



钙钛矿发光:多学科深度交叉融合

王建浦, 彭其明

引用本文:

王建浦, 彭其明. 钙钛矿发光:多学科深度交叉融合[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1335–1338.

WANG Jian-pu, PENG Qi-ming. Perovskite Luminescence: In-depth Multidisciplinary Integration[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(11): 1335–1338.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200321>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

MA_{0.6}Cs_{0.4}PbBr₃钙钛矿发光二极管瞬态电致发光研究

Investigation on Transient Electroluminescence from Perovskite Light Emitting Diode Based on MA_{0.6} Cs_{0.4} PbBr₃
发光学报. 2019, 40(1): 89–96 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194001.0089>

以硫氰酸亚铜作为空穴注入层的钙钛矿发光器件

Perovskite Light-emitting Devices Based on CuSCN Hole Injection Layer
发光学报. 2019, 40(4): 504–510 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194004.0504>

CsPbBr₃钙钛矿量子点微晶的制备及发光性能

Preparation and Luminescence Properties of CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dot Microcrystals
发光学报. 2019, 40(9): 1073–1078 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1073>

Mn掺杂CsPbCl₃钙钛矿量子点的发光性质

Photoluminescence Properties of Mn Doped CsPbCl₃ Perovskite Quantum Dots
发光学报. 2018, 39(5): 609–614 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183905.0609>

纳米结构氧化镍缓冲层对蓝色有机发光二极管性能的影响

Influence of Nickel Oxide Anode Buffer Nanolayer on Blue Organic Light-emitting Diodes
发光学报. 2017, 38(4): 492–498 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173804.0492>

文章编号: 1000-7032(2020)11-1335-04

钙钛矿发光:多学科深度交叉融合

王建浦*, 彭其明

(南京工业大学 先进材料研究院, 江苏省柔性电子重点实验室, 江苏 南京 211816)

摘要: 现代科学既高度分化又高度融合,多学科交叉极大地推动了科学的进步,不断孕育出新的研究范式和变革性科技。本文基于作者自身的研究经历,以钙钛矿发光器件的构筑和出光结构为切入点,阐述多学科深度交叉融合在钙钛矿发光的发展中所起的推动作用。

关键词: 钙钛矿; 发光二极管; 发光材料; 电致发光; 学科交叉融合

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200321

Perovskite Luminescence: In-depth Multidisciplinary Integration

WANG Jian-pu*, PENG Qi-ming

(Key Laboratory of Flexible Electronics(KLOFE) & Institute of Advanced Materials(IAM), Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

* Corresponding Author, E-mail: iamjpwang@njtech.edu.cn

Abstract: Disciplines of modern science are both highly differentiated and highly integrated. The multidisciplinary integration has greatly promoted the progress of science, results in new research paradigms and transformative technologies. Based on the author's research experience on perovskite light-emitting devices, this paper expounds the role of multidisciplinary integration in promoting the development of perovskite luminescence.

Key words: perovskites; light-emitting diodes; luminescent materials; electroluminescence; multidisciplinary integration

1 引 言

多学科交叉融合是现代科学发展的特征。近现代科学前沿的重大突破和原创性成果的产生,大多是多学科交叉融合的结果。近半数诺贝尔奖成果是基于多学科交叉融合取得的,且这种趋势愈发明显。世界主要大国和知名科学机构普遍高度重视建立学科交叉研究中心,推动多学科交叉融合与发展。我国相关部门近年来也十分重视多学科交叉融合。2018年,教育部、财政部、国家发改委联合印发了《关于高等学校加快“双一流”建设的指导意见》,明确要求大力促进多学科深度

交叉融合,构建协调可持续发展的学科体系,打破传统学科之间的壁垒,在前沿和交叉学科领域培植新的学科生长点。2019年,国家自然科学基金委提出依据科学问题的属性来确定的新时代科学基金资助导向。其中一类即为“共性导向,交叉融通”,旨在以共性科学问题为导向,促进不同学科的交叉融合,使科学基金成为人类知识的倍增器。2020年,教育部发布了《未来技术学院建设指南(试行)》,提到要坚持交叉融合,探索人才培养新模式,探索未来专业交叉融合机制,加大学科交叉融合力度。

金属卤化物钙钛矿是指具有 ABX_3 型晶体结

收稿日期: 2020-10-10; 修订日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(91733302, 61725502, 11804156, 51972171)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(91733302, 61725502, 11804156, 51972171)

构的一类半导体光电材料,通常 A 位置为甲胺等有机阳离子, B 位置为铅、锡等二价金属阳离子, X 位置为溴、碘等卤素阴离子^[1]。这是一类近乎全能的光电材料,其在光伏、发光、光探测、催化等一系列领域都表现出优异的性能^[2]。值得注意的是,作为新兴明星材料,钙钛矿自被研究伊始,就具备典型的多学科深度融合的特征。在其发展历程中,涌现出无数物理、化学、电子、材料、光学、大数据等学科背景的研究者,从不同的角度,不断地加深着我们对这类材料的理解。本文无意详述这一波澜壮阔的发展历程,作为钙钛矿发光的率先研究者之一,笔者仅以钙钛矿发光二极管的器件制备和出光结构为切入点,阐述多学科深度融合在钙钛矿发光的发展中所起的推动作用。

2 PeLED 的器件构筑:物理化学交叉

钙钛矿发光二极管(PeLED)有着与有机发光二极管(OLED)类似的器件结构,都是发光层夹在电子和空穴传输层之间构成三明治结构^[3-4]。事实上,PeLED 的高速发展在一定程度上也得益于从 OLED 研究中借鉴的经验。然而,在器件发光层的构筑上,PeLED 与 OLED 却有着极大的不同。通常,制备 OLED 时物理和化学分工明确。化学家负责材料的合成,一旦材料被制备出来,其性质就基本确定;物理研究者对器件结构的优化(如能级调控等)更多地体现在有机材料的选取和物理参数(膜厚等)的调控上,因为分子之间仅为简单的堆叠,极少发生化学反应。

与有机发光不同,钙钛矿材料的合成与成膜是同时进行的,体现出物理与化学的高度交叉。钙钛矿和功能层以及界面层之间经常发生强化学作用,界面的性质会影响沉积其上的钙钛矿层结晶度、形貌、缺陷性质和能级结构等^[5]。2014 年,笔者团队研究绿光 PeLED 时,发现在电子传输层氧化锌(ZnO)上增加一层有机界面材料(PEIE)后,不仅界面势垒会得到很大改善,而且晶体质量大大提高,缺陷明显变少,钙钛矿层表面也更加平整,薄膜覆盖率更高^[6]。基于此,我们实现了当时最高效率(3.5%)的红光 PeLED 和最大亮度($20\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)的绿光 PeLED。之后研究者发现,ZnO 层可使有机阳离子去质子化从而有效地

促进钙钛矿的结晶——ZnO 上能够形成高质量的钙钛矿膜,而同一前体溶液却未能在 TiO_x 和 SnO_2 上形成钙钛矿膜^[7]。此外,将具有钝化功能的基团(例如路易斯碱/酸基)连接在界面材料上,能够进一步修复钙钛矿的表面缺陷^[8]。

另一个例子是多量子阱(Multiple quantum well)钙钛矿发光器件的制备^[9]。无机 LED 的多量子阱结构是通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)等方式交替沉积具有不同带宽的晶体层,例如 GaN/InGaN,其过程虽然涉及化学反应,但势阱和势垒却是通过物理方式来精确控制。与无机多量子阱 LED 不同,钙钛矿多量子阱的制备过程中物理化学缺一不可。钙钛矿多量子阱通常由金属卤化物八面体无机层(势阱)和大尺寸有机阳离子层(势垒)构成。制备过程中,需要在前驱体中混合大尺寸有机阳离子、小尺寸有机阳离子、二价金属阴离子以及卤素离子,通过调节各成分的比例、溶液的浓度、成膜的时间、退火的温度等条件,从而实现钙钛矿多量子阱的调控,充分体现了物理与化学的学科交叉特征。2016 年,我们提出采用多量子阱钙钛矿构筑 PeLED,使 PeLED 的器件效率首次突破 10% 大关^[9]。

3 PeLED 的出光结构:光与电的融合

对于面发光 LED,例如 OLED,70% ~ 80% 的光子都会以波导模、基底模等模式限制在器件内部,致使器件的耦合出光效率仅为 20% 左右^[10]。为了提升 OLED 的耦合出光效率,人们提出了多种方式。例如,在基底上制备光栅结构或光子晶体结构破坏波导模式和等离激元模式^[11],或在基底上制备微透镜等微结构提取限制在基底模中的光子^[12]。但归根结底,对于 OLED,器件的电学性质和光学性质的优化是各自独立、分开进行的。

钙钛矿器件出光结构的优化却很大程度上体现了光学与电学性质的深度融合。相比于有机半导体,钙钛矿通常具有更高的折射率,使更多的光以波导模式限制在器件内部^[13]。因此通常的看法是,PeLED 的耦合出光效率要比 OLED 更低。然而,研究结果表明,很多时候 PeLED 天然就具备优良的出光结构,从而使其光提取效率远大于预测值。例如,2018 年,我们通过一种简单的低温溶液法,实现了由一层非连续、不规则分布的钙

钛矿晶粒和嵌入在钙钛矿晶粒之间的低折射率有机绝缘层组成的发光层^[14]。这种钙钛矿层具有凹凸起伏的非周期性结构,有效地降低了器件中的光波导模,从而将光提取效率从 20% 左右提高到了 30%。使用该方法制备的 PeLED 外量子效率达到 20.7%。值得注意的是,这种出光结构是在制备钙钛矿层时自发形成的,避免了复杂的光学结构制备工艺,使得器件的电学性能几乎不受影响,并且保留了朗伯体面光源所具有的视角无关电致发光特性。不仅如此,合理选择的绝缘层能够钝化钙钛矿晶粒的表面缺陷,大大提升钙钛矿的荧光量子产率。我们注意到,这一发现随后也得到了同行的广泛验证^[15-16]。以上特征均充

分体现了 PeLED 电学与光学性质的一体性。

4 展 望

现代科学既是高度分化又是高度综合的,学科分化与融合并进,传统学科不断分化出新的分支,而学科交叉研究不断地发展出新的研究领域,重视学科交叉融合将使科学向着更深层次和更高水平发展。从钙钛矿发光的几个方面,我们看到了多学科深度交叉融合如何起到了至关重要的作用,这一作用也必将延伸下去,推动钙钛矿发光发展成真正实用化的技术。我们期待更多研究领域中的多学科深度交叉融合,突破传统思维屏障,孕育出新的科学研究范式和颠覆性的技术创新。

参 考 文 献:

- [1] STRANKS S D, SNAITH H J. Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2015, 10(5):391-402.
- [2] MANSER J S, CHRISTIANS J A, KAMAT P V. Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(21):12956-13008.
- [3] TAN Z K, MOGHADDAM R S, LAI M L, *et al.* Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(9):687-692.
- [4] LIU X-K, XU W, BAI S, *et al.* Metal halide perovskites for light-emitting diodes [J]. *Nat. Mater.*, 2020, DOI:10.1038/s41563-020-0784-7.
- [5] ZHANG L, YANG X, JIANG Q, *et al.* Ultra-bright and highly efficient inorganic based perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8:15640.
- [6] WANG J, WANG N, JIN Y, *et al.* Interfacial control toward efficient and low-voltage perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(14):2311-2316.
- [7] YUAN Z, MIAO Y, HU Z, *et al.* Unveiling the synergistic effect of precursor stoichiometry and interfacial reactions for perovskite light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1):2818.
- [8] YANG X, ZHANG X, DENG J, *et al.* Efficient green light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional composition and phase engineered perovskite with surface passivation [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1):570.
- [9] WANG N, CHENG L, GE R, *et al.* Perovskite light-emitting diodes based on solution-processed self-organized multiple quantum wells [J]. *Nat. Photonics*, 2016, 10(11):699-704.
- [10] REINEKE S, THOMSCHKE M, LÜSSEM B, *et al.* White organic light-emitting diodes: status and perspective [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2013, 85(3):1245-1293.
- [11] BI Y G, FENG J, LI Y F, *et al.* Broadband light extraction from white organic light-emitting devices by employing corrugated metallic electrodes with dual periodicity [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(48):6969-6974.
- [12] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, 459(7244):234-238.
- [13] ZHAO L, LEE K M, ROH K, *et al.* Improved outcoupling efficiency and stability of perovskite light-emitting diodes using thin emitting layers [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31:1805836.
- [14] CAO Y, WANG N, TIAN H, *et al.* Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures [J]. *Nature*, 2018, 562(7726):249-253.
- [15] XU W, HU Q, BAI S, *et al.* Rational molecular passivation for high-performance perovskite light-emitting diodes [J].

Nat. Photonics, 2019, 13:418-424.

- [16] WANG H, KOSASIH F U, YU H, *et al.*. Perovskite-molecule composite thin films for efficient and stable light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1):891.



王建浦(1977-),男,浙江温州人,博士,南京工业大学教授。国家杰出青年科学基金获得者(2017年)、“长江学者”特聘教授(2018年),现任南京工业大学先进材料研究院常务副院长,江苏省柔性电子重点实验室常务副主任,国家自然科学基金重大研究计划集成项目(项目名称:基于维度调控的高性能钙钛矿发光)与国家重点研发计划-中国与欧盟合作项目(项目名称:钙钛矿光电子)负责人。获得江苏省“双创计划”、江苏省杰出青年基金、江苏省特聘教授等人才项目支持。参与创办自然出版集团旗下学术期刊 *npj Flexible Electronics* 并任常务副主编,任中国科协和美国科学促进会联合创办的旗舰学术期刊 *Research* 副主编,以及美国化学会期刊 *Journal of Physical Chemistry Letters* 编委。于2009年获得剑桥大学卡文迪许实验室博士学位,曾在三星电子韩国总部从事有机发光(OLED)显示的研发工作,解决了全色显示面板寿命受限于蓝光器件的问题,发明专利已得到大规模商业应用。目前主要研究兴趣为有机及钙钛矿光电子器件与物理,是国际上钙钛矿LED相关研究的开拓者之一,多次创造钙钛矿LED效率纪录,引领了该领域的发展。成果以第一或通讯作者身份发表在 *Nature*, *Nature Photonics* 等高水平期刊上,并入选2016年度“中国高等学校十大科技进展”、2018年度“中国科学十大进展”30项候选和2019年度“中国光学学会光学科技奖”一等奖。

E-mail: iamjpwang@njtech.edu.cn



彭其明(1987-),男,江西宜春人,博士,南京工业大学副教授,国家优秀青年科学基金获得者(2020年)。2015年于吉林大学获得物理化学博士学位,2015—2016年在深圳市华星光电技术有限公司OLED研发中心担任主任工程师,2017年加入南京工业大学先进材料研究院工作至今。长期致力于有机/钙钛矿光电器件及其物理问题的研究:首次实现了双线态激子发光的OLED,突破了传统有机电致发光理论框架,从源头上解决了三线态激子利用问题;发展了一种利用磁场效应原位研究LED的方法,阐明了器件中的多种物理机制;率先实现了外量子效率超过20%的顶发光钙钛矿LED。近年来,在 *Nature Materials*, *Light: Science & Applications*, *Advanced Materials* 等高水平学术期刊上发表论文40余篇,被引用2000余次,H指数19;参与撰写学术专著3部;以第一发明人获授权美国专利2项、中国专利4项;主持多项国家级和省部级科研项目。

E-mail: iamqmpeng@njtech.edu.cn