

Charge Accumulation Behavior in Quantum Dot Light-Emitting Diodes

Cheng Wang^{1,2}, Chi Zhang¹, Ruifeng Li³, Qi Chen^{1,4,*}, Lei Qian³, Liwei Chen^{1,5}

¹ *i*-Lab, CAS Center for Excellence in Nanoscience, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, Jiangsu Province, China.

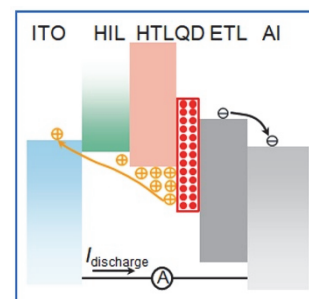
² School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China.

³ Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang Province, China.

⁴ School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

⁵ *In-situ* Center for Physical Sciences, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) constitute the next-generation display technology because of their wide color gamut, narrow emission spectrum, adjustable emission wavelength, and ease of solution processability. With the development of novel material and device preparation techniques, the QLEDs not only show an external quantum efficiency (EQE) of more than 20% in red, green, and blue (primary color) devices, but also achieve 100% Rec.2020 (recommendation standard for ultrahigh-resolution display) color gamut coverage. However, the future commercialization of QLEDs is still a challenge. The T95 lifetime (defined as 95% time for the luminance to decay to the initial value $L_0 = 1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) of red, green, and blue QLED devices is significantly lower than that of commercially available organic light-emitting diodes (OLEDs). This is ascribed to the lacking of understanding and argument to hypothesis of degradation mechanisms. A QLED is a sandwich structure composed of a quantum dot (QD) emitter layer, carrier transport layer, and electrode layer. The QLED works on the principle of electroluminescence: electrons and holes injected from the electrodes on both sides of the device cross multiple interfaces and reach the QD emitter layer to undergo radiation recombination. Generally, the QD emitter layer adopts the structure of a wide-band gap shell wrapped around a narrow band-gap core. Because of the deep valence band maximum, the hole injection barrier is higher, and the hole injection efficiency is reduced. This not only disturbs the injection balance but also leads to the accumulation of interfacial holes, which is one of the important factors affecting the efficiency and life of the device. Past studies have attempted to understand charge accumulation behavior in QLEDs by predicting the interfacial energy band structure, and there are very few reports on the direct measurement of charge accumulation. In this work, we built a charge extraction circuit to investigate the charge accumulation behavior before and after aging in a prototype red QLED. In the fresh red QLEDs, the number of accumulated charges gradually increased with the driving current density and tended to saturate above turn-on current density. In the aged red QLEDs, the accumulated charges increased with a decrease in luminance. Our method to investigate the charge accumulation behavior developed can be extended to various kinds of LEDs, such as OLEDs and perovskite LEDs, thus providing insight into their working mechanism.



Key Words: Quantum dot light-emitting diodes; Lifetime; Injection barrier; Charge accumulation; Injection balance

Received: April 14, 2021; Revised: May 6, 2021; Accepted: May 7, 2021; Published online: May 10, 2021.

*Corresponding author. Email: qchen2011@sinano.ac.cn; Tel.: +86-512-62872723.

The project was supported by the Ministry of Science and Technology of China (2016YFA0200700) and the National Natural Science Foundation of China (21625304, 21875280, 22022205, 21991150, 21991153).

国家重点研究发展计划(2016YFA0200700)和国家自然科学基金(21625304, 21875280, 22022205, 21991150, 21991153)资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

量子点发光二极管中电荷累积行为

王成^{1,2}, 张弛¹, 黎瑞锋³, 陈琪^{1,4,*}, 钱磊³, 陈立桅^{1,5}

¹ 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所国际实验室, 中国科学院纳米科学卓越中心, 江苏 苏州 215123

² 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

³ 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

⁴ 中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026

⁵ 上海交通大学化学与化工学院物质科学原位中心, 上海 200240

摘要: 量子点发光二极管(QLED)是不需要额外光源的主动发光技术, 在显示领域中的应用前景被广泛看好。寿命较短是影响QLED商业化的重要因素之一, 并且其老化机理尚不清晰。在本工作中, 我们通过自主搭建电荷提取装置, 证实红光QLED在恒流驱动过程中, 存在显著的电荷累积。累积电荷量随着驱动电流密度增加而增加, 但当超过阈值电流密度(对应于开启电压)后逐渐趋于饱和。随着器件老化, 亮度下降伴随着累积电荷量进一步增加。本工作对QLED老化过程中电荷累积规律的理解, 能为QLED材料和界面的优化设计提供直观判据。

关键词: 量子点发光二极管; 寿命; 注入势垒; 电荷累积; 注入平衡

中图分类号: O649

1 引言

发光二极管(LED)可应用于日常生活中的显示和照明¹⁻⁴。可溶液加工的量子点发光二极管(QLED)具有高效率、高亮度、高色纯度、宽色域、低功耗、低成本等诸多优势, 在显示领域中的应用前景被广泛看好⁵⁻⁷。随着量子点合成技术和器件制备工艺的发展, 红、绿、蓝三基色器件不仅外量子效率(EQE)超过了20%, 而且实现了100% Rec.2020 (超高清显示标准)色域覆盖⁸⁻¹²。

目前, 寿命较短是影响QLED商业化的重要因素之一。对于已实现商业化应用的有机发光二极管(OLED), 红、绿、蓝器件的T95寿命(定义为电致发光强度衰减到初始值 $L_0 = 1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 的95%的时间)分别超过了7000、9000、500 h^{13,14}。相比之下, 文献报道的QLED的T95寿命, 红、绿、蓝器件分别为5500、2500、4 h^{12,15,16}。显然QLED与OLED的寿命还存在一定的差距, 解决寿命问题依然是QLED领域的难题, 而缺乏对衰减机制的深入理解和论证是解决该问题的限制因素。

QLED是由量子点(QD)发光层、载流子传输层和电极层组成的三明治结构, 其原理为电致发光, 即电子和空穴从器件两侧电极注入, 跨越多个界面之后到达QD发光层之后辐射复合¹⁷⁻¹⁹。通常, QD发光层采用宽带隙外壳包裹窄带隙内核的结构, 通过制备单电子和单空穴器件并测量其电流-电压响应曲线, 看到同样电压下空穴电流密度更低。这可能是由于QD价带顶(VBM)较深, 使得空穴注入势垒较高, 降低了空穴注入效率²⁰⁻²³。这不仅破坏

了注入平衡, 而且易导致界面空穴累积, 是影响器件效率和寿命的重要因素之一²⁴⁻²⁶。Dai等²³在QD和电子传输层(ETL)之间加入聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)绝缘层, 不仅使EQE提升至20.5%, 而且器件T50寿命提高至3313 h ($L_0 = 1000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$)。该工作认为提升器件性能的机理在于, PMMA提高了电子注入势垒降低电子注入效率, 改善了注入平衡。但是, PMMA的引入造成显著的界面电子累积, 是限制器件寿命进一步提升的可能因素之一。Cao等²⁷采用窄带隙ZnSe替代宽带隙ZnS外壳之后, 器件EQE从11.4%提高到了15.1%。更重要的是, 器件T95寿命从320 h大幅提高至2320 h。通过开尔文探针显微镜证实, 采用窄带隙ZnSe外壳能够显著降低空穴注入势垒, 提高空穴注入效率抑制界面空穴累积, 改善了注入平衡。但是到目前为止, 理解QLED中电荷累积行为, 多是基于界面能带结构推测, 尚缺乏直接测量电荷累积的报道。在本工作中, 我们以红光QLED为原型器件, 利用自主搭建的电荷提取装置证实恒流驱动过程中发生显著的电荷累积, 器件老化与电荷累积密切相关。

2 实验部分

2.1 器件制备

首先将ITO玻璃基底依次使用清洁剂/去离子水、去离子水、乙醇(Sigma Aldrich, US, LR)和异丙醇(Sigma Aldrich, US, LR)超声清洗10 min, 氮气吹干后采用氧等离子处理10 min。然后将PE-DOT:PSS (聚3,4-乙烯二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐,

Baytron P VP AI 4083)滴在ITO基底上,以转速 $4500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 旋涂60 s,转移至手套箱中在 130°C 退火30 min。接着将TFB(聚(9,9-二辛基苄-CO-N-(4-丁基苯基)二苯胺), American Dye Source, Canada)的氯苯(Sigma Aldrich, US, AR)溶液($8 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)滴在ITO/PEDOT:PSS基底上,以转速 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 旋涂45 s,然后在 150°C 退火30 min。随后,将CdSe/ZnS QD的辛烷(Sigma Aldrich, US, AR)溶液²⁸ ($15 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)滴在基底上,以 $2000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速旋涂60 s。之后将ZnO的乙醇溶液($30 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)以 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 旋涂60 s,在 120°C 退火去除剩余溶剂。最后将器件转移至真空蒸镀仓中,在 10^{-4} Pa 真空度下蒸镀100 nm的Al电极,器件面积 0.04 cm^2 ,为ITO和Al电极交叠区域。

2.2 器件表征

电致发光光谱(EL)是采用Ocean Optics USB 2000+光谱仪(Ocean Insight, USA)在Keithley 2400源表(Keithley, USA)的恒流驱动下测量的。亮度-电流密度-电压(L - J - V)特征曲线是通过Keithley 2400源表电流电压扫描和带有校正硅探测器(Edmund, USA)的Keithley 6485皮安表(Keithley, USA)来测量的。亮度是由PR655亮度计(Spectra Scan, USA)基于Lambertian发射模式来校准的。

QLED中累积电荷量是由自制的电荷提取装置测量(图1a)。QLED器件进行 L - J - V 以及恒流驱动等测试时,两端的电极与Keithley 2400源表连接;测试完成后电路快速自动切换,两端的电极与电流放大器(DL Instrument, USA)连接,QLED中累积的电荷逐渐释放产生电流,由GDS-3154示波器(GWINSTEK, Taiwan Province, China)读取电流随时间的变化曲线。如图1b所示,我们用自制的电荷提取装置对标准电容器($C = 5.1 \pm 0.1 \mu\text{F}$)以 $1 \times$

10^{-6} A 恒流驱动21.28 s后,电容器两端电压(U)从0 V增至4.11 V(图1b插图),充电电量 $Q_{\text{charge}} = 0.213 \mu\text{C}$ 可通过公式(1)计算:

$$Q_{\text{charge}} = I_{\text{charge}} \cdot t_1 \quad (1)$$

其中, I_{charge} 是驱动电流, t_1 是充电时间。图1b是电容器中的电荷逐渐释放产生的电流随时间的变化曲线,放电电量 $Q_{\text{discharge}} = 0.212 \mu\text{C}$ 可通过公式(2)计算:

$$Q_{\text{discharge}} = \int_0^{t_2} I_{\text{discharge}} dt \quad (2)$$

其中, $I_{\text{discharge}}$ 是放电电流, t_2 是放电时间。 Q_{charge} 和 $Q_{\text{discharge}}$ 之间的误差 $< 0.5\%$,证实了电荷提取装置的可靠性。

3 结果与讨论

如图2a所示,红光QLED原型器件的结构ITO/PEDOT:PSS/TFB/QD/ZnO/Al,器件能带结构如图2b中插图所示。图2b是红光QLED的 J - L - V 特征曲线,当超过开启电压1.7 V时(对应阈值电流密度为 $0.33 \times 10^{-4} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$),电流密度和亮度都迅速增加,在5 V时亮度达到 $35542 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。如图2c所示,红光QLED的EL光谱峰位为620 nm,半峰宽为22 nm。图2d是QLED在不同亮度下的外量子效率(EQE)和电流效率(η_A),在亮度 $15042 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时峰值EQE为12.65%,电流效率为 $21.21 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$ 。由此可证实,红光QLED原型器件展现出较好的发光性能,是分析其电荷累积行为的重要前提。

如图3a所示,红光QLED在 2.5×10^{-7} - $1.0 \times 10^{-1} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 等不同驱动电流下工作20 s,所对应的电压不随时间变化。当驱动电流超过 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,器件亮度随着电流增加而变强(图3b),这与图2b中 J - L - V 特征曲线一致。图3c为恒流

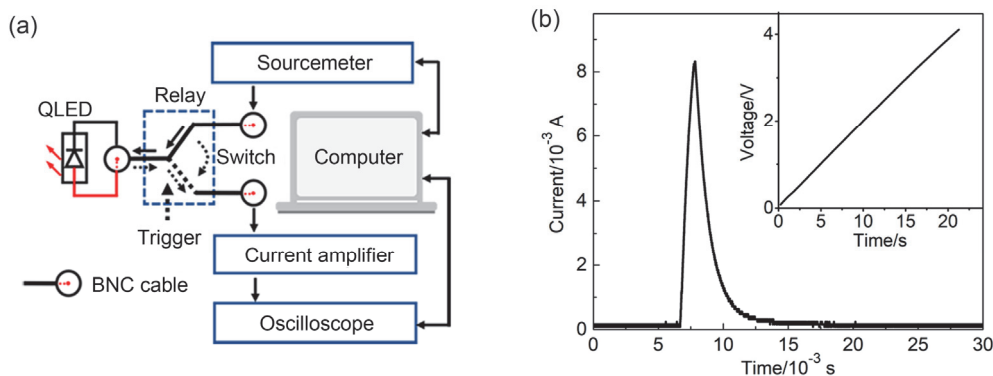


图1 QLED 累积电荷量测量原理

Fig. 1 The principle of accumulated charges of QLED.

(a) circuit diagram of charge extraction system; (b) discharge current vs. time curve of a standard capacitor ($C = 5.1 \pm 0.1 \mu\text{F}$), the insert is the voltage vs. time curve of the capacitor under 10^{-6} A constant current.

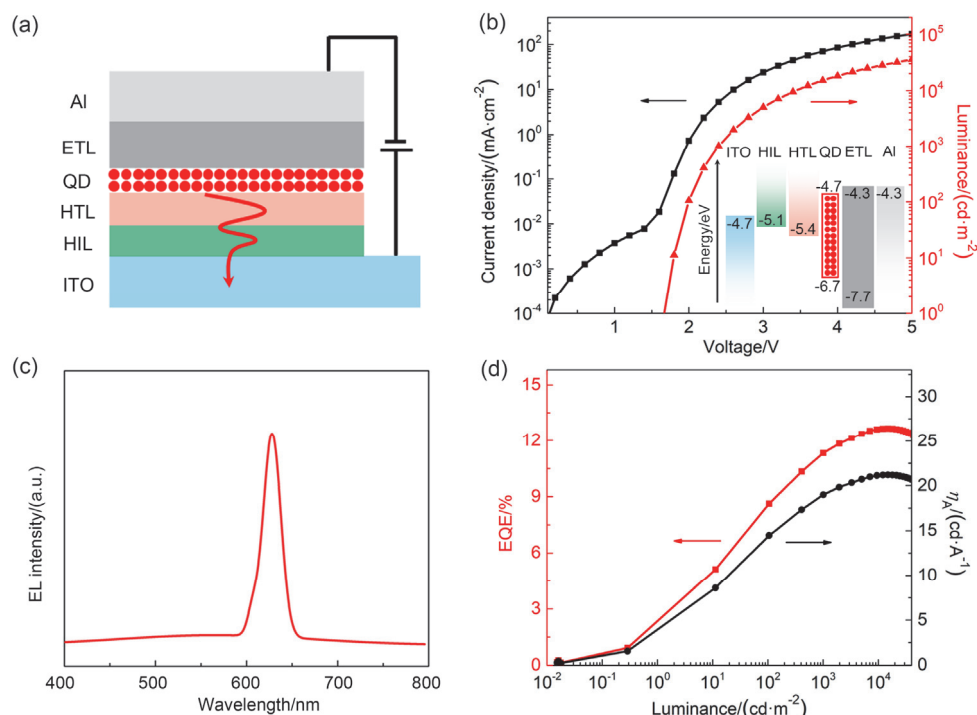


图2 红光QLED器件性能测试

Fig. 2 Device performance of red QLED device.

(a) schematic illustration of device structure; (b) J - L - V curves, the insert is the energy band diagram; (c) EL spectrum; (d) EQE - η_A - L curves.

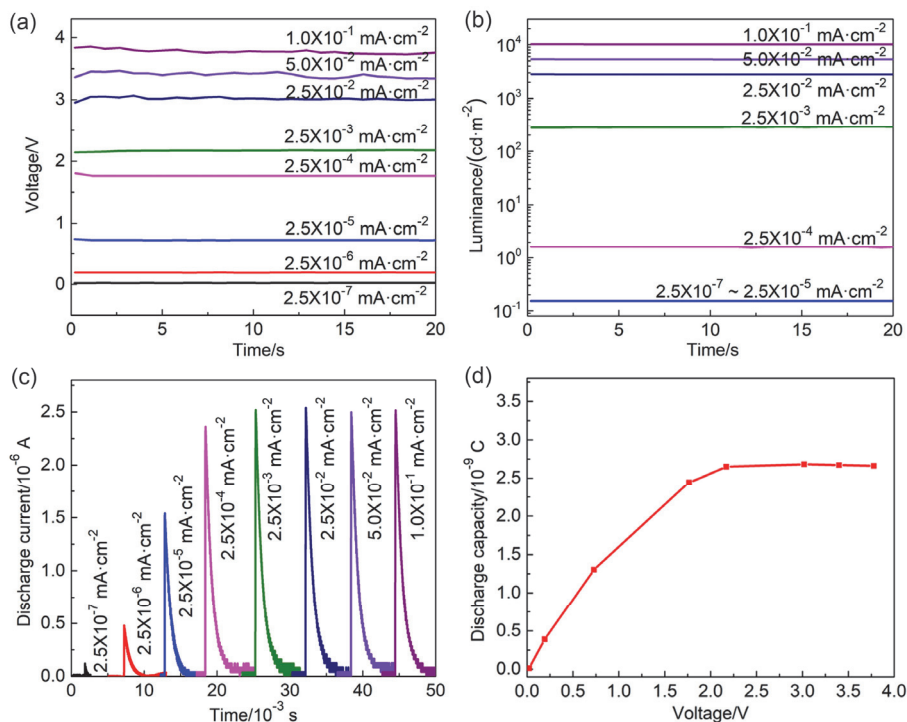


图3 红光QLED在不同驱动电流下的累积电荷量测试

Fig. 3 Measurement of accumulated charge carriers in red QLED under different drive currents.

voltage (a), luminance (b) vs. time curves. By turning-off the drive current, (c) current vs. times curves; (d) discharge capacity vs. drive voltages.

驱动停止后, 红光QLED内部累积电荷释放的电流随时间的衰减曲线。可以看出恒流驱动停止后的初始电流随着驱动电流逐渐增加, 当驱动电流超

过 $2.5 \times 10^{-4} \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时趋于饱和。通过对图3c中电流随时间的衰减曲线进行积分, 可以得到此过程中释放的电荷量。如图3d所示, 释放的电荷量随

驱动电流对应的电压逐渐增加, 随后趋于饱和。

图4a,b分别是器件恒流工作时和结束后的能带结构。施加驱动电流时, 电子和空穴需要越过界面势垒分别从电子传输层和空穴传输层向QD发光层注入(图4a)。电子传输层ZnO的导带底(CBM)与QD发光层的CBM差异较小, 因此界面电子注入势垒较低, 电子能有效注入。而空穴传输层最高占据分子轨道(HOMO)能级较浅, 与QD发光层的VBM之间存在较高的空穴注入势垒, 空穴注入相对更难, 易导致一部分空穴累积在界面²³。当电流逐渐增加, 累积的空穴总量也随之增加。如图4b所示, 当驱动停止后, 累积的空穴由于内建电场的存在逐渐流向外电路, 引起电流随时间衰减。

为了更好的理解QLED内部电荷累积过程, 我们建立了等效电路模型(图4c)^{29,30}, 器件的接触电阻和扩散电阻可等效为串联电阻(R_s), 由内部杂质和缺陷导致的旁漏电阻等效为并联电阻(R_{sh}), 而内部的二极管异质结可等效为结电阻(R_h)和结电容(C_h), 与 R_{sh} 并联。当驱动电压未达到二极管的阈值开启电压时, 较大的界面势垒导致 R_h 很大($R_h >$

R_{sh}), 而一般情况下 $R_s < R_{sh}$, 因此整个回路中的电流是由 R_{sh} 主导的, 也称为漏电流, 由于电路中的 R_{sh} 一般比较大, 因此回路中的电流随电压增加变化很小。当驱动电压大于二极管开启电压时, R_h 急剧下降($R_h < R_s$), 整个回路中的电流是由 R_s 主导的, 由于电路中 R_s 一般比较小, 因此回路中的电流随电压增加显著增加。我们的模型也很好的解释了图2b中 $J-V$ 曲线的变化趋势, 而器件内部电荷累积过程可近似看作是 C_h 的充电过程。

因此, 我们在图3d中可以看到, 当器件的驱动电流所对应的驱动电压未达到器件发光的开启电压时, 结电容两端的电压是随驱动电压逐渐增加的(与 R_{sh} 两端电压相等), 累积的电荷也会逐渐增加。当驱动电流密度所对应的电压超过开启电压后, C_h 两端的电压等于异质结的压降, 且压降保持恒定, 因此QLED内部所能累积的电荷也就保持恒定了。

进一步地, 为了理解红光QLED老化之后电荷累积行为是否发生变化, 将其在 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 恒流老化至T97 (图5a)。器件电压从3.54 V增加到

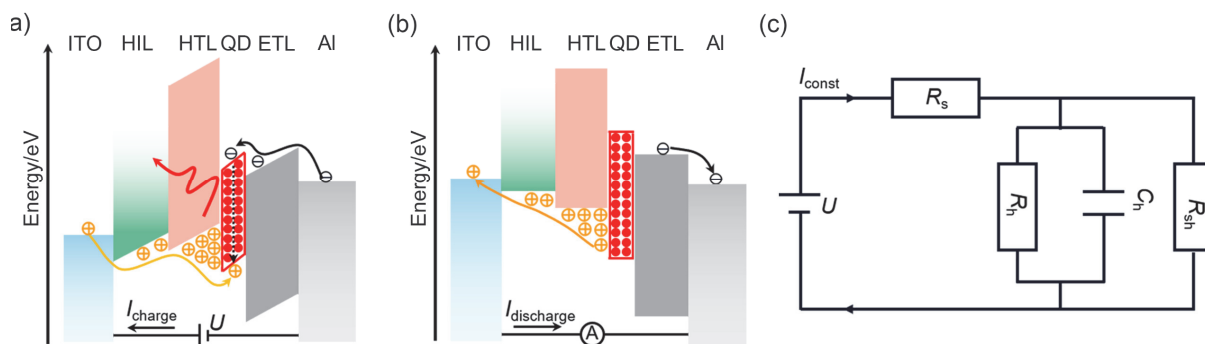


图4 红光 QLED 中电荷累积机理分析

Fig. 4 Mechanism analysis of charge accumulation in red QLED.

(a) energy band diagram driving under constant current; (b) energy band diagram after constant current driving; (c) equivalent circuit model.

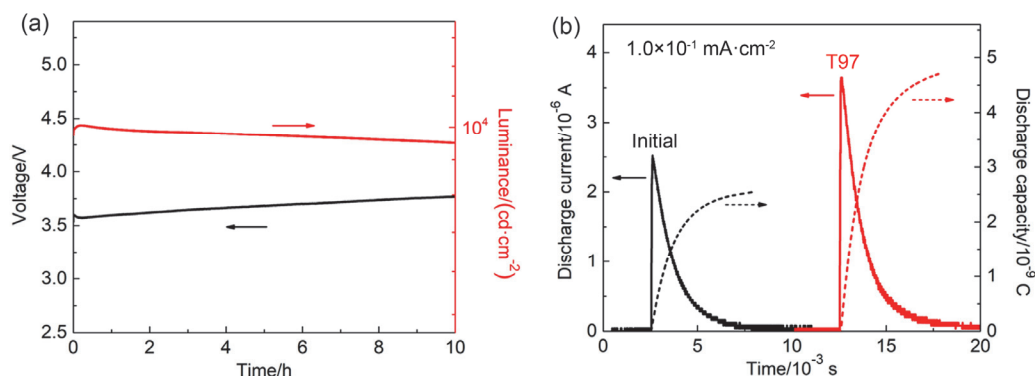


图5 红光 QLED 恒流老化前后的电荷累积

Fig. 5 Charge accumulation in red QLED before and after constant current driving.

(a) curves of changing of voltage and luminance driving under 4 mA constant current for 10 h; (b) discharge curves and integral capacity driving under $1.0 \times 10^{-1} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ constant current of initial stage and T97.

3.77 V, 亮度由初始亮度 $L_0 = 10000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 衰减到97%。图5b是恒流老化前后所对应的电流随时间衰减曲线, 以及相对应的积分电荷量, 可以看到老化后累积电荷量明显增加了。我们的结果证实QLED在长时间的恒流老化后, 性能发生衰减以及电压抬升可能是内部电荷累积增加导致的。电荷累积的增加, 一方面当界面存在缺陷时易捕获累积的空穴, 当电子到达界面后易引起单分子复合; 另一方面, 空穴在界面累积可能导致注入量子点发光层中的电子过剩, 从而诱导俄歇复合, 使电流注入效率和发光亮度降低; 电荷累积的存在还会导致载流子注入势垒增加, 驱动电压抬升, 界面也因此会发生不可逆的化学反应使材料失效^{19,27,31,32}。

4 结论

在本工作中, 我们通过自主搭建电荷提取装置, 研究了红光QLED老化前后的电荷累积行为。对于未经老化的红光QLED, 累积电荷量随着驱动电流逐渐增加, 随后趋于饱和。对于恒流老化后的红光QLED, 亮度在同样驱动电流密度下更低, 而累积电荷量更大。我们发展的QLED电荷累积行为研究方法, 同样也适用于有机发光二极管、钙钛矿发光二极管等, 有望推动对各类发光二极管工作机理的理解。

References

- (1) Nakamura, S.; Mukai, T.; Senoh, M. *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *64*, 1687. doi: 10.1063/1.111832
- (2) Uoyama, H.; Goushi, K.; Shizu, K.; Nomura, H.; Adachi, C. *Nature* **2012**, *492*, 234. doi: 10.1038/nature11687
- (3) Chen, Z. L.; Gao, P.; Liu, Z. F. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2020**, *36*, 1907004. [陈召龙, 高鹏, 刘忠范. 物理化学学报, **2020**, *36*, 1907004.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201907004
- (4) Tan, K. M.; Yan, M. N.; Wang, Y. N.; Xie, L. H.; Qian, Y.; Zhang, H. M.; Huang, W. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2017**, *33*, 1057. [檀康明, 闫敏楠, 王英勇, 解令海, 钱妍, 张宏梅, 黄维. 物理化学学报, **2017**, *33*, 1057.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201702161
- (5) Peng, X. G.; Manna, L.; Yang, W. D.; Wickham, J.; Scher, E.; Kadavanich, A.; Alivisatos, A. P. *Nature* **2000**, *404*, 59. doi: 10.1038/35003535
- (6) Meng, L.; Zhang, M.; Deng, H.; Xu, B.; Wang, H.; Wang, Y.; Jiang, L.; Liu, H. *CCS Chem.* **2020**, *2*, 2194. doi: 10.31635/ccschem.020.202000402
- (7) Zou, G. R. X.; Chen, Z. M.; Li, Z. C.; Yip, H. L. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2021**, *37* (4), 2009002. [邹广锐兴, 陈梓铭, 黎振超, 叶轩立. 物理化学学报, **2021**, *37* (4), 2009002.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009002
- (8) Dai, X.; Deng, Y.; Peng, X.; Jin, Y. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1607022. doi: 10.1002/adma.201607022
- (9) Shirasaki, Y.; Supran, G. J.; Bawendi, M. G.; Bulović, V. *Nat. Photonics* **2013**, *7*, 13. doi: 10.1038/nphoton.2012.328
- (10) Supran, G. J.; Shirasaki, Y.; Song, K. W.; Caruge, J. M.; Kazlas, P. T.; Coe-Sullivan, S.; Andrew, T. L.; Bawendi, M. G.; Bulović, V. *MRS Bull.* **2013**, *38*, 703. doi: 10.1557/mrs.2013.181
- (11) Shen, H.; Gao, Q.; Zhang, Y.; Lin, Y.; Lin, Q.; Li, Z.; Chen, L.; Zeng, Z.; Li, X.; Jia, Y.; *et al.* *Nat. Photonics* **2019**, *13*, 192. doi: 10.1038/s41566-019-0364-z
- (12) Kim, T.; Kim, K. H.; Kim, S.; Choi, S. M.; Jang, H.; Seo, H. K.; Lee, H.; Chung, D. Y.; Jang, E. *Nature* **2020**, *586*, 385. doi: 10.1038/s41586-020-2791-x
- (13) Levermore, P.; Schenk, T.; Tseng, H. R.; Wang, H. J.; Heil, H.; Jatsch, A.; Buchholz, H.; Böhm, E. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **2016**, *47*, 484. doi: 10.1002/sdtp.10714
- (14) Yamada, T.; Akino, N.; Tsubata, Y.; Fukushima, D.; Amamiya, S.; Sekihachi, J. I. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **2017**, *48*, 845. doi: 10.1002/sdtp.11786
- (15) Chen, D.; Chen, D.; Dai, X.; Zhang, Z.; Lin, J.; Deng, Y.; Hao, Y.; Zhang, C.; Zhu, H.; Gao, F.; Jin, Y. *Adv. Mater.* **2020**, *32*, e2006178. doi: 10.1002/adma.202006178
- (16) Li, X.; Lin, Q.; Song, J.; Shen, H.; Zhang, H.; Li, L. S.; Li, X.; Du, Z. *Adv. Opt. Mater.* **2019**, *8*, 1901145. doi: 10.1002/adom.201901145
- (17) Mashford, B. S.; Stevenson, M.; Popovic, Z.; Hamilton, C.; Zhou, Z.; Breen, C.; Steckel, J.; Bulovic, V.; Bawendi, M.; Coe-Sullivan, S.; *et al.* *Nat. Photonics* **2013**, *7*, 407. doi: 10.1038/nphoton.2013.70
- (18) Cho, K. S.; Lee, E. K.; Joo, W. J.; Jang, E.; Kim, T. H.; Lee, S. J.; Kwon, S. J.; Han, J. Y.; Kim, B. K.; Choi, B. L.; *et al.* *Nat. Photonics* **2009**, *3*, 341. doi: 10.1038/nphoton.2009.92
- (19) Chen, S.; Cao, W.; Liu, T.; Tsang, S. W.; Yang, Y.; Yan, X.; Qian, L. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 765. doi: 10.1038/s41467-019-08749-2
- (20) Bozyigit, D.; Yarema, O.; Wood, V. *Adv. Funct. Mater.* **2013**, *23*, 3024. doi: 10.1002/adfm.201203191
- (21) Caruge, J. M.; Halpert, J. E.; Wood, V.; Bulović, V.; Bawendi, M. G. *Nat. Photonics* **2008**, *2*, 247. doi: 10.1038/nphoton.2008.34
- (22) Kwak, J.; Bae, W. K.; Lee, D.; Park, I.; Lim, J.; Park, M.; Cho, H.; Woo, H.; Yoon, D. Y.; Char, K.; *et al.* *Nano Lett.* **2012**, *12*, 2362. doi: 10.1021/nl3003254
- (23) Dai, X.; Zhang, Z.; Jin, Y.; Niu, Y.; Cao, H.; Liang, X.; Chen, L.; Wang, J.; Peng, X. *Nature* **2014**, *515*, 96. doi: 10.1038/nature13829

- (24) So, F.; Kondakov, D. *Adv. Mater.* **2010**, 22, 3762.
doi: 10.1002/adma.200902624
- (25) Chen, S.; Jiang, X.; So, F. *Org. Electron.* **2013**, 14, 2518.
doi: 10.1016/j.orgel.2013.06.023
- (26) Coburn, C.; Forrest, S. R. *Phys. Rev. Appl.* **2017**, 7, 041002.
doi: 10.1103/PhysRevApplied.7.041002
- (27) Cao, W.; Xiang, C.; Yang, Y.; Chen, Q.; Chen, L.; Yan, X.; Qian, L. *Nat. Commun.* **2018**, 9, 2608.
doi: 10.1038/s41467-018-04986-z
- (28) Yang, Y.; Zheng, Y.; Cao, W.; Titov, A.; Hyvonen, J.; Manders, J. R.; Xue, J.; Holloway, P. H.; Qian, L. *Nat. Photonics* **2015**, 9, 259. doi: 10.1038/nphoton.2015.36
- (29) Li, Y. F.; Gao, J.; Yu, G.; Cao, Y.; Heeger, A. J. *Chem. Phys. Lett.* **1998**, 287, 83. doi: 10.1016/S0009-2614(98)00162-6
- (30) Shrotriya, V.; Yang, Y. *J. Appl. Phys.* **2005**, 97, 054504.
doi: 10.1063/1.1857053
- (31) Anikeeva, P. O.; Madigan, C. F.; Halpert, J. E.; Bawendi, M. G.; Bulović, V. *Phys. Rev. B* **2008**, 78, 085434.
doi: 10.1103/PhysRevB.78.085434
- (32) Yao, Z.; Bi, C.; Tian, J. *J. Phys. Chem. C* **2021**, 125, 2299.
doi: 10.1021/acs.jpcc.0c10181