

文章编号: 1000-7032(2025)03-0536-09

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

蒋博瑞¹, 宋博翔¹, 陈恩果^{2,3*}, 罗家俊^{1*}, 唐江^{1*}

(1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

3. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室), 福建 福州 350108)

摘要: 光刻法是一种制备微型发光二极管(Micro-LED)像素化色转换薄膜的可靠方案,但存在量子点与光刻胶兼容性的难题。本文开发了一种通过N-苯基马来酰亚胺(NPMI)侧链改性的丙烯酸树脂制备兼容量子点的光刻胶,侧链基团上C=O键能与量子点形成配位键从而钝化表面缺陷,并提高量子点分散性,使光刻胶溶液的量子产率(PLQY)达到76.1%(红色)和43.4%(绿色)。最终制备色转换薄膜时钝化效果仍然存在,绿色和红色的PLQY分别达到了66.4%和36.4%,像素化图形最小尺寸可实现10 μm×10 μm的矩形阵列。本研究中的树脂侧链改性方法为开发兼容量子点的光刻胶提供了指导,为Micro-LED全彩化的商业化应用提供了一种简便且可行的解决方案。

关键词: 量子点光刻胶; 色转换; 树脂改性; 像素化

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240317 CSTR: 32170.14.CJL.20240317

Quantum Dot Photoresists for Pixelated Color Conversion Films Based on N-Phenylmaleimide Modification

JIANG Borui¹, SONG Boxiang¹, CHEN Enguo^{2,3*}, LUO Jiajun^{1*}, TANG Jiang^{1*}

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics(WNLO), Huazhong University of Science and Technology (HUST),

Wuhan 430074, China;

2. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China (Mindu Innovation Laboratory),

Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Authors, E-mail: ceg@fzu.edu.cn; luojiajun@hust.edu.cn; tang@mail.hust.edu.cn

Abstract: Photolithography is a reliable method for fabricating pixelated color conversion films in Micro-LEDs, but it faces challenges related to the compatibility of quantum dots (QDs) with photoresists. This paper develops a quantum dot-compatible photoresist by modifying acrylic resin with N-phenylmaleimide (NPMI) side chains. The C=O bonds on the side chain groups form coordination bonds with quantum dots, passivating surface defects and improving the dispersion of quantum dots. This enhances the photoluminescence quantum yield (PLQY) of the photoresist solution, reaching 76.1% for red and 43.4% for green. Even after fabricating the color conversion films, the passivation effect persists, with PLQY values of 66.4% for green and 36.4% for red. The minimum pixel size achieved was a rectangular array of 10 μm × 10 μm. The resin side chain modification approach in this study provides guidance for developing QD-compatible photoresists and offers a simple and viable solution for the commercialization of full-color Micro-LED applications.

Key words: quantum dot photoresist; color conversion; resin modification; pixelation

收稿日期: 2024-12-04; 修订日期: 2024-12-26

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFB3501800); 国家自然科学基金(62322505, 62374069, 62175032); 福建省杰出青年基金项目(2024J010046); 武汉光电国家研究中心开放课题(2023WNLOKF011)
Supported by National Key R&D Program of China(2021YFB3501800); National Natural Science Foundation of China(62322505, 62374069, 62175032); Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Fujian Province(2024J01512955); Open Project Program of Wuhan National Laboratory of Optoelectronics(2023WNLOKF011)

1 引言

微型发光二极管(Micro-LED)作为新兴显示技术,与液晶显示屏(LCD)和有机发光二极管(OLED)等传统显示技术相比,具有诸多优势:低能耗、高亮度、高寿命、超高分辨率、响应速度极快等^[1-6]。Micro-LED未来应用领域广泛,包括高端电视、手机、头戴式显示器和可穿戴智能设备等^[7-13]。然而, Micro-LED也面临许多挑战,其中巨量转移技术实现困难就是关键问题之一^[14-15]。巨量转移技术是通过将红绿蓝三色LED芯片以设计的阵列排布在晶圆上,放置精度小于1 μm ,从而达到全彩化的效果^[16]。而且,运用色转换技术即在阵列化的蓝光LED芯片上涂覆一层发光介质,将蓝光转换为红光或者绿光,能直接实现全彩化从而规避巨量转移技术难题^[17-19]。

目前,主流色转换材料包括荧光粉和量子点^[20-25]。其中荧光粉由于其发光半峰宽较宽,且粒径尺度在微米级,不适合用于高精细图案的色转换方案^[26]。而CdSe量子点具有高光致发光量子产率、高色纯度、粒径在纳米尺度、高稳定性等优势,是用于Micro-LED色转换方案最有潜力的材料之一^[27-30]。目前提出能制作Micro-LED高分辨率的量子点阵列的图案化方案包括喷墨打印^[31]、光刻^[32]、微流控沉积^[33]和丝网印刷^[34]等,其中光刻技术是最常见的微结构加工手段,将量子点与负性光刻胶混合后按照常规光刻工艺即可得到图案化薄膜,具有像素化精度最高和光刻胶固化后形成保护层从而提高量子点稳定性的优势^[35-36]。但直接光刻也存在两个难题,一是量子点天然配体与光刻胶兼容性不佳导致无法分散^[37],二是光刻过程中自由基释放导致量子点荧光猝灭^[38]。

本文提出了一种适用于量子点光刻的丙烯酸树脂体系的负性光刻胶,通过在侧链引入N-苯基马来酰亚胺官能团,官能团的碳氧双键中氧上孤对电子与CdSe量子点表面形成配位键,既能钝化CdSe量子点表面配体交换带来的缺陷,又能减少光刻胶中酸性环境造成的配体脱落,以改善光刻胶与量子点的兼容性,从而将量子点光刻胶的PLQY提升至76.1%(红色)和43.4%(绿色)。同时,碳碳双键能够与光刻过程中产生的过量自由基反应,一方面促进交联结构的形成,从而增强材料的网络强度;另一方面通过消耗自由基,有效避免了自由基对量子点的损伤,从而保护了量子点

的光学性能。最终通过优化光刻工艺制备出边长为10 μm 的精细矩形阵列图案,色转换薄膜PLQY达66.4%(红色)和36.4%(绿色)。

2 实验

2.1 实验材料

石英玻璃(辽宁优选新能源有限公司);丙烯酸树脂B10202(未改性)、B11010(NPMI改性)(常州强力电子新材料股份有限公司);季戊四醇四丙烯酸酯、1-[9-乙基-6-(2-甲基苯甲酰基)-9H-吡唑-3-基]乙酮1-(O-乙酰肟)、25% TMAH水溶液(AR,上海麦克林生化科技有限公司);巯基丙酸、丙二醇甲醚、丙二醇甲醚醋酸酯、二甲苯、乙酸丁酯、正辛烷(AR,阿拉丁生化科技股份有限公司);油性CdSe量子点(厦门玻尔科技有限公司)。

2.2 量子点光刻胶制备

首先进行油性CdSe量子点表面改性,取0.2 g CdSe量子点溶于15 mL二甲苯溶剂中,再加入2 mL巯基丙酸,在氮气保护下100 $^{\circ}\text{C}$ 搅拌反应5 h,反应完成后将溶液离心,倒去上层清液,加入4 mL正辛烷和3 mL乙酸丁酯洗涤沉淀,最终将洗涤后沉淀放入70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥备用。

其次配置光刻胶,取1.08 g丙烯酸树脂B10202(B11010)、0.31 g季戊四醇四丙烯酸酯、0.48 g 1-[9-乙基-6-(2-甲基苯甲酰基)-9H-吡唑-3-基]乙酮1-(O-乙酰肟)、1.6 mL丙二醇甲醚醋酸酯、1.2 mL丙二醇甲醚在黄光间混合后计时搅拌4 h;改变丙烯酸树脂类型而保持光刻胶原料配比不变,即可得到两种不同树脂类型光刻胶。

最终配置量子点光刻胶,取80 mg改性后的量子点与1 g光刻胶混合,在120 W功率下超声和1 500 r/min转速下混匀仪搅拌各20 min直至量子点在光刻胶中分散均匀。

2.3 图案化薄膜制备

将石英玻璃依次放入玻璃清洗剂、去离子水、乙醇、异丙醇内各120 W功率下超声20 min,取出后用氮气吹干,将玻璃表面滴满量子点光刻胶,在1 000 rad/s 30 s旋涂条件下旋涂得到均匀薄膜,将薄膜放在95 $^{\circ}\text{C}$ 热台前烘2 min;之后用MA8 BA8紫外曝光机(光源功率23.1 mW/s)曝光3 s;最后依次在0.05%TMAH水溶液显影50 s,丙二醇甲醚显影20 s,去离子水冲洗10 s,用氮气吹干得到图案化薄膜。实验流程如图1所示。

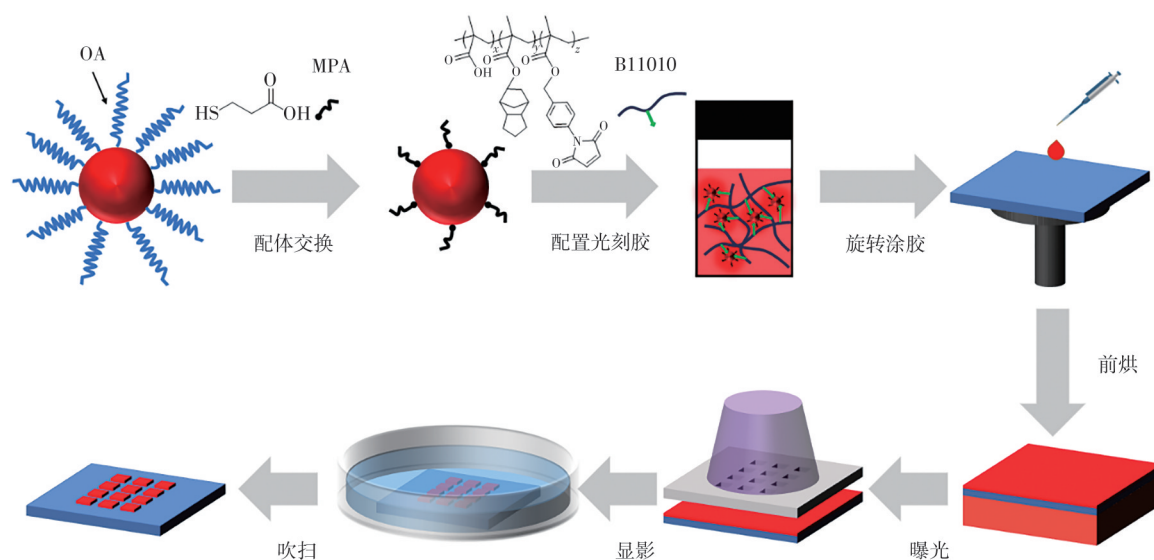


图1 实验流程示意图

Fig.1 Flow diagram of experiment

2.4 表征方法

采用美国 Thermo Scientific 公司 Nicolet iS50R 傅里叶变换红外光谱仪测定红外光谱 (FTIR); 采用日立公司 F-7000 荧光光谱仪 (Hitachi F-7000) 测定荧光发射光谱 (PL); 使用来自 Labsphere 的经过校准的积分球的 Zolix OmniFluo 分光荧光计来测定绝对量子产率 (PLQY); 利用爱丁堡仪器有限公司的 EPL370 测定荧光寿命 (TRPL); 采用日本岛津-Kratos 公司的 AXIS-ULTRA DLD-600W X 射线光电能谱仪测定 X 射线光电能谱 (XPS); 通过德国卡尔蔡司公司 GeminiSEM300 场发射扫描电子显微镜扫描电镜图片 (SEM)。在 450 nm 激发光下进行了 PL、PLQY、TRPL 测试。将 0.08 g

量子点溶解在 0.6 mL 混合溶剂 (丙二醇甲醚和丙二醇甲醚醋酸酯体积比为 3:4) 中作为“纯混合溶剂”对照组, 与未改性量子点光刻胶和 NPMI 改性量子点光刻胶在溶液态下进行 PL、PLQY、TRPL 测试; 之后将未改性量子点光刻胶和 NPMI 改性量子点光刻胶旋涂薄膜进行 PLQY、TRPL、SEM 测试。

3 结果与讨论

为了探究 N-苯基马来酰亚胺 (NPMI) 侧链基团与 CdSe 量子点的作用机理, 分别对纯改性树脂和掺入 CdSe 量子点树脂进行 FTIR 表征, 如图 2(a) 所示。可以看出, N-苯基马来酰亚胺侧链基团中位于 1599 cm^{-1} 的 $\text{C}=\text{C}$ 振动吸收峰和位于 1382 cm^{-1}

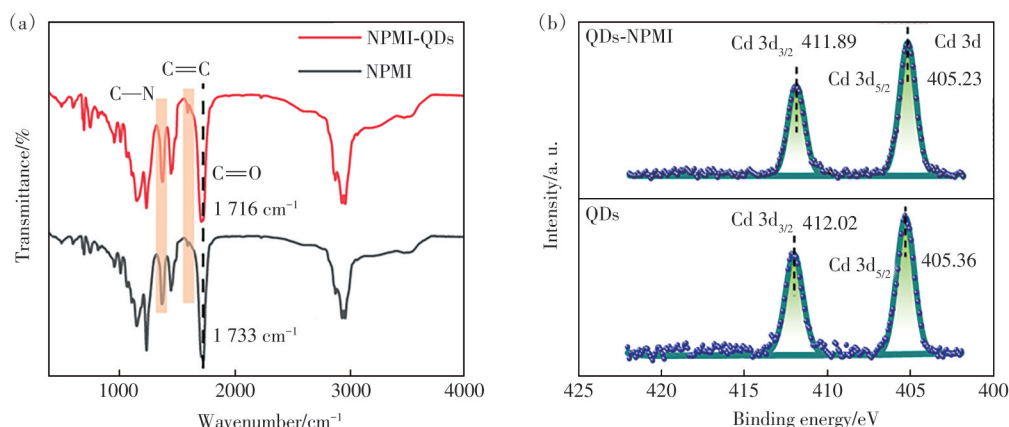


图2 (a)改性树脂和掺入量子点树脂的FTIR谱图;(b)纯量子点和掺入改性树脂量子点的XPS谱图

Fig.2 (a) FTIR spectra of modified resin and QD-incorporated resin. (b) XPS spectra of pure QDs and QDs embedded in modified resin

的C—N振动吸收峰的波数基本没有变化,而掺入量子点使位于 1733 cm^{-1} 的C=O拉伸振动吸收峰移动到 1716 cm^{-1} [39]。这说明CdSe量子点的掺入使Cd与O上的孤对电子形成配位,从而削弱了C=O键能导致向低波数移动[40]。图2(b)是未加入和加入改性树脂的CdSe量子点的XPS谱图,结果显示,在加入树脂后Cd的 $3d_{3/2}$ 和 $3d_{5/2}$ 均向低结合能方向移动 0.13 eV ,表明 Cd^{2+} 周围电子云密度增加。 Cd^{2+} 获得的电子来自于树脂中N-苯基马来酰亚胺中C=O键上的氧的孤对电子,进一步证明 Cd^{2+} 与C=O之间形成了Cd—O—C的配位键,降低了 Cd^{2+} 的缺陷电荷密度[41]。

进一步研究光刻胶对量子点光学性质的影响,分别用纯混合溶剂、未改性光刻胶和NPMI改性光刻胶混合改性后的红色和绿色量子点进行表征。

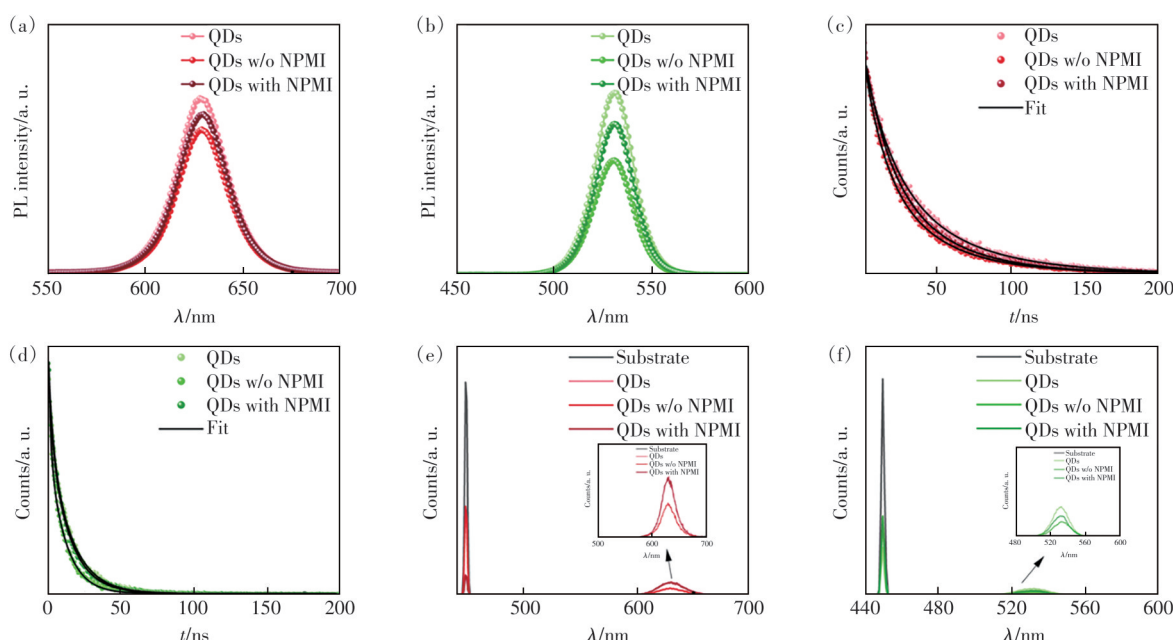


图3 量子点掺入纯混合溶剂、未改性光刻胶和NPMI改性光刻胶的红色(a)和绿色(b)PL谱图;红色(c)和绿色(d)TRPL谱图;红色(e)和绿色(f)PLQY谱图

Fig.3 PL spectra of quantum dots incorporated into pure mixed solvent, unmodified photoresist, and NPMI-modified photoresist for red(a) and green(b) quantum dots. TRPL spectra for red(c) and green(d) quantum dots. PLQY spectra for red(e) and green(f) quantum dots

可以看出,基于未改性树脂配置的光刻胶中红色和绿色量子点的平均寿命为 37.38 ns 和 11.71 ns ,而改性树脂中量子点平均寿命增加至 39.82 ns (红色)和 14.25 ns (绿色),结果也验证了N-苯基马来酰亚胺对量子点表面的钝化效果,缺陷更少寿命更长。图3(e)、(f)是三组样品的红色和绿色PLQY测试结果,可以通过公式(3)计

算出 η_{PLQY} :
图3(a)、(b)是三组样品的红色和绿色荧光发射光谱,可以看出加入光刻胶后溶液的光致发光强度都有所下降。因为光刻胶中的酸性环境会影响量子点表面配体,使部分配体发生脱落从而造成量子点表面缺陷增多[42]。而NPMI基团中的C=O键与Cd形成的配位键具有钝化作用,减少量子点缺陷的生成,使光致发光强度相对于未改性树脂有所增强。图3(c)、(d)是三组样品的红色和绿色时间分辨光致发光光谱及拟合曲线,可以通过公式(1)进行双指数衰减函数拟合和公式(2)计算平均复合寿命(τ_{avg}):

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

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

其中 A_1 和 A_2 为权重, τ_1 和 τ_2 为时间常数,拟合结果总结在表1中。

算出 η_{PLQY} :

$$\eta_{\text{PLQY}} = \frac{\int_{\text{QD-band}} \left(\frac{\lambda}{hc}\right) \times [I_{\text{em}}^{\text{QD}}(\lambda) - I_{\text{em}}^{\text{ref}}(\lambda)] d\lambda}{\int_{\text{Blue-band}} \left(\frac{\lambda}{hc}\right) \times [I_{\text{ex}}^{\text{QD}}(\lambda) - I_{\text{ex}}^{\text{ref}}(\lambda)] d\lambda}, \quad (3)$$

其中 $I_{\text{em}}^{\text{QD}}(\lambda)$ 是量子点样品的发射荧光强度, $I_{\text{em}}^{\text{ref}}(\lambda)$ 是空白背景的发射荧光强度, $I_{\text{ex}}^{\text{QD}}(\lambda)$ 为量子点样品被蓝光激发时的荧光强度, $I_{\text{ex}}^{\text{ref}}(\lambda)$ 为空白背景

表 1 红色和绿色量子点分别掺入纯混合溶剂、未改性光刻胶和 NPMI 改性光刻胶的 PL 谱图数据、TRPL 和 PLQY 拟合结果

Tab. 1 PL spectra data, TRPL and PLQY fitting results of red and green quantum dots (QDs) incorporated into pure mixed solvent, unmodified photoresist, and NPMI-modified photoresist

	Sample	PL peak/nm	FWHM/nm	τ_1 /ns	A_1 /%	τ_2 /ns	A_2 /%	τ_{avg} /ns	PLQY/%
Red QDs	—	629	31	21.97	58.0	57.32	42.0	45.09	77.1
	w/o NPMI	629	31	18.19	64.4	49.99	35.6	37.38	67.4
	with NPMI	629	31	21.71	69.4	55.78	30.6	39.82	76.1
Green QDs	—	531	23	7.36	57.2	18.99	42.8	15.02	48.5
	w/o NPMI	530	23	4.84	58.1	14.82	41.9	11.71	34.2
	with NPMI	531	23	6.61	57.6	18.05	42.4	14.25	43.4

下蓝光激发时的荧光强度,计算结果总结在表 1 中。从结果可以看出,未加入光刻胶前红色和绿色 PLQY 值分别为 77.1% 和 48.5%;加入普通树脂光刻胶后,红色 PLQY 下降至 67.4%,绿色 PLQY 下降至 34.2%;而改性树脂光刻胶中量子点分散性更好且具有一定钝化效果,使红色和绿色 PLQY 维持在 76.1% 和 43.4%。

进一步研究树脂侧链改性后对色转换薄膜的影响,对普通树脂量子点光刻胶和改性树脂量子点光刻胶制备的薄膜进行表征。

图 4(a)~(d) 分别是荧光显微镜下未改性和改性的厚度为 3 μm 、尺寸在 10 μm ×10 μm 、间距为 10 μm 的矩形阵列图案。可以看出未改性光刻

图案精度不够导致图案向外扩散,且会造成量子点的局部团聚。而改性后光刻图案尺寸与掩膜版上尺寸基本一致,同时量子点分布均匀,说明 N-苯基马来酰亚胺侧链基团中含有的 C=C 键能增强树脂交联性,提高曝光精度,且含有的 C=O 键与量子点配位后能提高其分散性。图 4(e)、(f) 是 NPMI 改性量子点光刻胶的光刻阵列图案的 SEM 图像,从俯视图可以观察到图像中各图案的分布均匀,表面结构表现出高度一致性,且图案内部的对比度变化小,体现出均匀的特征;从 35° 视图可以观察到图案的高度分布一致,表面平整度良好,未见显著的高度差异,表明微观结构的上表面具有较好的平整性。

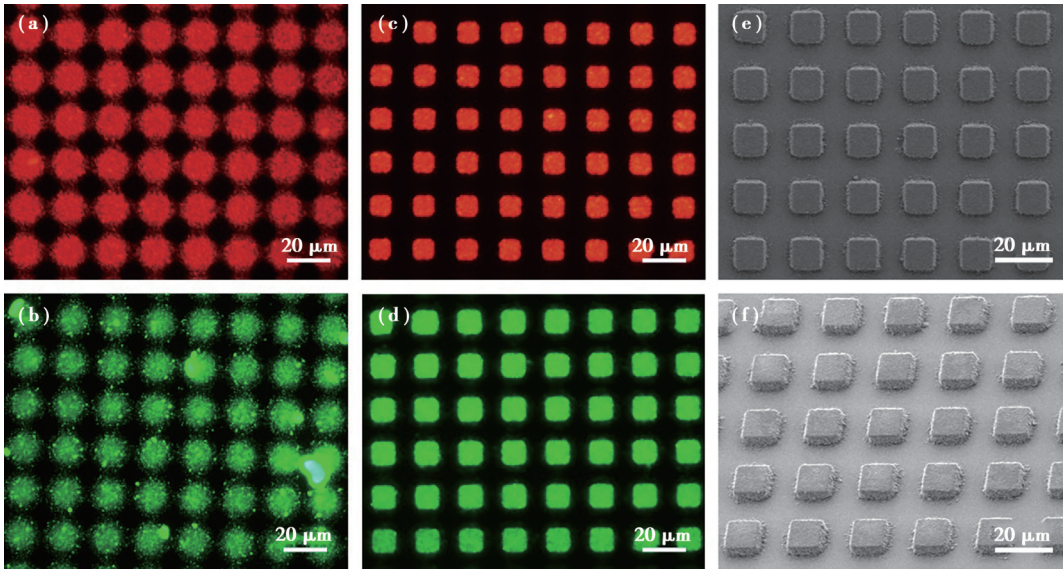


图 4 未改性量子点光刻胶的红色(a)和绿色(b)光刻矩形阵列图案;NPMI改性量子点光刻胶的红色(c)和绿色(d)光刻矩形阵列图案;NPMI改性量子点光刻胶的俯视图(e)和 35° 视图(f)的光刻阵列 SEM 图像

Fig.4 Photolithographic rectangular array patterns of red(a) and green(b) quantum dots in unmodified quantum dot photoresist. Photolithographic rectangular array patterns of red(c) and green(d) quantum dots in NPMI-modified quantum dot photoresist. SEM images of the lithographic arrays of NPMI-modified quantum dot photoresist top view (e) and 35° angled view (f)

图 5(a)、(b)是两种薄膜的 PLQY 测试结果, 其拟合结果总结在表 2 中。可以看出相较于溶液的 PLQY, 薄膜的 PLQY 还会出现一定的下降, 说明光刻过程中光引发剂释放的自由基会破坏量子点的表面^[43]。然而, 改性后基团含有的碳碳双键能消耗产生的过多自由基, 并且碳氧双键与量子点表面形成配位键起到钝化作用, 大幅度减少自由基的破坏效果, 使红色和绿色 PLQY 仍

能维持在 66.4% 和 36.4%。当没有改性基团时, 自由基破坏效果显著, 绿色和红色薄膜的 PLQY 下降至 50.5% 和 23.8%。图 5(c)、(d)是红色和绿色色转换薄膜的时间分辨光致发光光谱, 其拟合结果总结在表 2 中。改性基团对平均寿命的影响和 PLQY 类似, 改性薄膜的平均寿命都比未改性的长, 进一步说明改性后增强了对量子点的保护效果。

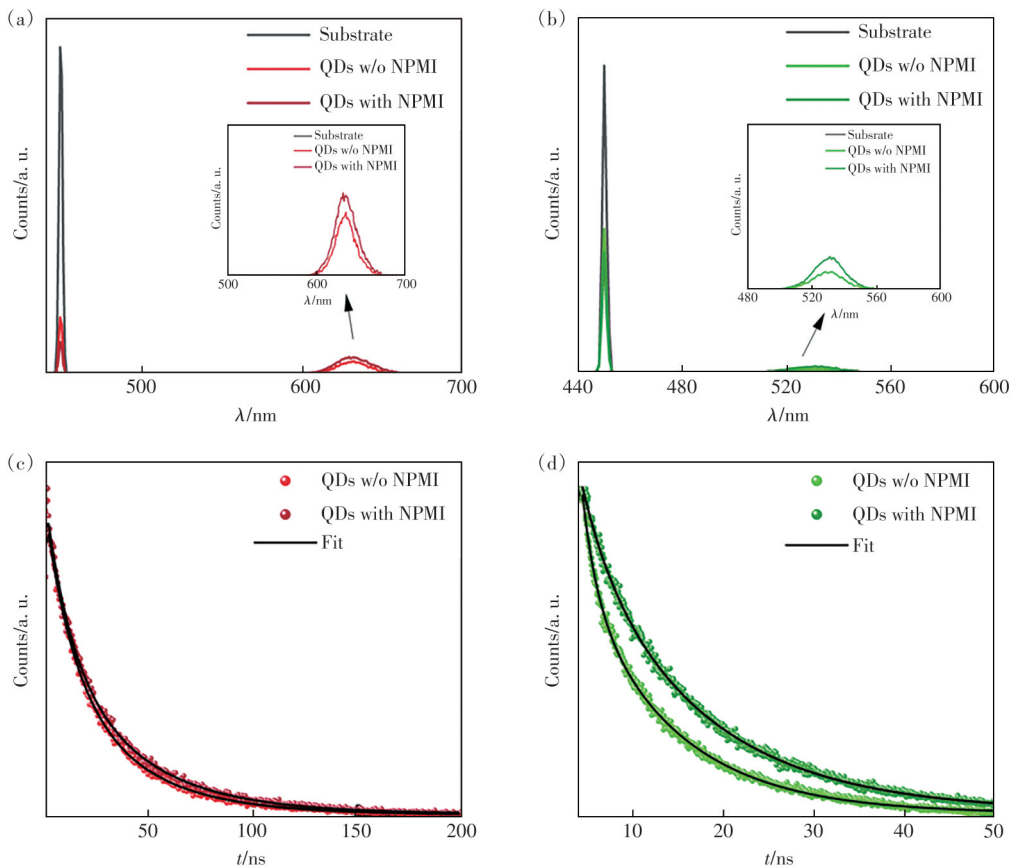


图 5 未改性和 NPPI 改性后色转换薄膜的红色 (a) 和绿色 (b) PLQY 谱图; 红色 (c) 和绿色 (d) TRPL 谱图
Fig.5 PLQY spectra of color conversion films for red (a) and green (b) quantum dots in unmodified and NPPI-modified films. TRPL spectra of red (c) and green (d) quantum dots in unmodified and NPPI-modified films

表 2 红色和绿色量子点未改性和 NPPI 改性后色转换薄膜的 TRPL 和 PLQY 拟合结果

Tab. 2 Fitting results of TRPL and PLQY for red and green quantum dot color conversion films before and after NPPI modification							
	Sample	τ_1/ns	$A_1/\%$	τ_2/ns	$A_2/\%$	$\tau_{\text{avg}}/\text{ns}$	PLQY/%
Red QDs	w/o NPPI	16.12	64.0	44.03	36.0	33.02	50.5
	with NPPI	19.18	67.3	53.17	32.7	38.68	66.4
Green QDs	w/o NPPI	1.73	78.9	10.41	21.1	7.08	23.8
	with NPPI	2.55	54.6	12.63	45.4	10.66	36.4

图 6(a)、(b)是在 365 nm 紫外光下华中科技大学的红绿光刻图案。通过优化光刻胶组分和光刻工艺, 能在 2 cm² 区域光刻出清晰且均匀

图案, 避免了传统工艺中容易出现的图案边缘模糊或均匀性下降的问题。本研究采用的光刻技术不仅能够制作高精度的微米图案, 还可以在大面积基底上实现均匀一致的图案, 展示了在大规模生产中实现高质量色转换图案的潜力。

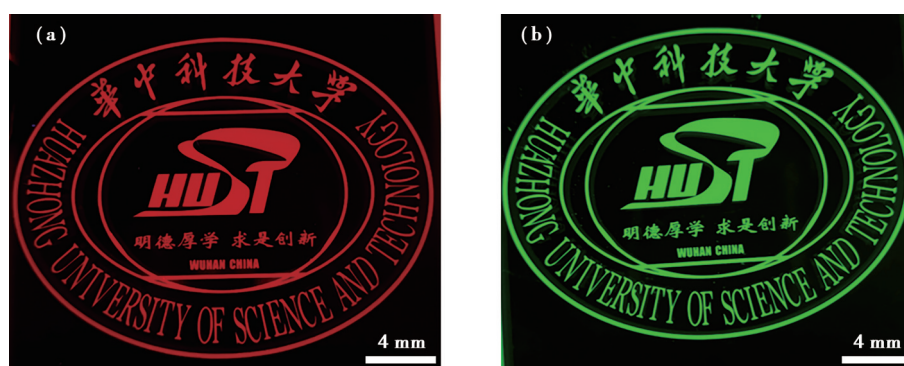


图 6 365 nm 激发光照射下的光刻图案:(a)红色;(b)绿色

Fig.6 The lithography pattern under 365 nm excitation light shows red(a) and green(b) fluorescence

4 结 论

本文开发了一种 N-苯基马来酰亚胺侧链改性的丙烯酸树脂配置能与量子点兼容的光刻胶,通过直接光刻工艺制备了精细图案化色转换薄膜。N-苯基马来酰亚胺中 C=O 键能与 Cd 形成配位键,钝化量子点表面缺陷,并增加量子点在光刻胶中的分散性,使光刻胶溶液 PLQY 达到 76.1%(红色)和 43.4%(绿色)。在制备色转换薄膜时,配位键钝化效果仍然存在,且 N-苯基马来酰亚胺中含有的 C=C 键可减

少光刻过程中自由基对量子点的破坏和增加曝光精度。最终色转换薄膜红色和绿色 PLQY 达到 66.4% 和 36.4%,像素化图形最小尺寸能做到 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的矩形阵列。该树脂侧链改性的方法可以为开发兼容量子点的光刻胶提供指导,为 Micro-LED 全彩化提供一种简单可行的商业化途径。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240317>

参 考 文 献:

- [1] LEE T Y, CHEN L Y, LO Y Y, *et al.* Technology and applications of Micro-LEDs: their characteristics, fabrication, advancement, and challenges [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(9): 2905-2930.
- [2] CHEN Z, YAN S K, DANESH C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, 54(12): 123001.
- [3] JIANG H X, LIN J Y. Nitride Micro-LEDs and beyond-a decade progress review [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(S3): A475-A484.
- [4] CAI J H, LAI W Z, CHEN Y, *et al.* Pushing patterning limits of drop-on-demand inkjet printing with CsPbBr₃/PDMS nanoparticles [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(10): 2400298.
- [5] CHEN E G, LIN J Y, YANG T, *et al.* Asymmetric quantum-dot pixelation for color-converted white balance [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 2158-2165.
- [6] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 105.
- [7] YAN Y G, XIAO Y Z, CAI J H, *et al.* Quantum-dot color wheel for projection displays [J]. *Optica*, 2023, 10(11): 1559-1566.
- [8] CHEN Z, LI Y, MAN Z W, *et al.* Research progress of quantum dot photolithography patterning and direct photolithography application [J]. *Nano Res.*, 2024, 17(12): 10386-10411.
- [9] ZHANG L, OU F, CHONG W C, *et al.* Wafer-scale monolithic hybrid integration of Si-based IC and III-V epi-layers: A mass manufacturable approach for active matrix micro-LED micro-displays [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2018, 26(3): 137-145.
- [10] CHEN D B, CHEN Y C, ZENG G, *et al.* Integration technology of Micro-LED for next-generation display [J]. *Research*, 2023, 6: 0047.
- [11] KANG I B, HAN C W, JEONG J K. *Advanced Display Technology* [M]. Singapore: Springer, 2021.

- [12] ZHANG S H, ZHENG H, ZHOU L, *et al.* Research progress of Micro-LED display technology [J]. *Crystals*, 2023, 13(7): 1001.
- [13] JAMES SINGH K, HUANG Y M, AHMED T, *et al.* Micro-LED as a promising candidate for high-speed visible light communication [J]. *Appl. Sci.*, 2020, 10(20): 7384.
- [14] ZHU G Q, LIU Y J, MING R, *et al.* Mass transfer, detection and repair technologies in Micro-LED displays [J]. *Sci. China Mater.*, 2022, 65(8): 2128-2153.
- [15] FU Y F, SUN J, DU Z F, *et al.* Monolithic integrated device of GaN Micro-LED with graphene transparent electrode and graphene active-matrix driving transistor [J]. *Materials*, 2019, 12(3): 428.
- [16] ANWAR A R, SAJJAD M T, JOHAR M A, *et al.* Recent progress in Micro-LED-based display technologies [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16(6): 2100427.
- [17] KIM W H, JANG Y J, KIM J Y, *et al.* High-performance color-converted full-color Micro-LED arrays [J]. *Appl. Sci.*, 2020, 10(6): 2112.
- [18] HUANG Y M, CHEN J H, LIOU Y H, *et al.* High-uniform and high-efficient color conversion nanoporous GaN-based Micro-LED display with embedded quantum dots [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2696.
- [19] 陈晓钢, 赵梦云, 蔡俊虎, 等. 基于量子点@有序介孔复合材料的 Micro-LED 色转换特性 [J]. *发光学报*, 2024, 45(1): 59-68.
- CHEN X G, ZHAO M Y, CAI J H, *et al.* Color conversion characteristics of Micro-LED based on quantum dot@ordered mesoporous composite materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(1): 59-68. (in Chinese)
- [20] LIU Z J, LIN C H, HYUN B R, *et al.* Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 83.
- [21] GOU F W, HSIANG E L, TAN G J, *et al.* Tripling the optical efficiency of color-converted Micro-LED displays with funnel-tube array [J]. *Crystals*, 2019, 9(1): 39.
- [22] LI G J, TSENG M C, CHEN Y, *et al.* Color-conversion displays: current status and future outlook [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 301.
- [23] GAURAV A, CHEN C S, TSAI C Y, *et al.* Stable colour conversion layer with enhanced conversion efficiency by incorporating nanoparticles for micro-LED display application [J]. *Mater. Today Chem.*, 2024, 39: 102184.
- [24] WANG Y H, LUO Y S, KONG X M, *et al.* Patterning technologies of quantum dots for color-conversion micro-LED display applications [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(4): 1764-1789.
- [25] HUANG Y M, SINGH K J, LIU A C, *et al.* Advances in quantum-dot-based displays [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1327.
- [26] MA T, CHEN J, CHEN Z Y, *et al.* Progress in color conversion technology for Micro-LED [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(1): 2200632.
- [27] CHANG S, BAI Z L, ZHONG H Z. *In situ* fabricated perovskite nanocrystals: a revolution in optical materials [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(18): 1800380.
- [28] YANG Z W, GAO M Y, WU W J, *et al.* Recent advances in quantum dot-based light-emitting devices: challenges and possible solutions [J]. *Mater. Today*, 2019, 24: 69-93.
- [29] JEONG B, HAN H, PARK C. Micro-and nanopatterning of halide perovskites where crystal engineering for emerging photoelectronics meets integrated device array technology [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(30): 2000597.
- [30] WANG K Y, XING G C, SONG Q H, *et al.* Micro-and nanostructured lead halide perovskites: from materials to integrations and devices [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(6): 2000306.
- [31] MATHIES F, LIST-KRATOCHVIL E J W, UNGER E L. Advances in inkjet-printed metal halide perovskite photovoltaic and optoelectronic devices [J]. *Energy Technol.*, 2020, 8(4): 1900991.
- [32] JEON S, LEE S Y, KIM S K, *et al.* All-solution processed multicolor patterning technique of perovskite nanocrystal for color pixel array and flexible optoelectronic devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(17): 2000501.
- [33] WENG Y L, LAI X C, CHEN G X, *et al.* Aspiration-assisted fabrication of patterned quantum dot films for photo-emissive color conversion [J]. *J. Mater. Sci.*, 2021, 56(2): 1504-1514.
- [34] HUANG B L, CHEN E G, SUN L, *et al.* Quantum-dot color conversion film patterned by screen printing and overprinting process for display backlights [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 145: 107486.

- [35] PARK S Y, LEE S, YANG J, *et al.* Patterning quantum dots *via* photolithography: a review [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(41): 2300546.
- [36] LIANG L M, MA T, CHEN Z Y, *et al.* Patterning technologies for metal halide perovskites: a review [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(3): 2200419.
- [37] HAHM D, PARK J, JEONG I, *et al.* Surface engineered colloidal quantum dots for complete green process [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(9): 10563-10570.
- [38] 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.
- [39] ZHAO X H, TIAN P, DENG J G, *et al.* Synthesis and characterization of vinyl acetate/N-phenylmaleimide copolymers and the corresponding polyvinyl alcohol/N-phenylmaleimide with color cycle change property [J]. *Colloid Polym. Sci.*, 2022, 300(1): 11-20.
- [40] MORGAN D P, KELLEY D F. Mechanism of hole trap passivation in CdSe quantum dots by alkylamines [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2018, 122(44): 25661-25667.
- [41] GU H J, ZHANG H H, WANG X L, *et al.* Robust construction of CdSe nanorods@Ti₃C₂ MXene nanosheet for superior photocatalytic H₂ evolution [J]. *Appl. Catal. B: Environ.*, 2023, 328: 122537.
- [42] GUO W S, CHEN J, MA T, *et al.* Direct photolithography patterning of quantum dot-polymer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(10): 2310338.
- [43] WANG Y K, LONG R, YANG Y, *et al.* Highly luminescent and uniform patterned quantum dot color converters *via* ligand engineering [J]. *Giant*, 2023, 16: 100202.



蒋博瑞(2001–),男,广西桂林人,硕士研究生,2023年于华中科技大学获得学士学位,主要从事光刻技术制备图案化量子点色转换层的研究。
E-mail: m202373384@hust.edu.cn



罗家俊(1993–),男,湖北武汉人,博士,教授,2020年于华中科技大学获得博士学位,主要从事新型发光材料与显示技术的研究。
E-mail: luojiajun@hust.edu.cn



陈恩果(1984–),男,福建福州人,博士,教授,2013年于浙江大学获得博士学位,主要从事微纳显示光学设计的研究。
E-mail: ceg@fzu.edu.cn



唐江(1981–),男,湖南浏阳人,博士,教授,2010年于多伦多大学获得博士学位,主要从事量子点红外探测芯片、卤素钙钛矿X射线探测器和卤素钙钛矿发光材料与器件的研究。
E-mail: jtang@mail.hust.edu.cn