

文章编号 1004-924X(2023)14-2052-08

石英上 Al 纳米阵列的制备及荧光增强性能

王子恒, 李金华*, 楚学影, 张 烨*
(长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:针对透明衬底上紫外共振金属纳米阵列制备的技术需求,在不导电石英衬底上,采用电子束曝光制备 Al 纳米阵列,并对其形貌及性能进行研究。在电子束曝光过程中,引入 Cr 金属层克服衬底不导电问题。采用曝光剂量测试和加工参数调节优化纳米棒形貌。采用时域有限差分法分析 Al 纳米棒在 325 nm 紫外光激发下的电场分布,并以 Langmuir-Blodgett(L-B)技术将 CdSe/ZnS 量子点沉积在 Al 纳米阵列表面进一步明确其荧光增强性能。结果表明,1 200 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 剂量下制备的 Al 纳米棒尺寸分布均匀,最终获得了取向互相垂直的四个区域集成的 Al 纳米阵列。光学性质分析表明,Al 纳米棒阵列可使 CdSe/ZnS 量子点的荧光强度增强约 1.7 倍。仿真结果表明,紫外光辐照下 Al 纳米棒末端电场强度明显高于纳米棒两侧,明确了量子点发光增强机理。成功在不导电衬底上获得多取向集成的、对量子点具有显著荧光增强效果的 Al 纳米阵列,为背光激发下量子点发光调控和偏振调制提供了一种新策略。

关键词:透明衬底;量子点;荧光增强;时域有限差分法

中图分类号: TB383.1 **doi:** 10.37188/OPE.20233114.2052

Preparation of Al nanoarray on quartz and fluorescence enhancement performance

WANG Ziheng, LI Jinhua*, CHU Xueying, ZHANG Ye*

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: lijh@cust.edu.cn; Zhangye84829@cust.edu.cn

Abstract: To address the difficulties in the preparation of ultraviolet (UV) resonance metal nanoarrays on transparent substrates, Al nanoarrays were prepared by electron beam exposure on a non-conducting quartz substrate and their morphology and properties were studied. A Cr metal layer was introduced to overcome the problem of non-conductivity in the electron beam exposure process. Nanorod morphology was optimized by adjustments to the exposure dose and design parameters. The electric field distribution of Al nanorods (excited by 325 nm UV light) was analyzed by using the finite-difference time-domain method. CdSe/ZnS quantum dots were deposited on the surface of Al nanoarrays by using Langmuir - Blodgett technology for fluorescence performance enhancement. The results indicate uniformity in the size distribution of Al nanorods prepared at a 1 200 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ dose. Four regions with Al nanorods in mutually perpendicular orientations were integrated. Optical analysis results indicate that the fluorescence intensity of CdSe/ZnS quantum dots could be enhanced approximately 1.7 times by the Al nanorod array. Simulation results show that, under UV radiation, the electric field intensities at the ends of the nanorods were

收稿日期:2022-11-30;修订日期:2023-03-23.

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金资助项目(No. 20200201266JC)

higher than at their sides, thereby revealing their influence on the fluorescence enhancement of the quantum dots. The multi-oriented integrated Al nanoarray with quantum dot fluorescence enhancement effects, which was prepared on a non-conducting substrate, provides a new strategy for the luminescence and polarization modulation of quantum dots under backlight excitation.

Key words: transparent substrate; quantum dots; fluorescence enhancement; FDTD method

1 引言

金属纳米结构具有改变分子所处介电环境电磁场的特点,广泛应用于光电器件、拉曼增强和偏振光调制等领域^[1-7]。Song 等人发现利用透明衬底上 Ag 纳米阵列可实现量子点荧光增强^[8]。Ye 等人在玻璃衬底上制造栅级金属,使得背光显示器件的刷新率提高^[9]。透明衬底上金属纳米阵列对荧光分子的自发辐射过程^[10-11],在背光显示等领域展现出诱人的前景。

Au、Ag 等金属材料近年来表现出很强的等离子体共振效应。但受其带间跃迁阈值的限制,入射光子波长小于 550 nm (Au) 和 350 nm (Ag) 时会优先激发电子-空穴对,而无法获得有效的局域表面等离子体共振^[12]。Al 纳米材料具有负的介电函数实部,使得其被认为是紫外波段中最有前景的等离子体材料之一^[13]。而且,Al 纳米粒子的局域表面等离子体共振的强度随入射光能量的增加而提高,使其具有优异的紫外吸收特性。Forestiere 等人探究了不同形状和尺寸的 Al 纳米颗粒的荧光增强性能,并明确了两个 Al 纳米颗粒耦合的近场相互作用^[14]。Sultangazyev 等人使用 Al 膜成功增强了标记在细胞上的 CdSe/ZnS 量子点荧光^[15]。与单个纳米颗粒相比,周期排布的金属纳米阵列结构可表现出光俘获效应,从而具有较高的光吸收率和低反射率^[16-17]。Dorh 等人利用 Al 纳米阵列成功实现了激光染料的荧光增强^[18]。另外,Al 材料价格低廉且易于产业化,Al 纳米结构的天然氧化层可作为荧光增强绝缘层避免荧光猝灭以及调整局域表面等离子体共振吸收峰的位置,在紫外波段背光显示领域表现出独特的价值。

现有报道的周期性 Al 纳米阵列主要以硅和金属材料为衬底来实现荧光和偏振调制^[19-21]。对于背光领域通常使用透明衬底来制备,而石英衬

底具有高透紫外光谱性能以及优异的化学稳定性常用于光电器件,在紫外透明石英衬底上设计与制备金属微纳结构就显得尤为重要。但遗憾的是,常用于紫外透明光电器件的石英衬底导电性差,对于制备本身粘附性较低的 Al 纳米阵列结构更具有极大的技术难度,相关结果仍有待探索。

半导体量子点因其量子产率高、稳定性好、波长可控等优点,被广泛应用于发光器件、光电显示等领域。如果能够借助紫外透明的 Al 纳米阵列结构实现量子点薄膜发光增强,就能够降低器件中的损耗和提升亮度,对背光显示领域具有重要价值^[22-23]。

本文以高紫外透过且不导电的石英材料为衬底,在小范围内可以实现多方向 Al 纳米阵列集成。通过精准控制曝光剂量测试和加工参数调节,最终可以实现四个方向 Al 纳米阵列的制备。有利于光电器件的荧光增强,器件的加工工艺得到提升。利用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)计算了 Al 纳米棒的近场电场分布,以 CdSe 量子点为例,对所获得的 Al 纳米阵列的荧光增强性能进行了验证。

2 实验

2.1 Al 纳米阵列制备

图 1 和图 2 分别给出了制备 Al 纳米棒阵列的工艺流程和 L-B 技术制备 CdSe/ZnS 量子点薄膜的实验流程。如图 1 所示,Al 纳米棒使用电子束正胶的曝光方案进行加工。采用厚度为 100 μm 、尺寸为 2 cm $\times$ 2 cm 的石英片作为基底,采用丙酮,异丙醇和去离子水,依次超声清洗后放入 180 $^{\circ}\text{C}$ 热板烘烤 10 min 去除表面水分,密封冷却至室温备用。

电子束曝光过程包括以下步骤:(1)导电处理:在基底表面旋涂电子束正胶 PMMA A4,经

过 90 s 前烘后进行金属磁控溅射(FHR)沉积Cr, 厚度为 10 nm; (2) 曝光: 电子束曝光(型号JBX5500ZA), 曝光剂量经优化后确定为 $1\ 200\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 4-甲基-2-戊醇和异丙醇的比例为 1:3, 显影时间为 120 s, 异丙醇定影时间为 30 s, 用氮气吹干后取出基底; (3) 金属沉积: 使用电子束蒸发(Ei-5Z)沉积Al, 厚度为 40 nm; (4) 剥离: 通过丙酮浸泡, 异丙醇和去离子水进行清洗得到石英衬底上的Al纳米阵列。

2.2 Al纳米阵列与CdSe/ZnS量子点复合实验过程

使用以CdSe为核心, ZnS为壳层的量子点材料, 通过在量子点表面包附ZnS来降低表面缺陷, 进一步提升发光效率和光学稳定性。采用L-B技术将CdSe/ZnS量子点(购自苏州星烁纳米科技有限公司)沉积在Al纳米阵列表面。如图2所示, 首先将 $100\ \mu\text{L}$, 浓度为 $2\ \text{mg}/\text{ml}$ 的CdSe/ZnS量子点正己烷溶液滴加至亚相(去离子水)表面, 等待 5 min 左右至溶剂充分挥发。将滑障以 $5\ \text{mm}/\text{min}$ 速度向前移动, 直至液面达到崩溃压后停止。将制备的Al纳米阵列水平固定至拉膜臂, 随后将 $2\ \text{cm} \times 2\ \text{cm}$ 的石英片设置插入水中的深度以及提膜速度, 最终完成将CdSe/ZnS量子点薄膜转移到面积为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 的Al纳米阵列表面。

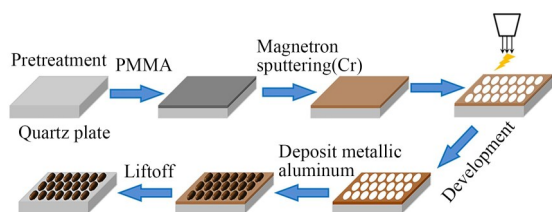


图1 Al纳米阵列电子束曝光加工工艺流程

Fig. 1 Steps of the fabrication of Al nanoarray by electron beam exposure technology

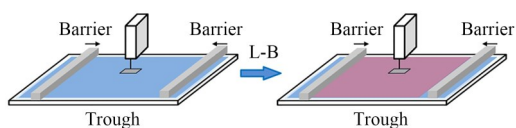


图2 Al L-B技术沉积CdSe/ZnS量子点薄膜过程

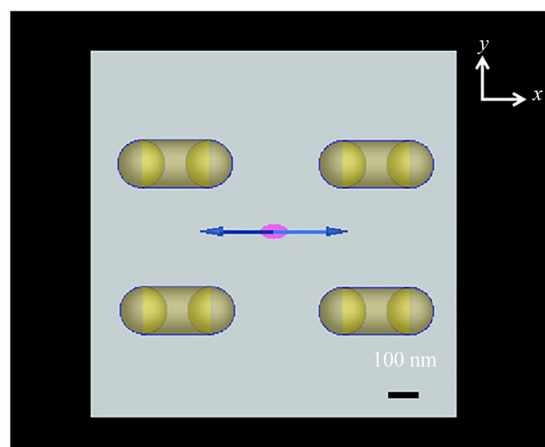
Fig. 2 Process of the deposition of CdSe/ZnS quantum dots by L-B method

2.3 材料表征与测试

以配备热场发射聚焦电子束诱导成像功能的电子束光刻机(Raith, eLINE Plus)观察Al纳米阵列形貌。采用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM, Agilent 5500)分析量子点沉积前后纳米棒阵列的厚度。以透射电镜(Transmission Electron Microscope, TecnaiG220S-Twin)对CdSe/ZnS量子点的形貌进行观察。使用紫外-可见分光光度计(UV-visible spectrophotometer, Agilent Cary-5000)收集CdSe/ZnS量子点的吸收光谱。以 $325\ \text{nm}$ He-Cd 激光器(Kimmom, IK3301R-G)作为激发光源, 以共聚焦拉曼光谱仪(Horiba, LabRam HR)测试量子点发光特性。

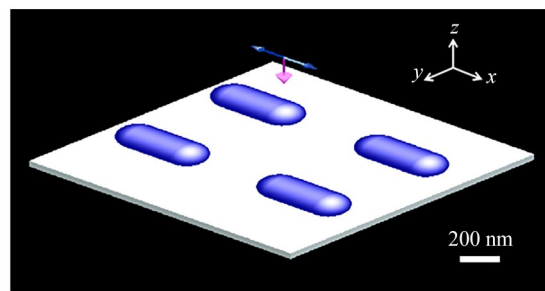
2.4 Al纳米阵列的仿真模拟

基于FDTD对Al纳米棒进行模拟, 分析其近场光学特性。依据电子束光刻获得的Al纳米阵列的形貌参数, 设计了如图3所示的Al纳米棒



(a) 俯视图

(a) Top view



(b) 立体图

(b) Perspective view

图3 Al纳米棒的FDTD模拟模型示意图

Fig. 3 Schematic of FDTD simulation model for Al nano-rods

模型。其中,长度为 $L=221$ nm,宽度 $R=150$ nm,横向间距 $H=238$ nm,纵向间距 $T=268$ nm 以及 $H=3$ nm 的氧化层。在理论模拟中,所有材料的折射率设置都取自 (Handbook of Palik) 手册^[24],光源设置为平面波,光源偏振方向为 x 轴方向,仿真波段在 $200\sim 400$ nm。通过采用适当的周期性和吸收边界条件,将模拟区域限制在纳米棒内。使用间距为 3 nm 的均匀方形网格对模拟域进行离散化。仿真区域 x 与 y 方向边界条件均设置为对称与反对称的周期性边界条件来节约仿真时间, z 方向上为 Perfectly Matched Layer (PML) 完美匹配层,能够使反射电磁波被完全吸收,不发生二次反射,以保证结果的正确性。

3 结果与讨论

3.1 Al 纳米阵列形貌表征

曝光剂量对电子束光刻制备纳米结构的形貌和尺寸影响较大,实验过程中,为了保证其制备成功率,需要先确认模板的加工工艺具有较好的稳定性。

图 4 为制备 Al 纳米棒阵列模板之前剂量测试过程相关结果。如图 4(a) 所示,分别设置了 10 个不同剂量测试区域。图 4(b) 是剂量测试实验获得的 SEM 照片。图 4(c) 给出了经多次曝光剂量测试和加工参数调节后获得的与模板版图尺寸相差最小的 SEM 照片 (曝光剂量为 $1\ 200\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$)。经过 50 次重复测量可以发现,获得的 Al 纳米棒模板的长度为 (185 ± 5) nm、直径为 (102 ± 9) nm、相邻两个纳米棒的径向间距为 (295 ± 5) nm、轴向间距为 (226 ± 5) nm (图 4(d) 为图 4(c) 标记框区域)。

图 5 为以 $1\ 200\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 剂量下制备的模板进行金属 Al 沉积后获得的 Al 纳米阵列的 SEM 照片。为了展示此加工技术对 Al 纳米棒排布方式的有效控制,加工过程中将模板版图设置为纳米棒取向互相垂直的四个区域。图 5(a) 展示了 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 面积内所制备 Al 纳米阵列的整体形貌。如图 5(b) 所示为 1 号标记框内的放大区域,得到的实际尺寸结构与剂量测

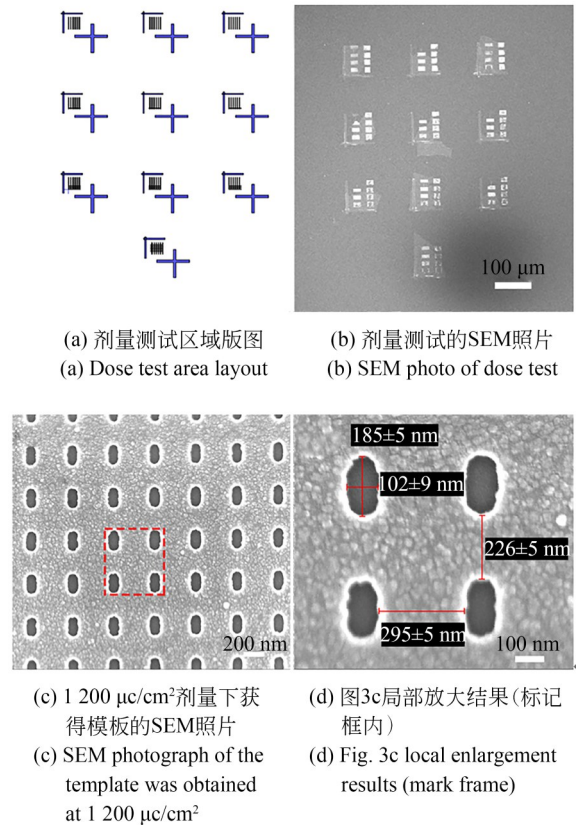
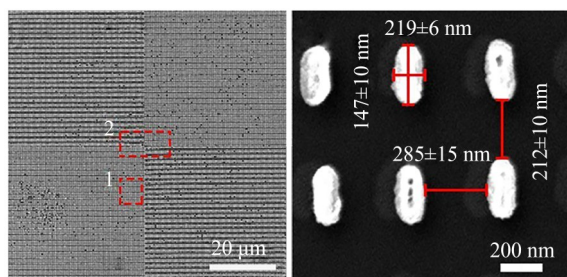


图 4 Al 纳米棒阵列模板的剂量测试过程
Fig. 4 Dose test process of Al nanorod array template

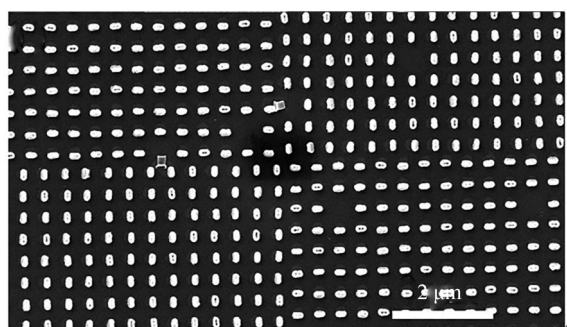
试的结果相差较小,表明该工艺具有较好的稳定性。经过 50 次平均测量,得出实际制备出 Al 纳米棒阵列的尺寸长度约为 (219 ± 6) nm、直径约为 (147 ± 10) nm、径向间距为 (285 ± 15) nm、横向间距为 (212 ± 10) nm。图 5(c) 展示了制备的 Al 纳米阵列中心区域的形貌照片,确认该工艺能有效的控制 Al 纳米棒的排布方式,成功制备了相互垂直的四个区域的 Al 纳米阵列 (2 号标记框)。

如图 6 给出原子力显微镜对 Al 纳米阵列沉积量子点厚度的分析结果。Al 纳米阵列的测量范围为 $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$,结果表明,Al 纳米阵列平均高度为 13 nm (图 6(b))。使用 L-B 技术在 Al 纳米阵列表面沉积了 CdSe/ZnS 量子点的薄膜,同样采用了无损 AFM 表征手段对其厚度进行了表征。图 6(c) 为沉积量子点后 Al 纳米阵列的 AFM 照片,其 Al 纳米阵列与沉积 CdSe/ZnS 量子点后平均高度为 28 nm (图 6(d))。



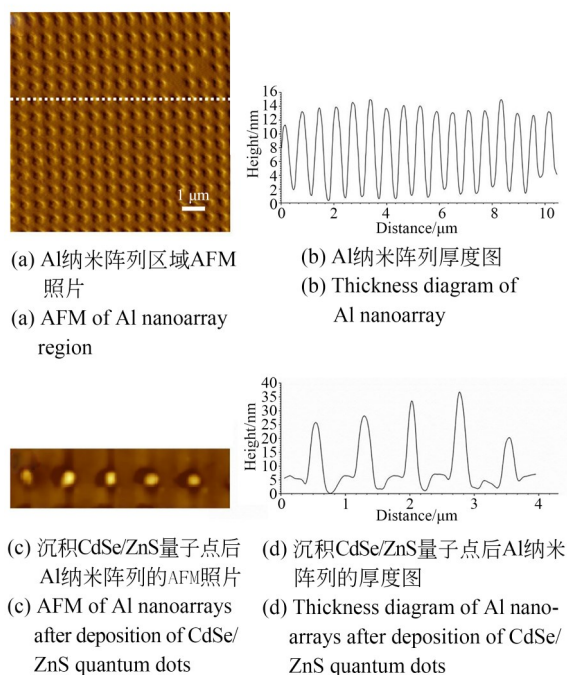
(a) 1 200 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 剂量下获得 Al 纳米阵列的 SEM 照片
(b) 1 号标记框内放大 SEM 照片

(a) SEM of Al nanoarrays were obtained at 1 200 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$



(c) 2 号标记框内放大 SEM 照片
(c) Enlarged SEM in the No. 2 mark frame

图 5 相互垂直的四个区域周期性 Al 纳米阵列 SEM 照片
Fig. 5 SEM of periodic Al nanoarrays in four regions perpendicular to each other

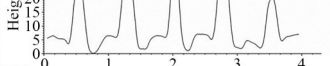


(a) Al 纳米阵列区域 AFM 照片
(a) AFM of Al nanoarray region

(b) Al 纳米阵列厚度图
(b) Thickness diagram of Al nanoarray



(c) 沉积 CdSe/ZnS 量子点后 Al 纳米阵列的 AFM 照片
(c) AFM of Al nanoarrays after deposition of CdSe/ZnS quantum dots



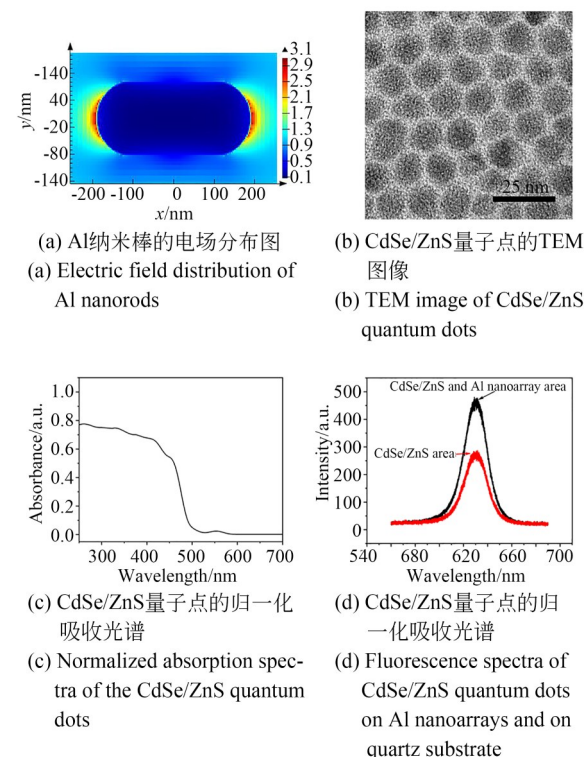
(d) 沉积 CdSe/ZnS 量子点后 Al 纳米阵列的厚度图
(d) Thickness diagram of Al nanoarrays after deposition of CdSe/ZnS quantum dots

图 6 Al 纳米阵列表面 AFM 照片

Fig. 6 AFM of Al nanoarray surface

3.2 光学性质分析

金属纳米棒阵列的表面等离子共振模式分为横向共振模式和纵向共振模式,其表面等离子共振模式的横向共振模式只与材料的本征特性有关,与纳米棒的长度无关^[25]。纵向模式中,入射光照射到 Al 纳米棒时,会引起 Al 纳米棒中的电子沿着棒长轴方向振荡,其振荡频率可对应紫外光区^[26]。当入射光频率与 Al 纳米阵列电子振荡频率一致时产生共振效应,导致集体振荡的电子发生剧烈的相互作用,使得 Al 纳米阵列对入射光的吸收大大增强,对光的反射迅速降低,在 Al 纳米阵列表面激发出强的局域电磁场。采用真空环境中的电场增强倍数“ $|E|/E_0$ ”来评估其电场增强效果。其中, $|E|$ 为 Al 纳米棒邻域电场幅值, E_0 为入射电场幅值。以波长为 325 nm 且偏振方向平行于衬底的平面波作为入射光,计算得到的电场(近场)分布如图 7(a)所示。电场强度在纳米



(a) Al 纳米棒的电场分布图
(a) Electric field distribution of Al nanorods

(b) CdSe/ZnS 量子点的 TEM 图像
(b) TEM image of CdSe/ZnS quantum dots

(c) CdSe/ZnS 量子点的归一化吸收光谱
(c) Normalized absorption spectra of the CdSe/ZnS quantum dots

(d) CdSe/ZnS 量子点的归一化吸收光谱
(d) Fluorescence spectra of CdSe/ZnS quantum dots on Al nanoarrays and on quartz substrate

图 7 Al 纳米棒电场分布图及 CdSe/ZnS 量子点形貌和光学性质表征

Fig. 7 Electric field distribution of Al nanorods and characterization of morphology and optical properties of CdSe/ZnS quantum dots

棒的两端处最高,最大计算强度为 3.1 倍,表明 Al 纳米棒表面等离子体共振主要由长轴的两端激发。

为了从实验上验证 Al 纳米棒在紫外光激发下的局域表面等离子体共振效应,在 Al 纳米棒阵列表面沉积了商用 CdSe/ZnS 量子点。如图 7(b)所示, CdSe/ZnS 量子点的直径为 11 ± 1 nm, 并且其吸收光谱能够覆盖紫外光区(见图 7(c))。325 nm 激发下,其荧光发射峰中心位于 632 nm 处(见图 7(d))。对比石英衬底上无 Al 纳米阵列处 CdSe/ZnS 量子点和 Al 纳米阵列表面 CdSe/ZnS 量子点的发光光谱,可以发现, Al 纳米阵列上的 CdSe/ZnS 量子点荧光强度比石英衬底上 CdSe/ZnS 量子点荧光强度平均约高 1.7 倍。证实了所制备的透明石英衬底上的 Al 纳米阵列确实可在紫外激发下实现量子点材料的荧光增强。这可理解为 CdSe/ZnS 量子点和 Al 纳米棒界面处的能带弯曲会使处于 Al 纳米棒表面等离子体共振能级上的电子转移到 CdSe/ZnS 量子点的导带,增强了 Al 纳米棒表面附近发光分子的吸收(激发)速率,进而实现

了更有效的激发^[27]。

4 结 论

紫外波段透明衬底上荧光增强技术对背光显示等领域具有重要价值, Al 纳米材料的等离子体共振频率能够在紫外波段实现较好的吸收,但在不导电紫外透明石英衬底上制备 Al 纳米阵列存在较大困难。通过精准控制曝光剂量测试和加工参数调节,成功获得了石英衬底上取向互相垂直的四个区域集成的 Al 纳米棒阵列样品。利用 L-B 技术将 CdSe/ZnS 量子点沉积在其表面,在 325 nm 紫外激发下实现了量子点材料荧光增强。实验结果表明, Al 纳米阵列上的 CdSe/ZnS 量子点荧光强度比石英衬底上 CdSe/ZnS 量子点荧光强度约高 1.7 倍。本文设计制备的取向互相垂直的多区域集成的 Al 纳米棒阵列在发光器件和光电显示等领域具有一定的发展潜力,随着微纳加工技术的发展,有望实现尺寸参数更小的金属阵列的制备,未来可同时实现荧光增强和偏振调制,进一步提高器件性能。

参考文献:

- [1] YAMADA I, TAKANO K, HANGYO M, *et al.* Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (3): 274-276.
- [2] 褚金奎, 康维东, 曾祥伟, 等. 基于柔性纳米压印工艺制备中红外双层金属纳米光栅[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12): 3034-3040.
- [3] 任升, 刘丽炜, 李金华, 等. 纳米尺度下的局域场增强研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 31-46.
- [4] ZHAO S X, YU Y Y, ZHANG B Y, *et al.* Dual-mode circularly polarized light emission and metal-enhanced fluorescence realized by the luminophore-chiral cellulose nanocrystal interfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(49): 59132-59141.
- [5] FULARZ A, STOGIANNIS D, RICE J H. Cellulose acetate-based plasmonic crystals for surface-enhanced Raman and fluorescence spectroscopy [J]. *ACS Materials Au*, 2022, 2(4): 453-463.
- [6] LI Z D, KANG H S, LONG M Y, *et al.* Tunable near-field enhancement in structure-adjustable Au nanodumbbells for improved SERS and double-resonantly enhanced SHG [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126(29): 12129-12135.
- [7] 袁纵横, 苏睿, 黄静. 宽谐振区光学纳米天线的谐振[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1518-1523.
- [8] YUAN Z H, SU R, HUANG J. Resonance of optical nano-antenna with wider resonant areas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (6): 1518-1523. (in Chinese)

- [8] SONG J H, ATAY T, SHI S F, *et al.* Large enhancement of fluorescence efficiency from CdSe/ZnS quantum dots induced by resonant coupling to spatially controlled surface plasmons[J]. *Nano Letters*, 2005, 5(8): 1557-1561.
- [9] YE J H, HUANG C L, HUANG K Y, *et al.* P-28: development of low-resistivity gate-metal process for LTPS-TFT-array backplane applications [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(1): 1141-1144.
- [10] QI F L, JEONG K J, GONG J X, *et al.* Modulation of nano-superstructures and their optical properties[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2022, 55(17): 2425-2438.
- [11] 姜利英, 杭欣欣, 张培, 等. 用于检测多巴胺的荧光增强型适体传感器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 50-54.
JIANG L Y, HANG X X, ZHANG P, *et al.* Fluorescence-enhanced aptamer sensor for dopamine detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 50-54. (in Chinese)
- [12] QIAN LX, LI W, GU Z, *et al.* Ultra-Sensitive β -Ga₂O₃ Solar-Blind Photodetector with High-Density Al@Al₂O₃ Core-Shell Nanoplasmonic Array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(12): 2102055.
- [13] BORISOV V I, LIZUNOVA A A, MAZHARENKO A K, *et al.* Aluminum nanoparticles synthesis in spark discharge for ultraviolet plasmonics [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1695(1): 012021.
- [14] FORESTIERE C, HANDIN A, NEGRO L D. Enhancement of molecular fluorescence in the UV spectral range using aluminum nanoantennas [J]. *Plasmonics*, 2014, 9(3): 715-725.
- [15] SULTANGAZIYEV A, AKHMETOVA A, KUNUSHPAYEVA Z, *et al.* Aluminum foil as a substrate for metal enhanced fluorescence of bacteria labelled with quantum dots, shows very large enhancement and high contrast [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2020, 28: 100332.
- [16] KRAUSE B, PHAM M T, LUONG H M, *et al.* Periodic nanohole arrays with enhanced lasing and spontaneous emissions for low-cost plasmonic devices[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(1): 1185-1191.
- [17] ZHAO Q, YANG H, NIE B B, *et al.* Wafer-scale and cost-effective manufacturing of controllable nanogap arrays for highly sensitive SERS sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(2): 3580-3590.
- [18] DORR N, SARUA A, STOKES J, *et al.* Fluorescent emission enhancement by aluminium nano-antenna arrays in the near UV [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7): 075008.
- [19] LI Z Y, XIA Y N. Metal nanoparticles with gain toward single-molecule detection by surface-enhanced Raman scattering[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(1): 243-249.
- [20] LV Z, LIU L, ZHANG Y X, *et al.* Comprehensive study on the optical properties of graded Al component Al_xGa_{1-x}n nanostructures for UV photocathode [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2020, 147: 106695.
- [21] QIU Y, PAN Z, CHEN H, *et al.* Current progress in developing metal oxide nanoarrays-based photoanodes for photoelectrochemical water splitting [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1348-1380.
- [22] WANG H Y, GUO Y Y, HAO H X, *et al.* Bright CdSe/CdS quantum dot light-emitting diodes with modulated carrier dynamics via the local Kirchhoff law[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(47): 56476-56484.
- [23] RADCHANKA A, HRYBOUSKAYA V, IODCHIK A, *et al.* Zeta potential-based control of CdSe/ZnS quantum dot photoluminescence [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, 13(22): 4912-4917.
- [24] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids, Volume 1*[M]. Academic Press, 1985.
- [25] HU J L, CHEN L, LIAN Z C, *et al.* Deep-ultraviolet-blue-light surface plasmon resonance of Al and Al_{core}/Al₂O_{3shell} in spherical and cylindrical nanostructures [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(29): 15584-15590.
- [26] RIEGSINGER S, POPESCU R, GERTHSEN D, *et al.* Room-temperature liquid-phase synthesis

of aluminium nanoparticles[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2022, 58(54): 7499-7502.

- [27] 徐良敏,张正龙,蔡晓燕,等. 金属表面荧光增强的物理增强机制[J]. 发光学报, 2009, 30(3):

373-378.

XU L M, ZHANG Z L, CAI X Y, *et al.* Physical mechanisms of fluorescence enhancement at metal surface [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, 30(3): 373-378. (in Chinese)

作者简介:

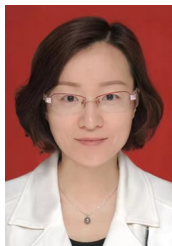


王子恒(1996—),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,2018年于长春理工大学光电信息学院获得学士学位,主要从事纳米材料制备及光学特性方面的研究。E-mail: 825424850@qq.com



楚学影(1982—),女,吉林长春人,博士,副教授,2011年于东北师范大学获得博士学位,主要从事半导体纳米材料制备及光电特性应用方面的研究。E-mail: xueying_chu@cust.edu.cn

通讯作者:



李金华(1977—),女,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,2006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,主要从事半导体纳米光电材料与器件等方面研究。E-mail: lijh@cust.edu.cn



张 烨(1984—),男,辽宁锦州人,博士,副教授,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体纳米光电材料与器件数值仿真分析研究。E-mail: Zhangye84829@cust.edu.cn