层,获得了结构为氧化铟锡(ITO)/ZnS/ZnO/ZnO 纳米棒/MEH-PPV/Al 有机复合发光器件,在正向偏压下观察到了 ZnO 在 380 nm 处的近紫外发光,但是其紫外波段发射强度明显低于缺陷产生的可见区发光。

近几年,基于纳米结构的堆叠或者多结的全无机光电子器件被逐渐关注,这类器件具有简单的器件结构和制备工艺,可以避免有机器件中存在的由氧气和水蒸气造成的性能衰减以及与金属电极层接触的不稳定性^[12],提高了器件的工作寿命。在发光器件方面,Mashford 等^[13]使用溶胶-凝胶法,通过旋涂的工艺制备出了 ITO/NiO/CdSe/ZnS/ZnO/Ag 结构的全无机量子点 LED,其可见区电致发光的亮度达到了 249 cd/m²。Omata 等^[14]提出了一个具有 I 型 MgO/ZnO/Mg 量子阱结构的量子点全无机电致发光器件,在交流驱动下发现明显的紫外发射。与有机光电器件相似,载流子平衡以及传输也是影响全无机纳米结构发光器件的重要因素。Wood 等^[15]对比了多种金属氧化物作为功能层的全无机发光器件,认为量子点发光层与载流子(电子和空穴)传输层能带匹配是实现高效量子点器件发射效率的关键因素。他们同时指出,在发光层与电极或者电子传输层之间增加一层超薄的绝缘层可以有

效降低活性层的发光淬灭,也是提高效率的可行方案。

SiO₂ 是一种绝缘材料,通常作为表面修饰剂实现材料表面修饰和接枝,有证据^[16]表明经 SiO₂ 修饰后,来源于 ZnO 纳米棒的表面缺陷和表面态的荧光发射得到抑制,其带边发射获得明显增强。SiO₂ 较宽的带隙在光电子器件中形成有效势垒,可使电场注入的电子在界面处积聚或重组^[17],提高载流子在活性区的复合几率。本文采用化学溶液法在 ITO 导电衬底上生长 ZnO 纳米棒阵列,在 ZnO 纳米棒阵列顶端旋涂 SiO₂,研究电场激发的具有 ITO/ZnO/ZnO 纳米棒/SiO₂/Al 简单结构的全无机发光器件的发光性能,讨论了 SiO₂ 对器件紫外和缺陷发光的影响机制。

2 实 验

利用化学溶液法^[18]在 ITO 基底上生长 ZnO 纳米棒。将分析纯的醋酸锌(10.975 g)、100 mL 乙二醇甲醚和 3 mL 乙醇胺充分混合,在 70 °C 恒定温度下磁力搅拌 3 h 后形成 ZnO 籽晶溶液。利用 KW-4A 型匀胶机以转速 2000 r/min 在充分清洁的 ITO 玻璃基底上旋涂 20 s 作为籽晶层,在 400 °C 下干燥处理后置入到由 200 mL 的 0.01 mol 六次甲基四胺(C₆H₁₂N₄)和 0.01 mol 六水合硝酸锌[Zn(NO₃)₂·6H₂O]的去离子水溶液混合,在 95 °C 的真空环境下反应 3 h,样品经去离子水和无水乙醇溶液多次清洗和干燥后放入真空管式炉中以 300 °C 加热 30 min 后自然冷却至室温。将氨水(NH₃·H₂O)和 1.3×10⁻³ mol 的硅酸乙酯(TEOS)与 8.6×10⁻¹ mol 无水乙醇(C₂H₅OH)充分反应,多次洗涤和高速离心后再分散在无水乙醇中得到 SiO₂ 溶液,通过旋涂技术将 SiO₂ 溶液旋涂在 ZnO 纳米棒层的表面,改变转速(3000,2000,1000,500 r/min),并分别标记为 A,B,C,D。利用 JSD500 高精度多靶电子束蒸发系统在 1×10⁻⁵ Pa 的真空度下对以上 4 个样品分别蒸镀厚度在 150 nm 的 Al 金属层作为阴极,器件结构为 ITO/ZnO/ZnO 纳米棒/SiO₂/Al(如图 1 所示),样品尺寸为 30 mm×13 mm,每个发光单元的尺寸为 2 mm×2 mm。ZnO 的晶相分析采用日本理学 Rigaku D/max2500v/pc X 射线衍射仪进行,ZnO

的形貌由日本理学 JSM-71001F 场发射扫描电子显微镜获得,利用型号为 Hitachi S-4800 的能谱分析仪对样品表面元素进行定性和定量分析,日立的 UV-4100 型紫外-可见吸收分光光度计测量样品的吸收光谱,Jobin Yvon 的 FL3 荧光光谱仪对样品的电致发光光谱进行分析,器件的 $I-V$ 特性曲线利用 Keithley 2400 电流源表得到。所有测试均在室温下得到。

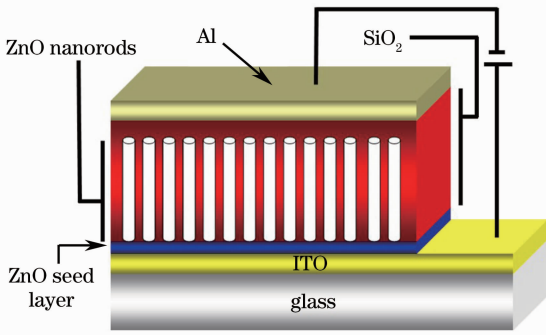


图 1 全无机 ZnO 纳米棒的器件结构

Fig. 1 Schematic diagram of the all-inorganic ZnO nanorods

3 实验结果与讨论

图 2(a)为生长的 ZnO 纳米棒及旋涂 SiO₂ 前后的 X 射线衍射(XRD)图谱,图中显示仅有分别对应

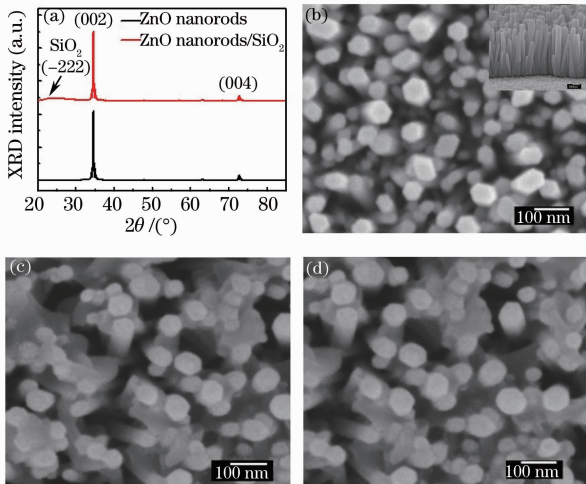


图 2 (a) ZnO 纳米棒旋涂 SiO₂ 前后的 XRD 图谱; (b) ZnO 纳米棒 SEM 俯视图; 以(c) 3000 r/min 和(d) 1000 r/min 速度在 ZnO 纳米棒上旋涂 SiO₂ 后的 SEM 俯视图

Fig. 2 (a) XRD patterns of the ZnO nanorods before and after SiO₂ coated; (b) SEM top view of ZnO nanorods; SEM top view of ZnO nanorods with SiO₂ coated at the speeds of (c) 3000 r/min and (d) 1000 r/min

于 ZnO 的(002)和(004)晶面的两个衍射峰,说明纳米棒优先沿着 c 轴方向生长^[19],其中在衍射角为 25.2°处有一个弱的包络,表明形成了无定形 SiO₂^[20];图 2(b)为样品的扫描电镜(SEM)俯视图,从图中可以看到生长的 ZnO 纳米棒端面接近正六边形,直径约为 50 nm,平均长度为 700 nm(内附图),基本都垂直生长在 ITO 基底上;图 2(c)和(d)分别为 SiO₂ 以 3000 r/min 和 1000 r/min 旋涂在 ZnO 纳米棒上的 SEM 俯视图,可以看出有部分 SiO₂ 渗入到阵列的缝隙中且沉积在 ZnO 纳米棒的侧面。

无 SiO₂ 的器件在电场作用下极易发生短路,且没有看到光的发射。这是由于 ZnO 纳米棒表面直接接触金属电极时,电子可能会经由纳米棒间的空隙直接导通至 ITO^[10]。SiO₂ 具有很好的绝缘性和分散性,易于在 ZnO 纳米棒表面形成均匀覆盖,在纳米棒之间形成的网状结构可以降低发生短路的几率,此外其修饰作用还可以减小表面缺陷引起的非辐射复合过程^[16]。

为了研究旋涂速度对 ZnO 纳米棒表面 SiO₂ 包覆量的影响,对不同旋涂速度所获得的 ZnO/SiO₂ 薄膜进行了能谱(EDS)分析(如图 3 所示),从能谱图中可以看出样品同时含有 Si、O、Zn 元素和 Sn 元素,其中 Sn 来源于衬底。随着 SiO₂ 旋涂速度的降低,Si/Zn 质量分数和原子数分数逐渐增大(如表 1 所示),表明 SiO₂ 的附着量逐渐增大。

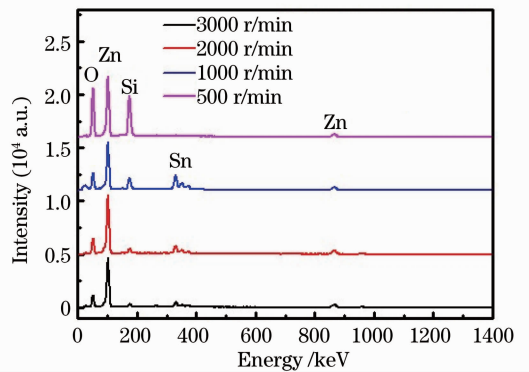


图 3 不同转速条件下的 ZnO 纳米棒/SiO₂ EDS 图谱

Fig. 3 EDS spectra of the ZnO nanorods/SiO₂ with different casting speeds

表 1 不同转速条件下 Si/Zn 的质量分数和原子数分数

Table 1 Fraction of mass and atoms of Si/Zn with different casting speeds

Casting speed / (r/min)	3000	2000	1000	500
Mass fraction / %	5.49	7.3	19.9	63.6
Atom fraction / %	12.8	17	46.3	67.5

图 4 给出了 ZnO 纳米棒, ZnO/SiO₂ 薄膜以及 SiO₂ 薄膜的吸收谱。从图 4 可以看出, ZnO 纳米棒在 360 nm 位置有较强的吸收, 单纯的 SiO₂ 薄膜的吸收峰在 400 nm 附近。ZnO/SiO₂ 薄膜的吸收谱和单一的 ZnO 纳米棒的吸收谱相似。为了观测 SiO₂ 对 ZnO/SiO₂ 薄膜的影响, 将 395~405 nm 范围内的光谱图放大, 见内插图。从内插图可以看出, 随着旋涂速度的降低, 在 400 nm 附近吸收峰强度有所增加, 说明在 ZnO/SiO₂ 薄膜中 SiO₂ 的量增加。这与能谱的结果一致。

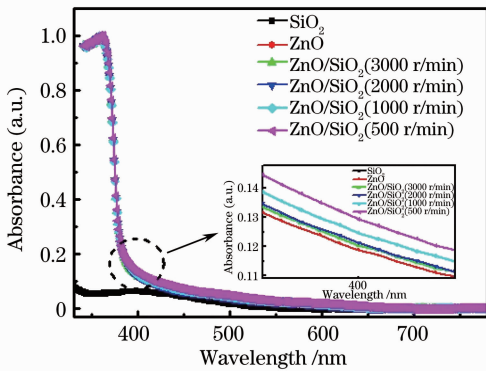


图 4 不同转速条件下样品的吸收光谱图

Fig. 4 Absorption spectra of the samples with different casting speeds

图 5 为在 ZnO 纳米棒上用不同速度旋涂 SiO₂ 和无 SiO₂ 的光致发光(PL)图谱。从图 5 可以看到, 对应于 ZnO 纳米棒的带边跃迁^[21-22] 的 377 nm 紫外发射强度随旋涂速度的增大明显增强, 且远远高于可见光的发射强度。纳米 ZnO 的可见发射源于其内部和表面存在的多种缺陷, ZnO 的带边发射强度随着 SiO₂ 旋涂速度的降低而逐渐增强, 意味着更多的与表面缺陷有关的发射以及非辐射复合过程被抑制。

图 6 给出了不同转速下器件 A~D 的 EL 图谱, 可以看出, 随着转速的降低, ZnO 纳米棒的带边发

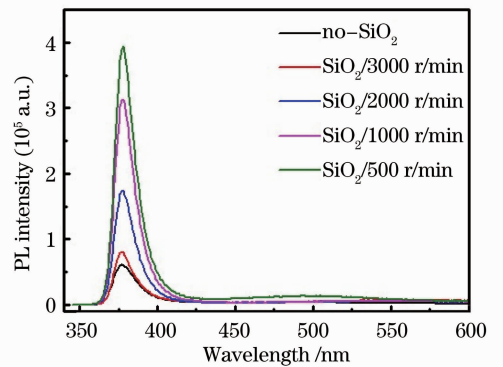


图 5 ZnO 纳米棒以不同速度旋涂 SiO₂ 和无 SiO₂ 的 PL 图谱

Fig. 5 PL spectra of ZnO nanorods for different casting speeds with SiO₂ and without SiO₂

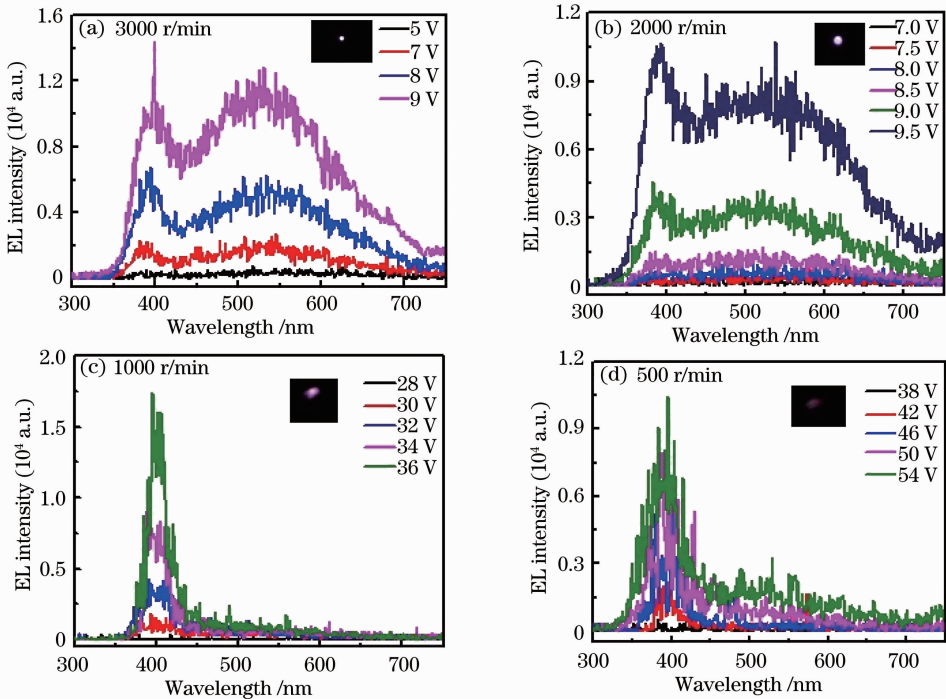


图 6 ZnO 纳米棒器件不同旋涂速度条件下的 EL 图谱(内附图为器件的 EL 照片)。(a) 器件 A; (b) 器件 B; (c) 器件 C; (d) 器件 D

Fig. 6 EL spectra of devices with different casting speeds of ZnO nanorods device. Insets show the EL photographs of the devices. (a) Device A; (b) device B; (c) device C; (d) device D

射逐渐增强,对应于缺陷的发光相对减弱。在转速为 3000 r/min,器件 A 紫外和可见区发射强度基本持平[如图 6(a)所示],当速度降至 2000 r/min 时,器件 B 可见区发射强度降低,紫外发射凸显[如图 6(b)所示],转速进一步下降到 1000 r/min[如图 6(c)所示]时,器件 C 可见区发射基本消失,紫外区域的发射强度达到最佳。从图 6(d)可以看出当转速降低到 500 r/min 时,ZnO 纳米棒的近紫外发射明显下降。从工作电压来看,SiO₂ 增多使器件达到最佳亮度时所对应的电压有所上升。器件 A~D 的最佳工作电压分别为 9,9.5,36,54 V。除了具有减少表面缺陷的作用之外,SiO₂ 较高的势垒(约为 9 eV^[23])使得电子在其表面积聚(如图 7 所示),转速的降低使得附着在 ZnO 纳米棒表面的 SiO₂ 增加,电子隧穿 SiO₂ 到达 ZnO 所需要更大的能量,造成了器件达到最佳强度的电压也增大。

全部器件的 I - V 曲线由图 8 给出,对比器件的 EL 光谱图(图 6)可以看出,随着转速的降低,器件的启亮电压由 3000 r/min 转速下的 6 V 大幅度增加至 38 V(转速为 500 r/min)。作为绝缘材料,电子主要是通过隧穿过程经由 SiO₂ 进入到 ZnO 层,在 ZnO 纳米棒表面包覆的 SiO₂ 增加,电子在 Al/SiO₂ 界面处积聚的可能加大(图 7),使电子隧穿所

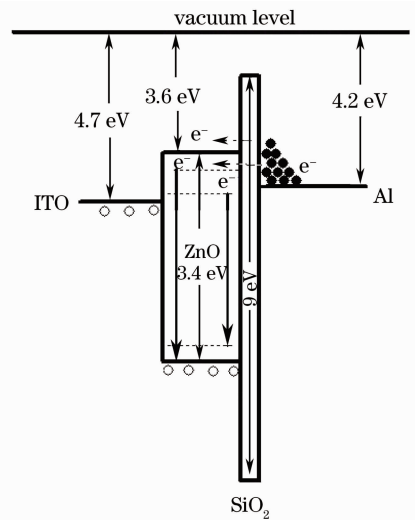
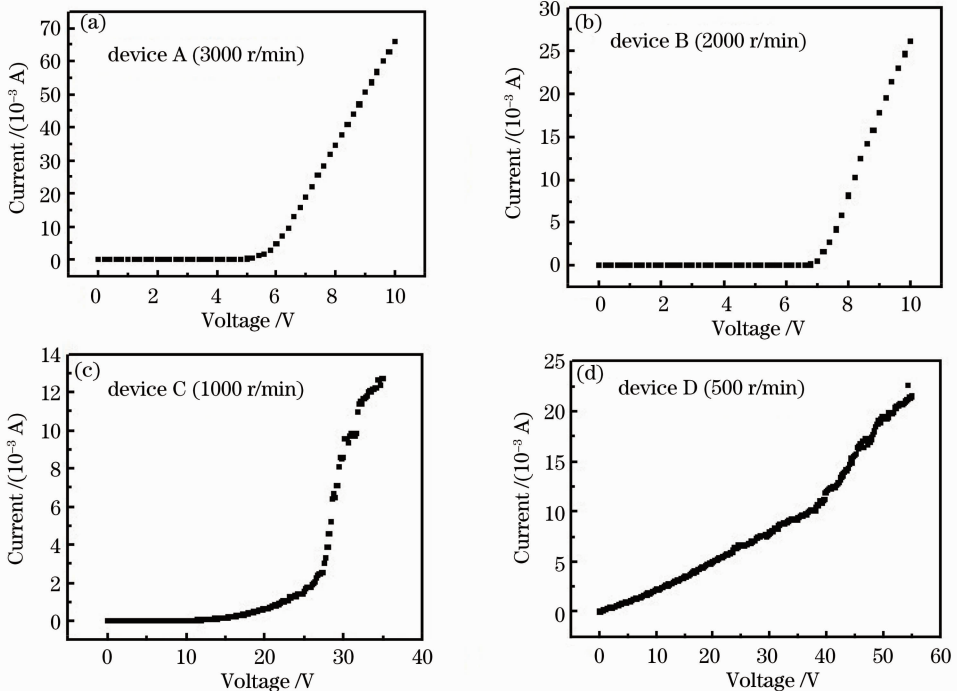


图 7 器件的能级结构图

Fig. 7 Schematic of energy level structure for the device

需要的能量加大。对于任一器件,可以发现随着施加电压的增加,紫外发射均逐渐增强(图 6),这是由于旋涂在 ZnO 的表面的 SiO₂ 在 ZnO 和电极之间形成了较高的势垒^[18],外加电压的增加,使电子在阴极和 SiO₂ 界面的积聚数量和电子能量均增加,更多的电子隧穿过 SiO₂ 后到达 ZnO 的高能态,高能量电子的复合几率增大。此外,SiO₂ 对电子具有加

图 8 ZnO 纳米棒器件不同 SiO₂ 旋涂速度条件下的 I - V 曲线Fig. 8 I - V curves of devices with different casting speeds of SiO₂ for ZnO nanorods device

速作用^[24],当电子经过 SiO₂ 时能量有一定的提高,这两个因素增大了高能态能级俘获电子的几率并降低深陷阱中心获得电子的几率,近带边紫外发射增强,与缺陷相关的发射降低^[25]。图 8 也显示,随着转速的降低,器件的电流逐渐减小,表明器件中的传导电荷趋于减少,可能源于参与复合的载流子数增大。当 SiO₂ 的量进一步增加时,会大大影响载流子的注入效率,使得传导电流和发光强度均下降。

4 结 论

使用化学溶液法制备 ZnO 纳米棒,通过在 ZnO 纳米棒上旋涂 SiO₂,得到了结构为 ITO/ZnO/ZnO 纳米棒/SiO₂/Al 的全无机发光器件。采用能谱和吸收光谱证实了 ZnO 表面 SiO₂ 的附着量随旋涂速度下降呈现增大的趋势。比较了不同速度旋涂 SiO₂ 的条件下器件的 EL 光谱,发现随着转速的降低,紫外发光强度先增大后减小,当旋涂速度达到最佳(1000 r/min)时有最强的紫外发射,而可见区的发光几乎消失。转速的降低使 SiO₂ 附着量相应的增加,电子隧穿过 SiO₂ 所需的电压增大,器件达到最佳的工作电压变大,而器件的电流逐渐变小,说明参与复合的载流子增多使得器件中的传导电荷减少。经过分析认为 SiO₂ 能够很好地改善载流子在发光层中的平衡及提高电子注入能量,并且可以增加高能态缺陷能级电子的数量及复合几率。

参 考 文 献

- 1 M H Huang, S Mao, H Feick, *et al.*. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers [J]. *Science*, 2001, 292(5523): 1897—1899.
- 2 X W Sun, S F Yu, C X Xu, *et al.*. Room-temperature ultraviolet lasing from zinc oxide microtubes [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2003, 42(2): L1229—L1231.
- 3 S Kishwar, G Tzamalīs, O Nur, *et al.*. Electro-optical and cathodoluminescence properties of low temperature grown ZnO nanorods/p-GaN white light emitting diodes [J]. *Phys Status Solidi A*, 2010, 207(1): 67—72.
- 4 A Javey, S Nam, R S Friedman, *et al.*. Layer-by-layer assembly of nanowires for three-dimensional, multifunctional electronics [J]. *Nano Lett*, 2007, 7(3): 773—777.
- 5 Chen Chuanxiang, Qi Hongxia. Influence of annealing on ZnO films and ZnO/p-Si heterojunctions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1411—1414.
陈传祥, 齐红霞. 退火对 ZnO 薄膜晶体结构和 ZnO/p-Si 异质结光电性质的影响[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1411—1414.
- 6 R Deng, B Yao, Y F Li, *et al.*. X-ray photoelectron spectroscopy measurement of n-ZnO/p-NiO heterostructure valence-band offset [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(2): 022108.
- 7 Qi Hongxia, Chen Chuanxiang. Photoelectric effects of ZnO/P-Si heterojunction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3232—

3235.

- 8 齐红霞, 陈传祥. ZnO/P-Si 异质结的光电特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3232—3235.
- 8 Y Q Bie, Z M Liao, H Z Zhang, *et al.*. Self-powered, ultrafast, visible-blind UV detection and optical logical operation based on ZnO/GaN nanoscale p-n junctions [J]. *Adv Mater*, 2011, 23(5): 649—653.
- 9 C Y Chang, F C Tsao, C J Pan, *et al.*. Electroluminescence from ZnO nanowire/polymer composite p-n junction [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(17): 173503.
- 10 X Sun, J Huang, J Wang, *et al.*. A ZnO nanorod inorganic/organic heterostructure light-emitting diode emitting at 342 nm [J]. *Nano Lett*, 2008, 8(4): 1219—1223.
- 11 S L Zhao, P Z Kan, Z Xu, *et al.*. Electroluminescence of ZnO nanorods/MEH-PPV heterostructure devices [J]. *Org Electron*, 2010, 11(5): 789—793.
- 12 Y Sato, H Kanai. Stability of organic electroluminescent diodes [J]. *Mol Cryst Liq Cryst*, 1994, 252(53): 435—442.
- 13 B S Mashford, T L Nguyen, G J Wilson, *et al.*. Al-inorganic quantum-dot light-emitting devices formed via low-cost, wet-chemical processing [J]. *J Mater Chem*, 2010, 20(1): 167—172.
- 14 T Omata, Y Tani, S Kobayashi, *et al.*. Ultraviolet electroluminescence from colloidal ZnO quantum dots in an all-inorganic multilayer light-emitting device [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(6): 061104.
- 15 V Wood, M Panzer, J Halpert, *et al.*. Selection of metal oxide charge transport layers for colloidal quantum dot LEDs [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(11): 3581—3586.
- 16 X Ma, P Chen, D Li, *et al.*. Electrophotoluminescence of ZnO film [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(2): 021105.
- 17 X Ma, J Pan, P Chen, *et al.*. Room temperature electrically pumped ultraviolet random lasing from ZnO nanorod arrays on Si [J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 14426—14433.
- 18 X Yan, Z Li, R Chen, *et al.*. Template growth of ZnO nanorods and microrods with controllable densities [J]. *Cryst Growth Des*, 2008, 8(7): 2406—2410.
- 19 Wang Jinzhong, Du Guotong, Wang Xinqiang, *et al.*. Effects of annealing on the structure and photoluminescence of ZnO thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(2): 178—180.
王金忠, 杜国同, 王新强, 等. 退火对 ZnO 薄膜结构及发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2002, 22(2): 178—180.
- 20 Z Yang, Z Yu, H Chen, *et al.*. Growth of amorphous SiO₂ nanowires on pre-oxidized silicon substrate via chemical vapor deposition [J]. *J Non-Cryst Solids*, 2008, 354(15-16): 1731—1735.
- 21 Y Yang, X Chen, Y Feng, *et al.*. Physical mechanism of blue-shift of UV luminescence of a single pencil-like ZnO nanowire [J]. *Nano Lett*, 2007, 7(12): 3879—3883.
- 22 N Wang, Y Yang, G Yang. Indium oxide-zinc oxide nanosized heterostructure and whispering gallery mode luminescence emission [J]. *J Phys Chem C*, 2009, 113(35): 15480—15483.
- 23 T DiStefano, D Eastman. The band edge of amorphous SiO₂ by photoinjection and photoconductivity measurements [J]. *Solid State Commun*, 1971, 9(24): 2259—2261.
- 24 Xu Chunxiang, Lou Zhidong, Xu Xurong. The direct evidence of the accelerating action of SiO₂ in TFEL devices [J]. *Chin J Luminescence*, 1995, 16(3): 187—191.
徐春祥, 娄志东, 徐叙璐. 薄膜电致发光器件中 SiO₂ 加速作用的直接证据[J]. *发光学报*, 1995, 16(3): 187—191.
- 25 Z Fu, B Yang, L Li, *et al.*. An intense ultraviolet photoluminescence in sol-gel ZnO-SiO₂ nanocomposites [J]. *J Phys Condens Matter*, 2003, 15(17): 2867—2873.