

# MPA/GMA 双重表面修饰量子点制备及与 SU-8 光刻胶的相容性研究

杨育霖, 谢莹莹, 陈结峰, 金磊\*, 张志宽\*

(深圳扑浪创新科技有限公司, 广东 深圳 518115)

**摘要:** 针对量子点(QDs)与SU-8光刻胶的界面相容性问题,本研究提出巯基丙酸(MPA)交换与甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)开环酯化的两步法表面修饰策略,成功在量子点表面引入可聚合双键,获得GMA-MPA-QDs。多维表征(FTIR、XPS、ICP-OES等)证实了表面官能团从OA到MPA再到GMA的演变以及Zn-S核心骨架的完整性。动力学分析表明,尽管大分子链段引入引起的表面微环境扰动导致PLQY轻微下降,其保留率仍高达86.8%。改性后的GMA-MPA-QDs有效解决了QDs在SU-8光刻胶中的微米级团聚问题,复合胶液静置90天仍均匀透明无沉降。此外,该复合体系展现出优异的抗热猝灭能力,并兼容标准光刻流程,成功制备出边缘清晰、荧光均匀的图案化结构,为量子点的高精度光刻图案化应用奠定了材料与工艺基础。

**关键词:** 量子点; 表面修饰; 配体交换; 甲基丙烯酸缩水甘油酯; SU-8光刻胶

中图分类号: TQ65;TB383;O647.2

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260169

CSTR: 32170.14.CJL.20260169

## Preparation of MPA/GMA Dual Surface-Modified Quantum Dots and a Study of Their Compatibility with SU-8 Photoresist

YANG Yulin, XIE Yingying, CHEN Jiefeng, JIN Lei\*, ZHANG Zhikuan\*

(Shenzhen Planck Innovation Technology Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518115, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: jinl@planckinnovation.com; zhangzk@planckinnovation.com

**Abstract:** The combination of quantum dots (QDs) with photoresist is a key technology for fabricating high-performance quantum dot display devices. However, the poor interfacial compatibility between QDs and the photoresist matrix severely limits their practical application. In this study, a two-step surface modification strategy is proposed to address the dispersion challenge of oil-soluble QDs in SU-8 photoresist and to endow them with reactivity. First, ligand exchange of oleic acid (OA)-capped QDs with mercaptopropionic acid (MPA) is performed to obtain hydrophilic QDs (MPA-QDs) with carboxyl-rich surfaces. Subsequently, using 4-dimethylaminopyridine (DMAP) as a catalyst, the epoxy group of glycidyl methacrylate (GMA) undergoes ring-opening esterification with the carboxyl groups on the MPA-QD surface under mild conditions (60 °C, 5h), covalently attaching polymerizable methacrylate double bonds to the QD surface to yield GMA-MPA-QDs. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) confirm the stepwise surface functional group evolution from OA to MPA to GMA; XPS quantitative analysis shows that the carbon content increases from 44.33% (MPA-QDs) to 57.31% after GMA grafting, indicating successful covalent conjugation. Transmission electron microscopy (TEM), ICP-OES and fluorescence spectroscopy demonstrate that the modification process does not damage the morphology or core-shell structure of the QDs. Kinetic analysis shows that although the surface microenvironment perturbation caused by the introduction of macromolecular segments leads to a slight decrease in the photoluminescence quantum yield (PLQY), the retention rate remains at 86.8% of its original value (from 99.6% to 86.5%). Remarkably, GMA-MPA-QDs ex-

hibit excellent dispersion stability in SU-8 2005 photoresist: the composite solution remains uniformly transparent without noticeable sedimentation even after 90 days of standing, and no aggregates larger than 500 nm are observed under optical microscopy. In contrast, the control MPA-QD system shows micron-scale aggregation (2-10 $\mu\text{m}$ ) within 24 hours. Furthermore, this composite system exhibits excellent resistance to thermal quenching and is compatible with standard photolithography processes, successfully producing patterned structures with clear edges and uniform fluorescence. This study not only provides an effective chemical modification strategy to resolve QD aggregation in photoresist but also establishes a materials and process foundation for high-precision photolithographic patterning applications of quantum dots.

**Keywords:** quantum dots; surface modification; ligand exchange; glycidyl methacrylate; SU-8 photoresist

## 1 引 言

量子点(Quantum dots, QDs)因量子限域效应,展现出激发光谱宽、发射光谱窄、发光波长可调、色纯度高、优异光学特性。通过调控其粒径(通常 2-10 nm),其发光波长可连续覆盖整个可见光波段(450-650 nm)。其荧光发射半峰宽(FWHM)通常小于 30 nm,可覆盖超过 90% 的 Rec. 2020 色域标准,已成为最具潜力的新一代显示发光材料之一<sup>[1-4]</sup>。然而,量子点自身不具备空间选择性沉积的能力。为满足显示面板对像素尺寸(通常 <50  $\mu\text{m}$ )、定位精度(亚微米级)、生产良率及成本的综合要求,必须借助图案化技术方可实现显示器件所需的像素化结构<sup>[5-6]</sup>。将量子点与光刻胶复合制成量子点光刻胶(QD-photoresist),再经由“涂布-曝光-显影”的标准光刻流程形成图案,具有高分辨率(亚微米级)、与现有产线兼容等优势,成为实现高精度像素化的理想路径<sup>[7]</sup>。

在众多光刻胶体系中,负性环氧树脂型光刻胶 SU-8 因其优异的高深宽比加工能力、良好的化学稳定性、对紫外光的高敏感性以及固化后优异的机械强度,成为量子点图案化载体基质的理想候选<sup>[8-10]</sup>。然而,实现量子点与 SU-8 光刻胶的高质量复合面临界面不相容性的根本障碍。目前高质量量子点的合成普遍采用油酸(OA)等长链有机配体,以确保其良好的单分散性和高荧光效率<sup>[11]</sup>。这些长链配体使量子点表面呈现强疏水性。与之相反, SU-8 树脂分子结构中含有多个羟基和醚键,呈现中等极性。直接复合时,疏水相互作用驱动量子点从基质中相分离,形成微米级团聚体,导致复合胶液不均、成膜质量下降及严重的荧光猝灭<sup>[12-13]</sup>。为改善量子点在极性基质中的分散性,研究者发展了多种量子点表面修饰策略<sup>[14-15]</sup>。采用短链双官能团分子(如巯基丙酸,MPA)置换原始

长链配体,解决了量子点由“疏水”到“亲水”的转换,操作简便、效果显著<sup>[16-17]</sup>。然而,经 MPA 修饰后,量子点(MPA-QDs)表面富含羧基,易与 SU-8 树脂中的羟基形成强氢键网络,导致量子点再次发生团聚<sup>[18]</sup>。此外,MPA-QDs 表面缺乏可参与 SU-8 光固化反应的官能团,在显影过程中量子点极易流失。而且上述单一配体策略面临分子设计的内在矛盾:一个分子难以同时具备强配位锚定、与基质的极性匹配以及可参与光固化的活性基团。例如,强极性的锚定基团可能导致与疏水性基质的不相容,而可聚合基团的引入又可能干扰配位稳定性。

针对上述挑战,本研究提出基于“功能解耦”的设计理念,发展了 MPA/GMA 两步法表面修饰策略。首先以巯基丙酸(MPA)交换 OA 配体,获得羧基功能化的 MPA-QDs;继而以 4-二甲氨基吡啶(DMAP)为催化剂,在温和条件下(60  $^{\circ}\text{C}$ , 5 h)促使甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)的环氧基与 MPA-QDs 末端羧基的开环酯化,引入可参与光聚合的甲基丙烯酸酯双键,同时实现表面能的有效调控<sup>[19-24]</sup>。经该策略修饰的 GMA-MPA-QDs 荧光发射峰位保持 625 nm,光致发光量子产率(PLQY)相对于 OA-QDs 总保留率达 86.8%。为深入解析修饰过程对量子点本征结构与发光性能的影响,本研究结合 ICP-OES 绝对元素定量与时间分辨荧光光谱(TRPL),从无机骨架完整性与激子动力学层面阐明了发光效率演变的物理化学机制。在 SU-8 光刻胶中,GMA-MPA-QDs 展现出优异的相容性:复合胶液室温静置 90 天后仍澄清均匀、无团聚或沉降,分散稳定性较未修饰量子点提升了从小时到月的数量级。此外,充分考虑实际光刻产线的前烘与坚膜工艺,本研究系统验证了复合体系在高温条件下的光学与热学加工稳定

性。该策略将“锚定”、“极性匹配”与“光聚合活性”三项功能分别赋予不同的结构单元,不仅为解决量子点在光刻胶中的分散稳定性问题提供了新途径,也为高精度图形化器件的实际制造提供了关键数据支撑。

## 2 实验

### 2.1 试剂

油酸修饰的 CdSe/ZnS 量子点(OA-QD)来自深圳扑浪创新科技有限公司、3-巯基丙酸(MPA,  $\geq 98\%$ )、甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA,  $\geq 97\%$ , 含 100 ppm MEHQ 稳定剂)、4-二甲氨基吡啶(DMAP,  $\geq 99\%$ )、N,N-二甲基甲酰胺(DMF,  $\geq 99.5\%$ )、环戊酮( $\geq 97\%$ )、正辛烷( $\geq 96\%$ )、乙酸乙酯( $\geq 99.5\%$ )等购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司, SU-8 2005 光刻胶购自苏州汶颢微流控技术股份有限公司。所有试剂无需进一步纯化直接使用。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 MPA-QD 的制备

首先,称取 0.1 g 油溶性油酸包覆量子点(OA-QDs)分散于 0.9 g 正辛烷中,制备成质量分数为 10 wt% 的量子点分散液。随后,向该体系中加入 1.0 g 质量分数为 10 wt% 的 MPA 的 DMF 溶液。混合溶液在 60 °C 条件下搅拌反应 1 h 以完成配体交换。反应结束后,向混合液中加入乙酸乙酯作为沉淀剂进行离心分离,以彻底去除置换出的油酸配体及未反应的 MPA。最终收集的沉淀物即为表面富含羧基的亲水性 MPA-QDs。

#### 2.2.2 GMA 接枝

将前述制得的 MPA-QDs 重新分散于无水 DMF 中,配制成质量分数为 1% 的分散液。将反应体系置于真空条件下脱气处理 20 min,随后通入高纯氮气进行保护。向体系中缓慢滴加含 0.02 g 4-二甲氨基吡啶(DMAP)催化剂的 DMF 溶液(0.5 mL),搅拌 15 min。然后升温至 40 °C,通过注射泵以 0.2 mL/min 的速率滴加 1.0 g 甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)的 DMF 溶液(4 mL),滴加完毕后继续搅拌 15 min。随后升温至 60 °C 并恒温反应 5 h。在此过程中,GMA 分子中的环氧基团与 MPA-QDs 表面的羧基发生开环酯化反应,从而实现表面功能化。反应结束后自然冷却至室温,产物经乙酸乙酯沉淀及多次离心洗涤纯化,最终获得 GMA-MPA-QDs。

#### 2.2.3 量子点/光刻胶复合体系配制

分别将 MPA-QDs 和 GMA-MPA-QDs 分散于环戊酮中,配制成 10 wt% 浓度的分散液。本研究选取 SU-8 2005 光刻胶用于研究,因其膜厚范围与量子点色转换层需求匹配,且黏度适中,便于分散性评价。为考察不同浓度下的分散行为,将量子点分散液按 5~20 wt% 的比例加入 SU-8 2005 中,使量子点固体质量分数为 0.5~2.0 wt%。磁力搅拌并超声脱泡,制备两种对比胶液。为评估分散稳定性,将复合胶液转移至透明玻璃样品瓶中,密封后置于避光柜,在室温(25 $\pm$ 2 °C)条件下静置,定期观察沉降情况并取样进行光学显微镜观察。

#### 2.2.4 光刻工艺过程

实验采用 2.0 wt% 量子点含量的 GMA-MPA-QDs/SU-8 复合胶液,以载玻片为基底开展光刻图案化实验,具体流程如下:以经丙酮、乙醇、去离子水超声清洗并烘干的玻璃片为基底,通过两步旋涂(500 rpm/5 s/100 m/s<sup>2</sup>+1000 rpm/55 s/1000 m/s<sup>2</sup>)制备薄膜;样品经 85 °C 前烘 3 min 后,采用 365 nm 紫外光以 66 mJ/cm<sup>2</sup> 剂量曝光,再经 85 °C 后烘 2 min 强化交联反应,最后置于 PGMEA 显影液中显影 1 min,去离子水冲洗并氮气吹干,完成图案制备。

### 2.3 仪器表征

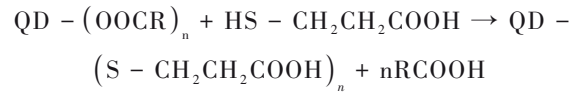
使用美国 Thermo Fisher Scientific Nicolet iS50 傅里叶红外光谱仪(FTIR)和捷克产 Thermo Fisher Scientific (China) Co. Ltd XPS Escalab Xi+ X 射线光电子能谱仪(XPS)对量子点表面的化学结构及元素组成进行表征。采用捷克产 Thermo Scientific Talos F200X G2 透射电子显微镜(TEM)观察产物的形貌与粒径。量子点的荧光光谱和荧光量子产率(PLQY)分别通过广州犀谱光电的 XP-MFS-Bas 光谱分析仪和 XPQY-EQE 荧光/外量子效率测量系统测定,并通过日本 Olympus IX73 光学显微镜观察量子点在光刻胶中的分散情况。采用 Avio 550 Max, PerkinElmer 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)完成无机元素定量分析。采用 NanoBrook Omni 型动态激光散射仪完成动态激光光散射(DLS)测试。采用 Agilent 8890-5977B 仪器分析样品的热分解产物及挥发性有机物。荧光寿命衰减分析采用基于 Nikon Ti-E 显微镜的 FLIM 系统,以脉冲激光为激发源,通过双通道 TCSPC 探测器记录时间分辨信号并拟合寿命。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 表面化学组成与结构演变

表面配体的精准调控与功能化是实现其在聚合物基体中稳定分散及良好界面相容性的先决条件。本研究提出的 MPA/GMA 双重表面修饰策略包含两个关键步骤(图 1):首先以 MPA 交换原始 OA 配体,实现从羧酸配位向巯基配位的

转变:



继而以 DMAP 为催化剂,通过 GMA 环氧基与 MPA-QDs 表面羧基的开环酯化反应完成接枝:

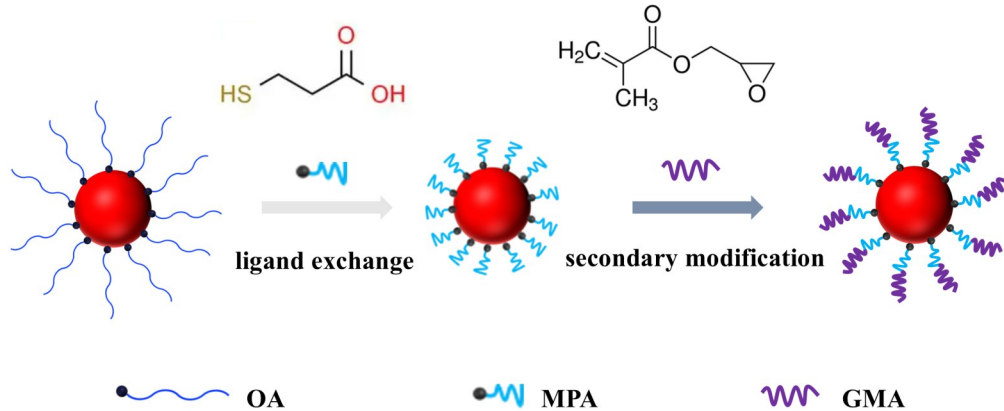
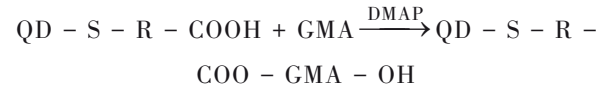


图 1 基于 MPA/GMA 双重表面修饰的量子点制备路线

Figure 1 Schematic illustration of the preparation route for quantum dots via MPA/GMA dual surface modification.

为验证上述两步修饰反应的逐步发生,采用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 对 OA-QDs、MPA-QDs 和 GMA-MPA-QDs 三个阶段的表面化学组成进行了系统表征(图 2(a))。OA-QDs 谱图中,位于  $2923\text{ cm}^{-1}$  和  $2856\text{ cm}^{-1}$  处的强吸收峰分别归属于油酸长链中亚甲基 ( $-\text{CH}_2-$ ) 的不对称和对称伸缩振动,表明初始量子点表面被长链油酸分子紧密覆盖<sup>[25]</sup>。经 MPA 配体交换后 (MPA-QDs),上述长链烷基特征峰强度显著衰减。与此同时,  $3351\text{ cm}^{-1}$  处出现宽化的 O-H 伸缩振动峰(对应表面羟基与吸附水),  $1660\text{ cm}^{-1}$  处出现特征吸收峰(源于羧酸盐与吸附水的羟基弯曲振动),  $1247\text{ cm}^{-1}$  处出现微弱 C-O 伸缩振动峰。上述光谱演变表明,短链 MPA 已成功置换了长链油酸,在量子点表面引入了丰富的羧基官能团<sup>[26]</sup>。进一步引入 GMA 进行接枝反应 (GMA-MPA-QDs), FTIR 谱图呈现新的变化:  $3351\text{ cm}^{-1}$  处羟基吸收峰进一步增强,  $1247\text{ cm}^{-1}$  处 C-O 振动信号加强,且在  $804$ 、 $881$ 、 $1051$ 、 $1093\text{ cm}^{-1}$  处出现一系列新特征峰。文献比对表明,这些新峰归属于 GMA 环氧开环后生成的 C-O-C 醚键、C-OH 及相关官能团的振动<sup>[27]</sup>。这一结果证实, GMA 已通过环氧基与羧基的开环酯化反应成功接枝于 MPA-QDs 表面。

为进一步确认表面官能团的演变及配位环境的变化,采用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对三个样品的 C1s、O1s 和 S2p 的精细谱图进行了采集与分析(图 2),同时通过表面元素含量变化进行定量佐证(表 1)。C 1s 精细谱(图 2(b))显示, OA-QDs 以强 C-C/C-H 峰 ( $284.8\text{ eV}$ ) 为主,  $288.8\text{ eV}$  处出现微弱的 O-C=O 峰,对应油酸的羧基碳,表明 QD 表面被油酸覆盖。MPA 交换后,烷基碳峰显著减弱,羧基碳峰 ( $288.8\text{ eV}$ ) 相对增强,并于  $286.2\text{ eV}$  处出现 C-S 新峰,且未见 C-O 峰,该谱图特征与 MPA 的化学结构完全吻合; GMA 接枝后,在  $287.0\text{ eV}$  出现 C-O/C-O-C 特征峰,且  $288.8\text{ eV}$  处峰强进一步增加,归因于羧基/酯羰基的叠加贡献。上述 C 1s 谱的逐步演变证明, GMA 已通过酯键共价连接至 MPA-QDs 表面。O 1s 精细谱(图 2(c))进一步佐证了这一结论: OA-QDs 仅见弱 C=O 峰 ( $531.8\text{ eV}$ ); MPA-QDs 以  $533.5\text{ eV}$  处的羧酸盐/羟基氧为主; GMA-MPA-QDs 拟合出  $530.5\text{ eV}$  (Zn-O 配位氧,证实核壳结构完整)、 $531.9\text{ eV}$  (C=O, 酯键/羧基) 及  $534.0\text{ eV}$  (C-OH/C-O-C, GMA 开环结构) 三个特征峰,表明 GMA 成功开环接枝且量子点表面配位环境未遭破坏。S 2p 精细谱(图 2(d))显示:所有样品均出现  $161-$

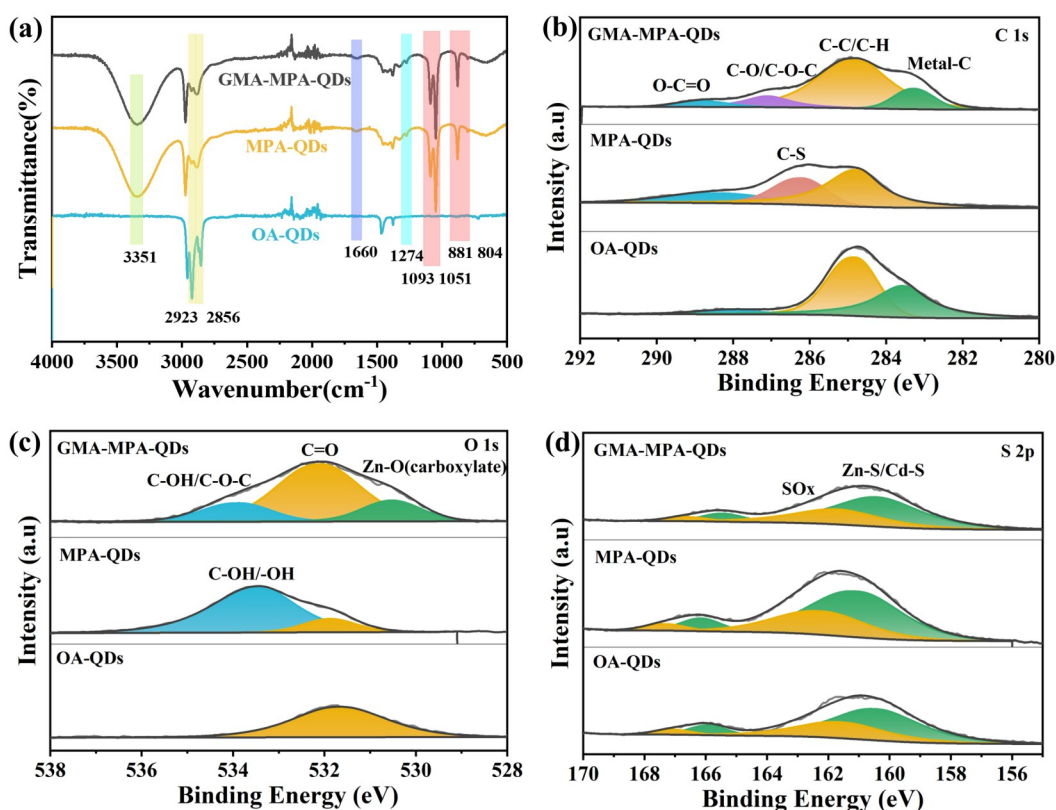


图2. (a) OA-QDs、MPA-QDs 及 GMA-MPA-QDs 的 FTIR 谱图; (b) OA-QDs、MPA-QDs 与 GMA-MPA-QDs 的 C 1s XPS 精细谱; (c) O 1s XPS 精细谱; (d) S 2p XPS 精细谱。

Figure 2 (a) FTIR spectra of OA-QDs, MPA-QDs, and GMA-MPA-QDs; (b) High-resolution C 1s XPS spectra of OA-QDs, MPA-QDs, and GMA-MPA-QDs; (c) O 1s XPS spectra; (d) S 2p XPS spectra.

162 eV 的  $S^{2-}$  晶格/配位硫峰及 166-168 eV 的氧化硫峰。MPA 交换后氧化硫峰增强, 可能源于 MPA 巯基的部分氧化。GMA 接枝后谱图无明显变化, 说明改性仅作用于羧基末端, 不破坏巯基-锌的配位键。

XPS 表面元素含量的定量分析(表 1)进一步验证了上述结构演变。C 含量从 OA-QDs 的 63.22% 降至 MPA-QDs 的 44.33%, 意味着长链油酸被有效脱除。GMA 接枝后 C 含量小幅回升至 57.31%, 可能归因于 GMA 含碳链段的引入。O 含量由 7.98% 逐步升至 17.55%, 反映了 MPA 引入羧基、GMA 进一步引入环氧开环含氧结构的累积效应。S 含量在 MPA 交换后由 28.80% 升至 42.99%, 源于巯基配位引入额外硫。GMA 接枝后, S 的原子百分比由 MPA-QDs 的 42.99% 降至 25.15%。这主要归因于 GMA 接枝后引入了大量含 C、O 元素的聚合物链段, 导致 XPS 探测区域内 S 元素的相对原子百分比发生表观下降。为进一步明确配体的真实保留率, 采用 ICP-OES 测定了

GMA 接枝前后样品的 S/Zn 质量比(表 2)。定量分析(Zn 334.501 nm)表明, 修饰前后样品的 S/Zn 质量比均维持在 0.42。该数值微低于 ZnS 理论值(0.49), 主要归因于配体交换及洗涤过程中部分 MPA 配体的脱附。但修饰前后该比例无显著差异, 证实 GMA 修饰过程并未破坏量子点表面的 Zn-S 配位键及无机核心骨架。此外, 次分析线(Zn 330.258 nm)的结果进一步验证了该定量数据的可靠性。

综合 FTIR 与 XPS 分析结果可以得出, 本研究建立的两步法修饰策略能够实现从 OA 到 MPA 再到 GMA 的梯次官能团演变, GMA 通过开环酯化

表 1 OA-QDs、MPA-QDs 与 GMA-MPA-QDs 的 XPS 表面元素原子含量对比

Table 1 XPS surface elemental composition of OA-QDs, MPA-QDs, and GMA-MPA-QDs

样品	C (at%)	O (at%)	S (at%)
OA-QDs	63.22	7.98	28.80
MPA-QDs	44.33	12.68	42.99
GMA-MPA-QDs	57.31	17.55	25.15

表2 MPA-QDs与GMA-MPA-QDs的ICP-OES定量分析

Table 2 Quantitative ICP-OES analysis results of MPA-QDs and GMA-MPA-QDs.

样品	Zn		S	
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	Zn/S
MPA-QDs	12.918	16.263	5.425	0.42
GMA-MPA-QDs	15.074	18.987	6.325	0.42

反应以共价键形式接枝于MPA过渡层,量子点的核壳结构及表面配位环境在温和反应条件下保持完整。这一结构基础是后续实现优异光学性能与分散稳定性的前提。

### 3.2 晶体结构与形貌表征

量子点的尺寸、形貌及单分散性直接决定其光学性能及在复合材料中的堆积行为。本研究采用透射电子显微镜(TEM)对OA-QDs、MPA-QDs及GMA-MPA-QDs进行了形貌表征。OA分散于正辛烷中,而因TEM测试要求使用易挥发溶剂,制样时将原本分散于DMF和环戊酮中的MPA-QDs和GMA-MPA-QDs置换为无水乙醇,稀释至约0.1 mg/mL后,采用滴铸法制备于碳支持膜铜网上室温干燥。基于对各样品中200个粒子的统

计分析,OA-QDs呈规则球形,粒子间界限清晰,展现出优异的单分散性,平均粒径为13.6 nm(图3(a)、(d))。经MPA配体交换和GMA接枝修饰后,MPA-QDs(图3(b))以及GMA-MPA-QDs(图3(c))的高分辨TEM图像显示,单个量子点依然保持完整的球形形貌,无明显刻蚀或形变,证实两步化学修饰过程并未对量子点的无机核心造成破坏。需要说明的是,图3(b)和(c)中观察到的局部聚集现象,主要归因于TEM制样干燥过程中无水乙醇快速挥发导致的局部浓度骤升,而非其在分散液中的真实团聚状态。粒径统计进一步证实,GMA-MPA-QDs的平均直径为13.9 nm,相比OA-QDs仅增加约0.3 nm。考虑到MPA分子碳链长约0.6 nm(配体交换后分子取向可能不完全垂直于表面),且GMA接枝后延伸约1.1 nm,实测的0.3 nm增量与预期表面修饰层厚度基本吻合。该结果还表明,最终修饰层总厚度小于2.0 nm,远低于聚合物包覆法的典型值(5-15 nm)。这一薄层修饰特征可有效避免“光稀释效应”,即非发光有机层占据过多体积分数而导致复合材料发光效率下降的问题,从而保证了量子点在后续光刻胶复合体系中的体积分数和发光效率。

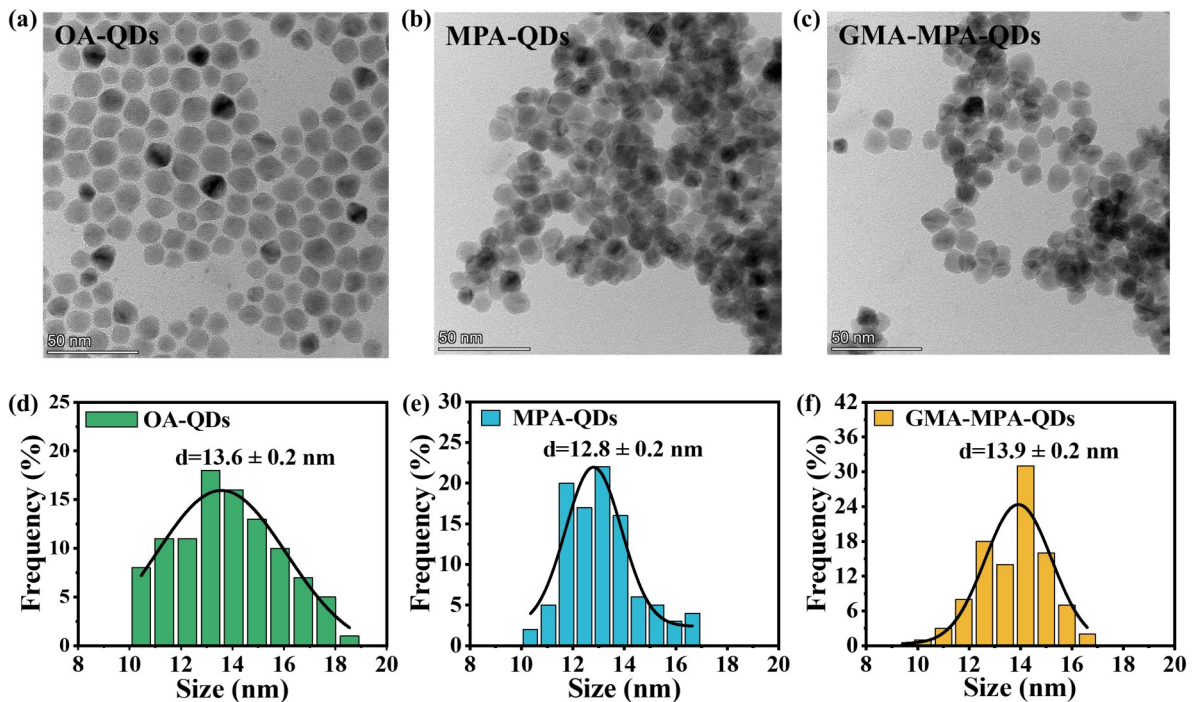


图3 (a) OA-QDs的TEM图像;(b) MPA-QDs的TEM图像;(c) GMA-MPA-QDs的TEM图像;(d) OA-QDs的粒径分布;(e) MPA-QDs的粒径分布;(f) GMA-MPA-QDs的粒径分布。

Figure 3 (a) TEM image of OA-QDs; (b) TEM image of MPA-QDs; (c) TEM image of GMA-MPA-QDs; (d) size distribution of OA-QDs; (e) size distribution of MPA-QDs; (f) size distribution of GMA-MPA-QDs.

### 3.3 GMA 接枝工艺参数优化

为实现接枝密度与光学性能的最佳平衡, 研究系统考察了 DMAP 用量、GMA 添加量及反应温度对产物光致发光量子产率 (PLQY) 保留率与分散性能的影响。以下优化实验中, 除特别说明外, 均固定 MPA-QD 用量为 0.1 g。作为羧基与环氧基开环酯化的亲核催化剂, DMAP 的用量对反应效率至关重要。固定 GMA 添加量 1.0 g, 反应温度 60 °C、反应时间 5 h, 考察 DMAP 用量对产物性能的影响 (图 4(a))。当 DMAP 用量为 0.02 g 时, PLQY 为 86.5%,

相对于 OA-QDs 的保留率为 86.8%, 且在环戊酮中分散性良好。当 DMAP 用量低于 0.02 g 时, 催化效率不足导致 GMA 接枝不完全, 改性后量子点仍呈现一定极性溶剂偏好, 在环戊酮中分散性不佳。当 DMAP 用量增加至 0.025 g 及以上时, 反应体系颜色轻微加深, PLQY 出现明显衰退 (降幅达 5.7%)。分析其成因, 过量的 DMAP 可能作为亲核试剂与量子点表面  $Zn^{2+}$  发生配位竞争, 或催化 GMA 环氧基开环水解等副反应, 从而破坏量子点表面结构的完整性。据此确定最佳 DMAP 用量为 0.02 g。

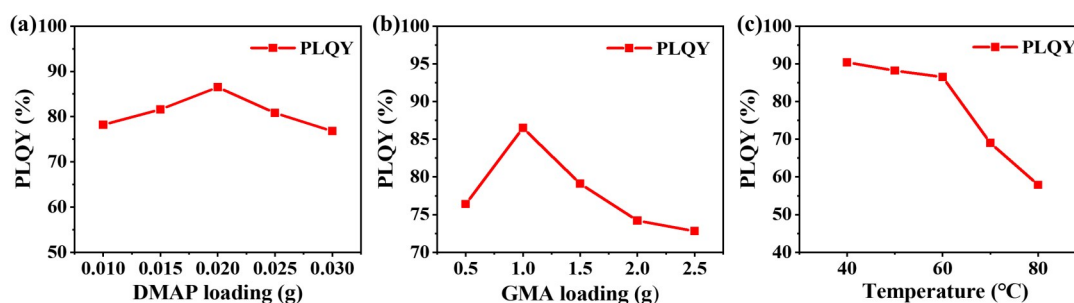


图 4 (a) DMAP 用量、(b) GMA 添加量及 (c) 反应温度对 GMA-MPA-QDs 的 PLQY 保留率的影响。

Figure 4 (a) Effect of DMAP dosage, (b) GMA addition, and (c) reaction temperature on the PLQY retention rate of GMA-MPA-QDs.

固定 DMAP 用量 0.02 g, 反应温度 60 °C、反应时间 5 h, 考察 GMA 与 MPA-QD 表面羧基的摩尔比对改性效果的影响 (图 4(b))。当 GMA 添加量降至 0.5 g (羧基与摩尔比 1:500) 时, 相对于 OA-QDs 的 PLQY 保留率为 76.7%, 且改性后量子点在环戊酮中的溶解性较差, 静置后出现轻微浑浊。这表明接枝密度不足时, 残留的羧基导致量子点极性偏高, 与弱极性溶剂的相容性下降。当 GMA 添加量为 1.0 g (羧基与 GMA 摩尔 ~1:1000) 时, 量子点展现出最佳的分散稳定性与光学性能。继续增加 GMA 至 1.5 g (摩尔比 1:1500) 时, 虽然溶解性维持, 但相对于 OA-QDs 的 PLQY 保留率降至 79.4%。过量 GMA 可能引发分子间副反应 (如双键自由基聚合或环氧基水解缩合), 在量子点表面引入额外缺陷态。综合考虑光学性能与分散稳定性, 确定最佳 GMA 添加量为 1.0 g。

固定 DMAP 用量 0.02 g、GMA 添加量 1.0 g、反应时间 5 h, 考察反应温度对产物性能的影响 (图 4(c))。当反应温度为 40 °C 时, PLQY 为 90.4%, 相对于 OA-QDs 的 PLQY 保留率高达 90.8%, 但改性后量子点在环戊酮中无法溶解分散, 出现聚集沉淀现象。这说明低温下开环酯化反应动力学较慢, GMA 接枝密度不足, 难以实现

致密修饰。当温度升至 60 °C 时, GMA 接枝反应进行温和, PLQY 为 86.5%, 相对于 OA-QDs 的 PLQY 保留率为 86.8%, 且改性后量子点在 SU-8 光刻胶溶剂环戊酮中相容性良好, 综合性能最优。当温度进一步升至 70 °C 时, 反应速率加快, 体系颜色明显加深, PLQY 急剧衰退至 69.0%, 相对于 OA-QDs 的 PLQY 保留率仅为 69.3%。这一现象可能归因于高温加剧了副反应 (如 GMA 的自聚或量子点表面配体的热脱附) 及表面缺陷的形成。

综合上述优化结果, 确定最佳反应条件为: DMAP 用量 0.02 g, 羧基:GMA 摩尔比 1:1000 (GMA 添加量 1.0 g), 反应温度 60 °C, 反应时间 5 h。在此条件下, GMA-MPA-QDs 的 PLQY 为 86.5%, 相对于初始 OA-QDs (99.6%) 的保留率达 86.8%。后续实验均采用此优化条件下制备的样品。

### 3.4 光学性能稳定性

在光刻胶及复合光电器件应用中, 保持量子点本征的高发光效率至关重要。为评估两步修饰过程对量子点光学性能的影响, 对比了 OA-QDs、MPA-QDs 与 GMA-MPA-QDs 的荧光发射光谱及绝对 PLQY (图 5)。荧光发射光谱 (图 5(a)) 显示, 尽管经历了两次连续的表面化学改性, GMA-MPA-

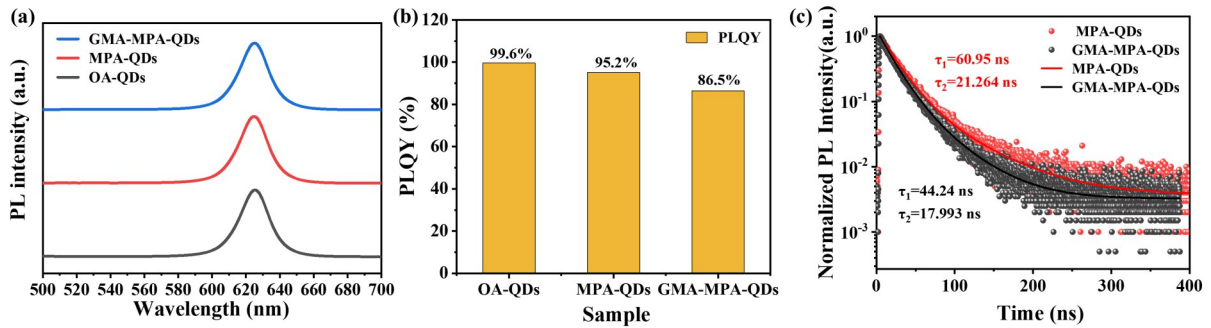


图5 OA-QDs、MPA-QDs与改性后GMA-MPA-QDs的(a)荧光发射光谱及(b)PLQY对比;(c)MPA-QDs与GMA-MPA-QDs的归一化荧光寿命衰减曲线及拟合寿命参数。

Figure 5 (a) Photoluminescence (PL) spectra and (b) PLQYs of OA-QDs, MPA-QDs, and GMA-MPA-QDs; (c) Normalized fluorescence lifetime decay curves and fitted lifetime parameters of MPA-QDs and GMA-MPA-QDs.

QDs的荧光发射峰(PL)峰位仍维持在625 nm,未出现明显的蓝移或红移现象。这表明本研究采用的温和修饰条件(60 °C, 5 h)未对量子点的无机核心尺寸及能带结构造成可探测的扰动。PLQY的演变过程(图5(b))进一步量化了各修饰阶段的光学性能保持情况。初始OA-QDs的PLQY为99.6%,展现出优异的本征发光效率。经MPA配体交换后,MPA-QDs的PLQY轻微降至95.2%,相对于初始值的保留率为95.6%。这一极小的效率损失表明,MPA短链配体不仅成功置换了OA长链,同时有效钝化了量子点表面的潜在缺陷态。随后在优化条件下进行GMA接枝,最终GMA-MPA-QDs的PLQY为86.5%,相对于OA-QDs的保留率为86.8%,相对于MPA-QDs的保留率为90.9%。该结果表明,GMA接枝过程虽因配体场空间重构及少量新生表面缺陷态的引入导致一定程度的效率下降,但最终产物仍保持着高达86.5%的绝对PLQY。

为了进一步从激发态动力学角度阐明GMA接枝导致量子点PLQY下降的物理机制,进行了时间分辨荧光光谱(TRPL)测试<sup>[28]</sup>。图5(c)展示了MPA-QDs和GMA-MPA-QDs的荧光衰减曲线,其衰减动力学过程通过双指数衰减模型进行拟合,公式如(1)所示:

$$I(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

基于拟合结果,样品的平均荧光寿命( $\tau_{avg}$ )采用以下振幅加权公式(2)进行计算:

$$\tau_{avg} = A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2 \quad (2)$$

其中, $I(t)$ 为时间 $t$ 时的荧光强度, $\tau_1$ 与 $\tau_2$ 分别代表长寿命和短寿命组分的衰减时间常数, $A_1$ 和 $A_2$ 为

对应组分的相对振幅。

拟合结果(表3)显示,MPA-QDs的平均荧光寿命为34.21 ns,而经GMA接枝修饰后,GMA-MPA-QDs的平均寿命缩短至27.18 ns。值得注意的是,修饰后体系的长寿命组分( $\tau_1$ )与短寿命组分( $\tau_2$ )均发生了明显的衰减( $\tau_1$ 由60.95 ns降至44.24 ns)。在激子动力学中,荧光寿命的整体缩短直接指向了非辐射复合过程的增强。结合前文ICP-OES证实的无机核心完整性,这一动力学变化表明:GMA聚合物链段的引入虽未破坏Zn-S骨架,但庞大的有机链段可能在量子点表面引发了局部微环境扰动或空间位阻效应,诱导了额外的表面缺陷态。这些新增的表面态作为非辐射重组中心加剧了激子的非辐射损耗,这正是导致GMA修饰后量子点发光效率出现轻微损失的动力学本质。

表3 MPA-QDs与GMA-MPA-QDs的时间分辨荧光衰减拟合参数

Table 3 Time-resolved photoluminescence decay fitting parameters of MPA-QDs and GMA-MPA-QDs.

样品	$\tau_{avg}$ (ns)	$\tau_1$ (ns)	$A_1$ (%)	$\tau_2$ (ns)	$A_2$ (%)
MPA-QDs	34.21	60.95	32.62	21.264	67.38
GMA-MPA-QDs	27.18	44.24	35.00	17.993	65.00

综合上述分析,本研究所建立的两步法表面修饰策略在实现官能团演化的同时,较好地保留了量子点的本征发光特性。86.8%的PLQY保留率使GMA-MPA-QDs具备满足高性能图案化光电器件应用需求的光学潜力。

### 3.5 在SU-8光刻胶中的分散机制与界面相容性

量子点在光刻胶基质中的分散状态直接决定了光刻图案的质量及器件性能。为评估GMA修

饰对分散稳定性的提升效果, 研究对比了 MPA-QDs 和 GMA-MPA-QDs 在 SU-8 胶液中的分散行为与光学显微形貌(图 6), 并通过加速沉降实验进行了定量验证(图 7)。光学显微镜观察显示(400 $\times$ , 图 6(c)), MPA-QDs 在 SU-8 胶液中表现出严重的相分离, 视野内可观察到大量尺寸在 2-10  $\mu\text{m}$  范围内的不规则团聚体。胶液宏观呈浑浊状态, 静置 24 小时内即出现明显沉降(图 6(b))。这

一行为可归因于 MPA-QDs 表面裸露大量极性羧基(-COOH)。在非质子型环戊酮溶剂及疏水性环氧树脂(SU-8)基质中, 这些羧基形成很强的分子间氢键网络, 驱动量子点发生团聚与沉降(图 6(a)左)。相比之下, GMA-MPA-QDs 在 SU-8 胶液中展现了优异的相容性。在 400 $\times$  光学显微镜视场内(图 6(c)), 胶液均匀透明, 未观察到任何大于 500 nm 的颗粒或团聚体。

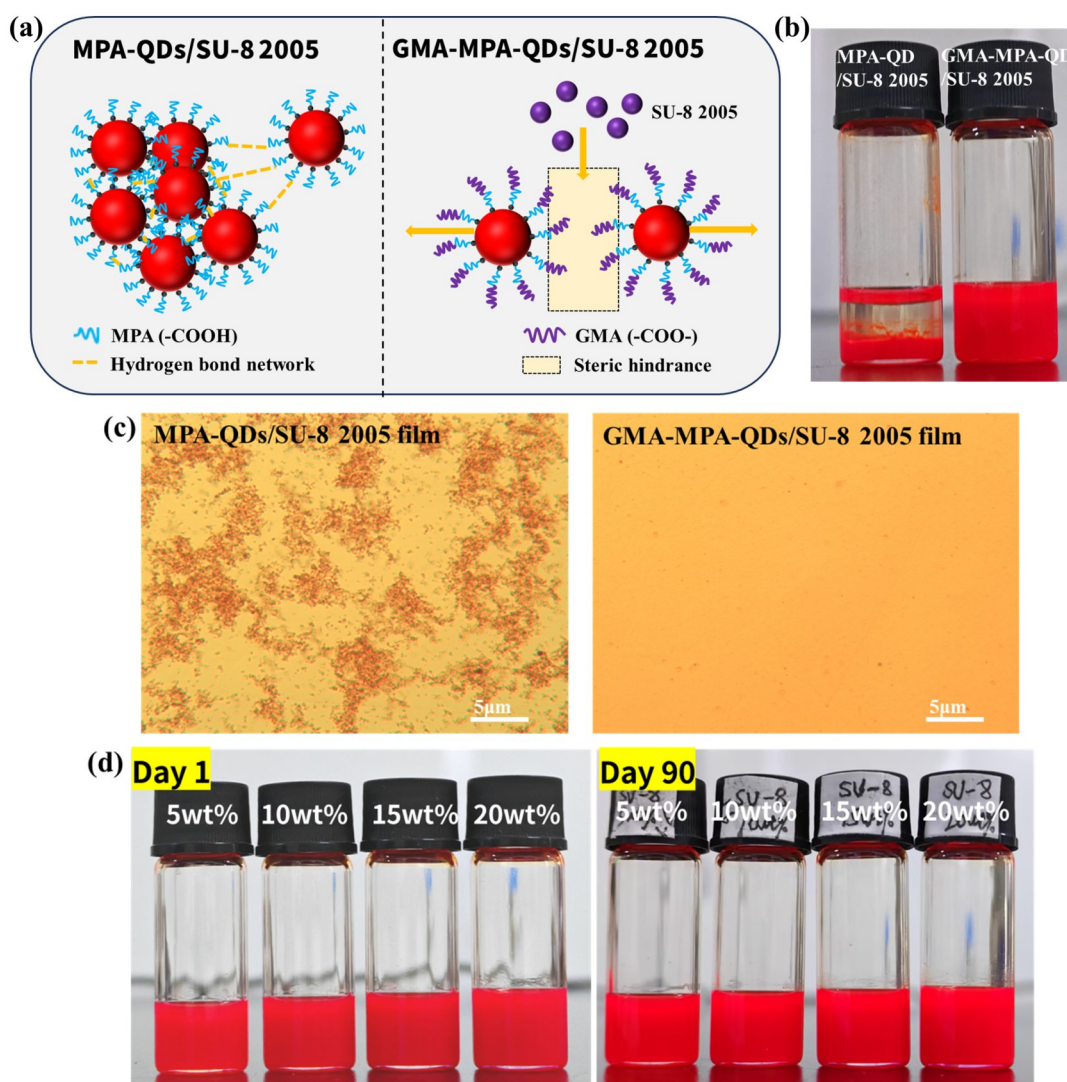


图 6.(a) MPA-QDs/SU-8 2005 团聚机制和 GMA-MPA-QDs/SU-8 2005 的稳定分散机理图; (b) MPA-QDs 和 GMA-MPA-QDs 在 SU-8 2005 光刻胶中的分散对比; (c) MPA-QDs 和 GMA-MPA-QDs/SU-8 2005 薄膜的光学显微照片; (d) GMA-MPA-QDs/SU-8 2005 复合液贮藏稳定性对比。

Figure 6. (a) Schematic diagrams illustrating the aggregation mechanism of MPA-QDs/SU-8 2005 and the stabilisation mechanism of GMA-MPA-QDs/SU-8 2005; (b) dispersion comparison of MPA-QDs and GMA-MPA-QDs in SU-8 2005 photoresist, and (c) optical micrographs of MPA-QDs/SU-8 2005 and GMA-MPA-QDs/SU-8 2005 composite films; (d) storage stability comparison of GMA-MPA-QDs/SU-8 2005 composite.

为定量评估分散状态, 采用动态光散射(DLS)对 MPA-QDs 与 GMA-MPA-QDs 在混合 SU-8

光刻胶前后的粒径分布进行表征对比。由图 7(a)和(b)可以看出, 未修饰的 MPA-QDs 与 SU-8

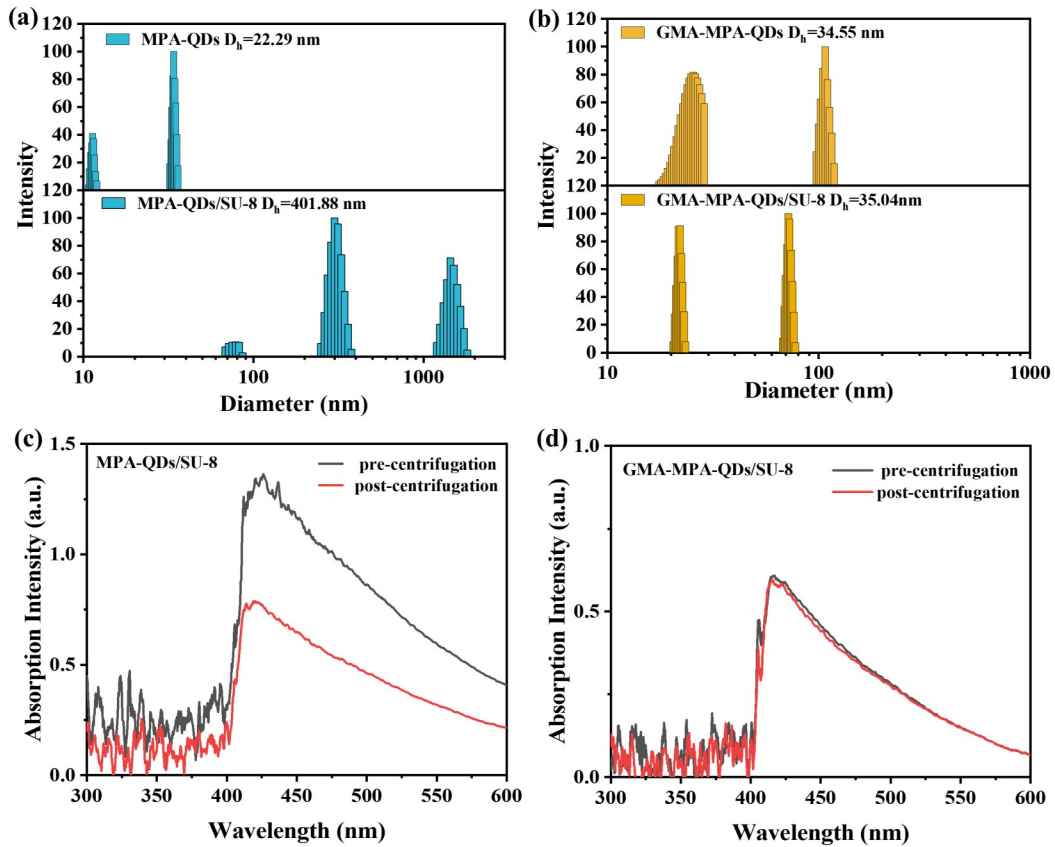


图7 (a)MPA-QDs与MPA-QDs/SU-8复合液的水动力粒径分布;(b)GMA-MPA-QDs与GMA-MPA-QDs/SU-8复合液水动力粒径分布;(c)MPA-QDs/SU-8和(d)GMA-MPA-QDs/SU-8复合液在离心前和离心后的吸光度。

Figure 7 (a) Hydrodynamic size distributions of MPA-QDs and MPA-QDs/SU-8 composite solution; (b) Hydrodynamic size distributions of GMA-MPA-QDs and GMA-MPA-QDs/SU-8 composite solution; Absorbance of the (c) MPA-QDs/SU-8 and (d) GMA-MPA-QDs/SU-8 systems before and after centrifugation.

混合后,平均水合粒径由22.29 nm剧增至401.88 nm,出现明显大颗粒团聚峰,表明二者相容性差;而经GMA-MPA配体交换后的GMA-MPA-QDs与SU-8光刻胶混合后,平均粒径仅从34.55 nm微变为35.04 nm,且保持窄分布、无大颗粒团聚,证明GMA-MPA修饰可显著改善量子点与SU-8光刻胶的界面相容性,实现稳定分散。DLS结果从亚微米尺度定量验证了GMA修饰对分散稳定性的显著提升,与光学显微镜观察结果相互印证。

宏观上,配制不同量子点(0.5~2.0 wt%)的GMA-MPA-QD/SU-8(图6(d)),密封避光室温静置90天后均保持澄清均匀、无任何沉淀或分层现象。这一显著改善源于GMA接枝的三重贡献:其一,GMA的接枝消耗了MPA-QDs表面易形成氢键的游离羧基;其二,引入的甲基丙烯酸酯链段与SU-8树脂具有更好的极性匹配;其三,GMA分子

提供空间位阻,其酯键和羟基可与SU-8的醚键/羟基形成适度的相互作用,既避免了强氢键导致的团聚,又维持了稳定的分散状态(图6(a)右)。

为了进一步量化分散稳定性,进行了加速沉降实验:将两种复合胶液在室温( $25 \pm 2$  °C)条件下以3000 rpm离心10 min后,测量上清液在450 nm处的吸光度,并以离心前吸光度为基准计算相对吸光度(图7(c)和(d))。MPA-QDs/SU-8体系的上清液相对吸光度(相对于离心前)仅为55.7%,意味着44.3%的量子点已发生沉降。而GMA-MPA-QDs/SU-8体系离心后的上清液相对吸光度高达96.9%,表明仅3.1%的量子点沉降。这一结果定量证实,GMA接枝使量子点在SU-8中的分散稳定性得到了数量级的提升。

### 3.6 光刻图案化验证及热稳定性测试

为验证GMA-MPA-QDs/SU-8复合材料在光刻工艺中的可加工性,采用标准光刻流程开展了

图案化实验,图 8(a)为 GMA-MPA-QDs/SU-8 复合体系光刻图案化步骤流程图及光刻图案化验证结果。可见明场模式下图案边缘清晰、轮廓完整,无明显残胶或图形缺陷;紫外激发模式下,曝光固化

区域呈现均匀的红色荧光,未曝光区域无荧光信号残留,表明量子点仅在固化区域被保留且保持发光性能,而未曝光区域的复合胶液被彻底显影去除。上述结果表明,GMA-MPA-QDs 表面的可

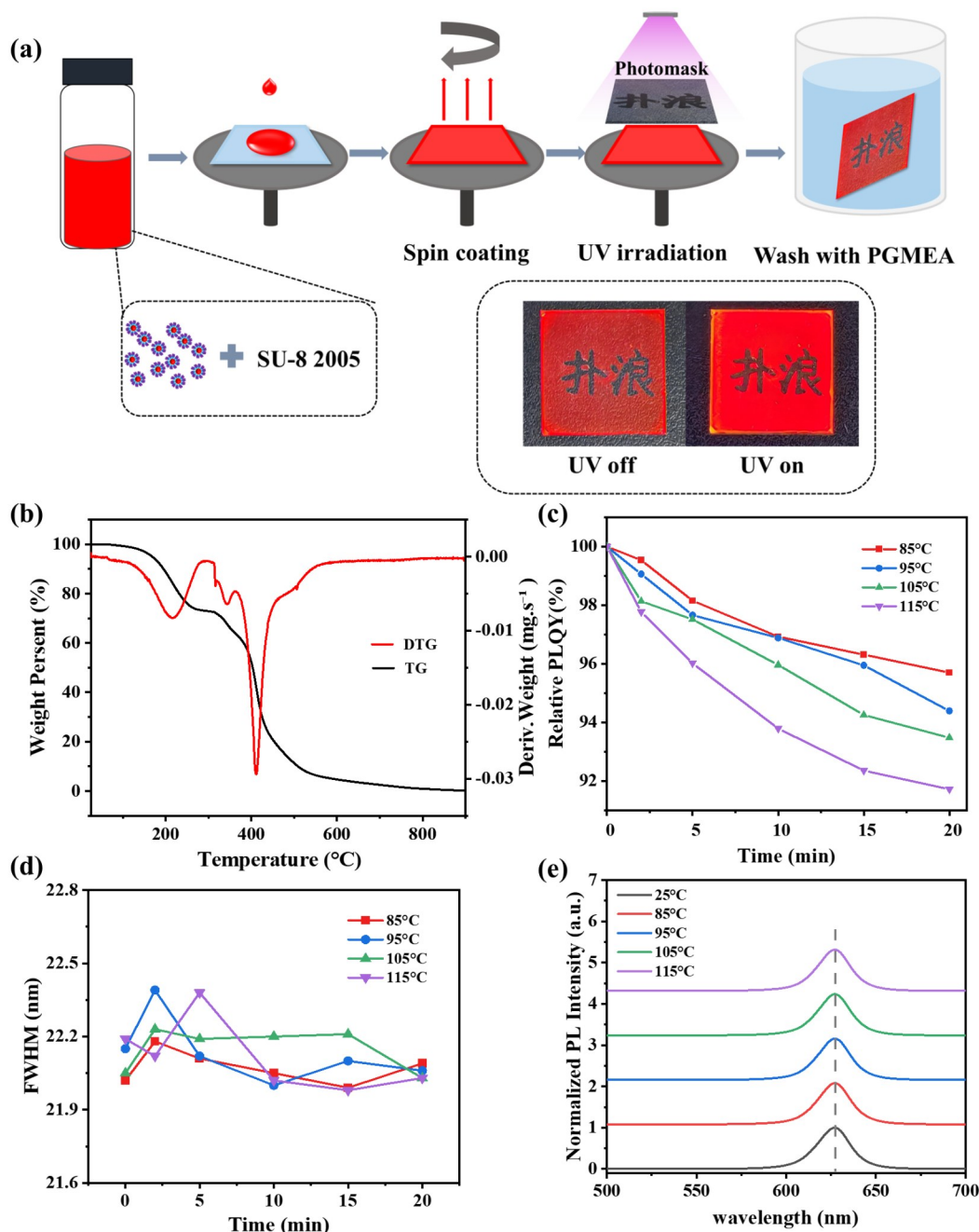


图 8 (a) GMA-MPA-QDs/SU-8 复合体系光刻图案化步骤流程图及光刻图案化验证结果(明场模式和紫外激发模式); (b)GMA-MPA-QDs/SU-8 的 TGA 热重曲线; (c)不同温度处理下 GMA-MPA-QDs/SU-8 薄膜的归一化 PL 光谱和 (d)光致发光峰的 FWHM 随时间的变化以及 (e)相对 PLQY 随时间的变化。

Figure 8 (a) Schematic illustration of the photolithographic patterning process for the GMA-MPA-QDs/SU-8 composite system, along with verification results of the photolithographic patterns (under bright-field mode and UV excitation mode); (b) TGA thermogravimetric curve of GMA-MPA-QDs/SU-8; (c) Normalized PL spectra of GMA-MPA-QDs/SU-8 films under different temperature treatments; (d) Time evolution of the FWHM of the photoluminescence peaks; and (e) Time-dependent changes in the relative PLQY.

聚合双键有效参与了SU-8的光固化交联反应,使复合材料具备光刻图案化加工能力。

考虑到光刻工艺中的前烘和坚膜过程通常包含90 - 110 °C的加热步骤,材料的热稳定性对于其实际产线加工的可行性具有决定性意义。因此,系统考察了GMA-MPA-QDs体系在高温条件下的物理与光学稳定性。首先,热重分析(TG-DTG)结果如图8(b)所示,样品在150 °C以下未出现显著的质量损失,其主要的热分解失重台阶发生在300 - 500 °C之间。这证实了GMA修饰并未削弱量子点体系的固有热稳定性,其主体骨架在典型的光刻烘烤温度区间内能够保持结构完好。为进一步明确加热过程对实际发光性能的影响,追踪了GMA-MPA-QDs薄膜在85 °C、95 °C、105 °C及115 °C恒温加热20 min内的光学演变行为。如图8(c)所示,薄膜展现出优异的抗热猝灭能力。在85 °C加热20 min后,其相对PLQY维持在初始值的95.7%;即使在115 °C的最高测试温度下历经20 min烘烤,相对PLQY的保留率依然高达91.7%。此外,变温加热过程并未引起发射光谱的劣化。如图8(d)所示,其半峰宽(FWHM)始终稳定在21.9 - 22.4 nm范围内;同时,在不同温度下,荧光发射峰位保持高度一致,无明显的红移或蓝移现象(图8(e))。半峰宽与峰位的高度稳定性表明,高温处理既未引发薄膜内部量子点的大规模团聚,也未诱导严重的表面缺陷激增。上述热学与光学稳定性测试结果充分证实,GMA-MPA-QDs复合体系能够经受住标准光刻工艺的

高温热负荷,具备优异的实际加工兼容性。

## 4 结 论

本研究通过MPA配体交换与GMA开环酯化接枝两步法,成功实现了量子点表面的梯次功能化修饰,获得与SU-8光刻胶高度相容的GMA-MPA-QDs。该“功能解耦”设计将“锚定(巯基-锌配位)”、“极性匹配(GMA链段)”与“光聚合活性(甲基丙烯酸酯双键)”三项功能分别赋予不同的结构单元,解决了单一分子难以兼顾多重功能的内在矛盾。多维结构表征证实了表面官能团的成功演变以及无机核心骨架的完整性。GMA-MPA-QDs平均粒径为13.9 nm(较初始仅增加0.3 nm),荧光发射峰位稳定在625 nm,PLQY保留率达86.8%。该复合液在SU-8光刻胶中密封避光室温静置90天后仍保持均匀透明,无团聚或沉降,远优于对照组。此外,该体系经115 °C高温烘烤20 min后相对PLQY保持在91.7%以上,展现出优异的热加工兼容性,并能通过标准光刻流程实现边缘清晰、荧光均匀的高分辨率光刻图案化。本研究建立的表面修饰策略及全面详实的光学、动力学与热稳定性验证,为量子点与光刻胶的界面相容性调控提供了新思路,为未来高精度量子点光刻的产线化应用奠定了坚实的材料基础。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容  
下载地址: [http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260169\(20260169为文章稿号\)](http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260169(20260169为文章稿号))。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 徐孟鑫,刘士浩,张乐天,等. 高色纯度有机发光器件研究进展[J]. 液晶与显示, 2023,38(4):432-447.  
XU M X, LIU S H, ZHANG L T, *et al.* Research progress in high color purity organic light emitting devices[J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023,38(4):432-447. (in Chinese)
- [ 2 ] 李恭明,蔡俊虎,赖文宗,等. 双短链配体调控提升MAPbBr<sub>3</sub>量子点性能及广色域LED显示应用[J]. 发光学报, 2025,46(1):1-11.  
LI G M, CAI J H, LAI W Z, *et al.* Performance enhancement of MAPbBr<sub>3</sub> perovskite quantum dot for wide color gamut LED via double short-chain ligand modifications[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025,46(1):1-11. (in Chinese)
- [ 3 ] 张泰玮,胡坤,李国彬,等. 超声法制备非金属及其化合物量子点研究进展[J]. 光电工程, 2024,51(4):230319-1-230319-16.  
ZHANG T W, HU K, LI G B, *et al.* Research progress in the quantum dots of nonmetals and their compounds prepared by ultrasonic method[J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2024,51(4):230319-1-230319-16. (in Chinese)
- [ 4 ] 李彦松,刘衡,赵泽邦,等. 量子点及其在显示领域研究进展[J]. 科技导报, 2025,43(2):62-89.  
LI Y S, LIU H, ZHAO Z B, *et al.* Quantum dots and their applications in the field of displays[J]. *Sci. Technol. Rev.*,

- 2025,43(2):62-89. (in Chinese)
- [ 5 ] 孙加振, 邝旻翔, 宋延林. 喷墨打印中“咖啡环”效应的调控及应用[J]. 化学进展, 2015,27(8):979-985.  
SUN J Z, KUANG M X, SONG Y L. Control and application of “coffee ring” effect in inkjet printing[J]. *Prog. Chem.*, 2015,27(8):979-985. (in Chinese)
- [ 6 ] 李文宇, 吴沂浙, 郑施冠卿, 等. 基于微转印的硅基光子异质集成技术研究进展[J]. 光通信研究, 2025(6): 250289.  
LI W Y, WU Y Z, ZHENG S G Q, *et al.* Research progress on silicon-based photonic heterogeneous integration technology based on micro-transfer printing[J]. *Opt. Commun. Res.*, 2025(6):250289. (in Chinese)
- [ 7 ] MYEONG S, CHON B, KUMAR S, *et al.* Quantum dot photolithography using a quantum dot photoresist composed of an organic - inorganic hybrid coating layer[J]. *Nanoscale adv.*, 2022,4(4):1080-1087.
- [ 8 ] 朱军, 刘景全, 张金姘, 等. 环氧基紫外负性光刻胶的特性, 应用工艺与展望[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(4):59-61.  
ZHU J, LIU J Q, ZHANG J Y, *et al.* Characteristics, application technology and prospect of epoxy-based UV negative photoresist[J]. *Polym. Mater. Sci. Eng.*, 2004,20(4):59-61. (in Chinese)
- [ 9 ] PANG L, TETZ K, SHEN Y, *et al.* Photosensitive quantum dot composites and their applications in optical structures [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005,23(6):2413-2418.
- [ 10 ] GAO Z, SHI J, YANG G. Quantum dots photoresist for direct photolithography patterning[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(27):2401106.
- [ 11 ] LI Z, LUE X, CHEN J, *et al.* Synthesis of visual fluorescence emission CdSe nanocrystals based on ligand regulation[J]. *Chin. J. Inorg. Chem.*, 2025,41(2):308-320.
- [ 12 ] WANG Y, LONG R, YANG Y, *et al.* Highly luminescent and uniform patterned quantum dot color converters via ligand engineering[J]. *Giant*, 2023,16:100202.
- [ 13 ] CHEN J, YUAN C, LIANG W, *et al.* Probing dynamics of lead (ii) sulfide quantum dots in solution ligand exchange by voltammetry[J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021,12(5):1567-1572.
- [ 14 ] LEE C, NAM E, LEE W, *et al.* Hydrosilylation of reactive quantum dots and siloxanes for stable quantum dot films[J]. *Polymers*, 2019,11(5):905.
- [ 15 ] ZHANG M, He P, ZHANG H, *et al.* Preparation and performance of a new silylated functional carbon quantum dots corrosion inhibitor[J]. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2023,676:132164.
- [ 16 ] DEVI S, KAUR R, PAUL A K, *et al.* MPA-capped CdSe QD/mercaptoethylamine-capped AuNP nanocomposite-based sensor for instant detection of trinitrotoluene[J]. *Colloid Polym. Sci.*, 2018, 296(3): 427-440.
- [ 17 ] SUSHMA M, KUMAR B J, MAHESH H M, *et al.* Controlled growth of MPA-capped ZnS quantum dots through concentration-modulated single injection hydrothermal method[J]. *J. Cryst. Growth*, 2024, 644: 127834.
- [ 18 ] 曹源, 马向东, 刘军库. 量子点的制备及分散性研究进展[J]. 材料科学, 2021,11(10):1089-1097.  
CAO Y, MA X D, LIU J K. Research progress on preparation and dispersion of quantum dots[J]. *Mater. Sci.*, 2021,11(10):1089-1097. (in Chinese)
- [ 19 ] KARAHAN O, AYDIN K, EDIZER S, *et al.* Development of reactive methacrylates based on glycidyl methacrylate[J]. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, 2010,48(17):3787-3796.
- [ 20 ] 陈新, 章国流, 杨明华. 甲基丙烯酸缩水甘油酯的开环反应研究[J]. 广州化工, 2016, 44(18):41-43.  
CHEN X, ZHANG G L, YANG M H. Study on ring-opening reaction of glycidyl methacrylate[J]. *Guangzhou Chem. Ind.*, 2016,44(18):41-43. (in Chinese)
- [ 21 ] SHIRAIISHI M, ISO Y, ISOBE T. Transparent nanocomposites comprising ligand-exchanged CuInS<sub>2</sub>/ZnS quantum dots and UV-Cured resin for wavelength converters[J]. *ACS omega*, 2022,7(37):33039-33045.
- [ 22 ] YANG Y, QIAN X, ZHANG L, *et al.* Enhanced imaging of glycan expressing cancer cells using poly (glycidyl methacrylate)-grafted silica nanospheres labeled with quantum dots[J]. *Anal. Chim. Acta*, 2020, 1095: 138-145.
- [ 23 ] YANG K P, SON S R, BAEK S H, *et al.* Fabrication of light emitting diodes using photo-patternable quantum dot-acrylate resins[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(47): 17084-17088.
- [ 24 ] BACH L G, ISLAM M R, LEE D C, *et al.* Poly (glycidyl methacrylate) grafted CdSe quantum dots by surface-initiated atom transfer radical polymerization: Novel synthesis, characterization, properties, and cytotoxicity studies[J]. *App. Surf.*

- Sci.*, 2013, 283: 546-553.
- [ 25 ] HE X, LENG C, PANG S, *et al.* Kinetics study of heterogeneous reactions of ozone with unsaturated fatty acid single droplets using micro-FTIR spectroscopy[J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(6):3204-3213.
- [ 26 ] LIU Q, HUANG A, WANG N, *et al.* Rapid fluorometric determination of perfluorooctanoic acid by its quenching effect on the fluorescence of quantum dots[J]. *J. Lumin.*, 2015, 161:374-381.
- [ 27 ] 严晶, 闫福安. GMA 改性水性光固化不饱和聚酯乳液的合成[J]. *涂料技术与文摘*, 2014, 35(3):7-13.  
YAN J, YAN F A. Synthesis of GMA-modified waterborne UV-curable unsaturated polyester emulsion[J]. *Paint Coat. Technol. Abstr.*, 2014, 35(3):7-13. (in Chinese)
- [ 28 ] 蒋博瑞, 宋博翔, 陈恩果等. 基于 N-苯基马来酰亚胺改性的量子点光刻胶制备色转换像素化薄膜[J]. *发光学报*, 2025, 46(03):536-544.  
JIANG B R, SONG B X, CHEN E G, *et al.* Quantum dot photoresists for pixelated color conversion films based on N-phenylmaleimide modification[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(03):536-544.



杨育霖(1996-),女,湖南凤凰人,硕士研究生,2025年于江苏大学获得硕士学位,主要从事量子点光刻胶的配方开发与性能优化的研究。

E-mail: yangyl@planckinnovation.com



金磊(1990-),女,内蒙古赤峰人,博士,副研究员,2019年于加拿大国立科学研究院(Institut national de la recherche scientifique, INRS)获得博士学位,主要从事半导体纳米晶的合成设计与光电转换器件的开发,致力于推动绿色能源技术与高效光电器件的创新。

E-mail: jinl@planckinnovation.com