

文章编号:1007-2780(2022)09-1158-07

基于金属纳米颗粒自组装的减有害蓝光衰减器

朱 庆¹, 刘 根¹, 苟晗光¹, 史光华², 赖伟恩^{1*}

- (1. 合肥工业大学 光电技术研究院 仪器科学与光电工程学院 特种显示技术国家工程实验室
测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;
2. 中国电子科技集团 第 13 研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要:为了减少 LED 等照明方式中有害蓝光成分对人眼带来的危害,提出了一种基于金属纳米颗粒自组装的局域表面等离子体共振效应的减有害蓝光衰减器。通过合成制备了银包金纳米颗粒(Au@Ag NPs)和银纳米颗粒(Ag NPs),使用自组装的方法在石英玻璃上制备了纳米颗粒单层膜,并通过退火进行后处理改变颗粒形貌和分布。使用扫描电子显微镜(SEM)图像对不同样品纳米颗粒的形貌以及排布方式进行分析,对样品进行紫外可见光透射光谱测试,并借助于时域有限差分法对透射情况进行模拟,分析影响透射峰值的因素。结果表明,自组装方法制备的样品对不同波段的光传输有选择性的衰减,并且在退火后衰减峰值发生了蓝移。最后,展示了不同样品在白光 LED 下的实际透光效果,其中退火 Ag NPs 样品在 416 nm 有害蓝光波段处,可将透射减至 24.5%,有效地衰减了有害蓝光,具有优异的蓝光防护效果。

关键词:纳米颗粒;自组装;等离子体共振;减蓝光

中图分类号:TN29 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0168

Reduced harmful blue light attenuator based on self-assembly of metal nanoparticles

ZHU Qing¹, LIU Gen¹, GOU Han-guang¹, SHI Guang-hua², LAI Wei-en^{1*}

- (1. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Academy of Opto-Electronic Technology, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to reduce the harmful blue light component of LEDs and other illumination modalities to human eyes, we propose a reduced harmful blue light attenuator based on the local surface plasmon resonance effect of self-assembled metal nanoparticles. The silver-covered gold nanoparticles (Au@Ag NPs) and silver nanoparticles (Ag NPs) were prepared by synthesis. Nanoparticle monolayers film were prepared on quartz glass using the self-assembly method, and the particle morphology film and distribution

收稿日期:2022-05-16;**修订日期:**2022-05-23.

基金项目:安徽省自然科学基金(No. 1908085MF200);中央高校基本科研业务费(No. PA2021GDSK0098)

Supported by Anhui Provincial Natural Science Foundation (No. 1908085MF200); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. PA2021GDSK0098)

*通信联系人, E-mail: wnlai@hfut.edu.cn

were changed by post-treatment through annealing. The scanning electron microscopy (SEM) images were used to analyze the morphology of nanoparticles of different samples as well as the arrangement pattern. The samples were subjected to UV-Vis transmission spectroscopy and the transmission was simulated with the help of time-domain finite difference method to analyze the factors affecting the transmission peaks. The results show that the samples prepared by the self-assembly method have selective attenuation of light transmission at different wavelengths and the attenuation peaks are blue-shifted after annealing. Finally, this paper shows the actual light transmission effects of different samples under white LEDs, in which the annealed Ag NPs sample can reduce the transmission to 24.5% at the 416 nm harmful blue light band, which significantly and effectively attenuates the harmful blue light and has excellent blue light protection effect.

Key words: nanoparticles; self-assembly; plasma resonance; reduced blue light

1 引言

在现代社会中,LED作为一种常用的发光器件已广泛应用于照明和显示领域^[1-2]。随着技术的不断进步,长时间使用LED所带来的危害也逐渐进入人们视野中。市场上现有的LED照明设备仍存在着较多的问题,比如最常见的白光LED,本质上是一种双色光源,它将蓝色LED的发射与黄色荧光粉耦合在一起^[3-4],尽管看起来是白色的,但仍有蓝光对人体造成伤害,影响人昼夜作息。随着生活水平的提高,人们开始追求更加健康的照明方式,照明带来的蓝光危害也被更多地了解。蓝光对人眼的危害主要集中于400~450 nm之间,在这个波段的蓝光对视网膜的危害程度最大,眼球长时间暴露于此波段会引起视觉疲劳^[5],同时会抑制褪黑色素的分泌,影响人昼夜作息^[6-8]。

除了考虑改进LED光源本身的光谱输出^[9-10],尽量减少有害蓝光成分,越来越多其他的减蓝光方式也被用来减少蓝光的传输。例如,在透明基底上制备各种薄膜^[11-12],通过光束干涉和共振来减少蓝光,而波段的控制和调谐是通过改变后续结构和材料实现的。但是这种方式工艺复杂和成本较高,同时要考虑薄膜与基底的匹配问题。随着纳米科学的不断发展,具有与宏观材料不同特性的纳米材料逐渐被开发出来。将纳米科学与光学透射相结合,为减少蓝光传输提供了很好的突破口。其中,金属纳米颗粒又因具有很强的局域表面等离子体共振特性而备受青睐^[13-14],同时通过探究纳米颗粒大小和颗粒间隔

等影响因素可以调谐局域表面等离子体共振^[15-16],这为减少特定波段的光传输提供了一个新的研究方向。

本文使用两相界面自组装的方法^[17-18],在石英基底上制备了贵金属纳米颗粒阵列,并通过对其退火处理,改变影响等离子共振的条件,实现了一种在有害蓝光波段的高效衰减器。

2 实验

2.1 实验材料及设备

实验材料:硝酸银(AgNO_3 , $\geq 99\%$)、二水合柠檬酸钠(SC, $\geq 99\%$)、单宁酸(TA, $\geq 98\%$)、四氯金酸($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\geq 99.9\%$)均来自Sigma-Aldrich;无水乙醇(分析纯)、丙酮(分析纯)、硝酸(HNO_3 , 68%)、盐酸(HCl , 36.0%~38.0%)、十二硫醇(化学纯)、正己烷(分析纯)均来自国药试剂。

实验设备:场发射扫描电子显微镜(SEM, Regulus 8230),紫外分光光度计(UV-Vis, UV-2550),光功率测试仪(THORLABS, PM100D)。

2.2 银纳米颗粒合成

采用柠檬酸钠和单宁酸体系法,按照文献[19]的方案加以改进制备了高度单分散的银纳米颗粒。制备银纳米颗粒之前,先将反应烧瓶、搅拌子、温度计等在王水溶液中浸泡,再使用去离子水和无水乙醇进行冲洗,并放入烘箱烘干。制备100 mL SC(5 mmol/L)和TA(0.1 mmol/L)水溶液至三颈烧瓶,并将三颈烧瓶放入恒温加热磁力搅拌机加热至沸腾,向三颈烧瓶滴加1 mL

AgNO_3 (25 mmol/L), 反应 10 min, 合成银纳米颗粒种子。将反应溶液从沸腾降低到 90 °C, 从三颈烧瓶中取出 20 mL 溶液样品。向三颈烧瓶中加入 16.5 mL 去离子水进行稀释, 再依次间隔 1 min, 注入 0.5 mL SC (25 mmol/L)、1.5 mL TA (25 mmol/L)、1 mL AgNO_3 (25 mmol/L) 进行纳米颗粒生长, 重复进行生长过程可以得到直径逐渐增大的银纳米颗粒。将得到的溶液在 10 000 r/min 的转速下离心提纯。

2.3 银包金纳米颗粒合成

金核种子合成: 取 1.16 mL $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (29.4 mmol/L) 溶液和 78.84 mL 去离子水混合, 形成溶液 A; 取 4 mL 柠檬酸钠 (38.8 mmol/L) 溶液、0.025 mL 单宁酸 (5.9 mmol/L) 溶液和 16 mL 去离子水混合, 形成溶液 B。将 A、B 溶液加热至 60 °C, 回流搅拌后混合, 并将混合物加热到 90 °C, 持续 3 min 之内形成球形 Au NPs。

银壳生长: 将 1.29 mL 的 10 mmol/L AgNO_3 储备溶液添加到 Au NPs 悬浮液中, 在回流和搅拌下, 快速添加 2.27 mL 的 34 mmol/L 柠檬酸钠还原溶液, 并将反应溶液加热至沸腾 10 min, 将反应后的溶液取出 20 mL, 作为第一次产物。溶液温度降到 90°, 加入 16.5 mL 去离子水稀释, 依次间隔 1 min, 注入 0.5 mL 柠檬酸钠 (25 mmol/L)、1.5 mL 单宁酸 (25 mmol/L)、1 mL AgNO_3 , 反应 20 min 后, 将得到的 Au@Ag NPs 溶液离心提纯。

2.4 器件制备

向玻璃瓶中分别添加 5 mL 丙酮、5 mL 纳米颗粒溶液中以及 5 mL 正己烷, 并与 500 μL 十二硫醇进行混合。将装有混合溶液的玻璃瓶在 25 °C 环境温度下静置 6 h。在此过程中, 硫代酸盐对纳米颗粒表面上的柠檬酸盐进行部分替换^[20]。将经过臭氧处理的基底放入烧杯底部, 并将上述静置后的纳米颗粒溶液倒入烧杯中, 纳米颗粒在面积更大的水油界面上重新分布, 通过注射器抽取多余的纳米颗粒来调整两相交界面的纳米颗粒密度, 使其密度调整合适, 达到单层密布, 展现出如图 1 所示的镜面反射效果。使用排水沉积的方法^[21], 排出底部水相溶液, 以允许纳米颗粒单层随着液面的下降沉积到基底上, 得到自组装纳米颗粒单层膜。对部分样品在氮气氛围下, 250 °C 退火处理 10 min 以改变纳米颗粒的



图 1 水油两相界面处的银纳米颗粒单层膜镜面反射效果
Fig.1 Mirror reflection effect of silver nanoparticles monolayer at the interface between water phase and oil phase

形貌与间隔。

3 结果与讨论

3.1 自组装和退火样品分析

使用场发射扫描电子显微镜对自组装方法制备的纳米颗粒单层膜进行表征, SEM 图像显示了纳米颗粒在基底上的分布情况。图 2(a)和(b)分别为 Au@Ag NPs 和 Ag NPs 样品图像, 可以明显观察到纳米颗粒单层密布在基底上, 同时由于表面活性剂十二硫醇和柠檬酸钠的包裹, 纳米颗粒之间存在较为均匀的间距。使用 ImageJ 软件分析 SEM 图像, 以进一步获得纳米颗粒的尺寸和纳米颗粒阵列的间距。经过统计, Au@Ag NPs 粒径均一, 颗粒分布均匀, 平均颗粒直径和间隔约为 15 nm 和 4 nm, Ag NPs 的平均粒径和间隔分别约为 30 nm 和 6 nm。图 2(c)为 Au@Ag NPs 退火后样品, 可以明显观测到纳米颗粒形貌发生了改变。纳米颗粒在退火过程中发生融化烧结, 部分聚合成为较大的纳米颗粒, 尺寸从 15 nm 增加至 70 nm 不等。纳米颗粒之间的间距发生了较大的增大, 从 4~40 nm 不等。图 2(d)为 Ag NPs 退火样品, 颗粒尺寸从未融合的 30 nm 到融合后的 90 nm 不等, 间隔也在 6~50 nm 区间分布。由于纳米颗粒初始尺寸不同, 在经过退火之后, 小尺寸的 Au@Ag NPs 更容易聚合成为较大的类球形颗粒, 同时间隔分布相对于较大尺寸的 Ag NPs 更窄, Ag NPs 形状部分表现出多聚体形貌。相较于 Ag NPs, Au@Ag NPs 在聚合之后形成成分复杂的合金颗粒。

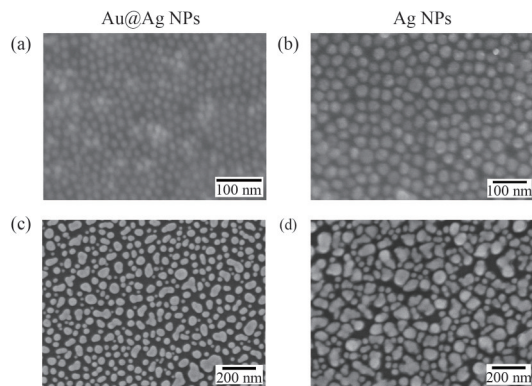


图2 Au@Ag NPs (a)和Ag NPs (b)自组装样品形貌; Au@Ag NPs (c)和Ag NPs (d)退火处理后样品形貌。

Fig. 2 Morphology of Au@Ag NPs (a) and Ag NPs (b) self-assembled sample; Morphology of Au@Ag (c) NPs and Ag NPs (d) after annealing.

3.2 紫外可见光透射光谱分析

基于纳米颗粒的减蓝光薄膜的重点是利用纳米颗粒阵列的局域表面等离子共振效应,通过改变纳米颗粒的大小以及间距调谐共振的波长。通过使用不同种类的纳米颗粒,并对其进行退火处理,我们实现了共振峰值的调谐。利用紫外分光光度计对基于纳米颗粒自组装和退火的样品进行了测试与分析。

图3(a)和(b)分别为Au@Ag NPs和Ag NPs样品的紫外分光光度计的透射光谱测试。在光谱范围内,均观察到明显的等离子体共振透射衰减峰。对于通过自组装制备的Au@Ag NPs样品而言,共振峰值在565 nm,透射率为24.3%。Ag NPs样品峰值在555 nm,透射率为16.0%,且峰宽较大。当对两种颗粒样品进行退火时,可以观察到透射衰减峰值均发生蓝移,Au@Ag NPs退火样品峰值蓝移至499 nm处,透射率为37.5%;Ag NPs退火样品峰值蓝移至416 nm处,透射率为24.5%。这是由于在进行退火时,纳米颗粒粒径变大,颗粒之间的间距增加,纳米颗粒阵列的共振峰发生了偏移。Ag NPs退火样品相较于未退火样品而言,400~450 nm波段蓝光得到了有效的传输衰减,并在450 nm以上的波段保持较高的透过率。

3.3 仿真分析

为了更进一步探究粒径大小和间隔对纳米颗粒阵列共振峰的影响,我们使用时域有限差分

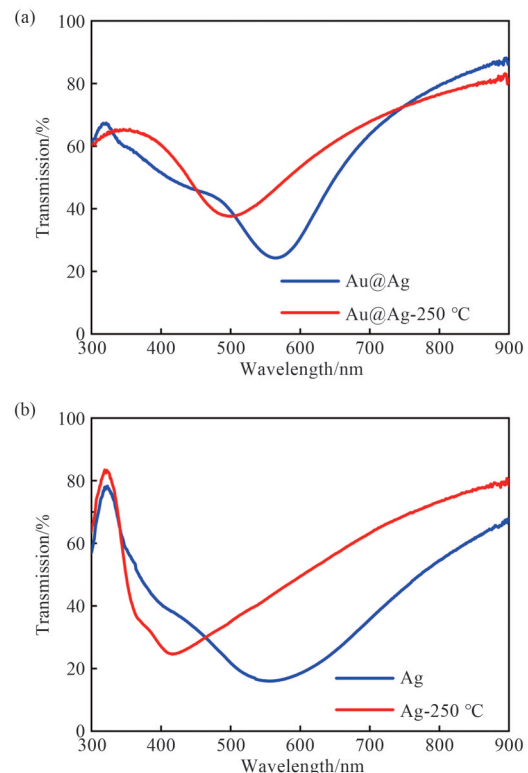


图3 纳米颗粒样品在300~900 nm范围内透射曲线。(a) Au@Ag NPs自组装和退火样品;(b) Ag NPs自组装和退火样品。

Fig. 3 Transmission curves of nanoparticle samples in the range of 300~900 nm. (a) Au@Ag NPs self-assembly and annealed samples; (b) Ag NPs self-assembly and annealed samples.

法对其进行分析。模拟是在Lumerical FDTD软件平台上进行的。根据实际的样品环境,这里以Ag NPs为例,进行简化模型分析,将纳米颗粒单层膜视为粒径一致的球形纳米颗粒,并将其理想化为分布在石英玻璃基底上的规则阵列。通过控制变量,分别改变纳米颗粒大小和间隔。以直径为30 nm,间隔为6 nm的未退火Ag NPs样品为例,初始透射如图4(a)所示,峰值在520 nm左右。随着纳米颗粒之间的间隔从6 nm增加到30 nm,透射衰减峰值逐渐蓝移。当间隔增大到30 nm时,衰减峰值蓝移至441 nm处。固定间隔为30 nm,增大纳米颗粒的直径,透射衰减峰值发生微弱蓝移,如图4(b)所示。当直径增大至80 nm时,峰值移动到430 nm处,同时峰宽也随粒径而增大。通过仿真得到透射峰值和形状与测试紫外可见光光谱基本相符,其中理想化模型使得仿真透射率稍低于实物测试。

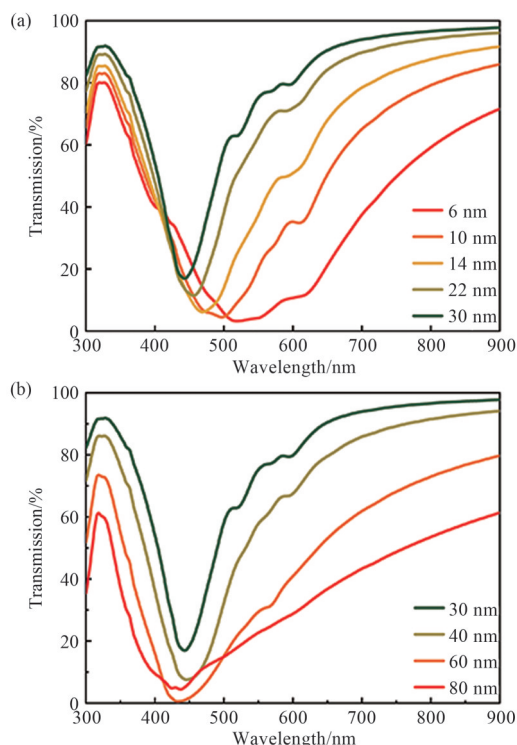


图 4 (a) 仿真 Ag NPs 阵列透射光谱随颗粒间隔变化曲线; (b) 仿真 Ag NPs 阵列透射光谱随颗粒直径变化曲线。

Fig. 4 (a) Variation curves of the simulation of Ag NPs array transmission spectra with particle spacing; (b) Variation curves of the simulation of Ag NPs array transmission spectra with particle diameter.

3.4 防蓝光效果

为了对比不同样品的实际透光效果,将样品置于含有大量蓝光的普通白色 LED 灯前。图 5(a) 和 (b) 分别展示了 Au@Ag NPs 和 Ag NPs 未退火样品实际透光效果,两种样品都极大地减少了光的透射,但剩余的透射光中蓝紫光占据了很大一部分。对于两种不同材料制备的退火样品,图 5(c) 展示了 Au@Ag NPs 退火样品,虽然其他波段透光有所增加,但仍可以明显地看到蓝紫光占据了其中一部分。在图 5(d) 展示 Ag NPs 退火样品中,透光大幅增加,同时透过的光主要呈米黄色,蓝紫色得到了很大的削弱。使用不同颜色的 LED 和光功率计对 Ag NPs 退火样品实际透光率进行更进一步的分析,并相对于石英玻璃进行归一化。在 400 nm 紫光处的透光率为 23.4%,在 460 nm 蓝光处的透光率为 30.9%,表明样品对蓝紫光有效地进行了传输衰减。当使用波长为 520 nm 翠绿色 LED 时,透光率为 44.9%,在波长为 585 nm 黄光处,透光率升

至 58.5%,相对于蓝紫光有很好的透光率。同时透光率测试与透射光谱结果相符,证明 Ag NPs 退火样品具有优异的蓝光防护效果。



图 5 纳米颗粒样品在含有大量蓝光的普通白色 LED 下透光效果。Au@Ag NPs(a) 和 Ag NPs(b) 自组装未退火实际透光效果; Au@Ag NPs(c) 和 Ag NPs(d) 自组装退火实际透光效果。

Fig. 5 Light transmission effect of nanoparticle samples under ordinary white LED containing a large amount of blue light. The actual transmittance effect of Au@Ag NPs (a) and Ag NPs (b) self-assembled and unannealed, and Au@Ag NPs (c) and Ag NPs (d) self-assembled and annealed.

4 结 论

采用柠檬酸钠和单宁酸体系,合成出 Au@Ag NPs 和 Ag NPs,使用自组装方法在石英上制备了纳米颗粒单层阵列,并通过退火方法改变阵列形貌,对其传输光衰减进行了研究。结果表明,由于纳米颗粒阵列的局域表面等离子共振,样品对光传输衰减存在选择性。使用退火的方式,可以改变影响共振的条件,有效地改变传输光衰减的波段。未退火 Au@Ag 和 Ag 样品主要衰减波段集中在绿色和黄色光波段。退火后样品的传输光衰减发生蓝移,特别是 Ag NPs 样品衰减峰值蓝移至 416 nm 处,透光率仅有 24.5%,而对 600 nm 左右的橙黄色波段有较高的透光率。所制备的样品实现了有选择性的光传输衰减,并使其主要衰减波段覆盖了 400~450 nm 的有害蓝光波段。使用在石英基底上制备的 Ag NPs 自组装退火样品,可以用于照明的光传输阶段,有效地减少有害蓝光对人眼的危害,实现更健康的照明方式。

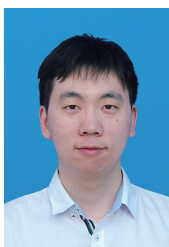
参 考 文 献:

- [1] MORGAN PATTISON P, HANSEN M, TSAO J Y. LED lighting efficacy: status and directions [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2018, 19(3): 134-145.
- [2] 曹慧,郑喜凤,汪洋,等. 超高清超高分辨率大尺寸LED显示器[J]. 液晶与显示, 2021, 36(4): 566-574.
CAO H, ZHENG X F, WANG Y, *et al.* Ultra high definition ultra-high resolution large size LED display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(4): 566-574. (in Chinese)
- [3] DU F, ZHUANG W D, LIU R H, *et al.* Synthesis, structure and luminescent properties of yellow phosphor $\text{La}_3\text{Si}_6\text{N}_{11}:\text{Ce}^{3+}$ for high power white-LEDs [J]. *Journal of Rare Earths*, 2017, 35(11): 1059-1064.
- [4] 武文杰,阿木古楞,刘文全,等. 氮(氧)化物荧光粉的合成与发光性能[J]. 液晶与显示, 2017, 32(9): 663-676.
WU W J, AMUGULEN, LIU W Q, *et al.* Synthesis and luminescence of nitride and oxynitride luminescent materials [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9): 663-676. (in Chinese)
- [5] OUYANG X L, YANG J, HONG Z X, *et al.* Mechanisms of blue light-induced eye hazard and protective measures: a review [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020, 130: 110577.
- [6] TOSINI G, FERGUSON I, TSUBOTA K. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology [J]. *Molecular Vision*, 2016, 22: 61-72.
- [7] 张平奇,王丹,吕振华,等. 健康显示的影响因素综述[J]. 液晶与显示, 2020, 35(9): 981-990.
ZHANG P Q, WANG D, LYU Z H, *et al.* Review of determinants of healthy display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(9): 981-990. (in Chinese)
- [8] LEE S I, MATSUMORI K, NISHIMURA K, *et al.* Melatonin suppression and sleepiness in children exposed to blue-enriched white LED lighting at night [J]. *Physiological Reports*, 2018, 6(24): e13942.
- [9] ZHANG J J, GUO W H, XIE B, *et al.* Blue light hazard optimization for white light-emitting diode sources with high luminous efficacy of radiation and high color rendering index [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 193-198.
- [10] ZHU X, GUO X, ZHANG J L, *et al.* Phosphor-free, color-mixed, and efficient illuminant: multi-chip packaged LEDs for optimizing blue light hazard and non-visual biological effects [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106174.
- [11] SHOU C H, LUO Z Y, WANG T, *et al.* Investigation of a broadband $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ optical thin-film filter for hybrid solar power systems [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 298-306.
- [12] 庞梦林,周顺,郭峰,等. 用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 221-227.
PANG M L, ZHOU S, GUO F, *et al.* Design and preparation of cut-off filter for observation scope [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 221-227. (in Chinese)
- [13] YU H K, PENG Y S, YANG Y, *et al.* Plasmon-enhanced light-matter interactions and applications [J]. *NPJ Computational Materials*, 2019, 5: 45.
- [14] LOISEAU A, ZHANG L, HU D, *et al.* Core-shell gold/silver nanoparticles for localized surface plasmon resonance-based naked-eye toxin biosensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 46462-46471.
- [15] ŠPRINGER T, ERMINI M L, ŠPAČKOVÁ B, *et al.* Enhancing sensitivity of surface plasmon resonance biosensors by functionalized gold nanoparticles: size matters [J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(20): 10350-10356.
- [16] AMENDOLA V, PILOT R, FRASCONI M, *et al.* Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, 29(20): 203002.
- [17] CHAI Y, HASNAIN J, BAHL K, *et al.* Direct observation of nanoparticle-surfactant assembly and jamming at the water-oil interface [J]. *Science Advances*, 2020, 6(48): eabb8675.
- [18] TAHHIGHI M, MANNELLI I, JANNER D, *et al.* Tailoring plasmonic response by Langmuir-Blodgett gold nanoparticle templating for the fabrication of SERS substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 447: 416-422.
- [19] BASTÚS N G, MERKÖÇİ F, PIELLA J, *et al.* Synthesis of highly monodisperse citrate-stabilized silver nanoparticles of up to 200 nm: kinetic control and catalytic properties [J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(9): 2836-2846.
- [20] WEI H R, LENG W N, SONG J, *et al.* Real-time monitoring of ligand exchange kinetics on gold nanoparticle surfaces enabled by hot spot-normalized surface-enhanced raman scattering [J]. *Environmental Science & Technology*,

2019, 53(2): 575-585.

- [21] YANG G, HALLINAN D T. Self-assembly of large-scale crack-free gold nanoparticle films using a'drain-to-deposit' strategy [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(22): 225604.

作者简介:



朱 庆(1997—),男,河南周口人,硕士研究生,2019年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事金属纳米颗粒自组装功能器件及光谱技术研究。E-mail: zhu_qing97@foxmail.com



赖伟恩(1986—),男,福建龙岩人,博士,副教授,2014年于电子科技大学获得博士学位,主要从事红外/太赫兹功能器件及光谱技术研究。E-mail: wn-lai@hfut.edu.cn