

文章编号: 1000-7032(2015)12-1363-07

# 不同密度银纳米粒子对氧化锌基发光二极管发光的增强

乔 倩<sup>1\*</sup>, 单崇新<sup>2\*</sup>, 刘娟意<sup>1</sup>, 陶丽芳<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>1</sup>,  
张存喜<sup>1</sup>, 李炳辉<sup>2</sup>, 申德振<sup>2</sup>

(1. 浙江海洋学院 船舶与海洋工程学院, 浙江 舟山 316022;

2. 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:** 采用分子束外延法制备不同密度的银纳米粒子 (Ag NPs) 修饰的局域表面等离子体共振增强 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结发光二极管 (LEDs), 并对其电学及光学性质进行表征。结果显示: LEDs 中引入适当浓度的 Ag NPs 有利于 Ag NPs 局域表面等离子体激元与 ZnO 激子相耦合, 可以显著提高器件的电致发光性能; 随着 Ag NPs 浓度的增加, LEDs 发光增强倍数先增大后减小, 分析认为这是 Ag NPs 局域表面等离子体共振耦合增强过程和 Ag NPs 的消光过程两者之间相互博弈而导致的结果。

**关键词:** 局域表面等离子体共振; 发光二极管; 银纳米粒子; 电致发光

中图分类号: TN383+.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20153612.1363

## Localized Surface Plasmon Resonance Enhanced Electroluminescence from ZnO-based Light-emitting Diodes via Optimizing The Density of Silver Nanoparticles

QIAO Qian<sup>1\*</sup>, SHAN Chong-xin<sup>2\*</sup>, LIU Juan-yi<sup>1</sup>, TAO Li-fang<sup>1</sup>,  
WANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Cun-xi<sup>1</sup>, LI Bing-hui<sup>2</sup>, SHEN De-zhen<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. 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: qian\_qiao@aliyun.com

**Abstract:** Localized surface plasmon resonance enhanced n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN heterostructure light-emitting diodes (LEDs) with different silver nanoparticles (Ag NPs) density were fabricated using molecular-beam epitaxy technique. It is found that the introduction of Ag NPs with suitable density is favorable for the effective resonant coupling between excitons in ZnO and the localized surface plasmons of Ag NPs, and thereby significantly improves the electroluminescence (EL) performance of the device. Note that the enhancement ratio increases firstly with the Ag NPs density and then decreases, and the variation is believed to be resulted from balance between the enhancement caused by the resonant coupling between the excitons in ZnO and the localized surface plasmons of Ag NPs and the extinction of the emitted photons by the Ag NPs.

**Key words:** localized surface plasmon resonance; light-emitting diodes; silver nanoparticles; electroluminescence

收稿日期: 2015-08-01; 修订日期: 2015-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(11304281); 浙江海洋学院科研启动项目(21065013213)资助

## 1 引 言

金属纳米粒子在入射光子激发下,纳米粒子中自由振荡的电子与入射光子相互作用产生局域表面等离子体共振现象,共振的频率与金属纳米粒子的材料、形状、大小、纳米粒子所处的环境以及粒子之间的耦合作用等密切相关<sup>[1-3]</sup>。局域表面等离子体共振耦合产生的电磁场强度在金属纳米粒子表面被极大增强,形成很强的近场能量密度,可以大大提高金属表面附近材料的光电转换效率。目前,金属纳米粒子已被广泛用于提高光电器件的转化效率,如太阳能电池、半导体激光器、发光二极管和光探测器等<sup>[4-10]</sup>。

半导体发光二极管(Light-emitting diodes, LEDs)由于发光效率高、工作电压低、寿命长等优点,已成为各种固态发光器件的重要部分<sup>[11]</sup>。II-VI族直接带隙化合物半导体氧化锌(ZnO)的禁带宽度为3.37 eV,激子结合能为60 meV,远高于室温热离化能26 meV,理论上在室温可获得高效的紫外激子发光,被认为是制备紫外发光二极管和激光器等光电子器件的理想材料<sup>[12-13]</sup>。迄今为止,研究人员已在ZnO基紫外发光器件方面取得了诸多有意义的成果<sup>[13-15]</sup>,然而目前ZnO基发光器件的性能还很低,离实际应用有较大的差距。

近年来,利用金、银、铂等贵金属纳米粒子局域表面等离子体共振效应提高ZnO基发光器件发光效率成为业界研究的热点。Zhang等<sup>[16-17]</sup>研究发现,银纳米粒子(Ag NPs)的局域表面等离子体共振效应可以使n-ZnO/AlN/p-GaN异质结LEDs的发光强度提高2.5倍,并且在Ag NPs直径为10 nm时增强效果最好。Liu等<sup>[18-19]</sup>研究发现,Ag NPs与n-ZnO/i-ZnO/p-GaN异质结LEDs发光层之间的距离为10 nm时,发光增强效果最好。本研究组也对金属纳米粒子局域表面等离子体共振效应提高ZnO基LEDs器件的发光效率进行了诸多研究,发现Ag NPs可以使n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN异质结LEDs的紫外发光强度提高3.2倍<sup>[20]</sup>,且不同种类的金属纳米粒子对器件的发光具有选择性增强特性,只有在ZnO基LEDs器件的发光波长接近于金属纳米粒子局域表面等离子体共振波长时才会出现明显的增强效应<sup>[21]</sup>。同时,局域表面等离子体共振效应对ZnO基

LEDs的增强效果具有很好的稳定性<sup>[22]</sup>,LEDs放置90 d以后,发光的增强效果也没有明显的衰减。

从已经报道的研究结果看,目前金属纳米粒子的局域表面等离子体共振效应在增强ZnO基LEDs器件的发光强度方面取得了一些进展。但是,要构建一个高效的局域表面等离子体共振效应增强ZnO基LEDs器件,还有很多的工作需要去做。在目前对于局域表面等离子体共振效应增强ZnO基LEDs器件发光性能的研究中,关于LEDs中金属纳米粒子分布密度的研究还没有报道,而金属纳米粒子的分布密度对器件的发光性能也会产生非常重要的影响。本文构建了不同密度Ag NPs修饰的局域表面等离子体共振增强n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN异质结LEDs器件,研究了Ag NPs的密度对ZnO基LEDs器件发光性能的影响。研究发现,合适的Ag NPs的分布密度可以显著提高LEDs器件的电致发光性能,而Ag NPs的密度太高或者太低,增强效果都不好。

## 2 实 验

以高纯金属锌(99.9999%)、金属镁(99.9999%)、氧气(99.999%)作为原料,商用的p-GaN作为衬底,利用等离子体辅助分子束外延(Molecular-beam epitaxy, MBE)技术制备n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN异质结LEDs器件。以硝酸银、柠檬酸钠、硼氰化钠为原料,采用Mulfinger等<sup>[23]</sup>描述的硼氰化钠还原硝酸银法制备Ag NPs溶液。

具体过程如下:(1)将经过化学清洗的p-GaN衬底放入MBE生长室,控制衬底温度为750℃,真空条件下预处理30 min,去除表面吸附的杂质。(2)控制衬底温度为650℃,金属Mg源温度为317℃,沉积20 nm MgO层;随后控制金属Zn源温度为235℃,沉积50 nm i-ZnO层。(3)将样品从MBE腔中取出,分成形状大小相同的4块,第一块样品作为参比样品不做任何处理(记作LED w/o Ag NPs),在余下的3块样品上分别旋涂1次、2次、3次硼氰化钠还原硝酸银法制备Ag NPs溶液(分别记作LED w Ag NPs-1、LED w Ag NPs-2、和LED w Ag NPs-3)。(4)将4块样品再次放入到MBE生长室中,衬底温度先控制在350℃,金属Zn源温度为235℃,沉积20 nm i-ZnO层,覆盖Ag NPs后,将衬底温度升到500℃,金属Zn源

温度升高到 245 °C,沉积 500 nm n-ZnO 层。(5) 最后利用金属热蒸发技术分别在 p-GaN 层和上面 n-ZnO 薄膜层上沉积双层金属 Ni/Au 和 Ti/Au 作为电极。

利用 Hitachi S-4800 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 和 Shimadzu UV-3101 PC 型紫外-可见-近红外分光光度计来表征 Ag NPs 的形貌及光学特性。利用 LakeShore 公司的 7707 霍尔测试系统来表征 p-GaN、i-ZnO 和 n-ZnO 薄膜层的电学性质以及 Ag NPs 修饰的 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 器件的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性。利用 Hitachi F-4500 荧光光谱仪来表征 LEDs 器件的电致发光特性,泵浦电源为 Keithley 2400 数字源表。

### 3 结果与讨论

图 1 分别显示了旋涂 1 次、2 次和 3 次 Ag NPs 溶液的 ZnO 薄膜的 SEM 照片。从图中可以看出,Ag NPs 的直径为 10 ~ 20 nm,随机分散在薄膜的表面,并且随着旋涂次数变多,Ag NPs 的密度变大。对于旋涂 1 次 Ag NPs 溶液的样品,如图 1(a) 所示,Ag NPs 的分布很稀,纳米粒子之间间距较远,ZnO 薄膜层的表面覆盖率大约为 5% 左右。对于旋涂 2 次 Ag NPs 溶液的样品,如图 1(b) 所示,ZnO 薄膜上 Ag NPs 的个数明显增多,少数区域发生 Ag NPs 的聚集现象,ZnO 薄膜层的表面覆盖率约为 10%。对于旋涂 3 次 Ag NPs 溶液的样品,如图 1(c) 所示,ZnO 薄膜上 Ag NPs 的个数进一步增多,Ag NPs 之间的距离变近,ZnO 薄膜层的表面覆盖率约为 20%,且 Ag NPs 的聚集区域也明显增多。

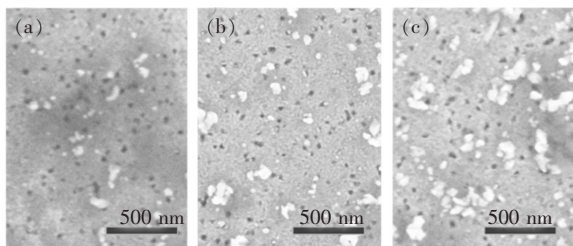


图 1 旋涂不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜 SEM 照片。(a) Ag NPs-1;(b) Ag NPs-2;(c) Ag NPs-3。

Fig. 1 FE-SEM images of the Ag NPs deposited on ZnO films with different spin-coating times. (a) Ag NPs-1. (b) Ag NPs-2. (c) Ag NPs-3.

为了研究用来提供局域表面等离子体共振源的 Ag NPs 的光学性质,我们对没有旋涂和旋涂不

同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜进行了紫外-可见透射光谱和消光(散射+吸收)光谱测试。图 2(a) 为没有旋涂 Ag NPs 和分别旋涂有 1 次、2 次、3 次 Ag NPs 的 ZnO 薄膜的紫外-可见透射光谱。从图中可以看出,所有的薄膜样品在 380 nm 以下显示出很强的吸收,该吸收来源于半导体 ZnO 薄膜材料的禁带吸收。对于没有旋涂 Ag NPs 的 ZnO 薄膜,其在 390 ~ 800 nm 区域内完全透明,透过率达到 95% 以上;而对于旋涂了不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜样品,其在该区域内透过率均有不同程度的下降。对于旋涂 1 次 Ag NPs 的 ZnO 薄膜样品,其在 390 ~ 500 nm 的透过率与没有旋涂 Ag

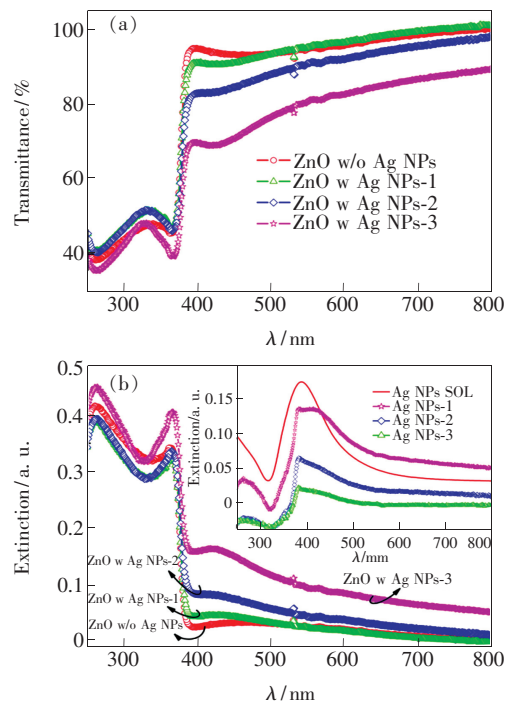


图 2 没有旋涂 Ag NPs 和旋涂不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜的紫外-可见透射光谱(a)和紫外-可见消光光谱(b),图(b)插图为 Ag NPs 溶液、Ag NPs-1、Ag NPs-2 和 Ag NPs-3 的局域表面等离子体共振吸收光谱。

Fig. 2 UV-visible transmittance (a) and UV-visible extinction (b) spectra of ZnO film without Ag NPs, as well as ZnO film with Ag NPs-1, Ag NPs-2, and Ag NPs-3, respectively. Inset of (b) shows the localized surface plasmon resonance extinction spectra of Ag NPs-1, Ag NPs-2, and Ag NPs-3 obtained by subtracting the extinction spectrum of ZnO film with Ag NPs to that of ZnO film without Ag NPs, and the localized surface plasmon resonance extinction spectrum of Ag NPs sol is also displayed for comparison.

NP 的 ZnO 薄膜相比略有降低,而在 500 ~ 800 nm 的透过率保持不变;对于旋涂 2 次 Ag NPs 的样品,其在 390 ~ 800 nm 范围内的透过率出现整体下降,下降幅度为 5% ~ 20%,尤其是在 390 ~ 500 nm 的透过率降低幅度较大;对于旋涂 3 次 Ag NPs 的样品,其在 390 ~ 800 nm 范围内的透过率整体下降程度更加明显,下降幅度为 10% ~ 30%,尤其是在 390 ~ 500 nm 的透过率降低幅度比较严重。

图 2(b) 显示的是没有旋涂和分别旋涂有 1 次、2 次、3 次 Ag NPs 的 ZnO 薄膜的紫外-可见消光光谱。对于旋涂有不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜,与没有旋涂 Ag NPs 的 ZnO 薄膜相比较具有相同的吸收带边,但是旋涂了 Ag NPs 的 ZnO 薄膜在 390 ~ 500 nm 处显示出一个吸收包络。对旋涂了不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜的消光光谱与没有旋涂 Ag NPs 的 ZnO 薄膜的消光光谱做差谱,其结果显示在图 2(b) 插图中。从图中可以看出,旋涂了 Ag NPs 的样品在 380 ~ 500 nm 波长处显示出一个明显的吸收包,且随着旋涂次数的增加该吸收包络变得更加明显。同时图 2(b) 插图中也给出化学方法合成 Ag NPs 溶液的消光光谱,可以发现,旋涂在 ZnO 薄膜上的 Ag NPs 的吸收包络与 Ag NPs 溶液的消光光谱相吻合。因此,可以认为旋涂了不同次数 Ag NPs 的 ZnO 薄膜消光光谱中 380 ~ 500 nm 波长处的这个包络来源于 Ag NPs 的局域表面等离子体共振吸收。

图 3(a) 为 Ag NPs 局域表面等离子体共振增强 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 器件的结构示意图。考虑到金属纳米粒子局域表面等离子体激元的电磁场为消逝场,纵向的衰减常数一般在几十个纳米量级,为了使 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 发出的光子能够与 Ag NPs 很好地耦合,选择将金属 Ag NPs 置入到发光层 i-ZnO 层中。图 4(b) 显示了参比的 ZnO 基 LED 器件和 Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 器件的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性曲线,从图中可以看出,Ag NPs-1 以及 Ag NPs-2 修饰的 LEDs 和参比的 LEDs 的  $I$ - $V$  特性曲线非常近似,开启电压分别为 24.6, 24.2, 23.8 V。而对于旋涂了 3 次 Ag NPs 的 LEDs,其  $I$ - $V$  特性曲线与前 3 个器件稍有不同,开启电压为 27 V。

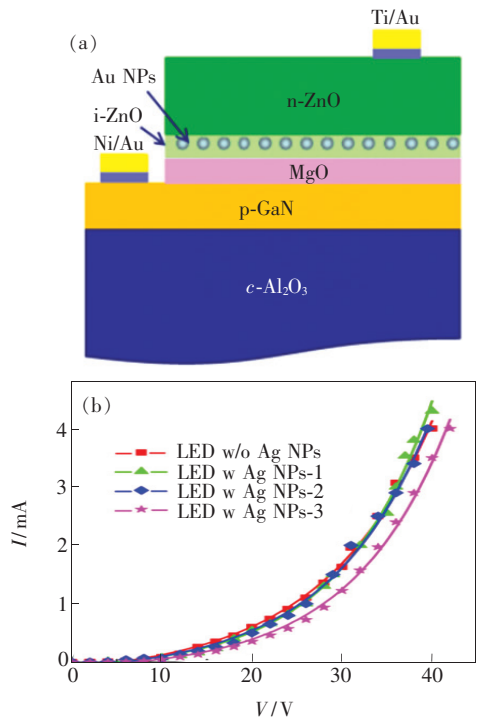


图 3 (a) Ag NPs 局域表面等离子体共振增强 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 器件结构示意图; (b) 参比的 ZnO 基 LED 和 Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性曲线。

Fig. 3 (a) Schematic diagram of Ag NPs localized surface plasmon resonance modified n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN heterostructures LEDs. (b)  $I$ - $V$  characteristics of n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN heterostructures LEDs without Ag NPs, as well as with Ag NPs-1, Ag NPs-2 and Ag NPs-3.

图 4 分别显示了参比的 ZnO 基 LED 和 Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 的室温下电致发光光谱,注入电流为 1.0 ~ 4.0 mA。从图中可以看出,n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 的电致发光光谱由 400 nm 处的发射峰和 440 nm 处的发射峰叠加而成,且随着注入电流的增加,器件发光强度增大。400 nm 附近的紫外发光来源于 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 中 i-ZnO 薄膜层的近带边复合发射,而 440 nm 附近的发光来源于 p-GaN 层中导带电子到 Mg 相关的受主能级的辐射跃迁<sup>[14]</sup>,具体发光过程见参考文献 [14, 21]。对比图 4 (b)、(c)、(d) 与图 4 (a),在相同注入电流下,相比于没有 Ag NPs 修饰的 ZnO 基 LED,Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 LEDs 器件的电致发



光强度出现了不同程度的增强现象。分析认为, LEDs 的电致发光强度的增强是由于 Ag NPs 的局域表面等离子体激发与 LEDs 中电子-空穴对或光子之间的相互耦合作用所引起的<sup>[20-21]</sup>。在正向注入电流的作用下, n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 器件内部产生的部分电子-空穴对复合形成光子, 当光子的能量与 Ag NPs 的局域表面等

离子体激发能量相匹配时, 激发 Ag NPs 产生局域表面等离子体共振, Ag NPs 表面电磁场极大地增强。该高强度的能量场加快了 LEDs 中电子-空穴对复合的速率, 使得 LEDs 中一部分本来有可能发生非辐射复合的电子-空穴对也发生辐射复合放出光子, 从而提高了器件的发光量子效率, 增强了器件的发光。

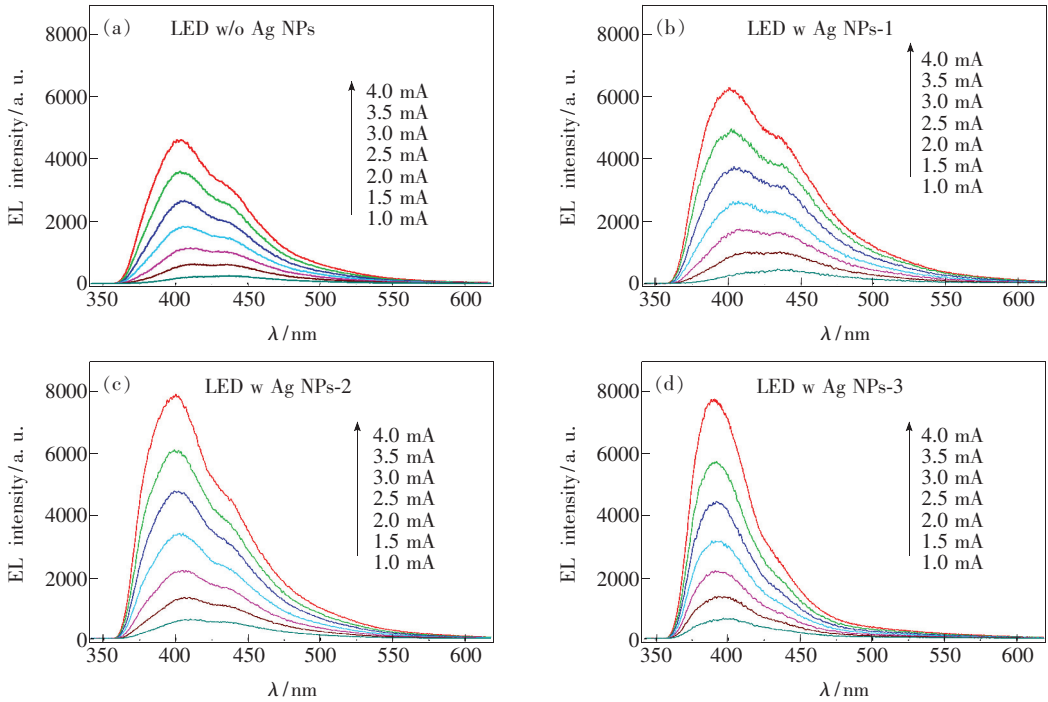


图 4 不同注入电流下, 参比的 ZnO 基 LED (a)、Ag NPs-1 (b)、Ag NPs-2 (c) 和 Ag NPs-3 (d) 修饰的 ZnO 基 LEDs 的室温电致发光光谱, 电流变化范围为 1~4 mA。

Fig. 4 EL spectra of n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN heterostructures LEDs without Ag NPs (a), as well as with Ag NPs-1 (b), Ag NPs-2 (c), and Ag NPs-3 (d) under various injection currents ranging from 1 to 4 mA.

从图 4 还可以发现, 随着 Ag NPs 密度的增加, LEDs 发光的增强倍数出现先增加后减少的现象。在相同注入电流下, 相比于没有 Ag NPs 修饰的 ZnO 基 LED 器件, 旋涂 1 次 Ag NPs 的 LEDs 的电致发光强度增大; 旋涂 2 次 Ag NPs 后, LEDs 的电致发光强度继续增大; 然而当 Ag NPs 的旋涂次数再次增加时, 器件发光的增强效果反而稍稍下降。为了研究 Ag NPs 的密度对 LEDs 器件发光强度的增强效果, 我们将参比的 ZnO 基 LED 和 Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 的电致发光的幅值随注入电流变化的关系显示在图 5 中。从图中可以看出, 在注入电流为 2.5 mA 时, 旋涂 1 次 Ag NPs 的 LED 发光强度增强了约 1.4 倍, 旋涂 2 次 Ag NPs 的 LED 发光强

度增强了约 1.9 倍, 而旋涂 3 次 Ag NPs 的 LED 发光强度增强约为 1.7 倍。分析认为, 当 ZnO 基 LEDs 器件旋涂 1 次 Ag NPs 时, 器件中覆盖 Ag NPs 密度较低, 这些 Ag NPs 与 LEDs 中电子-空穴对或光子共振耦合, 提高了 LEDs 的电致发光效率。但是由于器件中 Ag NPs 的量比较少, LEDs 中电子-空穴对或光子得不到 Ag NPs 局域表面等离子体激发的有效耦合, 因此 LEDs 的电致发光效率提高得有限。当增加 Ag NPs 的密度时, Ag NPs 的局域表面等离子体激发与发光器件中更多的电子-空穴对或光子相互共振耦合, 从而使 LEDs 的电致发光效率进一步提高。但是, 进一步增加发光器件中 Ag NPs 的密度时, 发光器件中的电子-空穴对或光子与 Ag NPs 局域表面等离子体

激元之间的耦合已经达到饱和,无法再继续提高发光器件的发光效率。

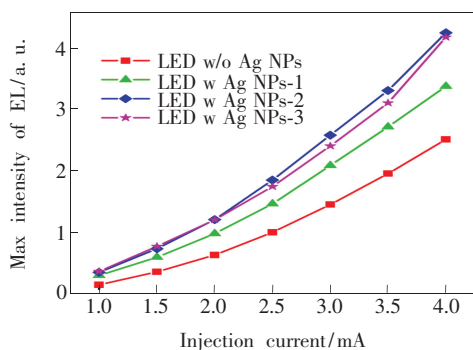


图5 参比的 ZnO 基 LED 和 Ag NPs-1、Ag NPs-2 以及 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 的电致发光强度随注入电流的变化关系。

Fig. 5 Normalized EL intensities of LEDs without Ag NPs, as well as with Ag NPs-1, Ag NPs-2, and Ag NPs-3 as a function of the injection current.

从图 4 和图 5 中还可以看出,旋涂了 3 次 Ag NPs 后,LEDs 发光的增强效果出现降低现象,这其可能是以下两个原因所导致:

(1)由前面的分析可知 Ag NPs 要发生局域表面等离子体共振耦合增强发光,首先要吸收光子,因此,在 Ag NPs-3 修饰的 LEDs 中,过多的金属纳米粒子可能会消耗更多的光子,从而导致器件发光强度的增强倍数下降。这在前面的实验数据中也有相应的证据,如图 2(a)和(b)中 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 薄膜相比于其他样品透过率明显下降、消光度明显升高。推断认为,ZnO 薄膜上负载了过多的 Ag NPs,由于 Ag NPs 对光子的吸收及散射作用导致了 ZnO 薄膜的光透射率下降,致使 LEDs 的光子出射效率降低,从而使得 LEDs

发光强度的增强倍数下降。

(2)LEDs 中引入过多的 Ag NPs 会引起器件电学性质发生变化。如图 3(b)所示,Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 的  $I-V$  特性与其他 3 个器件有差异,相同的输入电压下,其电流比其他器件小。这是由于 Ag NPs-3 修饰的 ZnO 基 LEDs 负载 Ag NPs 的量比较多,在器件的制备过程中影响了后续过程中制备 n-ZnO 薄膜层的质量,从而降低了 Ag NPs 的局域表面等离子体共振增强效果。

综合这两方面因素,可以认为在发光器件中引入过多的金属纳米粒子会引起发光器件的光透过率和电学性能下降,导致局域表面等离子体共振效应增强 LEDs 发光强度的效果变差。

## 4 结 论

利用 MBE 技术与化学合成技术相结合制备了不同密度 Ag NPs 局域表面等离子体共振效应增强 n-ZnO/i-ZnO/MgO/p-GaN 异质结 LEDs 器件,并研究了器件中的 Ag NPs 的形貌、光学性质以及 Ag NPs 修饰的 ZnO 基 LEDs 器件的电学及光学性质。研究发现:当 LEDs 中的 Ag NPs 的密度较低(旋涂 1 次)时,Ag NPs 可以实现局域表面等离子体共振增强 LEDs 的发光强度,发光增强倍数为 1.4 倍;当器件中 Ag NPs 的密度增加(旋涂 2 次)时,LEDs 的发光强度随之增大,发光增强倍数上升为 1.9 倍;但是当器件中 Ag NPs 的密度继续增加(旋涂 3 次)时,过多的金属纳米粒子会影响 LEDs 的电学性质和光学性质,局域表面等离子体共振增强 LEDs 的发光强度的效果反而变差,发光增强倍数为 1.7 倍。

## 参 考 文 献:

- [1] Maier S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Springer, 2007.
- [2] Kreibig U, Vollmer M. *Optical Properties of Metal Clusters* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1995.
- [3] Kelly K L, Coronado E, Zhao L L, *et al.* The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2003, 107(3):668-677.
- [4] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9(3):205-213.
- [5] Ferry V E, Munday J N, Atwater H A. Design considerations for plasmonic photovoltaics [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(43):4794-4808.
- [6] Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, *et al.* Demonstration of a spaser-based nanolaser [J]. *Nature*, 2009, 460(7259):1110-1112.
- [7] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, *et al.* Plasmon lasers at deep subwavelength scale [J]. *Nature*, 2009, 461(7264):629-632.

- [ 8 ] Okamoto K, Niki I, Shvartser A, *et al.* Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells [J]. *Nat. Mater.*, 2004, 3(9):601-605.
- [ 9 ] Gu X, Qiu T, Zhang W, *et al.* Light-emitting diodes enhanced by localized surface plasmon resonance [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2011, 6(1):199-202.
- [ 10 ] Chang C C, Sharma Y D, Kim Y S, *et al.* A surface plasmon enhanced infrared photodetector based on InAs quantum dots [J]. *Nano Lett.*, 2010, 10(5):1704-1709.
- [ 11 ] Schubert E F. *Light-emitting Diodes* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [ 12 ] Ozgur U, Hofstetter D, Morkoc H. ZnO devices and applications: A review of current status and future prospects [J]. *IEEE Xplore*, 2010, 98(7):1255-1268.
- [ 13 ] Radzimska A K, Jesionowski T. Zinc oxide from synthesis to application: A review [J]. *Materials*, 2014, 7(4):2833-2881.
- [ 14 ] Zhu H, Shan C X, Yao B, *et al.* Ultralow-threshold laser realized in zinc oxide [J]. *Adv. Mater.*, 2009, 21(16):1613-1617.
- [ 15 ] Chu S, Wang G, Zhou W, *et al.* Electrically pumped waveguide lasing from ZnO nanowires [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6(8):506-510.
- [ 16 ] Zhang S G, Zhang X W, Yin Z G, *et al.* Localized surface plasmon-enhanced electroluminescence from ZnO-based heterojunction light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(18):181116-1-3.
- [ 17 ] Zhang S G, Zhang X W, Yin Z G, *et al.* Optimization of electroluminescence from n-ZnO/AlN/p-GaN light-emitting diodes by tailoring Ag localized surface plasmon [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 112(1):013112-1-5.
- [ 18 ] Liu W Z, Xu H Y, Zhang L X, *et al.* Localized surface plasmon-enhanced ultraviolet electroluminescence from n-ZnO/i-ZnO/p-GaN heterojunction light-emitting diodes via optimizing the thickness of MgO spacer layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(14):142101-1-3.
- [ 19 ] Liu W Z, Xu H Y, Wang C L, *et al.* Enhanced ultraviolet emission and improved spatial distribution uniformity of ZnO nanorod array lightemitting diodes *via* Ag nanoparticles decoration [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(18):8634-8639.
- [ 20 ] Qiao Q, Shan C X, Zheng J, *et al.* Localized surface plasmons enhanced ultraviolet light-emitting devices [J]. *J. Lumin.*, 2013, 134:754-757.
- [ 21 ] Qiao Q, Shan C X, Zheng J, *et al.* Localized surface plasmons enhanced light-emitting devices [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(19):9481-9484.
- [ 22 ] Shen H, Shan C X, Qiao Q, *et al.* Stable surface plasmon enhanced ZnO homojunction light-emitting devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1(2):234-237.
- [ 23 ] Mulfing L, Solomon S D, Bahadory M, *et al.* Synthesis and study of silver nanoparticles [J]. *J. Chem. Educ.*, 2007, 84(2):322-325.



乔倩(1985 -),女,安徽五河人,博士,讲师,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子材料与器件、金属纳米粒子光学性质等方面的研究。

E-mail: qian\_qiao@aliyun.com



单崇新(1977 -),男,河南长垣人,研究员,博士生导师,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: shanxc@ciomp.ac.cn