

# 基于积分球系统的有机-无机杂化钙钛矿发光 二极管量子转化效率的测量

李婉, 冯州, 苏杭, 张立来, 索鑫磊, 李国龙\*

宁夏大学宁夏光伏材料重点实验室, 宁夏 银川 750021

**摘要** 有机-无机杂化钙钛矿发光二极管 (PeLED) 作为一种新型发光器件, 具有原料来源广、器件制备简单和载流子迁移率高等优点, 使其成为显示与发光领域的研究热点之一。由于 PeLED 存在发光稳定性差和器件均匀发光区域小的缺点, 并且对于 PeLED 量子效率的测试没有统一的测量方法。鉴于此, 提出一种新型的 PeLED 量子转化效率测量系统。首先采用小尺寸积分球并结合光谱测量系统对 PeLED 发射光进行收集, 最终得到其量子转化效率。然后采用 GaN 发光二极管的数据作为标准数据, 并对该系统的中心波长、亮度及辐射亮度进行校准。最后使用该测量系统测量 PeLED 器件的性能。实验结果表明, 当电压为 3.2 V 时, PeLED 的外量子效率最高, 值为 0.089%, 与参考值的误差不超过 6%。

**关键词** 光学设计; 测量; 钙钛矿发光二极管; 外量子效率; 积分球; 光谱仪

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212201

## Quantum Conversion Efficiency Measurement of Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Light-Emitting Diode Based on Integrating Sphere System

Li Wan, Feng Zhou, Su Hang, Zhang Lilai, Suo Xinlei, Li Guolong\*

Key Laboratory of Ningxia for Photovoltaic Materials, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

**Abstract** Organic-inorganic hybrid perovskite light-emitting diodes (PeLEDs) is a new type of light-emitting device, it have many advantages, including a wide range of raw material sources, simple device preparation, and high carrier mobility, making it one of the research hotspot in the field of displays and luminescence. Despite this, PeLEDs do have disadvantages, such as poor luminescence stability and small, uniform luminous areas, and there is no unified measurement method for testing PeLED quantum efficiency. In light of this, we propose a new type of PeLED quantum conversion efficiency measurement system. Using a small-sized integrating sphere combined with a spectrum measurement system to collect the PeLED light emission, the quantum conversion efficiency is determined. Standard GaN light-emitting diode data is used to calibrate the center wavelength, brightness, and radiance of the system. Finally, this system is used to measure the performance of actual PeLED devices. Experimental results show that the PeLED external quantum efficiency is the highest (0.089%) at a voltage of 3.2 V, and the error determined from the reference did not exceed 6%.

**Key words** optical design; measurement; perovskite light-emitting diode; external quantum efficiency; integral sphere; spectrometer

**OCIS codes** 220.4840; 310.6845; 120.3150

## 1 引言

有机-无机杂化钙钛矿材料是一种具有高功率转换效率和长距离平衡空穴电子传输特性的新型

半导体材料, 在照明、显示和激光器等领域具有巨大的应用潜力<sup>[1-4]</sup>。由有机-无机杂化钙钛矿材料制备的钙钛矿发光二极管 (PeLED) 可以高效地将电能转化为光能, 并且兼具无机和有机材料的诸多特

收稿日期: 2020-02-01; 修回日期: 2020-02-23; 录用日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61565015)

\* E-mail: liglo@163.com

性,如具有可以采用溶液法大面积制备、带隙可调、载流子迁移率高和荧光效率高等优点,可以在照明、显示、激光器和光电探测器等方面应用<sup>[5-8]</sup>。对于发光二极管性能的评定,研究者们提出了量子效率这种评价方式。Forrest等<sup>[9]</sup>采用了已校准的光电探测器来测量发光二极管的量子转换效率,将发光器件靠近检测器的表面,可以直接从探测器的光电流中推测出外量子效率(EQE),然而该方法因无法收集到全部发射光,所以EQE的计算结果偏小。较为普遍的发光二极管测试方法是采用大尺寸积分球对光进行测试,但部分PeLED的发射光微弱且不稳定,其发散角为 $2\pi$ 。传统的发光二极管具有亮度高和发射光稳定的特点,所以传统的测试方法并不能有效采集数据,因此对于目前EQE较低的PeLED并不适用。近年来,研究者在提高PeLED性能的同时,提出了测量其量子效率的一些方法<sup>[10-15]</sup>。2014年,英国剑桥大学Friend等<sup>[13]</sup>提出了在室温下工作并发射近红外光和绿光的PeLED,并测量其发射光谱和硅光电二极管的已知光谱响应,根据测得的辐射亮度和亮度可以直接推算器件的EQE。2015年,Song等<sup>[14]</sup>提出了发射蓝光和橙光的PeLED,采用数字源表、亮度计以及分光光度计测得的数据计算得到EQE。2018年,华侨大学魏展画等<sup>[15]</sup>采用了辐射照度计与亮度计测得的数据计算得到发绿光PeLED的EQE。然而,目前还没有统一的且误差较小的方法可以用于测定有机-无机杂化钙钛矿发光二极管的EQE。

鉴于此,针对PeLED这种发光微弱且不稳定的平面发光器件,采用小尺寸积分球并结合高灵敏度光谱测量系统测试其EQE。采用GaN发光二极管标准器件对该系统进行校准,并使用校准公式对采集数据进行修正,实现对EQE的校准。以采用溶液法制备ITO/PEDOT:PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>/TPBi/LiF/Ag的PeLED器件为例,通过测量和计算得到其亮度、电流密度、EQE和电流效率等相关数据,并与参考值进行比对。

## 2 测量原理及系统的构成

### 2.1 测量原理

量子效率分为EQE和内部量子效率(IQE)。对于发光器件来说,EQE是器件在空间上发射的光子总数与注入器件的电子-空穴对数的比值,IQE是器件产生的光子总数(器件自吸收的光子数)与注入器件的电子-空穴对数的比值<sup>[9]</sup>。综上可知,IQE

反映的是由器件自身的电子-空穴形成激子并发生复合以释放光子的数目,探究的是器件内部的物理效应,而EQE则可以直接评判器件对外发光的效率,所以EQE是目前衡量器件性能的重要指标之一。PeLED的光发射面在金属电极的另一侧。钙钛矿发光层中的大部分光可以从透明导电玻璃透过,则从器件内部产生的光强高于人眼所观察到的光强。设器件外某个方向上的光耦合系数为 $\eta_c$ ,因此EQE与IQE可以满足

$$x_{\text{EQE}}(\lambda) = x_{\text{IQE}}(\lambda) \eta_c(\lambda), \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为光的波长。在薄膜发光器件中,由于其结构内发射的光子可以被物质重新吸收<sup>[9,16]</sup>,并在某些情况下发光层的光会以更长的波长重新发射,因此在计算(1)式时会产生误差。此外, $\eta_c$ 随着PeLED驱动电压、视角以及光发射区的位置和宽度的变化而变化,所以在计算时也会出现偏差。对于PeLED来说,将EQE定义为发光器件在单位时间内产生的光子数 $N_{\text{ph}}$ 与单位时间内注入器件的电荷数的比值<sup>[17]</sup>,即

$$x_{\text{EQE}} = \frac{N_{\text{ph}} e}{I_{\text{PeLED}}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $I_{\text{PeLED}}$ 为PeLED在外加电压下通过其本身的电流值; $e$ 为电荷量,值为 $1.6 \times 10^{-19}$  C。 $N_{\text{ph}}$ 为辐射通量 $\Phi_e$ 与平均光子能量 $E_{\text{ave}}$ 的比值,即

$$N_{\text{ph}} = \frac{\Phi_e}{E_{\text{ave}}} = \frac{\Phi_e}{\int F(\lambda) \frac{\lambda}{1240} d\lambda} \times 1.6 \times 10^{-19}, \quad (3)$$

式中: $F(\lambda)$ 为探测器收集到的辐射亮度值。将PeLED假设为朗伯发射体,则 $\Phi_e$ 可表示为

$$\Phi_e = \frac{\pi AL}{K_m \int V(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

式中: $V(\lambda)$ 为光谱光效函数; $K_m$ 为明视觉条件下 $\lambda = 555$  nm的一个常数值,值为683 lm/W; $A$ 为有效发光面积; $L$ 为亮度值。同样,可用电流效率 $\eta_L$ 来衡量器件的发光性能,表达式为

$$\eta_L = \frac{AL}{I_{\text{PeLED}}}. \quad (5)$$

### 2.2 系统的构成

PeLED由透明氧化物电极、金属电极以及有机-无机杂化发光层相互堆叠而成,而每层材料具有不同的折射率,从而形成一个复杂的光学微腔。器件内存在的干涉效应对器件的发光性能会产生影响,

使得 PeLED 的发射光为非理想朗伯发射体,而且强烈依赖于进入人眼的入射角。目前,测量薄膜器件可采用积分光路法,使得发射光通过积分球后呈各向同

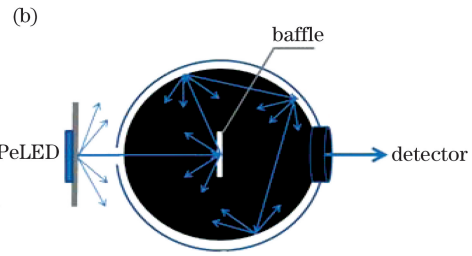
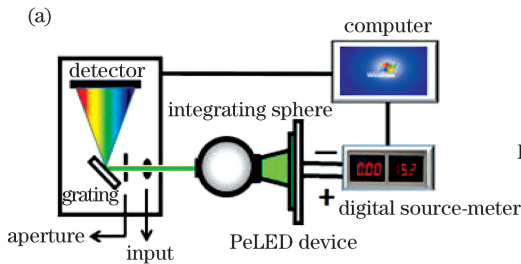


图1 测量系统。(a) EQE 测量系统;(b)积分球测量原理

Fig.1 Measuring system. (a) EQE measurement system; (b) integrating sphere measurement principle

该测量系统包括积分球、型号为 FLAME-S-VIS-NIR-ES 的光谱仪和型号为 WYJ-3020D 的数字源表三个组成单元。该测量系统采用的积分球如图 1(b)所示,其是一个内径为 50 mm 的空心球体,内表面涂有全反射材料,材料为硫酸钡。该测量系统中的积分球主要有两个用途:1)作为光接收器,PeLED 发出的光经过积分球入光口后进入球体,在球体出口处设置一个光探测器,由光探测器输出的光电流与积分球内壁的照度成正比,可以得到进入积分球后的光通量<sup>[18]</sup>;2)作为被均匀照亮的物面,PeLED 发出的光源通过积分球体后,光在其内壁进行多次反射可以形成一个均匀明亮的发光球面,因此可作为被测光学系统中亮度均匀且视场大的物面<sup>[19]</sup>。积分球体内的正中心有一个涂有硫酸钡的挡板,防止光子直接在探测器上照明<sup>[20]</sup>。该系统的光谱测量系统包括入射狭缝、准直镜(凸透镜)、色散元件(光栅)以及聚焦光学系统和探测器。当复合光线进入入射狭缝时,由光学准直镜将其准直成平行光束后穿过光栅,获得不同波长的单色光。不同波长的单色光离开光栅的角度不同,通过聚焦反射镜后成像于出射狭缝,再使用光电转换装置接收不同波长的光。积分球系统对入射光进行匀光后,通过光纤传输至光谱仪来测量光强度。将 PeLED 的出光面紧贴于积分球的入光口,不是放入积分球球体的内部,光在球体的内壁经过多次全反射后从积分球出光口处进入探测器中。待测器件的结构如图 2 所示。从图 2 可以看到,待测器件的有效发光面积为  $2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ,积分球输入端口的面积为  $4.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ,确保有效发光面积远小于积分球输入端口。PeLED 的 EQE 是直接通过测得的光子辐射亮度与亮度值推算出来的<sup>[21]</sup>。

测试过程中存在两个问题:1)测试 PeLED 的

性分布,可以消除入射光的角度影响。鉴于此,积分光路法可以用来测量 PeLED 的 EQE、亮度以及辐射亮度等光度学参数,测量系统如图 1 所示。

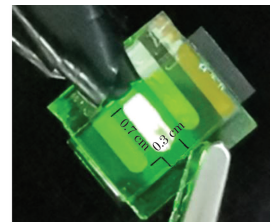


图2 待测器件示意图

Fig.2 Schematic of device under test

发射光谱前校准光谱仪的光谱响应,测量系统中,通过 GaN 发光二极管的标准发射光谱对该系统的测量光谱进行校准;2)消除由 PeLED 背散射造成的光子损耗,测量系统中,采用标准白板紧贴合于 PeLED 背板的方法,可以有效减少由 PeLED 背散射造成的光子损耗。此外,当使用积分球时,应避免 PeLED 器件对发射光的自吸收,这可以采用减少 PeLED 器件尺寸的方法,减少器件自身因素对测量结果的干扰。

### 3 系统的校准

测量过程中,任何一个器件或者系统都不可能是完全的理想反射体或吸收体,因此会产生一系列的误差,系统误差主要是因积分球内自吸收效应、不同光谱仪的光谱响应差异以及背景光的干扰而造成的。为了得到更精准的数据,需引入修正因子对系统整体进行修正校准。选用商用的 GaN 发光二极管作为标准光源,由西安横渠检测科技公司对其进行亮度以及辐射亮度的测量,将测量值作为系统校准的标准值并对测量系统进行校准。

#### 3.1 波长误差的校准

暗室内,将标准光源放入测量系统中,取仪器最小间隔为 1 nm 进行扫描,在量程允许的范围内采集波长,重复采集三次并记录标准光源的峰值波

长。波长相对误差可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{1}{3} \sum \lambda_s - \lambda_i, \quad (6)$$

式中： $\lambda_i$  为测量第  $i$  次的峰值波长； $\lambda_s$  为标准光源的峰值波长。由测量系统得到的 PeLED 波长为  $\lambda_t$ ，则实际的波长  $\lambda_{\text{PeLED}}$  为

$$\lambda_{\text{PeLED}} = \lambda_t + \Delta\lambda. \quad (7)$$

在器件发光的状态下，采集波长与标准波长的对比如表 1 所示。

表 1 采集波长与标准波长的对比

Table 1 Comparison of collected wavelengths and standard wavelengths

Times	$\lambda_i/\text{nm}$	$\lambda_s/\text{nm}$
1	524	
2	524	530
3	524	

利用表 1 的数据并根据 (6) 式，可以计算得到  $\Delta\lambda$  为 6 nm。

### 3.2 亮度误差的校准

将标准光源置于积分球中，接通电路后等到器件发光稳定再测量其亮度，分别测量几组不同偏置电压下的器件亮度，重复三次并记录显示值。亮度相对误差可表示为

$$\Delta L = \frac{1}{3} \sum \frac{L_i - L_s}{L_s} \times 100\%, \quad (8)$$

式中： $L_i$  为测量第  $i$  次的亮度； $L_s$  为标准光源的峰值波长。由测量系统得到的 PeLED 亮度为  $L_t$ ，则实际亮度  $L_{\text{PeLED}}$  可表示为

$$L_{\text{PeLED}} = \frac{L_t}{1 + \Delta L}. \quad (9)$$

当电压为 4 V 时，采集的亮度与标准数据的对比如表 2 所示。

表 2 采集亮度与标准亮度的对比

Table 2 Comparison of collected brightness and standard brightness

Times	$L_i/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$L_s/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$
1	18464.53	
2	18500.11	20770.14
3	18497.52	

利用表 2 的数据并根据 (8) 式，可以得到  $\Delta L$  为  $-11\%$ 。

### 3.3 辐射亮度误差的校准

重复 3.2 节的操作，测量标准光源单波长的辐射亮度，分别测量几组不同偏置电压下的辐射亮度，重复三次并记录显示值。辐射亮度相对误差可表示为

$$\Delta F(\lambda) = \frac{1}{3} \sum F_i(\lambda) - F_s(\lambda), \quad (10)$$

式中： $F_i$  为测量第  $i$  次的辐射亮度； $F_s$  为标准光源的辐射亮度。由测量系统得到的 PeLED 辐射亮度为  $F_t$ ，则实际辐射亮度  $F_{\text{PeLED}}$  可表示为

$$F_{\text{PeLED}}(\lambda) = F_t(\lambda) + \Delta F(\lambda). \quad (11)$$

## 4 结果与讨论

使用搭建的测量系统来测量关于 PeLED 的相关数据，经过误差修正后测得的数据如图 3 所示，同时对数据进行分析。图 3(a) 为 PeLED 的结构。从图 3(a) 可以看到，器件的结构为 ITO/PEDOT:PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>/TPBi/LiF/Ag。当驱动电压分别为 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 V 时，PeLED 器件的电致发光光谱如图 3(b) 所示。从图 3(b) 可以看到，PeLED 器件的发光强度随着电压的变化而变化。

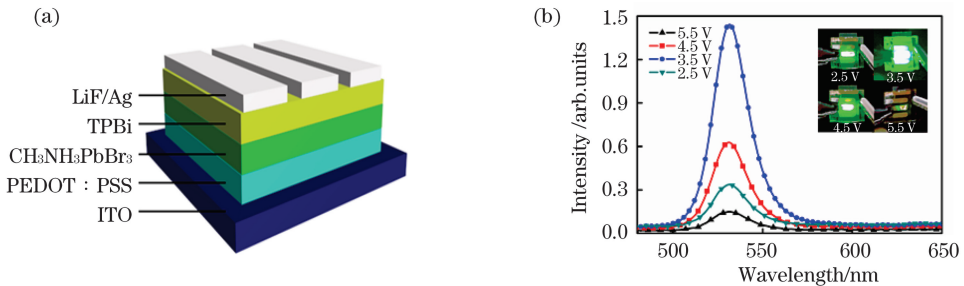


图 3 关于 PeLED 的相关数据。(a) PeLED 结构；(b) 电致发光光谱(插图为 0.7 cm×0.3 cm 的 PeLED 在不同电压下的亮度)  
Fig. 3 Relevant data about PeLED. (a) PeLED structure; (b) electroluminescence spectrum (illustration shows that brightness of 0.7 cm×0.3 cm PeLED under different voltages)

PeLED 与传统的 OLED (Organic Light Emitting Diode) 均属于注入式发光二极管, 即电子和空穴分别从器件的阴极和阳极注入到钙钛矿层(光发射层)中, 在外电场的作用下, 电子和空穴形成激子并在光发射层发生辐射复合而产生光<sup>[22]</sup>。PeLED 的性能表征如图 4 所示。从图 4(a) 可以看到, 当电压在 2.5~3.5 V 之间时, 钙钛矿层中所产生的载流子足以满足器件所需的电流, 经过器件的电流会受到钙钛矿层中载流子的限制<sup>[23]</sup>; 随着注入电流的增加, 亮度随之增长, 当电压为 3.4 V 时, 器件的亮度达到最大, 值为 403 cd/m<sup>2</sup>, 此后亮度逐渐降低, 原因在于随着电压的增大, 钙钛矿发光层中的激子会大量猝灭<sup>[22, 24-25]</sup>; 随着注入电流的增加, PeLED 中钙钛矿层薄膜的致密性差, 晶粒之间存在孔洞, 使钙钛矿层产生泄漏电流, 导致亮度减小。

从图 4(b) 可以看到, 当电压为 3.2 V 时, EQE 达到最大, 值为 0.089%, 随后 EQE 逐渐降低, 这归因于光发射层出现较大的电荷势垒和载流子猝灭<sup>[26]</sup>; 随着驱动电压的增加, 电压应力会加速钙钛矿薄膜产生针孔, 使漏电流增大, 同时电压过高会使钙钛矿材料产生缺陷, 导致 EQE 降低<sup>[27]</sup>。从图 4(c) 可以看到, PeLED 的电流效率最高可达 0.39 cd/A, 这是随着光发射层中空穴和电子密度的增加, 使得载流子复合率提高; 随着电压的增大, 形成的空间电荷阻碍载流子运动, 从而导致电流效率降低。从图 3(b) 和图 4(d) 可以看到, 当电压在 2.5~5.5 V 之间时, PeLED 的发射峰处于 531 nm 和 532 nm, 接近人眼最敏感的 555 nm 波长的绿光, 且波长漂移不超过 2 nm, 而半峰全宽(FWHM)为 20 nm, 这表明 PeLED 的发光色度稳定以及色纯度高。

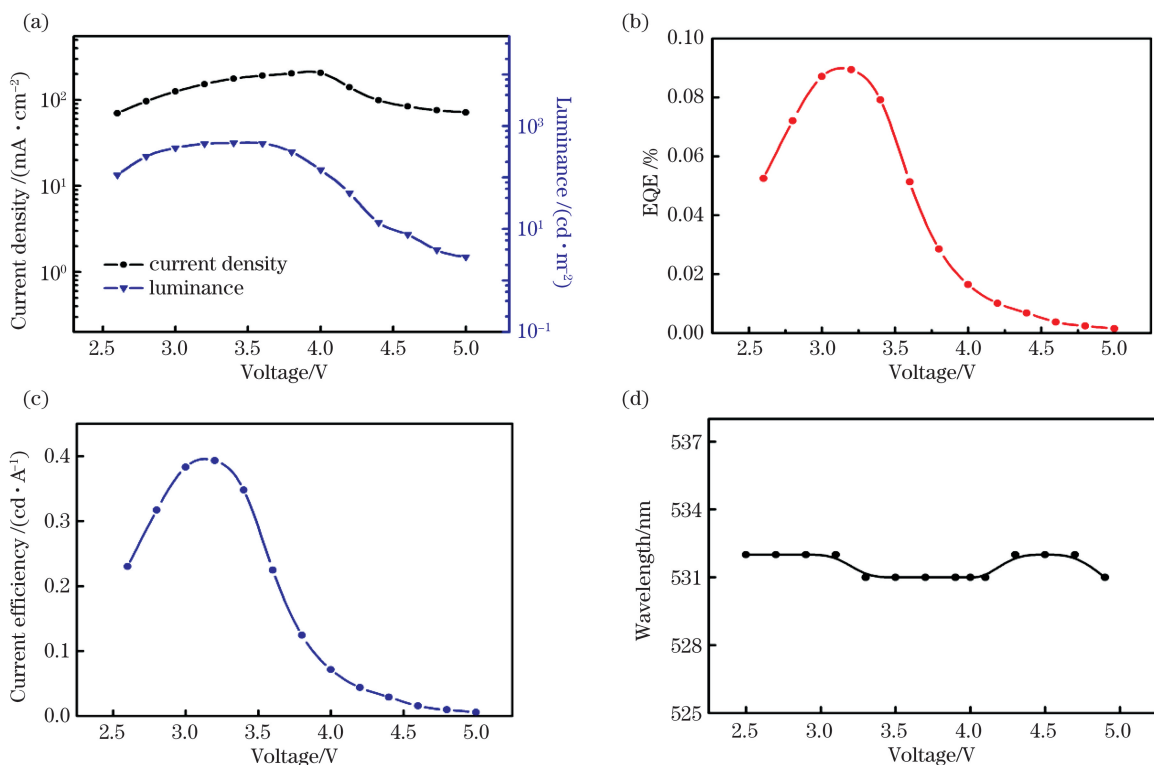


图 4 PeLED 的性能表征。(a) 电流密度和亮度在不同电压下的变化曲线; (b) 不同偏置电压下的 EQE; (c) 电流效率与电压的关系; (d) 中心波长与电压的关系

Fig. 4 Performance characterization of PeLED. (a) Curves of current density and brightness under different voltage; (b) EQE under different bias voltages; (c) relationship between current efficiency and voltage; (d) relationship between center wavelength and voltage

使用测量系统对两个 PeLED 在两个采样电压下的 EQE 与亮度进行测试, 并与参考值(由上海海洋光学检测中心提供)进行对比, 结果如表 3 所示,

其中所列的第一个电压为 PeLED 的开启电压, 第二个电压为 EQE 最高时的电压, 不同的样品具有不同的开启电压与最大亮度。

表3 PeLED测试数据及误差的对比  
Table 3 Comparison of PeLED test datas and errors

Simple	Voltage/V	EQE/%		Error/%	$L/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$		Error/%
		reference	measurement		reference	measurement	
1	2.2	0.0219	0.0230	5.9	1.000	1.089	8.9
	3.2	0.0851	0.0892	4.8	388.086	403.264	3.9
2	2.4	0.0198	0.0211	6.0	1.000	1.077	7.7
	3.4	0.0521	0.0550	5.2	258.790	269.340	4.1

从表3可以看到,样品1在开启电压下,EQE与亮度的相对误差分别为5.9%和8.9%,在电压为3.2V的情况下,EQE与亮度的相对误差分别为4.8%和3.9%;样品2在开启电压下,EQE与亮度的相对误差分别为6.0%和7.7%,在电压为3.4V的情况下,EQE与亮度的相对误差分别为5.2%和4.1%;EQE与参考值的误差不超过6%。通过数据分析可知,不同样品具有不同的开启电压,并且不同样品的EQE最大值对应的电压不同。这是由于器件制备工艺的非均一性造成薄膜样品存在差异,使得样品具有不同的光学各向异性。测试值高于参考值的原因,测量系统中采用标准白板作为光学补偿板并贴合于样品上,从而避免由PeLED背散射光造成的光子损耗。

## 5 结 论

根据PeLED(ITO/PEDOT:PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>/TPBi/LiF/Ag)的发光特性,基于小尺寸积分球并结合光谱测量系统,建立PeLED量子转化效率测量系统,使得发光器件发射的光子数能够有效被高灵敏度光谱仪收集。采用GaN发光二极管作为标准器件,使用校准公式并将系统采集标件的波长、亮度和辐射亮度值进行对比,得到 $\Delta\lambda$ 值为6nm, $\Delta L$ 值为-11%。使用测量系统测量PeLED器件的性能,当电压在2.5~5.5V之间时,PeLED的发射峰处于531nm和532nm,当电压为3.4V时,亮度达到最大,值为403cd/m<sup>2</sup>,当电压为3.2V时,EQE达到最大,值为0.089%,并与参考值进行对比,误差不超过6%。实验结果表明,采用小尺寸积分球并结合光谱测量系统,能够准确测量PeLED发光器件的EQE。

## 参 考 文 献

[1] Lin Q Q, Armin A, Nagiri R C R, et al. Electro-optics of perovskite solar cells[J]. Nature Photonics,

2015, 9(2): 106-112.

- [2] Yuan M J, Quan L N, Comin R, et al. Perovskite energy funnels for efficient light-emitting diodes[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(10): 872-877.
- [3] Saliba M, Matsui T, Domanski K, et al. Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance [J]. Science, 2016, 354(6309): 206-209.
- [4] Zhang M Y, Chen J, Sun L J, et al. Recent advances of rare-earth up-conversion materials doped perovskite solar cells [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 344-350.  
张梦炎, 陈杰, 孙利杰, 等. 稀土元素上转换材料在钙钛矿太阳能电池中应用的研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 344-350.
- [5] Zhu L, Wang N N, Wang J P, et al. Research progress and prospect of perovskite led in China [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(1): 4.  
朱琳, 王娜娜, 王建浦, 等. 我国钙钛矿发光二极管的研究进展与展望 [J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 4.
- [6] Sutherland B R, Sargent E H. Perovskite photonic sources [J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 295-302.
- [7] Smith M D, Connor B A, Karunadasa H I. Tuning the luminescence of layered halide perovskites [J]. Chemical Reviews, 2019, 119(5): 3104-3139.
- [8] Zheng W L, Zhang Y G, Gu Y, et al. Effects of InGaAs/InP interface control on the electrical and optical properties of InGaAs films [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(6): 751-757.  
郑文龙, 张亚光, 顾溢, 等. InGaAs/InP界面控制对InGaAs薄膜电学和光学性质的影响[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(6): 751-757.
- [9] Forrest S R, Bradley D D C, Thompson M E. Measuring the efficiency of organic light-emitting devices [J]. Advanced Materials, 2003, 15(13):

- 1043-1048.
- [10] Liang D, Peng Y L, Fu Y P, et al. Color-pure violet-light-emitting diodes based on layered lead halide perovskite nanoplates[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(7): 6897-6904.
- [11] Li J Q, Bade S G R, Shan X, et al. Single-layer light-emitting diodes using organometal halide perovskite/poly(ethylene oxide) composite thin films [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(35): 5196-5202.
- [12] Ling Y C, Tian Y, Wang X, et al. Enhanced optical and electrical properties of polymer-assisted all-inorganic perovskites for light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(40): 8983-8989.
- [13] Tan Z K, Moghaddam R S, Lai M L, et al. Bright light-emitting diodes based on organometal halide perovskite[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(9): 687-692.
- [14] Song J Z, Li J H, Li X M, et al. Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides ( $\text{CsPbX}_3$ ) [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7162-7167.
- [15] Lin K B, Xing J, Quan L N, et al. Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent[J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 245-248.
- [16] Peng J, He Q, Zhang Y, et al. Calibration and measurement of internal stray radiation in thermal infrared spectrometer system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 621-626.  
彭俊, 何琦, 张营, 等. 热红外光谱仪系统的内部杂散辐射定标与测量技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(5): 621-626.
- [17] Ban M Y, Zou Y T, Rivett J P H, et al. Solution-processed perovskite light emitting diodes with efficiency exceeding 15% through additive-controlled nanostructure tailoring[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3892.
- [18] Liu J, Liu H, Zhao W Q, et al. Impact of distance between detector and LED on measurement of averaged LED intensity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0912001.  
刘建, 刘慧, 赵伟强, 等. 测量距离对发光二极管平均发光强度的影响 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0912001.
- [19] Su D T. *Optical testing techniques* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 38-40.  
苏大图. *光学测试技术* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 38-40.
- [20] Lin F S, Li T C, Huang B Y. Research on the influence of baffle in luminous flux measurement with integrating sphere [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2017, 44(6): 11-14.  
林方盛, 李铁成, 黄必勇. 积分球挡板对光通量测量的影响[J]. *上海计量测试*, 2017, 44(6): 11-14.
- [21] Cao Y, Wang N N, Tian H, et al. Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures [J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 249-253.
- [22] Zhong J, Cheng J B, Chen W B, et al. Study on optical and electronic performance of highly bright green OLED[J]. *Journal of Optoelectronics • laser*, 2006, 17(3): 295-298.  
钟建, 成建波, 陈文彬, 等. 高亮度绿色 OLED 的制备与光电性能研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2006, 17(3): 295-298.
- [23] Halverson F, Brinen J S, Leto J R. Photoluminescence of lanthanide complexes. III. Synergic agent complexes involving extended chromophores[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1964, 41(9): 2752-2760.
- [24] Deng Y L, Liao C J, Liu S H, et al. A theoretic analysis of electrical injection and optical output process in high brightness light emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2002, 23(3): 255-260.  
邓云龙, 廖常俊, 刘颂豪, 等. 高亮度发光二极管中的电注入和光输出过程的理论分析 [J]. *发光学报*, 2002, 23(3): 255-260.
- [25] Li Z Z, Liu W Q, Wu R X, et al. Influence of host material on performances of green organic light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 222302.  
李真真, 刘伟强, 武瑞霞, 等. 主体材料对绿色有机发光二极管性能的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 222302.
- [26] Wei Z H, Yan K Y, Chen H N, et al. Cost-efficient clamping solar cells using candle soot for hole extraction from ambipolar perovskites[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(10): 3326-3333.
- [27] Zhang W J, Zhang Q, Yang L, et al. Improved charge balance of quantum dot light-emitting diodes via Spiro-OMeTAD electron blocking layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0523003.  
张文静, 张芹, 杨亮, 等. 基于 Spiro-OMeTAD 电子阻挡层的量子点发光二极管电荷平衡改善 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0523003.