

文章编号: 1000-7032(2013)05-0535-07

# 利用金属纳米颗粒改善有机光电器件性能

谢文法\*, 徐 凯, 李 杨, 闻雪梅, 张乐天

(集成光电子国家重点联合实验室 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 有机发光和有机光伏器件为代表的有机光电器件在显示、照明、能源等领域有着广阔的应用前景。有机发光器件具有发光效率高、发光颜色丰富、响应速度快等优点, 而有机光伏器件具有质轻、成本低、可实现柔性器件等优点。金属纳米颗粒的表面等离子体共振耦合效应可以提高有机发光器件的效率和有机光伏器件的光电转换效率, 因而得到了研究人员的广泛关注。本文综述了金属纳米颗粒改善有机发光/光伏器件性能方面的研究进展, 并对其今后的应用趋势进行了讨论。

**关键词:** 有机光电器件; 金属纳米颗粒; 表面等离子体共振耦合

中图分类号: TN383+.1; TM914.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20133405.0535

## High-efficiency Organic Photoelectric Devices with Metal Nanoparticles

XIE Wen-fa\*, XU Kai, LI Yang, WEN Xue-mei, ZHANG Le-tian

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xiewf@jlu.edu.cn

**Abstract:** Organic photoelectric devices including organic light-emitting devices (OLEDs) and organic photovoltaic cells (OPVs), etc, have great potential applications in flat-panel display, solid-state lighting and energy. OLED is a promising technology for display due to its high efficiency, excellent color gamut and quick response. OPV has the advantages of light weight, low cost and flexibility. Surface plasmon resonance of metal nanoparticles could improve the efficiency of OLED and OPV. This paper reviewed the research progress of high-efficiency OLED/OPV with metal nanoparticles and discussed the prospective applications.

**Key words:** organic photoelectric devices; metal nanoparticles; surface plasmon resonance

## 1 引 言

自 Kodak 公司邓青云博士发表其在有机发光器件(OLED)<sup>[1]</sup>和有机光伏器件(OPV)<sup>[2]</sup>相关研究成果后,全世界许多企业和研究机构开始致力

于 OLED 和 OPV 的研究。OLED 由于其全固态器件、宽视角、响应快、易于实现柔性器件等特点使得其在显示和照明领域都有巨大应用前景,而 OPV 由于其材料来源广泛、工艺简单、成本低、柔性好等优势,对于太阳能利用方面也具有重要意

收稿日期: 2013-01-25; 修订日期: 2013-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(60937001, 11074096, 61177026); 教育部新世纪优秀人才支持计划(10-0446)资助项目

作者简介: 谢文法(1978-), 男, 福建三明人, 教授, 主要从事有机发光方面的研究。

E-mail: xiewf@jlu.edu.cn, Tel: (0431)85168241-8217

义。目前, OLED 和 OPV 都已经从实验室走向了市场<sup>[3-4]</sup>。

尽管 OLED 和 OPV 器件都已经取得了很大的进展,然而作为新兴的技术,依然还有很多待解决的物理和技术问题。目前 OLED 还存在着一系列的不足,例如载流子注入不平衡<sup>[5]</sup>、有机材料导电能力和稳定性较差<sup>[6,7]</sup>、光取出效率低<sup>[8]</sup>、效率滚降严重<sup>[9]</sup>等。这些不足除了通过合成新的材料来解决外,研究人员还可以通过其他方式加以解决。例如加入微透镜阵列可以提高光取出效率<sup>[10]</sup>,有机层中加入金属纳米颗粒可以改善发光器件的效率滚降<sup>[9]</sup>等。而在 OPV 中,光的收集和激子解离效率一直是重要的研究课题。在有机半导体中,由于激子扩散长度小于光吸收深度,极大影响了器件的能量转换效率<sup>[11]</sup>。

金属纳米颗粒表现出不同于金属体材料的许多电学、光学及化学特性,其中一个重要特性就是其表面等离子体共振特性<sup>[12]</sup>,研究人员在其催化、光子学、光学传感、生物标记、医疗等方面取得了重要的进展<sup>[13-17]</sup>。将金属纳米颗粒应用到有机光电器件中,利用金属纳米颗粒特殊的电学和光学特性来改善器件的性能成为目前有机光电器件领域的一个研究热点<sup>[18-34]</sup>。

## 2 金属纳米颗粒在 OLED 器件中的应用

由于 OLED 为多层结构,不同的有机层具有不同的功能,因而金属纳米颗粒在 OLED 中的位置会对 OLED 所产生不同的作用,进而导致对器件性能的影响也有所不同。

### 2.1 对载流子注入的影响

通常而言,在 OLED 中电极注入空穴的能力要比注入电子的能力大,并且有机材料传输空穴的能力比电子强,进而引起复合区中电子和空穴的比例不平衡,造成发光效率的降低。将金属纳米颗粒引入到电极和有机层之间,利用表面等离子体共振所产生的强大的局部电场,可以增强电子的注入效率,从而改善有机发光器件的性能。

Liu 等<sup>[12]</sup>利用激光脉冲沉积技术,将 Mg-Ni 合金纳米颗粒沉积到有机层和阴极之间。他们发现,在有纳米颗粒的器件中开启电压有所降低,器件电流明显高于无金属纳米颗粒器件的电流,其他性能也有很大提高。他们认为这是由于镁镍纳

米颗粒的共振效应导致局部电场增强,从而使电子的隧道注入增强。Liu 等<sup>[19]</sup>将金纳米颗粒加在阴极和空穴阻挡层之间,结果表明,金纳米颗粒的表面等离子体效应增加了电子的注入,明显提高了电流密度,同时降低了器件的开启电压,提高了器件发光亮度,最大发光效率增加了 15%。

Zheng 等<sup>[20]</sup>在 ITO 上旋涂银纳米粒子,制作了 NPB/Alq<sub>3</sub> 结构的器件。他们发现在低电压(4~8 V)区存在一电流曲线峰(共振峰),并且在这一区间不遵守空间电荷限制模型。随后电流下降,再逐渐上升。他们认为这是因为银纳米粒子存在着陷阱态,能够储存大量载流子。银纳米颗粒会形成一些分立的陷阱能级,而当偏压满足的时候这些陷阱能级能够与空穴传输层(NPB)的 HOMO 能级一起组成共振隧道。这样电流就像电容一样接近线性关系形成一个峰值。通过分析器件的电流-电压特性,银纳米颗粒的电荷陷阱效应使得在低电压时空穴储存银纳米颗粒中,当偏压增加时空穴被释放出来与界面处积聚的电子复合发光,在这一区域  $J$ - $V$  特性成平方关系,使得亮度有所增加。

### 2.2 对内量子效率的影响

金属纳米颗粒改善材料发光性能存在两个条件<sup>[21]</sup>:一是金属纳米颗粒的表面等离子体共振波长与发光波长相对应,光谱重叠越大耦合效果越明显。二是金属纳米颗粒与发光层之间应选择合适的距离,距离发光层太远则表面等离子体共振耦合特性影响不到发光层中的激子,耦合效果不明显;距离发光层太近则纳米颗粒表面会使激子非辐射猝灭比较严重,降低器件性能。研究表明,金属纳米颗粒能够提高发光激子的辐射发光效率。一些科研人员还通过理论模拟的方法进行了证实。

在对 Alq<sub>3</sub> 发光特性的研究中,Liu 等<sup>[19]</sup>发现,当发光中心接近 Ag 纳米颗粒并且距离合适时,由于纳米粒子的表面增强的局部电场影响,激子的辐射衰减将会增加,从而可以提高发光效率,并且存在一个最佳的距离使得效率提高幅度最大。而当发光层进一步接近 Ag 纳米粒子时,效率增加的幅度会降低。当纳米颗粒与发光层距离小于一定的数值时,发光效率反而降低,他们认为这是由于金属纳米粒子影响了发光材料的能量转移。除了选择合适的距离之外,金属纳米颗粒的

共振波长还应与发光层的发射波长相对应,且要求两种波长重合程度应较大。Tanaka 研究小组<sup>[21]</sup>将 50~60 nm 的金纳米棒引入到 ITO 表面,选择 Alq<sub>3</sub>:DCM 这样的掺杂层作为发光层。合成的金纳米棒存在两个共振峰,一个是 650 nm 处的主峰(对应于 DCM 的 650 nm 发光波长),另一个是 520 nm 处的肩峰。如图 1 所示,通过选择合适的距离,DCM 的发光强度得到了极大的提高,而 Alq<sub>3</sub> 的发光受到了抑制。当选择 12 nm 金纳米球代替纳米棒时,如图 2 所示,由于 12 nm 金纳米球的共振波长在 520 nm 处,所以 Alq<sub>3</sub> 的发光得到增强,而 DCM 的发光得到抑制。Fujiki 等<sup>[18]</sup>将 12 nm 的金纳米颗粒置于 ITO 表面,以 Alq<sub>3</sub> 作为发光层,金纳米颗粒的吸收光谱(510 nm)与 Alq<sub>3</sub> 的发光光谱(520 nm)重合得很好,与无金纳米颗粒的器件相比,器件的内量子效率最高提高了 20 倍。

除了上述的做法之外,还可以将纳米颗粒溶于有机层中来实现性能的改善。苏州大学的 Xiao 等<sup>[22]</sup>将低浓度的金纳米颗粒溶液溶于 PEDOT:PSS 中,发现在电流密度为 40 mA/cm<sup>2</sup> 时,Alq<sub>3</sub> 的发光效率提高了 25%。他们认为这是由于金纳米颗粒的表面等离子体近场效应增加了自发辐射效率。Frank Reil 等<sup>[23]</sup>也对金纳米颗粒的表面等离子体耦合效应影响辐射和非辐射效率方面做了详细的研究,并且讨论了颗粒形状、尺寸对发光特性的影响,这些特性可以实现有机光电器件性能

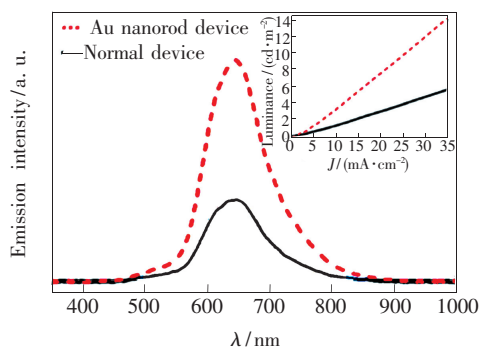


图 1 正常器件(实线)和加入金纳米棒器件(虚线)的发光光谱。插图:正常器件(实线)和加入金纳米棒器件(虚线)的电流密度和亮度的关系。

Fig. 1 Emission spectra of the normal device (solid line) and Au nanorod device (dotted line). Inset: Relationship between current density and luminance for the normal device (solid line) and Au nanorod device (dotted line).

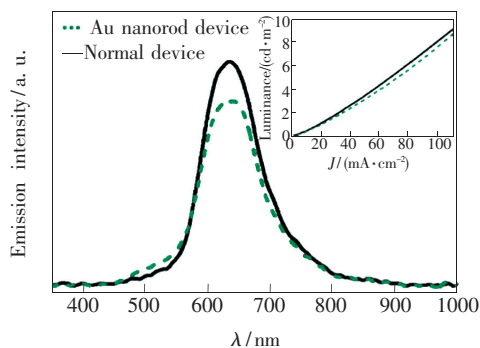


图 2 正常器件(实线)和加入金纳米球器件(虚线)的发光光谱。插图:正常器件(实线)和加入金纳米球器件(虚线)的电流密度和亮度的关系。

Fig. 2 Emission spectra of the normal device (solid line) and Au nanosphere device (dotted line). Inset: Relationship between current density and luminance for the normal device (solid line) and Au nanosphere device (dotted line).

的改善。

Yang 等<sup>[24]</sup>也做了一些类似的研究,并做了详细的解释。他们认为,在银纳米颗粒上形成的表面等离子体(SP)提供了强烈的施主衰减通道,增强了施主-受主之间的相互作用,降低了激子寿命,使发光增强,发光效率增加。具体地说,当 SP 波长接近受体吸收中心波长时,施主和受主之间的相互作用就会增强,当表面等离子体激发波长接近施主发光能量时施主衰减会增加,当 SP 能量接近受主吸收中心时,施主-受主相互作用增强。全部的能量转移效率是由施主衰减和施主-受主相互作用决定的,所以 SP 波长应接近施主发光和受主吸收中心。

前面已经提到,当金属纳米颗粒距离发光层很近时,会导致发光层的激子猝灭,因此不能将金属纳米颗粒引入到发光层中。研究人员采用了一些方法来消除纳米颗粒导致的激子猝灭,从而可以将金属纳米颗粒引入到发光层中。正如前面所述,金属纳米颗粒应与发光激子保持一定的距离,研究人员将金属纳米颗粒外围包裹了一定厚度的绝缘层,而这个绝缘层的厚度相当于前面所述的金属纳米颗粒与发光层之间的距离。Nunzil 等<sup>[25]</sup>将二氧化硅包裹的银纳米颗粒掺入到发光层中,在这种器件中,SiO<sub>2</sub> 绝缘层的厚度显得至关重要。如图 3 所示,与参考器件相比,当绝缘层厚度为 13 nm 时,器件效率最高;而绝缘层的厚度

为 7 nm 时,器件的效率比参考器件低。而加入裸露银纳米颗粒的器件效率降低了很多,研究人员认为这是因为裸露银纳米颗粒使载流子在其表面复合,导致了激子的非辐射猝灭,降低了器件性能。另外,根据 MEF 理论,裸露银纳米颗粒可能会导致  $\text{Ir}(\text{ppy})_3$  磷光发光猝灭。随后, Nunzil 等在聚合物发光器件中观察到了同样的现象。

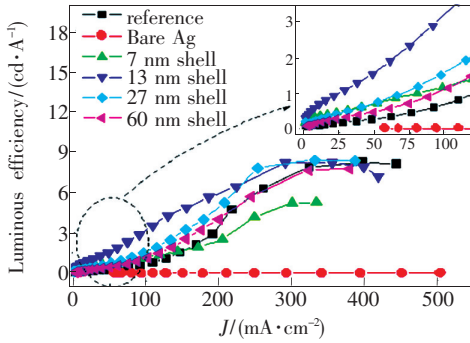


图 3 掺杂不同厚度  $\text{SiO}_2$  的  $\text{Ag-SiO}_2$  纳米颗粒磷光发光器件的发光效率和电流密度关系,颗粒浓度保持不变。

Fig. 3 Luminescence efficiency vs. current density of PHOLEDs doped with  $\text{Ag-SiO}_2$  NPs of different silica shell thickness. Particle concentration was kept the same.

由于真空蒸镀制备金属纳米颗粒的方法与小分子 OLED 制备工艺兼容性好,并且金属纳米颗粒的粒径大小可控,因此有研究人员使用这种方法将金属纳米颗粒引入到 OLED 中。实验表明,真空蒸镀的金属纳米颗粒粒径大小与蒸发速率有直接关系,而粒径大小又影响着表面等离子体共振波长。Arunandan Kumar 等<sup>[26]</sup>的实验结果表明,金、银纳米颗粒的粒径大小与蒸发速率成正比。进一步,他们将金、银纳米颗粒分别引入到了 OLED 中,发现当金纳米颗粒与发光层的距离小于 5 nm 时,在金属表面会发生从激子到金属表面的 Förster 形式的非辐射能量转移。当距离为 5 nm 时,非辐射能量转移降低,从而发光强度提高了 3.2 倍。而距离继续增加后,激子和表面等离子体耦合效应减弱,发光强度提高率降低。对于金属纳米颗粒耦合效应与距离有关的问题, Arunandan Kumar 等<sup>[27]</sup>随后用银纳米颗粒在 BCz-VBi 蓝光器件中也得到了同样的结果。

### 2.3 对效率滚降的影响

金属纳米粒子的表面等离子共振特性可以通过与激子的耦合效应影响激子,特别是三线态激

子,减少激子的非辐射衰减(三线态-三线态猝灭、三线态-极化子猝灭<sup>[29]</sup>),降低激子的寿命,从而改善磷光器件效率滚降的问题。

Ji 等<sup>[9]</sup>的研究表明,金纳米颗粒的表面等离子体耦合作用能够影响磷光绿光材料  $\text{Ir}(\text{ppy})_3$  的三线态激子寿命,使磷光发光的效率滚降问题得到明显的改善。三线态激子和金纳米颗粒之间的相互作用降低了激子寿命,使三线态激子的自发辐射衰减变得更快,从而降低了发光材料的效率滚降。Arunandan Kumar 等<sup>[27]</sup>使用 2D-FDTD 对耦合效应进行了模拟,计算得出加入银纳米颗粒前后激子的寿命分别为 6.3 ns 和 3.5 ns,发光层中激发态的寿命得以明显降低。如图 4 所示, Xiao 等<sup>[22]</sup>也证明了等离子体-辐射发光耦合过程速率远高于激子的自发辐射复合,因此等离子体增强发光过程中激子的寿命降低了很多。实验表明,无金纳米颗粒时  $\text{AlQ}_3$  的衰减时间为 14.73 ns,而引入金纳米颗粒后降低到了 13.60 ns。

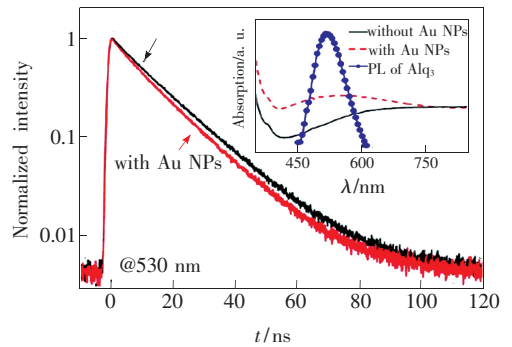


图 4 时间分辨光致发光光谱(激光光源为 370 nm,发光波长为 530 nm)。

Fig. 4 Time-resolved PL spectra detected at the wavelength of 530 nm via a 370 nm laser source

## 3 金属纳米颗粒在 OPV 器件中的应用

在有机光伏器件中,光的收集效率和转换效率一直是非常热门的话题。金属纳米颗粒的表面等离子体共振效应对有机光伏器件的性能也有重大影响,如果将金属纳米颗粒引入到光伏器件中,由于 SP 耦合效应增加了光的吸收,光电转换效率可得到大幅度的提高。

Zhu 等<sup>[11]</sup>对金属纳米粒子通过增强电场而增加光吸收的现象做了详细的研究。他们在透明

电极和有源层之间加入了一层六边形的周期性金属纳米球来制作异质结有机太阳能电池, 其中的有源层分别采用 P3HT: PC<sub>60</sub>BM 和 PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM, 它们的吸收光谱范围分别为 360 ~ 650 nm 和 360 ~ 900 nm。他们发现, 与原始的吸收光谱相比, 加入金属纳米颗粒之后, 两种有源层在以上波段的光吸收都提高了, 并且在 604 nm 的波段出现了吸收峰值, 尤其是窄禁带材料 PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM 在 604 nm 波段的吸收, 有效弥补了在此波段吸收较低的缺陷。此外, 研究表明光吸收强弱受电场影响较大, 且与入射光偏振状态有关。有源层对光的吸收与电场强度成一定的正比关系, 如果有源层电场得到加强必然会导致光吸收

的增加。如图 5 所示, 可以看到在有源层周围由于金属纳米颗粒的等离子体效应产生了强电场, 增强的电场集中在两个纳米球之间。从图 5(c) 和 (d) 中还可以看到 P 偏振光和 S 偏振光呈现了不同的电场分布。R. S. Kim 等<sup>[30]</sup>通过 FDTD 理论模拟的方法并结合实验研究了 Ag 纳米颗粒的电场增强效应提高光吸收效率的原因, 认为纳米颗粒的粒径和形状对光吸收有重要影响。2011 年, Chu 等<sup>[31]</sup>在有机小分子太阳能电池 CuPc/C<sub>60</sub> 和 TiOPc/C<sub>60</sub> 的阳极 ITO 表面分别制备了一层 Ag 纳米颗粒提高了器件性能, 认为因 Ag 纳米颗粒的引入而形成的表面等离子体共振可显著提高有机光活性层的吸收效率和光生激子的分解效率。

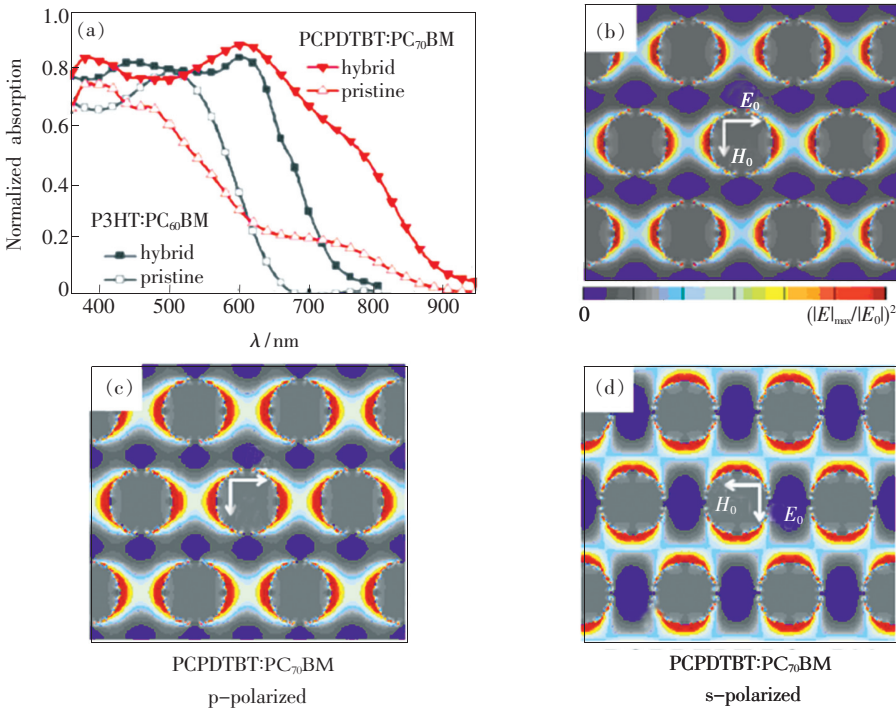


图 5 (a) P3HT: PC<sub>60</sub>BM 和 PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM 有源层加入纳米颗粒后和原始器件的 P 偏振瞬态吸收光谱; (b) P3HT: PC<sub>60</sub>BM 中的 P 偏振状态; (c) PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM 中的 P 偏振状态; (d) PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM 中的 S 偏振状态。

Fig. 5 P-polarized incident absorption spectra of the pristine and hybrid active layers using P3HT: PC<sub>60</sub>BM and PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM (a), p-polarized incidence in P3HT: PC<sub>60</sub>BM (b) and PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM (c), and s-polarized incidence in PCPDTBT: PC<sub>70</sub>BM (d).

也有研究人员认为, 在有机光伏器件中由于金属纳米颗粒散射现象而增加了光吸收。Liu 等<sup>[32]</sup>发现, 在聚合物 P3HT 太阳电池中, 由于 Ag 纳米颗粒的存在, 光吸收有了极大的提高。他们认为这是由于银纳米颗粒的存在使入射光被散射, 光路径增加, 相互作用时间增加提高了光子吸收, 结果导致器件的能量转换效率提高了

20%。Wang 等<sup>[33]</sup>研究了纳米颗粒在有源区中的垂直位置对光吸收的影响, 结果表明, 散射效应增加了光在有源区中的传播路径, 从而增加了光吸收, 且当粒子位于有源区底部时可以获得最大的光吸收。

金属纳米颗粒除了可以增强光吸收之外, 在某种条件下还可以直接释放出电子, 增加光电流。

M. Westphalen 等<sup>[34]</sup>证明,当将金属纳米颗粒置于定向电场中时,金属纳米簇可以在最优方向上释放电子。

## 4 结 论

有机发光器件经过了 30 多年发展,目前已经取得了巨大的成就,相关的应用已经出现在人们的生活中。但是由于载流子注入的不平衡和激子猝灭等问题限制了其普及性应用。金属纳米颗粒的表面等离子体共振耦合作用可以增强电子的注入能力,同时也可以影响材料的内量子效率和激子的寿命,从而改善器件的效率和效率滚降。另

外,将金属纳米颗粒应用在有机光伏器件中可以提高器件的光收集能力,从而提高器件的光电转换效率。在不同的有机光电器件中,研究表明表面等离子体的特殊性能能够从一个新的角度来改善器件的性能,这也为科研人员开辟了一条新的研究方向。

但是目前对于金属纳米颗粒在有机光电器件中的研究还很有限,很多方面的应用还处于探索阶段,实际的应用依然需要进一步的研究。我们相信经过科研工作者的不断努力,随着科学技术的不断发展,设备的不断升级,金属纳米颗粒在有机光电器件中的应用将有巨大的前景。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Tang C W. Two-layer organic photovoltaic cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(2):183-185.
- [ 2 ] Tang C W, Van Slyke S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12):913-915.
- [ 3 ] Muller C D, Reckefuss N, Rudati P, *et al.* Multi-color polymeric OLEDs by solution processing [J]. *Org. Proc. Res. Dev.*, 2004, 5214:21-30.
- [ 4 ] Schilinsky P, Waldauf C, Brabec C J. Performance analysis of printed bulk heterojunction solar cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2006, 16(13):1669-1672.
- [ 5 ] Kulkarni A P, Tonzola C J, Babel A, *et al.* Electron transport materials for organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Mater.*, 2004, 16(23):4556-4573.
- [ 6 ] Pei Q B, Yu G, Zhang C, *et al.* Polymer light-emitting electrochemical cells [J]. *Science*, 1995, 269 (5227): 1086-1088.
- [ 7 ] Aziz H, Popovic Z D, Hu N X, *et al.* Degradation mechanism of small molecule-based organic light-emitting devices [J]. *Science*, 1999, 283(5409):1900-1902.
- [ 8 ] Yagi T, Satoh R, Yamada Y, *et al.* Organic light-emitting diodes with enhanced out-coupling efficiency using high-refractive-index glass frit [J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2012, 20(9):526-532.
- [ 9 ] Ji W Y, Zhang L T, Xie W F. Improving efficiency roll-off in phosphorescent OLEDs by modifying the exciton lifetime [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(11):2019-2021.
- [ 10 ] Moller S, Forrest S R. Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 91(5):3324-3327.
- [ 11 ] Zhu J F, Xue M, Shen H J, *et al.* Plasmonic effects for light concentration in organic photovoltaic thin films induced by hexagonal periodic metallic nanospheres [J]. *Appl. Phys. A*, 2011, 98(15):151110-1-5.
- [ 12 ] Liu D A, Fina M, Ren L, *et al.* Enhanced luminance of organic light-emitting diodes with metal nanoparticle electron injection layer [J]. *Appl. Phys. A*, 2009, 96(2):353-356.
- [ 13 ] Ni X M, Zhang J B, Zhang Y F, *et al.* Citrate-assisted synthesis of prickly nickel microwires and their surface modification with silver [J]. *J. Colloid Interf. Sci.*, 2007, 307(2):554-558.
- [ 14 ] Nath N, Chilkoti A. A colorimetric gold nanoparticle sensor to interrogate biomolecular interactions in real time on a surface [J]. *Anal. Chem.*, 2002, 74(3):504-509.
- [ 15 ] Talley C E, Jackson J B, Oubre C, *et al.* Surface-enhanced Raman scattering from individual Au nanoparticles and nanoparticle dimer substrates [J]. *Nano Lett.*, 2005, 5(8):1569-1574.
- [ 16 ] Thompson D G, Enright A, Faulds K, *et al.* Ultrasensitive DNA detection using oligonucleotide-silver nanoparticle conjugates [J]. *Anal. Chem.*, 2008, 80(8):2805-2810.
- [ 17 ] Alexiou C, Jurgons R, Schmid R, *et al.* In vitro and in vivo investigations of targeted chemotherapy with magnetic

- nanoparticles [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2005, 293(1):389-393.
- [18] Fujiki A, Uemura T, Zettsu N, *et al.* Enhanced fluorescence by surface plasmon coupling of Au nanoparticles in an organic electroluminescence diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 96(4):043307-1-3.
- [19] Liu F, Nunzi J M. Noble metal nanoparticle enhanced organic light emitting diodes [J]. *SPIE*, 2012, 8424:84243-1-5.
- [20] Zheng T H, Choy W C H, Sun Y X. Nanoparticle-induced resonant tunneling behaviors in small molecule organic light-emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(12):123303-1-3.
- [21] Tanaka T, Totoki Y, Fujiki A, *et al.* Enhanced red-light emission by local plasmon coupling of Au nanorods in an organic light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Exp.*, 2011, 4(3):032105-1-5.
- [22] Xiao Y, Yang J P, Cheng P P, *et al.* Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating Au nanoparticles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(1):013308-1-3.
- [23] Reil F, Gerber S, Krenn J R, *et al.* Comparing the influence of gold nanorods and -discs on the spontaneous decay rate of Eu-chelate dye [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, 9(9):S437-S442.
- [24] Yang K Y, Choi K C, Ahn C W. Surface plasmon-enhanced energy transfer in an organic light-emitting device structure [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(14):11495-11504.
- [25] Liu F, Nunzi J M. Phosphorescent organic light emitting diode efficiency enhancement using functionalized silver nanoparticles [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(12):123302-1-3.
- [26] Kumar A, Srivastava R, Tyagi P, *et al.* Efficiency enhancement of organic light emitting diode via surface energy transfer between exciton and surface plasmon [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(1):159-165.
- [27] Kumar A, Srivastava R, Mehta D S, *et al.* Surface plasmon enhanced blue organic light emitting diode with nearly 100% fluorescence efficiency [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(9):1750-1755.
- [28] Liu F, Rao B S, Nunzi J M. A dye functionalized silver-silica core-shell nanoparticle organic light emitting diode [J]. *Org. Electron.*, 2011, 12(7):1279-1284.
- [29] Zheng T H, Choy W C H, Ho C L, *et al.* Improving efficiency roll-off in organic light emitting devices with a fluorescence-interlayer-phosphorescence emission architecture [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(13):133304-1-3.
- [30] Kim R S, Zhu J F, Park J H, *et al.* E-beam deposited Ag-nanoparticles plasmonic organic solar cell and its absorption enhancement analysis using FDTD-based cylindrical nano-particle optical model [J]. *Opt. Exp.*, 2012, 20(12):12649-12657.
- [31] Zhuang T J, Su Z S, Liu Y D, *et al.* Enhanced performance of small molecular weight organic solar cells by incorporating Ag nanoparticles [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(12):1266-1270 (in Chinese).
- [32] Liu F, Nunzi J M. Enhanced organic light emitting diode and solar cell performances using silver nano-clusters [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(9):1623-1632.
- [33] Wang S Y, Borca-Tasciuc D A, Kaminski D A. The effect of particle vertical positioning on the absorption enhancement in plasmonic organic solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 111(12):124301-1-5.
- [34] Westphalen M, Kreibig U, Rostalski J. Metal cluster enhanced organic solar cells [J]. *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, 2000, 61(1):97-105.