蓝光 LED 专题·论文

InGaN 蓝光 LED 内量子效率的评测

汪莱*, 邢雨辰, 郝智彪, 罗毅, 孙长征, 韩彦军, 熊兵, 王健, 李洪涛

清华大学电子工程系, 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

*联系人, E-mail: wanglai@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-01-16; 接受日期: 2015-03-12; 网络出版日期: 2015-04-16

国家重点基础研究发展计划(编号: 2011CB301900, 2012CB3155605, 2013CB632804)和国家自然科学基金(批准号: 61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024, 61176059)资助项目

摘要 LED 的内量子效率是评价 LED 性能的重要指标. 本文详细介绍了目前针对 GaN 基 LED 内量子效率的多种评测方法, 包括: 变温光致荧光方法、变激发功率光致荧光方法、变温电致荧光方法、效率-电流曲线拟合方法, 并结合对实际样品的测试结果指出了他们的适用范围和局限性. 其中, 变温光致荧光方法和变激发功率光致荧光方法适用于测量材料的辐射复合效率且在结果上是一致的; 而变温电致荧光方法从原理上就不可靠; 效率-电流曲线拟合方法原理上可靠, 但是依赖对样品参数的假设, 在足够了解样品的基础上可以获得比较准确的结果.

关键词 内量子效率, 发光二极管, 氮化镓, 光致荧光, 电致荧光

PACS: 78.55.Cr, 78.60.Fi, 78.67.De, 81.05.Ea

doi: 10.1360/SSPMA2015-00025

1 引言

自 20 世纪 90 年代初, 日本的科学家发明 InGaN 蓝光发光二极管(LED)后, 世界范围内均掀起了针对 InGaN 蓝光 LED 的研究^[1,2]. 20 年来, LED 的效率不断提升, 应用场合也从最初的指示、显示拓展至照明^[3,4]. 目前最常见的白光 LED 是基于蓝光 LED 芯片和黄色荧光粉组合发出白光. 影响白光 LED 光效的因素包括, 蓝光 LED 芯片的外量子效率(由内量子效率和光提取效率共同决定)、蓝光 LED 芯片的工作电压、黄色荧光粉的转换效率. 一般而言, LED 的光效随注入电流密度先迅速增大到最大值(峰值效率往往是在

5–10 A/cm² 时取得), 而后随着电流密度的进一步增加而逐渐下降, 这一变化是由蓝光 LED 的内量子效率变化引起的^[5]. 以最典型的 40 mil 芯片为例, 350 mA 工作时 LED 的电流密度约 35 A/cm², 此时 LED 的效率已经低于峰值效率 20%–30%. 如果增加芯片尺寸至 80 mil(对应芯片面积增大为 40 mil 的 4 倍), 则刚好使 LED 的工作电流密度处于峰值效率点附近. 目前市场上 40 mil 的 LED 在 350 mA 下光效为 130–140 lm/W, 而 80 mil 的 LED 在 350 mA 下光效可达 180–200 lm/W. 据此估算, 蓝光 LED 的峰值内量子效率在小电流密度下可达 80%–90%.

内量子效率是衡量 LED 芯片性能至关重要的一

引用格式: 汪莱, 邢雨辰, 郝智彪, 等. InGaN 蓝光 LED 内量子效率的评测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 067304

Wang L, Xing Y C, Hao Z B, et al. Evaluation of internal quantum efficiency of blue light emitting-diodes (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 067304, doi: 10.1360/SSPMA2015-00025

个指标, 它是指单位时间内 LED 有源区内产生的光子数和注入到 LED 中的电子-空穴对数之比, 它又可以分为 LED 有源区的辐射复合效率和 LED 的注入效率. 前者是指单位时间内 LED 有源区内产生的光子数和注入到 LED 有源区中的电子-空穴对数之比, 后者则是单位时间内注入到 LED 有源区中和注入到 LED 中的电子-空穴对数之比. 有时也将辐射复合效率称为内量子效率, 为避免混淆, 本文按上述方式定义辐射复合效率和内量子效率. 辐射复合效率取决于有源区中辐射复合和非辐射复合之间的竞争, 它和有源区的晶体质量、结构都密切相关. 缺陷等非辐射复合中心越少, 辐射复合效率就越高; 而双异质结有源区往往比同质结有源区具有更高的辐射复合效率. 注入效率主要取决于有源区对载流子的俘获能力和限制能力, 它既和 LED 的能带结构有关, 也和材料质量有关. 当然, 注入效率和辐射复合效率之间也会互相影响. 例如: 注入效率低时, 有源区中的载流子浓度就低, 而辐射复合效率是和载流子浓度相关的; 而当有源区中载流子复合较慢时, 则会增加载流子逃逸的几率.

由于内量子效率对 LED 的性能举足轻重, 所以对内量子效率的正确评测就显得十分重要. 但是这并不是一件容易的事情. 首先, 对 LED 而言, 实验上可以直接测量的是外量子效率, 它是内量子效率和光提取效率的乘积, 光提取效率无法直接测量而只能通过理论建模仿真来获得. 其次, 内量子效率随着 LED 注入程度不同是在变化的. 第三, 辐射复合效率和注入效率都会影响内量子效率, 且它们各自也都随着注入电流变化. 至今仍然没有一种方法能够绝对准确且系统全面地对内量子效率进行评测, 文献中经常使用的方法, 如变温光致荧光、变温电致荧光、效率-电流曲线拟合等方法, 都只能作为内量子效率评测的参考. 本文将以前研究组实际生长的 InGa_N 多量子阱和 LED 样品为例, 结合本研究组近期的研究工作, 对内量子效率的评测方法进行详细地论述.

2 实验

实验中生长了 InGa_N 多量子阱样品和 LED 样品, 多量子阱样品用于光学测试, 而 LED 样品同时用于光学和电学测试. 样品均采用 Aixtron 2000HT MOCVD 设备在 2 英寸 *c* 面蓝宝石衬底上外延生长获

得. 对于多量子阱样品, 外延过程依次为: (1) 1050°C 氢气清洗衬底 10 min; (2) 520°C 生长 30 nm 厚 GaN 低温缓冲层; (3) 1020°C 生长 4 μm 厚 GaN 体材料; (4) 降温至 740°C 生长 InGa_N/GaN 多量子阱, 阱宽约 2–3 nm, 垒宽约 10–20 nm, 为提高量子阱的辐射复合效率, 在量子阱下方插入 60–90 nm 厚 In_{0.02}GaN_{0.98} 层^[6,7]. 对于 LED 样品, 外延步骤和多量子阱样品类似, 不同之处是在 GaN 体材料中进行浓度约 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 Si 掺杂, 形成 n-GaN, 并且在多量子阱有源区生长完之后继续生长 30 nm 的 p-AlGa_N 电子阻挡层和 150 nm 的 p-GaN 欧姆接触层. 对生长的样品分别标记为 M10(量子阱数目为 10 的多量子阱样品), L10(量子阱数目为 10 的 LED 样品), LC5(不含 InGa_N 插入层量子阱数目为 5 的 LED 样品)和 L5(含有 InGa_N 插入层量子阱数目为 5 的 LED 样品).

对样品进行变温光致荧光测试, 将样品放置于液氮制冷(温度范围为室温至 20 K)冷头中, 激发光源为 50 mW 的 405 nm 半导体激光器以避免激发 GaN 而只激发 InGa_N. 在常温下对样品进行变激发功率光致荧光的测试, 采用同样的激发光源, 加入聚焦透镜使达到样品的光斑面积约 $6.25 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. 对 LED 样品, 除进行光学测试外, 还将外延片加工成 300 μm×300 μm 的芯片, 并对芯片进行变温电致荧光、发光强度-电流等测试.

3 结果与讨论

3.1 变温光致荧光测试

一般地, 辐射复合效率 η_r 可以表示为

$$\eta_r = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}}, \quad (1)$$

其中, τ_r 和 τ_{nr} 分别表示载流子的辐射复合和非辐射复合寿命. 变温光致荧光常用于测试样品的辐射复合效率^[8], 其原理是: 假设在低温下样品的非辐射复合可以忽略(这一假设在大多数情况下是合理的), 即认为低温下的辐射复合效率为 100%, 则用常温和低温下光致荧光的强度之比就是样品的辐射复合效率, 如公式(2)所示:

$$\eta_r(RT) = \frac{I_{PL}(RT)}{I_{PL}(LT)}. \quad (2)$$

值得指出的是, 进行光致荧光测试时, 最好选用

光子能量介于 InGaN 量子阱和 GaN 垒层带隙之间的光源(如 405, 375 nm 激光器)进行激发, 以保证只激发量子阱中的载流子而不激发垒层的载流子. 如采用 325 nm 激光器进行激发, 则 GaN 垒层中也会产生光生载流子, 载流子同时还会弛豫到量子阱中进行复合, 此时载流子的输运以及垒层的晶体质量等因素也会对测试结果造成影响.

另一方面, 根据载流子速率方程, 辐射复合效率还可写成如下的形式:

$$\eta_r = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}, \quad (3)$$

其中, n 为载流子浓度, A, B, C 分别代表肖克莱-里德-霍尔非辐射复合系数、辐射复合系数、俄歇非辐射复合系数. 可以看到, 辐射复合效率和载流子浓度相关, 也就是说随着注入水平的变化, 辐射复合效率也是变化的. 这一点在进行变温光致荧光测试时需要格外注意, 因为不同的测试系统中注入到样品中的载流子浓度不同, 单纯将测得数值进行比较而不考虑测试系统的区别是不严谨的.

图 1 为 M10 和 L10 样品的变温光致荧光谱. 随着温度降低, PL 主峰先蓝移再红移最后又蓝移, 此“S”型变化为 InGaN 量子阱的典型特性^[9]. 低温下 PL 主峰在 450 nm 左右, 其低能端 465 nm 左右的小峰为一级纵光学声子伴线. 通过对比常温和低温的光致荧光积分强度, 可得 M10 和 L10 在此激发强度下的辐射复合效率分别为 51.4% 和 33.2%. M10 和 L10 具有一样的有源区结构, 之所以 L10 相比 M10 效率更低的原因是: L10 是 LED 样品, 生长完有源区后还需生长 p 型区, 而 p 型区的生长温度高于有源区, 同时

p 型掺杂剂 Mg 容易向有源区扩散, InGaN 量子阱的质量在高温和杂质扩散的影响下会发生退化.

3.2 变激发功率光致荧光测试

采用变激发功率光致荧光来测试辐射复合效率的方法是由 Schubert 教授组最先提出的^[10], 后来 Amano 组在研究 AlGaIn/GaN 多量子阱的辐射复合效率时也采用该方法进行了测试^[11]. 和变温光致荧光相比, 变激发功率是在常温下通过改变激发光源的功率, 来测试不同载流子密度下光致荧光的强度, 再按照相应的公式拟合得到计算辐射复合效率的参数. 该方法的优点是可以得到辐射复合效率随载流子浓度变化的规律. 其原理是假设在低激发时(即当 n 较小时), 公式(3)中的俄歇复合项 Cn^3 可忽略, 因此 η_r 可表示为

$$\eta_r = \frac{Bn^2}{An + Bn^2} = \frac{Bn^2}{G}, \quad (4)$$

其中, G 代表单位时间内注入到样品中的载流子浓度. 另一方面, 光致荧光的强度 I 和辐射复合成正比, 通过引入一个固定的系数 β , 可以表示为

$$I = \beta Bn^2. \quad (5)$$

通过激发光的光斑面积、入射角度、反射率和吸收率, 可以计算出 G 和激发光功率 P 之间的关系. 进而通过拟合 $G-I$ 曲线, 可获得 η_r . 具体过程可参见参考文献[10].

图 2 是以该方法测量的样品 M10 和 L10 的辐射复合效率随注入载流子浓度变化的曲线. 可以看到, 和变温光致荧光类似, 多量子阱样品的辐射复合效率比 LED 样品的辐射复合效率要高. 在大注入下(n

图 1 (网络版彩图)M10(a)和 L10(b)的变温光致荧光谱

Figure 1 (Color online) Temperature-dependent photoluminescence spectra of samples M10(a) and L10(b).

图 2 (网络版彩图)采用变激发功率光致荧光方法测得的 M10 和 L10 的辐射复合效率随载流子浓度变化的关系

Figure 2 (Color online) The radiative recombination efficiency of samples M10 and L10 depending on carrier concentration measured by excitation power dependent photoluminescence.

接近 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 量子阱样品的辐射复合效率接近 90%, 这表明外延材料的质量很高. 图 2 中还标出了相同样品采用变温光致荧光测试的结果, 可以看到, 变温光致荧光测得的结果相当于光激发载流子浓度在 $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时的结果, 两个样品符合得很好. 这一结果是合理的, 在变温光致荧光测试中, 由于低温冷头的存在以及未加入聚焦透镜, 使得到达样品表面的光功率密度比变激发功率光致荧光测试时要小得多.

LED 是一个电注入工作的器件, 其内量子效率也受到载流子注入的影响, 采用光致荧光测试, 虽然可以获得样品的辐射复合效率, 但是无法获得注入效率. 而且样品在光致荧光测试时的注入状态和 LED 电注入工作时是不同的, 电注入工作时 LED pn 结的内建电场会被外加电场抵消一部分, 因而通过光致荧光测试得到的辐射复合效率也不能认为和 LED 电注入工作时的辐射复合效率完全一致, 但是可以作为参考来评价有源区的质量.

3.3 变温电致荧光测试

变温电致荧光测试的原理和变温光致荧光测试类似. 在变温光致荧光测试中, 由于载流子在有源区本地激发且通常光生载流子浓度不高, 因此可以忽略掉载流子的泄漏, 认为注入效率为 100%, 这样测试得到的即为辐射复合效率. 而在变温电致荧光测试中, 由于 LED 采用电注入发光的方式, 因而最终

发光强度既受到辐射复合效率的影响, 也受到注入效率的影响, 且他们都会随着注入电流的大小和温度变化. 因此, 利用变温电致荧光进行测试时, 往往需要作如下假设: 假设低温下外量子效率取最大值时, 注入效率和辐射复合效率均近似为 100%. 则用常温下测得的外量子效率除以低温下的峰值外量子效率即为常温下的内量子效率(辐射复合效率和注入效率之积).

上述假设中, 认为低温下辐射复合效率近似 100% 在大多数情况下是合理的, 随着温度的降低, 非辐射复合变弱, 低温下可以忽略. 但是最近也有研究表明, 对于一些缺陷行为特殊的样品, 其低温下的非辐射复合过程随温度的变化不再是简单的热激活关系, 从而导致 4–10 K 低温下非辐射复合不可忽略^[12,13]. 另一方面, 上述假设中认为注入效率也近似 100% 在大多数情况下都不合理. 这是因为随着温度降低, 热激活的载流子浓度变低, 尤其是空穴浓度变低, 电子和空穴注入的不对等会越发严重, 导致注入效率也会下降. 因此, 通常观察到的电致荧光峰值外量子效率随温度降低先增大再减小, 最大值往往在 100–200 K 范围内取得. 其增大主要是由于辐射复合效率的提高; 而减小则主要是由于注入效率的降低. 如图 3 所示, 是样品 L10 在不同温度下的电致荧光效率随注入电流变化的曲线. 可以看到, 随着温度的降低, 峰值效率先增大再减小, 160 K 时峰值效率最高, 这表明 300–160 K 区间中峰值效率的增大主要归因于辐射复合效率的提高, 而 160 K 以下时, 注入效率的降低占主导作用, 使得峰值效率下降了. 与此同时, 随着温度的降低, 峰值效率对应的电流值也伴随着不断减小. 这正是由于低温下, 空穴的注入受到影响, 电子泄漏到 p 区复合的比例增加, 从而使得量子效率的下降在更小的电流下就提前发生. 综上, 在变温电致荧光测试中假设低温下注入效率为 100% 是不正确的. 基于这一点, 采用变温电致荧光进行内量子效率的测试也是缺乏说服力的.

3.4 效率-电流曲线拟合

效率-电流曲线拟合的方法也是基于载流子速率方程. 一般地, LED 的外量子效率可以写为

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extr}} = \eta_{\text{inj}} \eta_r \eta_{\text{extr}} = \eta_{\text{inj}} \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \eta_{\text{extr}}, \quad (6)$$

其中, η_{ext} , η_{int} , η_{inj} , η_{extr} 分别代表外量子效率、内量子

图 3 (网络版彩图)不同温度下测得的 L10 外量子效率随注入电流的变化

Figure 3 (Color online) The external quantum efficiency of sample L10 depending on injection current under different temperatures.

效率、注入效率和光提取效率. 实验中, 通过测试 LED 的光功率、光波长随注入电流的变化, 可以很容易获得 LED 的外量子效率随注入电流的变化. 一般地, 认为光提取效率不随注入电流变化, 外量子效率的变化主要是由内量子效率的变化引起的.

Shim 等人^[14]假设注入效率近似为 100%, 且不随注入电流变化, 则内量子效率的变化是由辐射复合效率引起的. A , B , C 三个参数的大小决定了效率-电流曲线的样子. 通过拟合实验曲线, 可以获得辐射复合效率, 也即内量子效率. 通过这一方法获得的 C 远远大于实验值, 这意味着大电流下除了俄歇复合可能还有其他载流子非辐射复合的机制. 然而这一方法的前提假设——注入效率近似为 1 且不随注入电流变化, 实际中很难做到. 有研究表明, 注入效率的下降也是导致内量子效率随着注入电流的降低的重要原因. 除此以外, 也有研究表明大注入下 InGaN 中的载流子会发生退局域化效应^[15], 这也有可能造成 LED 辐射复合效率下降. 一般认为, 在小注入条件下, 载流子主要集中在低势能的局域化区域, 此区域非辐射复合中心少, 因此对量子阱而言总体的辐射复合效率较高; 但是随着注入的增大, 当局域化区域逐渐被载流子占据饱和以后, 载流子在非局域化区域的占据比例会逐渐提升, 而非局域化区域的非辐射复合中心较多, 量子阱总体的辐射复合效率也就下降了. 这一过程就是载流子的退局域化. 退局域化效应会导

致速率方程中的 A 和 B 系数随载流子浓度变化.

可以看到, 上述 Shim 等人^[14]的方法无法区分注入效率和辐射复合效率各自随注入电流的变化, 归根结底是载流子速率方程的模型偏简单, 没有考虑注入效率和载流子浓度之间的关系, 以及载流子的退局域化. 针对这一情况, 本研究组改进了载流子速率模型, 引入载流子的逃逸寿命来建立注入效率和载流子浓度之间的关系, 并利用随载流子浓度动态变化的 A , B 系数描述载流子的退局域化效应^[16,17].

在之前的研究中, 发现含有 InGaN 插入层的样品 L5 比不含 InGaN 插入层的常规样品 LC5 的载流子局域化程度更高^[18]. 根据上述改进的模型, 对样品 L5 和 LC5 的效率-电流曲线进行了对比测试和拟合, 得到了注入效率和辐射复合效率各自随注入电流变化的规律, 如图 4 所示. 根据这一结果, 发现两个样品的注入效率的降低是内量子效率在大电流下下降的主因. 对于载流子局域化程度较高的样品, 在效率下降的初始阶段还可以观察到载流子退局域化引起的辐射复合效率降低的过程.

值得指出的是, 这种根据理论模型对实验曲线进行拟合从而获得相关参数的方法必须建立在对实验样品的足够了解之上. 模型中的载流子迁移率、极化电场强度等需要根据经验预设. 另一方面, 尽管拟合的参数较多, 但是针对一组结构完全相似, 仅局部存在差异的样品, 可以预设他们大部分物理参数一致仅区分受到局部差异影响的参数, 这样拟合得到的结果会更准确.

4 结论与展望

综上所述, 内量子效率是表征 LED 性能重要参数之一, 对内量子效率的准确评价是深入理解 LED 大注入下量子效率下降的物理根源的基础. 然而, 目前仍然缺乏普遍适用的全面系统的 LED 内量子效率评测方法. 常用的方法都存在一些局限性, 如变温光致荧光、变激发功率光致荧光等光学方法只能评测材料的辐射复合效率; 根据理论仿真的光提取效率和实际测得的外量子效率来推算内量子效率, 光提取效率的准确性很难被证明, 同时不能分别获得辐射复合效率和注入效率; 变温电致荧光从原理上就不正确; 效率-电流曲线拟合方法看上去是最全面系统的评测手段, 但必须依赖准确的物理模型和物理参

图 4 (网络版彩图)利用改进的速率方程模型从实验曲线中拟合得到 LED 样品(a)LC5 和(b)L5 的内量子效率、注入效率和辐射复合效率. (a) 不含 InGaN 插入层的 LC5, 载流子局域化程度较弱; (b) 含有 InGaN 插入层的 L5, 载流子局域化程度较强

Figure 4 (Color online) Obtaining the internal quantum efficiency, injection efficiency and radiative recombination efficiency of LED samples LC5 (a) and L5 (b) through fitting of efficiency-current curves by the improved the carrier rate equation model. (a) LC5, without InGaN interlayer, weaker degree of carrier localization; (b) L5, with InGaN interlayer, stronger degree of carrier localization.

数, 现阶段氮化物半导体的一些物理参数还十分依赖材料质量, 因此要获得可信的结果还需对器件有充分的了解. 此外, 值得指出的是 LED 的载流子寿命也

是评价内量子效率的重要参数之一, 针对电注入下 LED 的载流子寿命进行评测, 并将载流子寿命引入效率-电流曲线的分析中, 有可能获得更准确的结果.

参考文献

- 1 Akasaki I, Amano H, Kito M, et al. Photoluminescence of Mg-doped p-type GaN and electroluminescence of GaN p-n-junction LED. *J Luminescence*, 1991, 48-49: 666-670
- 2 Nakamura S, Mukai T, Senoh M. High-power GaN p-n-junction blue-light-emitting diodes. *Jpn J Appl Phys Part 2-Lett*, 1991, 30: L1998-L2001
- 3 Ponce F A, Bour D P. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices. *Nature*, 1997, 386: 351-359
- 4 Nakamura S. III-V nitride based light-emitting devices. *Solid State Commun*, 1997, 102: 237-243, 245-248
- 5 Cho J, Schubert E F, Kim J K. Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures. *Laser Photonics Rev*, 2013, 7: 408-421
- 6 Wang J X, Wang L, Zhao W, et al. Study on internal quantum efficiency of blue InGaN multiple-quantum-well with an InGaN underneath layer. *Sci China-Tech Sci*, 2010, 53: 306-308
- 7 Wang L, Wang J X, Zhao W, et al. Effects of InGaN barriers with low indium content on internal quantum efficiency of blue InGaN multiple quantum wells. *Chin Phys B*, 2010, 19: 076803
- 8 Lahmann S, Hitzel F, Rossow U, et al. Analysis of quantum efficiency of high brightness GaInN/GaN quantum wells. *Phys Status Solidi C*, 2003, 0: 2202-2205
- 9 Cho Y H, Gainer G H, Fischer A J, et al. "S-shaped" temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 1370-1372
- 10 Dai Q, Schubert M F, Kim M H, et al. Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 111109
- 11 Ban K, Yamamoto J, Takeda K, et al. Internal quantum efficiency of whole-composition-range AlGaIn multiquantum wells. *Appl Phys Express*, 2011, 4: 052101
- 12 Ji X L, Ma J, Wei X C, et al. Investigation into low-temperature photoluminescence internal quantum efficiency and defect-recombination in InGaN light-emitting diodes. *Phys Status Solidi C*, 2014, 11: 718-721
- 13 Ma J, Ji X L, Wang G H, et al. Anomalous temperature dependence of photoluminescence in self-assembled InGaN quantum dots. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 131101

- 14 Ryu H Y, Kim H S, Shim J I. Rate equation analysis of efficiency droop in InGaN light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 081114
- 15 Hader J, Moloney J V, Koch S W. Density-activated defect recombination as a possible explanation for the efficiency droop in GaN-based diodes. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 221106
- 16 Wang L, Wang J X, Hao Z B, et al. Efficiency droop effect mechanism in an InGaN/GaN blue MQW LED. *Chin Phys Lett*, 28: 118105
- 17 Wang J X, Wang L, Wang L, et al. An improved carrier rate model to evaluate internal quantum efficiency and analyze efficiency droop origin of InGaN based light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2012, 112: 023107
- 18 Wang J X, Wang L, Zhao W, et al. Understanding efficiency droop effect in InGaN/GaN multiple-quantum-well blue light-emitting diodes with different degree of carrier localization. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 201112

Evaluation of internal quantum efficiency of blue light emitting-diodes

WANG Lai^{*}, XING YuChen, HAO ZhiBiao, LUO Yi, SUN ChangZheng, HAN YanJun,
XIONG Bing, WANG Jian & LI HongTao

*Tsinghua National Laboratory on Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China*

The internal quantum efficiency (IQE) is one of the most important indexes to evaluate the performance of light emitting-diodes. This paper introduced several evaluation methods of IQE widely used in current research, including temperature-dependent photoluminescence (TDPL), excitation power dependent photoluminescence (EDPL), temperature dependent electroluminescence (TDEL), and fitting of efficiency-current curve. In addition, the application range and limit of these methods were also discussed based on the measurement results of practical samples. TDPL and EDPL apply to measurement of radiative recombination efficiency, and their results are consistent. The principle of TDEL is not reliable. Fitting of efficiency-current curve is reliable in principle, but it depends on the assumed parameters of samples. The believable results can be obtained based on the sufficient understanding on samples.

internal quantum efficiency, light-emitting diode, GaN, photoluminescence, electroluminescence

PACS: 78.55.Cr, 78.60.Fi, 78.67.De, 81.05.Ea

doi: 10.1360/SSPMA2015-00025