

doi:10.3788/gzxb20184709.0916001

# 基于金纳米粒子增强有机-无机杂化钙钛矿放大自发辐射

吴小龔<sup>1,2</sup>, 刘国栋<sup>1,2</sup>, 李阳龙<sup>1,2</sup>, 李巍<sup>1</sup>, 吴凌远<sup>1,2</sup>, 付博<sup>1</sup>, 王伟平<sup>1,2</sup>,  
张大勇<sup>1</sup>, 赵剑衡<sup>1</sup>, 陈平<sup>3</sup>

(1 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

(2 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

(3 西南大学 发光与实时分析教育部重点实验室, 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

**摘 要:**有机-无机杂化钙钛矿作为激光的增益介质时,存在室温时纳秒脉冲或连续激光作用下的光泵浦器件不稳定、难以实现电泵浦激光等问题.通过将金纳米粒子水溶液和 PEDOT:PSS 溶液共混的方法,将 20 nm 尺寸的金纳米粒子掺杂至光泵浦平面波导器件的界面层 PEDOT:PSS 中,掺杂了金纳米粒子的平面波导器件(以  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  为增益介质)的放大自发辐射绝对强度相对于没掺杂金纳米粒子的器件提升了 5.5 倍.实验结果表明,金纳米粒子的引入,一方面提升了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  薄膜的吸收,增加了粒子反转数目,另一方面加快了激发态激子的辐射跃迁速率.仿真分析表明,金纳米粒子的近场和远场复合表面等离子激元可有效耦合增益介质光吸收/发射主区域,从而提高了平面波导器件的放大自发辐射性能.研究结果可为高效泵浦激光的实现提供参考.

**关键词:**有机-无机杂化钙钛矿;放大自发辐射;金纳米粒子;近场表面等离子激元;远场表面等离子激元

中图分类号:O433

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0916001-6

## Enhancing Organic-inorganic Hybrid Perovskite Amplified Spontaneous Emission Based on the Gold Nanoparticles

WU Xiao-yan<sup>1,2</sup>, LIU Guo-dong<sup>1,2</sup>, LI Yang-long<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WU Ling-yuan<sup>1,2</sup>,  
FU Bo<sup>1</sup>, WANG Wei-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-yong<sup>1</sup>, ZHAO Jian-heng<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>3</sup>

(1 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(2 Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(3 School of Physical Science and Technology, MOE Key Laboratory on Luminescence and Real-Time Analysis, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** When the organic-inorganic hybrid perovskite has been regarded as the gain medium in lasers, the lasing devices with nanosecond laser pulses or continuous wave pumping at room temperatures is unstable and the electrically driven lasing is difficult to be achieved. Gold nanoparticles solution and PEDOT:PSS solution were blended, gold nanoparticles with size of 20 nm were doped into PEDOT:PSS interface layer in a slab waveguide device. As a result, the facile device doping with gold nanoparticles shows a 5.5-fold enhanced amplified spontaneous emission intensity than the device without

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 11602243, 11504300),国家自然科学基金委员会/中国工程物理研究院"NSAF"联合基金(No. U1630125)和重庆市基础与前沿研究计划(No. cstc2015jcyjA50002)资助

**第一作者:**吴小龔(1988-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光电功能材料与器件. Email:wuxiaoyan1219@sina.cn

**通讯作者:**刘国栋(1980-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光电功能材料与器件. Email:guodliu@126.com

**收稿日期:**2018-01-23; **录用日期:**2018-06-13

<http://www.photon.ac.cn>

gold nanoparticles. The results show that gold nanoparticles can effectively improve the absorption of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  film, increase the population inversion and accelerate the excitons radiative decay process. Combining with theoretical simulation, the comprehensive near- and far-field surface plasmon of gold nanoparticles could both couple with the absorption/emission area, so that the amplified spontaneous emission of planar waveguide are improved. The results can provide a reference in fabricating the high performance optically pumped amplified spontaneous emission devices.

**Key words:** Organic-inorganic hybrid perovskite; Amplified spontaneous emission; Gold nanoparticles; Near-field surface plasmon; Far-field surface plasmon

**OCIS Codes:** 160.4236; 240.6680; 140.3380; 300.2530

## 0 引言

有机-无机杂化钙钛矿半导体材料具备缺陷密度低(仅为约  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )、光吸收能力强( $300 \sim 800 \text{ nm}$  的吸收率为  $5.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ )、发光效率高(荧光量子效率通常  $> 70\%$ )、能带可调( $1.48 \sim 2.23 \text{ eV}$ )、双极子传输性能及迁移率高(约为  $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、扩散距离长( $100 \text{ nm} \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ )等优异的光电特性<sup>[1-4]</sup>,在泵浦放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)应用中展现出巨大的优势,但其被用作光泵浦或电泵浦激光的增益介质时,存在室温下纳秒脉冲或连续激光作用下的光泵浦器件不稳定、难以实现电泵浦激光等问题.增强器件光泵浦 ASE 性能是有效的解决方案之一<sup>[5]</sup>,该方案不仅需要钙钛矿材料做进一步的结构设计与改性,也需要对器件制备方面进行优化<sup>[6-9]</sup>.材料设计方面,Fu 课题组<sup>[6]</sup>报道了基于  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  单晶方形微米盘的发射激光现象,在  $120 \text{ fs}$  泵浦激发下的阈值低至  $3.6 \text{ }\mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ .Zeng 研究组<sup>[7]</sup>报道了  $\text{CsPbBr}_3$  单晶的非线性光学性质,首次实现了胶体纳米晶的三光子泵浦 ASE.器件结构优化方面,Friend 课题组<sup>[8]</sup>在布喇格反射镜和金反射镜间采用  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  为增益介质,获得了垂直谐振腔结构的发射激光.Song 课题组<sup>[9]</sup>报道了高功率光泵浦下  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  与石墨烯复合结构的发射激光行为,ASE 强度增强超过 4 倍,同时增益阈值降低了 20%.通过优化器件结构来研究光泵浦钙钛矿 ASE 方面的工作非常有效且适用于多种增益介质,特别是考虑到电泵浦器件结构中的吸收损耗、注入损耗、三线态累积和激发态吸收等因素会大幅度增加器件的损耗.但目前报道的器件制备改进方法较为复杂,因此寻求一种更加简便灵活、高效的器件结构来实现高效光泵浦 ASE 很有必要.

金属纳米粒子可通过其表面增强荧光、能量转移、界面效应和电学效应等显著提升光电器件性能<sup>[10-14]</sup>.通过分析光泵浦 ASE 的物理过程可发现,受激吸收和受激发射是其中最重要的过程<sup>[15]</sup>,金属纳米粒子对光发射的增强来源于基态激子的跃迁几率和激发态激子的辐射跃迁速率的提升<sup>[16]</sup>,因此利用金属纳米粒子理论上可提升 ASE 速率.针对金属纳米粒子对 ASE 的增强特点,通过器件结构调控是提升 ASE 的关键.本文制备了基于有机-无机杂化钙钛矿  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  增益介质的平面波导器件(Quartz/PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ),将  $20 \text{ nm}$  尺寸的金纳米粒子(gold nanoparticles, Au NPs)加入界面层 PEDOT:PSS 中,以提高平面波导器件的 ASE 性能,并进行了实验验证.

## 1 实验与测量

### 1.1 Au NPs 的合成

实验中采用经典的 Frens 法制备粒径为  $20 \text{ nm}$  的水溶性 Au NPs<sup>[17]</sup>.具体的制备过程为:1)将氯金酸配置成  $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的水溶液,取  $100 \text{ mL}$  加热至沸腾;2)剧烈搅拌情况下加入  $1 \text{ mL}$  的 5% 柠檬酸三钠水溶液;3)继续加热煮沸约  $15 \text{ min}$ ,观察溶液颜色由淡黄色变成灰色,继而转变为黑色,最终转变为稳定的酒红色溶液.整个颜色转变过程约为  $2 \sim 3 \text{ min}$ ;4)停止加热,持续搅拌冷却至室温,即可得所需尺寸的 Au NPs.

### 1.2 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 溶液的配制

将  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Br}$ (西安宝莱特光电科技有限公司,纯度  $> 99.5\%$ )和  $\text{PbBr}_2$ (西安宝莱特光电科技有限公司,纯度  $> 99.5\%$ )以  $1.5:1$  摩尔比混合溶解于 N,N-二甲基甲酰胺溶剂中,室温下搅拌  $12 \text{ h}$  后形成约  $40 \text{ wt}\%$  的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  溶液.然后,将甲苯溶剂逐滴加入  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  溶液直至饱和.继续搅拌  $3 \text{ h}$ ,得到  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  前驱体溶液.其中,甲苯作为  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  的反溶解溶剂,可以加快  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  的结晶速率,改善钙钛矿薄膜的成膜质量.

### 1.3 Quartz/PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 平面光波导器件的制备与表征

实验采用的平面光波导器件结构为 Quartz/PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>. 洁净的 Quartz 经过 plasma 处理 5 min 后,在空气中旋涂 PEDOT : PSS,然后 150℃ 处理 20 min.接着将 Quartz 片转入手套箱内,4 000 rpm 旋涂 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 溶液 60 s,80℃ 加热 20 min.最后,对器件进行封装.Au NPs 溶液和钙钛矿薄膜的吸收由岛津紫外分光光度计(型号:Shimadze UV-2600)测得,钙钛矿薄膜的荧光光谱由荧光分光光度计(型号:Hitachi F-2500)测得,钙钛矿薄膜的荧光寿命曲线由瞬态光谱仪(型号:Horiba Jobin Yvon FL-TCSPC)获得,Au NPs 的尺寸是由透射电子显微镜(型号:JEM-100 CX II)获得,Au NPs 的近场表面等离激元由时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain,FDTD)分析得到,钙钛矿薄膜厚度由探针轮廓仪(型号:Dektak 150 Surface Profiler)直接测试得到.

## 2 结果与讨论

### 2.1 金纳米粒子和钙钛矿的制备与表征

通过 Frens 法制备了球形 Au NPs,如图 1(a)通过动态光散射光谱测定其尺寸约为 20 nm,透射电镜(Transmission Electron Microscope,TEM)电镜照片见插图 1(b),溶液呈现酒红色见图 1(c).采用溶液旋涂一步法制备钙钛矿单晶薄膜,薄膜经 X-射线衍射(X-Ray Diffraction,XRD)测试后的结果见图 2,其中 14.90°、21.10°、29.98°、33.68°、43.00°、45.68° 对应晶体结构为(100)、(110)、(200)、(210)、(220)、(300),此晶格数符合立方晶系的条件<sup>[18]</sup>.

图 3 为 Au NPs 的吸收光谱与钙钛矿 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 薄膜的吸收、发射光谱,可以看出,Au NPs 的吸收光谱与 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 薄膜的吸收、发射光谱均存在一定重叠(AuNPs 的加入未引起光谱的斯托克斯频移

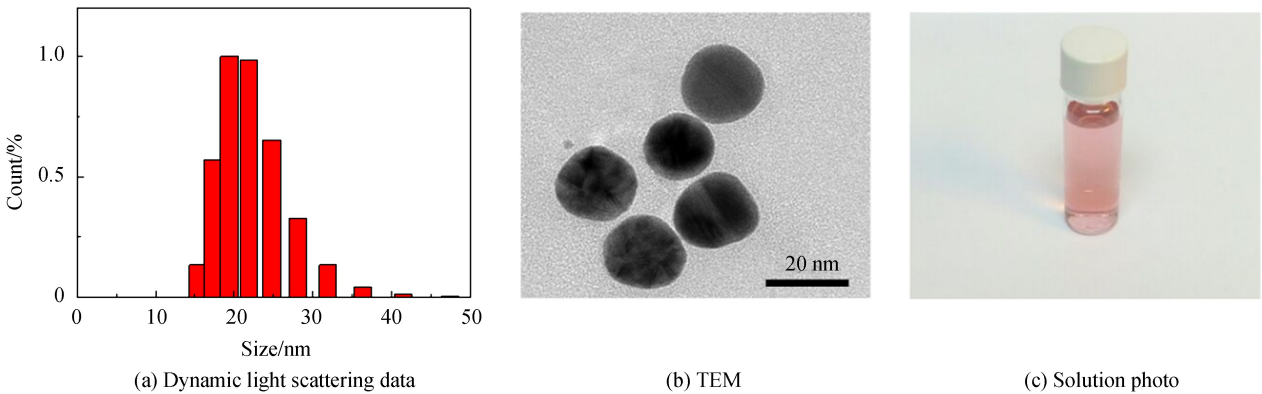


图 1 Au NPs 的动态光散射数据,TEM 和溶液照片

Fig.1 The dynamic light scattering data, TEM and solution photo of Au NPs

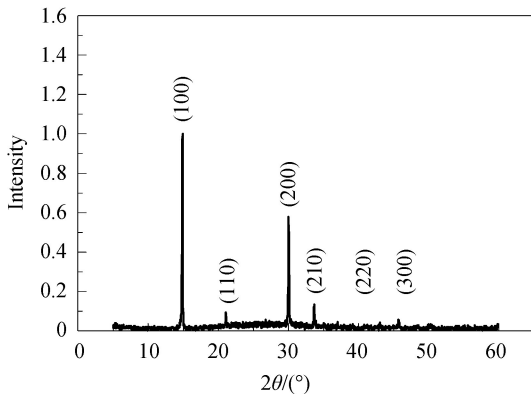


图 2 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 单晶薄膜的 XRD 图  
Fig.2 XRD diagram of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> single crystal thin film

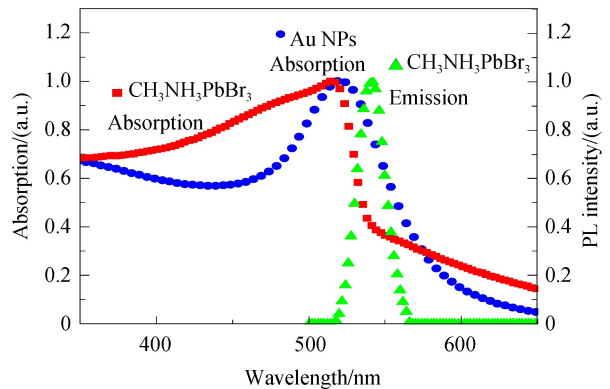


图 3 Au NPs 和 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 吸收光谱, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 发射光谱  
Fig.3 The absorption spectra of Au NPs and CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>, the emission spectra of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>

变化),从理论上讲,有利于钙钛矿薄膜光发射增强<sup>[16]</sup>.

## 2.2 平面光波导器件掺杂金纳米粒子的制备与表征

按照标准器件制备过程制备了 Quartz/PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 平面光波导器件,将 Au NPs 按照一定比例加入至 PEDOT : PSS 中(Au NPs 与 PEDOT : PSS 通过溶液搅拌混合均匀,经过优化后,Au NPs 与 PEDOT : PSS 溶液掺杂的体积比为 1:2),测试有无 Au NPs 时 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 的 ASE 性能.从图 4 (a)中可以看出,加入 Au NPs 后,在 11.1 μJ · cm<sup>-2</sup> 光泵浦激发情况下,ASE 性能有了明显的提升,其强度提升了 5.5 倍(5 次测试的平均结果).为了探究 ASE 性能增强来源,测试了 Quartz/PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 器件的吸收光谱和瞬态荧光光谱.

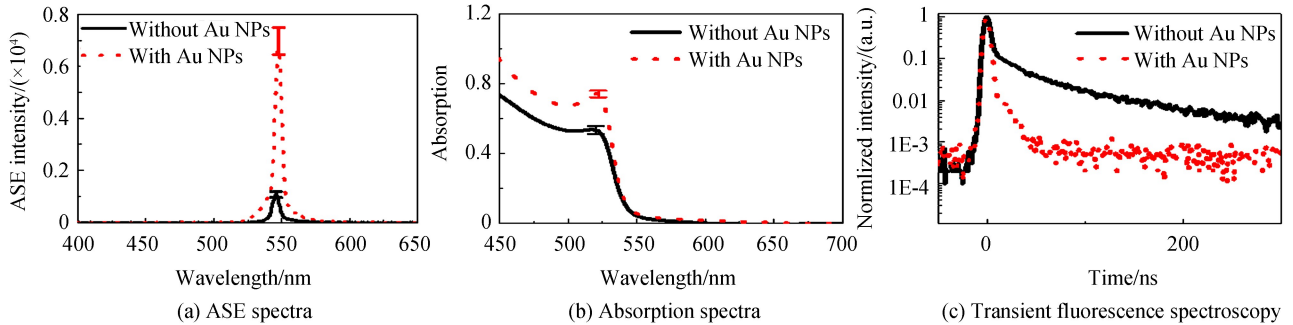


图 4 有无 Au NPs 时 Quartz/ PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 光波导器件的 ASE 光谱,吸收光谱和瞬态荧光光谱  
Fig.4 The ASE spectra, absorption spectra and transient fluorescence spectroscopy of Quartz/PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> optical waveguide devices with/without Au NPs

从测试结果来看,一方面,如图 4(b),CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 薄膜的绝对吸收强度提升了 38%,说明 Au NPs 的加入提升了基态激子的跃迁几率,使粒子反转数目  $\Delta n$  增多;另一方面,如图 4(c),CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 激发态激子的寿命明显降低,可算出加入 Au NPs 前后 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 激发态激子的寿命分别为 8.23 ns 和 0.28 ns,根据 Purcell 效应,利用辐射中心附近介质的共振响应来改变电磁场的光子模式密度,增强激发态激子的受激辐射跃迁速率<sup>[19-20]</sup>.因此,钙钛矿光泵浦 ASE 强度提升可归因于 Au NPs 加入后提升了基态激子的跃迁几率和增强了激发态激子的辐射跃迁速率.

## 2.3 器件性能增强来源分析

Au NPs 增强光发射的本质来源于 Au NPs 的近场表面等离激元<sup>[21-23]</sup>和远场表面等离激元<sup>[24-26]</sup>复合效应.近场表面等离激元增强光发射,可归因于增强的基态激子激发速率<sup>[27]</sup>和提升了的激发态激子辐射跃迁速率<sup>[28-29]</sup>.通过 FDTD 模拟分析了 20 nm 尺寸 Au NPs 的近场表面等离激元效应,其主要分布在 Au NPs 表面 1~10 nm 内,且随距离的增加迅速衰减,以往的研究表明光发射增强最大值约位于 3 nm 处,如图 5<sup>[21]</sup>.通过分析器件结构可知,钙钛矿厚度通常为 300~500 nm,而 ASE 现象是 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 发光层的整体表现,而在此实验中,PEDOT : PSS 的厚度约为 23 nm,因此近场表面等离激元能

部分覆盖钙钛矿薄膜发光层.同时,分子吸收/发射的增强取决于近场峰位与荧光团的吸收峰/发射峰的耦合程度.通过图 3 可以看出,Au NPs 的吸收谱与 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 薄膜的吸收/发射谱有较大的重叠,极有利于近场表面等离激元的增强.因此,Au NPs 的近场表面等离激元能有效与 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> 薄膜耦合,进而提升 ASE 效率.

远场表面等离激元效应为金属纳米粒子表面反射的相干光与原有光的叠加作用所引起的整体介电变化(光叠加行为),这种相互作用对荧光团与金属纳米粒子表面的距离  $d$  为阻尼震荡函数,且增强范围  $> \lambda/10$

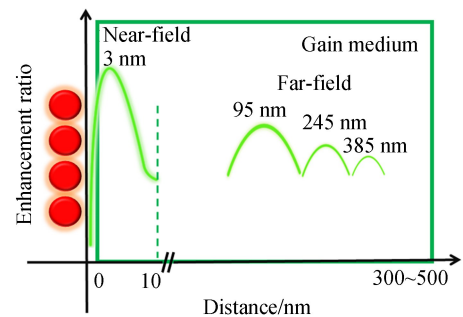


图 5 Au NPs 近场表面等离激元和远场表面等离激元增强增益介质示意图

Fig.5 The enhancement of gain medium by near and far field surface plasmon of Au NPs

( $\lambda$  是荧光团的发射波长),远远大于近场表面等离激元的增强范围.通过远场公式<sup>[24]</sup>计算得出,其对增益介质的 ASE 增强距离远大于近场表面等离激元的作用范围,且计算得出三个增强峰位分别为 95 nm、245 nm、385 nm,均处于增益介质薄膜厚度范围(300~500 nm)内,可对增益介质的 ASE 性能进一步增强.

通过光学仿真可知 Au NPs 近场和远场表面等离激元均能有效覆盖增益介质层  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ .当光学增强区域与发光层的吸收/发射耦合后,一方面提高了激发效率,有效地提升激子反转数目;另一方面,增强了激发态激子的辐射跃迁速率.因此基于近场和远场的复合表面等离激元综合效应有利于提升钙钛矿发光薄膜 ASE 性能.

### 3 结论

本文通过 Frens 法制备了尺寸约为 20 nm 的 Au NPs,并将其按一定比例掺杂入界面层 PEDOT:PSS 中.实验发现,有机-无机杂化钙钛矿  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  薄膜的 ASE 强度提升了 5.5 倍,归因于 Au NPs 增强了基态激子的激发效率和提高了激发态激子的辐射跃迁速率.金纳米粒子的近场和远场复合表面等离激元可有效覆盖增益介质的光吸收/发射主区域,最大程度地提升 ASE 强度.研究结果有望为高效泵浦激光的实现提供参考.

#### 参考文献

- [1] KUEHNE A J C, GATHER M C. Organic lasers: recent developments on materials, device geometries, and fabrication techniques[J]. *Chemical Reviews*, 2016, **116**(21): 12823-12864.
- [2] GUO Xiu-bin, YU Wei, LI Jing, *et al.* Optimization of microstructure and photoelectric properties of perovskite thin films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0331004.  
郭秀斌,于威,李婧,等. 钙钛矿薄膜的微结构和光电特性优化[J]. *光子学报*, 2017, **46**(3): 0331004.
- [3] VELDHUIS S A, BOIX P P, YANTARA N, *et al.* Perovskite materials for light-emitting diodes and lasers[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(32): 6804-6834.
- [4] LI Jian-feng, LÜ Jie, ZHAO Chuang, *et al.* Tuning the crystal-growth and coverage of perovskite thin-films for highly efficient solar cells by using polyacrylonitrile additive [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(7): 897-904.  
李建丰,吕杰,赵创,等. 利用 PNA 添加剂来调控钙钛矿薄膜结晶和覆盖率实现高效太阳能电池[J]. *发光学报*, 2017, **38**(7): 897-904.
- [5] CHEN J N, ZHOU S S, JIN S Y, *et al.* Crystal organometal halide perovskites with promising optoelectronic applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(1): 11-27.
- [6] LIAO Q, HU K, ZHANG H H, *et al.* Perovskite microdisk microlasers self-assembled from solution[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**: 3405-3410.
- [7] WANG Y, LI X M, ZHAO X, *et al.* Nonlinear absorption and low-threshold multiphoton pumped stimulated emission from all-inorganic perovskite nanocrystals[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(1): 448-453.
- [8] DESCHLER F, PRICE M, PATHAK S, *et al.* High photoluminescence efficiency and optically pumped lasing in solution-processed mixed halide perovskite semiconductors[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, **5**(8): 1421-1426.
- [9] ZHANG C, WANG K Y, YI N B, *et al.* Improving the performance of a  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  perovskite microrod laser through hybridization with few-layered graphene[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(12): 2057-2062.
- [10] WU Xiao-yan, LIU Lin-lin, XIE Zeng-qi, *et al.* Advance in metal- based nanoparticles for the enhanced performance of organic optoelectronics devices[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2016, **37**(3): 409-425.  
吴小龔,刘琳琳,解增旗,等. 金属纳米粒子增强有机光电器件性能研究进展[J]. *高等学校化学学报*, 2016, **37**(3): 409-425.
- [11] YANG X, LIU W Q, CHEN H Z, *et al.* Recent advances in plasmonic organic photovoltaics[J]. *Science China Chemistry*, 2015, **58**(2): 210-220.
- [12] XIAO Y, YANG J P, CHENG P P, *et al.* Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating Au nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(1): 013308-013311.
- [13] JEONG S H, CHOI H, KIM J Y, *et al.* Silver based nanoparticles for surface plasmon resonance in organic optoelectronics[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2015, **32**(2): 164-175.
- [14] XIE Wen-fa, XU Kai, LI Yang, *et al.* High-efficiency organic photoelectric devices with metal nanoparticles[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(5): 535-541.  
谢文法,徐凯,李杨,等. 利用金属纳米颗粒改善有机光电器件性能[J]. *发光学报*, 2013, **34**(5): 535-541.
- [15] ZHOU X H, LIU L L, WU X Y, *et al.* Au NPs doped buffer layer in slab waveguide for enhancement of organic amplified spontaneous emission[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, **5**(6): 1356-1362.

- [16] YANG Ai-lin, ZHAO Wei-na, YANG Yun, *et al.* Influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles to fluorescence spectra of ethanol-rhodamine 6G solutions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1091-1096.  
杨爱玲, 赵维娜, 杨云, 等. SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 R6G-乙醇溶液荧光光谱影响[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1091-1096.
- [17] WU X Y, LI Y L, WU L Y, *et al.* Enhancing perovskite film fluorescence by simultaneous near- and far-field effects of gold nanoparticles[J]. *RSC Advances*, 2017, **7**(57): 35752-35756.
- [18] YANG B, MAO X, YANG S Q, *et al.* Low threshold two-photon-pumped amplified spontaneous emission in CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> microdisks[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8**(30): 19587-19592.
- [19] TANG Jing, CHEN Li, XIE Wan-ying, *et al.* Upconversion luminescence of NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er nanocrystals co-doped with 3d<sup>5</sup> metal ions[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1056-1065.  
唐静, 陈力, 谢婉莹, 等. 3d<sup>5</sup> 金属离子共掺杂 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 纳米晶的上转换发光[J]. 发光学报, 2016, **37**(9): 1056-1065.
- [20] XU Liang-min, ZHANG Zheng-long, CAI Xiao-yan, *et al.* Physical mechanisms of fluorescence at metal surface[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, **30**(3): 373-378.  
徐良敏, 张正龙, 蔡晓燕, 等. 金属表面荧光增强的物理机制[J]. 发光学报, 2009, **30**(3): 373-378.
- [21] WU X Y, LIU L L, CHOY W C H, *et al.* Substantial performance improvement in inverted polymer light-emitting diodes via surface plasmon resonance induced electrode quenching control[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, **6**(14): 11001-11006.
- [22] CHEN P, XIONG Z Y, WU X Y, *et al.* Nearly 100% Efficiency enhancement of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> perovskite light-emitting diodes by utilizing plasmonic Au nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, **8**(17): 3961-3969.
- [23] NING S Y, WU Z X, DONG H, *et al.* Enhancement of lasing in organic gain media assisted by the metallic nanoparticles-metallic film plasmonic hybrid structure[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(24): 5717-5724.
- [24] WU X Y, LIU L L, DENG Z C, *et al.* Efficiency improvement in polymer light-emitting diodes by “far-field” effect of gold nanoparticles[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2015, **32**(6): 686-692.
- [25] WU X Y, LIU L L, YU T C, *et al.* Gold nanoparticles modified ITO anode for enhanced PLEDs brightness and efficiency[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, **1**(42): 7020-7025.
- [26] WU X Y, ZHUANG Y Q, FENG Z T, *et al.* Simultaneous red-green-blue electroluminescent enhancement directed by surface plasmonic “far-field” of facile gold nanospheres[J]. *Nano Research*, 2018, **11**(1): 151-162.
- [27] KINKHABWALA A, YU Z F, FAN S H, *et al.* Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(1): 654-657.
- [28] LIU L, XIE Z, MA Y. Uniform composition film of hydrophilic colloidal gold nanoparticles and hydrophobic carbazole functionalized fluorene trimers for enhanced fluorescence and stability[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(22): 2741-2746.
- [29] XIONG Zi-yang, WU Xiao-yan, GAO Chun-hong, *et al.* Highly efficient PeLEDs using gold nanoparticles modified PEDOT:PSS as the hole injection layer[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, **62**(32): 3774-3782.  
熊自阳, 吴小龔, 高春红, 等. 基于金纳米粒子修饰空穴注入层的高效率钙钛矿发光二极管[J]. 科学通报, 2017, **62**(32): 3774-3782.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11602243, 11504300), the NSAF of China (No. U1630125), Natural Science Foundation Project of CQ CSTC (No. cstc2015jcyjA50002)

引用格式: WU Xiao-yan, LIU Guo-dong, LI Yang-long, *et al.* Enhancing Organic-inorganic Hybrid Perovskite Amplified Spontaneous Emission Based on the Gold Nanoparticles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0916001  
吴小龔, 刘国栋, 李阳龙, 等. 基于金纳米粒子增强有机-无机杂化钙钛矿放大自发辐射[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0916001