

两种烷基取代喹吖啶酮衍生物 LB 膜的荧光特性

高学喜¹ 王文军^{1*} 刘云龙¹ 徐建华²

¹ 聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059
² 华东师范大学物理系精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 制备了两种烷基取代喹吖啶酮衍生物 C6DHQA 和 C16DMQA 的 X 型 Langmuir-Blodgett(LB)膜,采用紫外-可见吸收、稳态荧光和时间分辨荧光的方法研究其溶液及 LB 的光学特性。研究结果表明,C16DMQA 比 C6DHQA 的吸收谱整体红移,说明烷基链加长减小了分子的能级间隔;两者 LB 膜的吸收谱较溶液整体红移,说明在 LB 膜中形成了“J-聚集体”。两种材料的溶液及 LB 膜都有较强的荧光发射,溶液的荧光谱与吸收谱有很好的镜像对称关系,形成 LB 膜后,镜像对称关系被打破,两者第三个荧光峰相对强度差别很大。C6DHQA 溶液中的荧光寿命为 21 ns 左右,C16DMQA 溶液中的荧光寿命为 22 ns 左右,形成 LB 膜后,荧光寿命明显较少,两者第三个荧光峰对应的荧光寿命差别较大。其原因应归于 C16DMQA 分子在基板上的排列更密,分子间的相互作用力强,从而对能级结构的影响更大。

关键词 材料;LB 膜;喹吖啶酮;荧光光谱;荧光寿命

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0731002

Fluorescence Spectra of Two Kinds of Alkyl Substitution Quinacridone Derivative Langmuir-Blodgett Films

Gao Xuexi¹ Wang Wenjun¹ Liu Yunlong¹ Xu Jianhua²

¹ School of Physical Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China
² State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract Two kinds of alkyl substitution quinacridone derivative C6DHQA and C16DMQA X-type Langmuir-Blodgett (LB) films are prepared. The optical characteristics are studied by UV-visual spectrum, steady state and time resolved fluorescence. The experimental results show that the absorption spectrum of the C16DMQA has a whole red shift compared with C6DHQA's. It shows that the energy level is lower with the added alkyl chain. The absorption spectrum of their LB films has a whole red shift compared with their solution. It shows that the two kinds molecule formed J-aggregation in LB films. The two kinds of material in chloroform solution and LB films both have strong fluorescence emission. The absorption spectrum and the fluorescence spectrum of the two kinds of material solution have mirror symmetry. But their LB films' are asymmetrical. The third peak relative intensity of C6DHQA and C16DMQA LB films has a larger difference. The fluorescence lifetime at three fluorescence emission peaks of C6DHQA solution is about 21 ns and C16DMQA's is about 22 ns. It is obviously reduced as in LB films. And it is obviously different at the third peaks of C6DHQA compared with C16DMQA. All these differences are due to closer-arrangement of C16DMQA molecule on the substrate, the intermolecular interactions stronger and has a bigger influence on its energy level structure than C6DHQA molecule.

Key words materials; Langmuir-Blodgett films; quinacridone; fluorescence spectrum; fluorescence lifetime

OCIS codes 310.6860; 310.6188; 140.3025; 300.6280

收稿日期: 2012-02-07; 收到修改稿日期: 2012-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(10874063)、山东省科技攻关计划项目(2010GGX10127)和山东省教育厅科技发展计划(J10LA60)资助课题。

作者简介: 高学喜(1971—),女,硕士,副教授,主要从事有机化合物的光学特性方面的研究。E-mail: xuexigao@126.com

* 通信联系人。E-mail: phywwang@163.com

1 引 言

喹啉并[2,3-b]-吡啶-5,12-二氢-7,14-二酮(5,12-Dihydro-quono[2,3-b]acridone-7,14-dione), 通常称为喹吡啶酮(QA)^[1]是一类光色鲜艳、着色力强的橙、红和紫色有机着色剂,具有良好的光、热和化学稳定性,是一类性能优异的工业染料^[2,3]。由于喹吡啶酮结构单元具有强烈的 N—H...O 型氢键作用,容易形成致密的三维网络结构,几乎不溶于常见溶剂,这种性质限制了对其基本结构和谱学特性的研究^[4,5],通过 N-烷基化反应可以消除其分子间氢键的形成。目前,人们已经成功地合成了各种取代基修饰改性后的新型衍生物,使得喹吡啶酮在印染工艺研究、晶体工程学、有机光电器件和超分子可控组装等方面的研究得到了迅速发展^[6~10]。尤其近年来,喹吡啶酮衍生物以其出色的热稳定性和化学稳定性、优良的光电和光敏特性,成为有机电致发光(OLED)的重要掺杂材料,相关的器件研究发展十分迅速^[11~13]。Langmuir-Blodgett(LB)膜是有机分子超薄膜,能在分子水平上控制其结构和物理、化学性能,从而实现分子的排列组合,组建超分子结构和超微复合材料,在非线光学材料,分离膜和模拟生物膜等方面展示出巨大的应用前景^[14~17]。本文研究了两种烷基取代喹吡啶酮衍生物 C6DHQA 和 C16DMQA 溶液及 LB 膜的光学特性。

2 实 验

实验所用的两种化合物二正己基喹吡啶酮(C6DHQA)是在南京邮电大学合成的^[18],二叔甲基取代喹吡啶酮(C16DMQA)是上海华东理工大学合成的^[19],其分子结构如图 1 所示。氯仿是从化学试剂商店购买的光谱级分析纯。

LB 膜的制备是在芬兰造的 KSV2000 单槽制膜

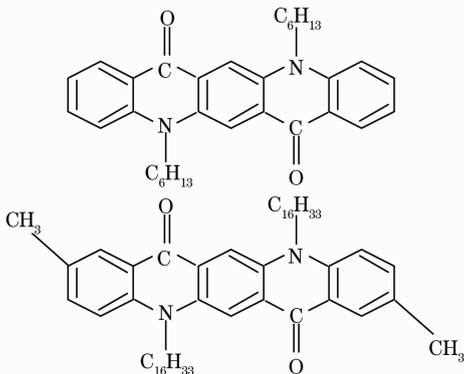


图 1 C6DHQA 和 C16DMQA 的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of C6DHQA and C16DMQA

系统上完成,亚相为 20 ℃ 的二次蒸馏的去离子水,以氯仿为溶剂配制浓度分别为 6.175×10^{-4} mol/L 和 5×10^{-4} mol/L 的 C6DHQA 和 C16DMQA 的溶液并铺展到系统槽水面上。压膜速度为 5 mm/min,保持 28 mN/m 的膜压,采取水平附着法将两种分子淀积在经疏水处理过的石英基板上,C6DHQA 制备 1、2、15、35、50、100 层,C16DMQA 制备 1、2、15 层的 X 型 LB 膜。

吸收谱的测量是在日立 U-3310 型光谱仪上完成的,稳态荧光是在英国 Edinburgh Instruments(EI)公司生产的 FLS920 型荧光光谱仪上完成的,激发光源为 450 W 汞灯,时间分辨荧光是在英国 EI 公司生产的 Life Spec-ps 型时间分辨荧光光谱仪上完成的,激发光源中心波长为 405 nm,时间分辨率为 64.7 ps。

3 结果与讨论

3.1 π -A 等温曲线

两种材料溶液在亚相表面的 π -A 等温曲线如图 2 所示。由图可见,两材料单分子膜较稳定,有明显的气、液和固态区。将固态区等温曲线外延至 $\pi=0$,得到 C6DHQA 平均单分子的面积为 0.9 nm^2 ,C16DMQA 平均单分子的面积为 0.22 nm^2 ,考虑到烷基链是疏水的,通常情况下烷基立于水面之上,对单个分子所占面积影响很小。根据不同原子间的键长^[20],理论上可计算出喹吡啶酮母体环的单分子平面的面积为 0.93 nm^2 ,侧面的面积为 0.21 nm^2 。与实验结果进行比较可知,C6DHQA 分子平躺在亚相表面,C16DMQA 分子则是侧立在亚相表面的,这可能是由于随着烷基链长度增加,其疏水性增强,分子更容易立在亚相表面上。

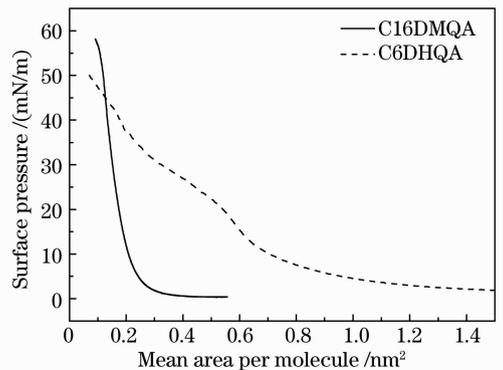


图 2 C6DHQA 和 C16DMQA 溶液的 π -A 等温曲线
Fig. 2 π -A isotherm lines of C6DHQA and 16DMQA solutions

实验中所用石英基板经疏水处理,由于采用的是水平附着法制备 LB 膜,每层单分子层排列整齐,可以制得较为理想的 X 型 LB 膜,而且避免了垂直提拉法造成的流动变形。C6DHQA 和 C16DMQA 的烷基链都是疏水的,可以很好地附着在经疏水处理的石英基板上,两种材料第 1 层膜的转移比都达到 1.0,第 2 层的转移比也均在 0.9 左右,但随着层数的增加,C6DHQA 转移比保持在 0.8 左右,可做到 100 层,C16DMQA 转移比则在第 15 层后降到 0.5,实验中做到 15 层。据 π -A 等温曲线性质及 X 型 LB 膜的特点可推断,两分子单层膜在基板可能的排列情形如图 3 所示,据此理论上可估算 C6DHQA 单层膜厚约 1.26 nm,C16DMQA 单层膜厚约 2.36 nm。

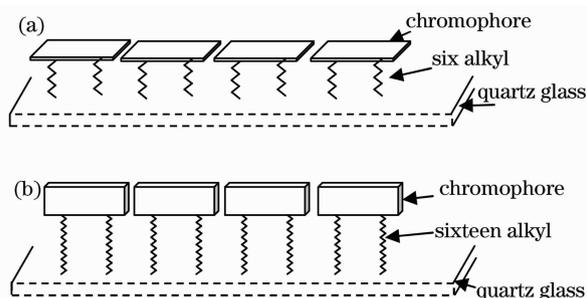


图 3 两种分子在 LB 膜上的可能排列。(a) C6DHQA;
(b) C16DMQA

Fig. 3 Possible arrangement of the molecule at LB film.

(a) C6DHQA; (b) C16DMQA

3.2 紫外-可见吸收谱

实验中分别测量了两材料不同浓度氯仿溶液及所制备的样品的吸收、稳态荧光和时间分辨荧光,溶液浓度范围 $5.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ mol/L。

两材料溶液吸收谱结果表明随浓度的增加,两者的吸收强度随浓度的增加而增强,但吸收峰位并无变化,说明两种分子在溶液中没有聚集。图 4 是 C6DHQA 和 C16DMQA 浓度为 4.0×10^{-5} mol/L 溶液及 15 层 LB 归一化的紫外-可见吸收谱图。由图可见,化合物 C6DHQA 的氯仿溶液在 524 nm 和 490 nm 各有一个吸收峰,461 nm 附近有一肩峰(图中实线所示),根据 Frank-Condon 原理^[21],此吸收带具有电子振动精细结构,524、490、461 nm 的吸收峰分别属于 $\nu=0$ 到 $\nu'=0,1$ 和 2 的电子振动跃迁,如图 6(b)(图 6 具体说明在 3.3 稳态荧光部分)所示,其吸收强度依次减低。化合物 C16DMQA 的氯仿溶液的吸收峰分别在 535、499、466 nm 附近(图中线、点、点线所示),与 C6DHQA 具有类似的

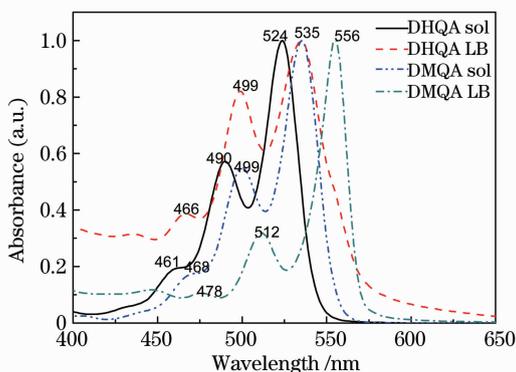


图 4 C6DHQA 和 C16DMQA 的紫外-可见吸收谱
Fig. 4 Ultraviolet-visible absorption spectrum of
C6DHQA and C16DMQA

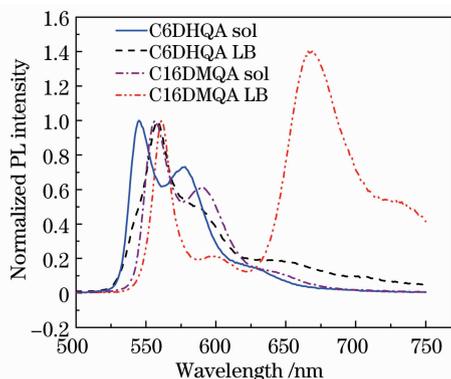


图 5 C6DHQA 和 C16DMQA 的稳态荧光光谱
Fig. 5 Photoluminescence spectrum of C6DHQA
and C16DMQA

峰形,3 个吸收峰的相对强度基本相同,但吸收峰整体红移了约 10 nm,这可能是取代基构型、位置以及取代数量的差异导致分子带隙发生了变化。两种化合物形成 LB 膜后,吸收谱的峰形没有发生变化,但吸收峰 C6DHQA 整体红移了约 10 nm,两个短波的特征吸收峰强度有所增强,C16DMQA 整体红移了约 21 nm,两个短波的特征吸收峰强度有所减弱。根据激子理论^[22]可知两种化合物的分子在形成 LB 膜时形成了“J-聚集”,但由于两种材料取代基构型、位置及取代数量的差异使两分子在形成聚集体时对分子精细结构的影响不同。C6DHQA 形成 LB 膜后,电子由 $\nu=0$ 到 $\nu'=1$ 和 2 跃迁的概率增大,而 C16DMQA 相应的跃迁概率降低^[21]。

3.3 稳态荧光光谱

图 5 是 C6DHQA 和 C16DMQA 浓度为 4.0×10^{-5} mol/L 溶液及 15 层 LB 的稳态荧光光谱图,为了便于比较在第一个荧光峰位进行了归一化处理,实验中测量样品稳态荧光前先做了材料的激发谱,根据激发谱确定其激发光波长为 340 nm。由图可见,

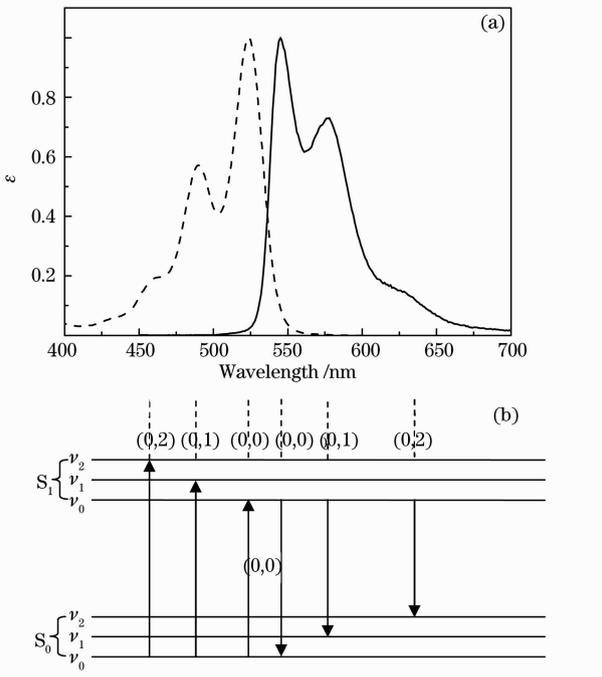


图 6 C6DHQA 溶液的吸收(虚线)和发射谱(实线)对应及其归属

Fig. 6 Adsorption and the corresponding relation of the absorption spectrum (dotted line) and photoluminescence spectrum (solid line) of the C6DHQA solution

化合物 C6DHQA 溶液在 545 nm 和 577 nm 各有一个荧光峰,在 629 nm 有一肩峰,与其吸收谱有很好的镜像对称性,有力地证明了 Frank-Condon 原理。图 6 是 C6DHQA 溶液的吸收和发射谱对应及其归属^[21]。图 6(a)是 C6DHQA 溶液的吸收和发射谱对应关系,虚线是吸收谱而实线是发射谱。图 6(b)是各个吸收(发射)带的归属。在激发时,对应于终

态(激发态)不同的振动态跃迁几率(强度)不同,同样,在发射时对应于终态(基态)不同的振动态跃迁几率也不相同,呈现图中上半部分所示的镜像对称关系。化合物 C16DMQA 溶液在 557 nm 和 591 nm 各有一个荧光峰,在 647 nm 有一肩峰,与其吸收谱有较好对称性,与 C6DHQA 具有类似的峰形,但荧光峰整体红移了约 15 nm。这一特点和两种分子的吸收特征一致。此处不再给出对应关系及归属图。C6DHQA 形成 LB 后,与其溶液具有类似的峰形,荧光峰整体红移了约 17 nm,第二个荧光发射峰强度有所降低,峰有所展宽,第三个荧光峰强度有所增加,峰也有所展宽,但第二、三荧光峰强度都比第一个弱,第三个峰只是一肩。C16DMQA 形成 LB 膜后,与其溶液相比,荧光峰整体红移了约 5 nm,第二个荧光峰强度降低很多,第三个荧光峰增强很多,并且大于第一个荧光峰,成为主要的荧光发射,说明电子由 $S_1(\nu_0)$ 向 $S_0(\nu_2)$ 跃迁的几率最大,与 C6DHQA 形成 LB 后的变化规律相反。由前面两种材料 π -A 等温曲线的分析可见,烷基链的长度及取代基的位置影响分子在基板的排列,C16DMQA 分子的排列较 C6DHQA 紧密,分子间的作用力较强,对分子的振动精细结构影响较大。

3.4 时间分辨荧光

图 7 和图 8 是 C6DHQA 和 C16DMQA 溶液及多层 LB 在三个相应特征峰的时间分辨荧光谱图。对实验数据采用多指数函数拟合:

$$I(t) = A + B_1 \exp(-t/\tau_1) + B_2 \exp(-t/\tau_2) + B_3 \exp(-t/\tau_3) + \dots, \quad (1)$$

通过拟合可以得到不同衰减过程的荧光寿命,拟合质量通过 χ^2 判据来评价。拟合结果如表 1 所示。

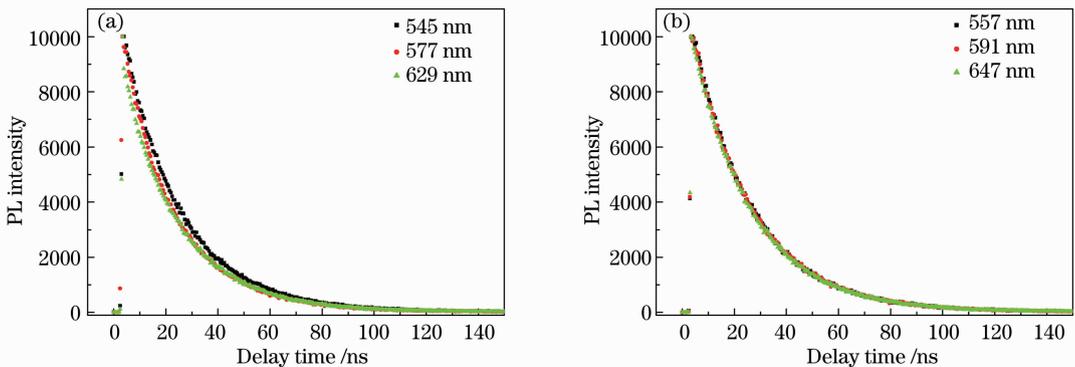


图 7 (a)C6DHQA 溶液和(b)C16DMQA 溶液的时间分辨荧光谱

Fig. 7 TRPL spectrum of C6DHQA solution (a) and C16DMQA solution (b)

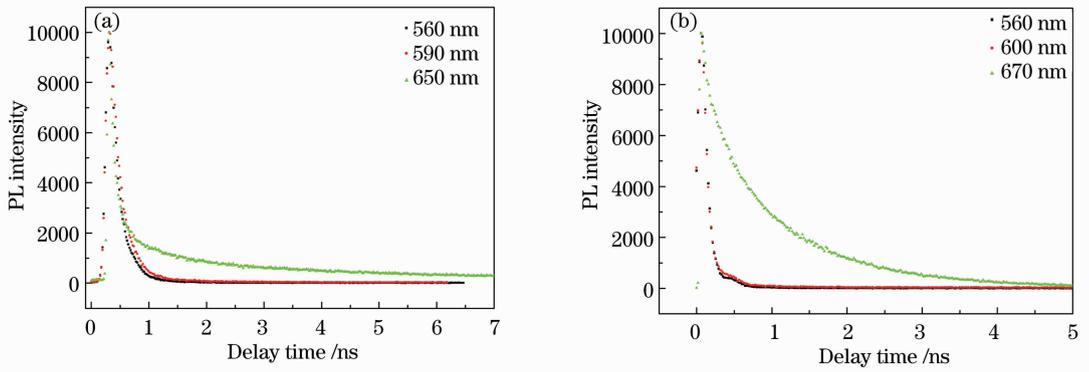


图 8 (a)C6DHQALB 膜和(b)C16DMQA 膜时间分辨荧光谱

Fig. 8 TRPL spectrum of C6DHQA LB film (a) and C16DMQA LB film (b)

表 1 C6DHQA 和 C16DMQA 溶液及多层 LB 的荧光寿命和组分

Table 1 Fluorescent lifetime and proportion of C6DHQA and C16DMQA solution and LB Film

Sample	State	Wavelength /nm	τ_1 /ns	Re/ (τ_1) %	τ_2 /ns	Re/ (τ_2) %	T_3 /ns	Re/ (τ_3) %	X^2
C6DHQA	Solution	545	21.727	94.94	65.250	5.06			1.138
		577	19.272	84.4	38.016	15.6			1.258
		629	21.42	94.18	53.513	5.82			1.094
	LB film	560	0.158	79.34	0.452	20.66			1.654
		590	0.189	86.97	0.883	13.03			1.462
		650	0.2	6.01	1.503	17.63	9.293	76.36	1.289
C16DMQA	Solution	557	22.467	93.93	59.02	6.07			1.02
		591	22.833	95.54	66.975	4.46			1.014
		647	22.748	95.22	64.476	4.78			1.160
	LB film	560	0.067	75.57	0.267	24.43			3.003
		600	0.050	45.72	0.269	54.28			2.152
		670	3.901	15.81	12.717	84.19			1.204

由拟合结果可见,在溶液中两种分子在三个特征荧光峰寿命有两个组分,两组份的寿命都较长,较短组分为 21 ns 左右,占 95%左右,较长组分的寿命在 60 ns,成分占到 5%左右,拟合质量较好。形成 LB 膜后,两者在三个特征峰的寿命与其溶液中的相比较短了 1/10 左右,两者的差别也很大。C6DHQA 在 560 nm 和 590 nm 处的寿命有两个组分,两组份的寿命差别不大,稍短的组分占比例较大,在 80%左右,而 650 nm 处的寿命有三个组分,每组分寿命都比前两个波段长,最长的为 9.293 ns,所占比例为 76.36%,这也是分子间相互作用影响的结果,且对长波段的影响较大。C16DMQA 在 560 nm 和 600 nm 处的所拟合的 0.067 ns 和 0.050 ns 的组分不符合实际,应舍去,所以只有 0.267 ns 和 0.269 ns 这一个组分,但 670 nm 处的寿命则要长许多,两组分的寿命分别为 3.901 ns 和 12.717 ns,长寿命组分占 84.19%。这种差异在稳态荧光谱中也表现出来,其原因应归于分子在基板上的排列方式不同,分子间

的相互作用力不同造成的。

4 结 论

研究了两种烷基取代喹吡啶酮衍生物 C6DHQA 和 C16DMQA 的 π -A 等温曲线,制备了两种材料的 X 型 LB 膜,根据 π -A 等温曲线得出两种分子在基板上可能的排列方式。对其溶液及 LB 膜的紫外可见吸收谱、稳态荧光和时间分辨荧光进行了测量与分析,结果表明,两种材料在亚相表面能形成稳定的 Langmuir 膜,并且能较好地转移到基片上,C6DHQA 分子是平躺在亚相表面,C16DMQA 分子则是侧立在亚相表面。C16DMQA 与 C6DHQA 具有类似的吸收峰,三个吸收峰的相对强度基本相同,但 C16DMQA 吸收峰整体红移了约 10 nm,这可能是取代基构型、位置以及取代数量的差异导致分子带隙发生了变化;C6DHQA 形成 LB 膜的吸收峰位较溶液红移了 10 nm,C16DMQA 形成 LB 膜的则红移了 23 nm,说明两种分子在 LB

膜中形成了J-聚集体。两种材料的溶液及LB膜都有较强的荧光发射, LB膜的荧光光谱较溶液的整体红移, 溶液的荧光光谱与吸收谱有很好的镜像对称关系, 形成LB膜后, 镜像对称关系被打破, C6DHQA第三个荧光峰相对强度稍有增加, 但远小于第一个峰的, 而C16DMQA的第三个荧光峰的强度已远大于第一个峰的。两种材料在溶液中, 与三个特征峰对应的荧光寿命C6DHQA的为21 ns左右, C16DMQA的为22 ns左右, 两者稍有差异, 形成LB膜后, 与第一、二个特征峰对应的荧光寿命C6DHQA的分别降低到0.158 ns和0.189 ns, C16DMQA的为0.267 ns和0.269 ns, 比C6DHQA的稍长, 与第三个荧光峰对应的荧光寿命C6DHQA的为9.293 ns, C16DMQA的为12.717 ns差别较大。其原因应归于C16DMQA分子在基板上的排列更密, 分子间的相互作用力强, 从而对能级结构的影响更大。本工作为光电器件的发光特性研究提供了有力的理论支持。

参 考 文 献

- W. Herbst, K. Hunger. Industrial Organic Pigments (3rd edition)[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004
- Julius Jackson, Westfield. Particle Size Reduction of Quinacridone and Phthalocyanine Pigments [P]. US Patent: 3030370, 1962
- Herman Gerson, F. John, C. Vincent. Preparation of Quinacridone Pigments[P]. US Patent: 3257405, 1966
- S. S. Labana, L. L. Labana. Quinacridones [J]. *Chem. Rev.*, 1967, **67**(1): 1~18
- Kaiqi Ye, Jia Wang, Hui Sun *et al.*. Supramolecular structures and assembly and luminescent properties of quinacridone derivatives[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2005, **109**(16): 8008~8016
- S. E. Shaheen, B. Kippelen, N. Peyghambarian *et al.*. Energy and charge transfer in organic light-emitting diodes: a soluble quinacridone study[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(11): 80~98
- Takeo Wakimoto, Yoshinobu Yonemoto, Jun Funaki *et al.*. Stability characteristics of quinacridone and coumarin molecules as guest dopants in the organic LEDs[J]. *Synthetic Metals*, 1997, **91**(1-3): 15~19
- Shi Dongxia, Ji Wei, He Xiaobo *et al.*. Modulation of quinacridone derivatives nanostructures by lateral alkyl chain on Ag(110)[J]. *Physics*, 2007, **36**(1): 11~14
时东霞, 季威, 贺肖波等. 通过不同烷基链取代调控喹啉酮分子在Ag(110)表面上的自组装结构[J]. *物理*, 2007, **36**(1): 11~14
- Jin Ping, Ren Quansheng, Du Junxia *et al.*. Development and prospect of the organic pigments derived from succinic acid [J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2010, **47**(5): 1~7
晋平, 任全胜, 杜俊霞等. 有丁二酸衍生的有机颜料产品的开发应用及展望[J]. *染料与染色*, 2010, **47**(5): 1~7
- Cristiana Radulescu, I. Ionita, A. M. Hossu. Synthesis of linear bis-thiazolo[2,3-d][8,9-d] trans-quinacridone [J]. *Dyes and Pigments*, 2005, **65**(2): 175~177
- Zhang Huidong, Zhang Ping, Sun Yinghui *et al.*. Metal ion sensing properties of BAEAHQA/MCM-41 assembly [J]. *Chemical J. Chinese Universities*, 2006, **27**(3): 506~509
张慧东, 张萍, 孙迎辉等. 喹啉酮衍生物/介孔分子筛MCM-41组装体的金属离子传感性能研究[J]. *高等学校化学学报*, 2006, **27**(3): 506~509
- S. E. Shaheen, G. E. Jabbour, B. Kippelen *et al.*. Organic light-emitting diode with 20 lm/W efficiency using a triphenylamine side-group polymer as the hole transport layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **74**(21): 3212~3214
- J. Li, M. Yahiro, K. Ishida *et al.*. Influence of doping location and width of dimethylquinacridone on the performance of organic light emitting devices [J]. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2005, **38**(3): 392~396
- Xunyu Yang, Zhongcheng Mu, Zhiqiang Wang. STM study on quinacridone derivative assemblies: modulation of the two-dimensional structure by coadsorption with dicarboxylic acids[J]. *Langmuir*, 2005, **21**(16): 7225~7229
- Zhongcheng Mu, Zhiqiang Wang, Xi Zhang. Two-dimensional supramolecular assemblies of quinacridone derivatives from achiral to chiral racemates and domains [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, **108**(52): 19955~19959
- Liu Yunlong, Wang Wangjun, Gao Xuexi *et al.*. Spectrum properties of thulium bisphthalocyanine Langmuir-Blodgett films [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(2): 422~425
刘云龙, 王文军, 高学喜等. 稀土夹心双酞菁钪的LB膜及其光谱特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(2): 422~425
- Gao Xuexi, Wang Wenjun, Liu Yunlong *et al.*. Spectral and nonlinear optical properties of two azobenzene compounds in Langmuir-Blodgett films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1276~1281
高学喜, 王文军, 刘云龙等. 两种偶氮苯化合物LB膜的光谱与非线性光学特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1276~1281
- Zhao Jianfeng. Synthesis and Supramolecular Self-Assembly of Hydrogen Bonded Organic Semiconductors [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011. 39~57
赵剑峰. 氢键功能化有机半导体的合成及其超分子自组装 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2011. 39~57
- Liu Peihua. The Synthesis and the Study of Capability of Soluble Quinacridones and Derivatives [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2000. 14~23
刘佩华. 可溶性喹啉酮类及萘类化合物的合成及其性能研究 [D]. 上海: 上海华东理工大学, 2000. 14~23
- Liu Yunlong, Gao Xuexi, Li Shuhong *et al.*. Spectral properties of a novel soluble quinacridone derivative Langmuir-Blodgett films [J]. *J. Light Scattering*, 2006, **18**(2): 168~172
刘云龙, 高学喜, 李淑红等. 一种可溶性喹啉酮衍生物LB膜的光谱特性[J]. *光散射学报*, 2006, **18**(2): 168~172
- Lu Weimin, Chen Fang. Fundamental of Spectroscopy and Structure Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 80
陆维敏, 陈芳. 谱学基础与结构分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 80
- Huang Chunhui, Li Fuyou. Huang Yanyi. Ultrathin Films for Optics and Electronics [M]. Beijing: Peking University Press, 2001. 74~77, 155~162
黄春辉, 李福友, 黄岩谊. 光电功能超薄膜 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001. 74~77, 155~162