

# InGaN 蓝光 LED 的发射光谱、色品质与正向电流的关系

刘行仁<sup>1</sup> 郭光华<sup>1</sup> 林秀华<sup>2</sup>

(1. 福建省苍乐电子企业有限公司, 福州 350007; 2. 厦门大学物理系, 厦门 361005)

**摘要:** 测量了 InGaN 蓝色发光二极管 (LED) 在不同正向电流  $I_F$  驱动下的发射光谱、色品坐标、光通量、光效等性质的变化。探讨了它们与  $I_F$  的依赖关系。结果表明, 发射光谱和峰值波长  $\lambda_p$  随电流  $I_F$  从 5mA ~ 20mA 增加, 发生蓝移, 当  $I_F$  大于 25mA 直到 50mA 后,  $\lambda_p$  又逐渐红移, 光谱的半高宽 (FWHM) 和色坐标  $x$  和  $y$  值也发生变化, 光通量呈亚线性增加, 而光效下降。解析随  $I_F$  增加, 影响蓝光 LED 性能的因素是多方面的。此外, 还发现 EL 光谱中有弱的紫外光辐射。

**关键词:** 蓝色 LED; InGaN; 发射光谱; 色品质

## Driving Current Dependence of Emission Spectra and Spectro-color Characteristics of InGaN Based LEDs

Liu Xingren Guo Guanghua

(Joinluck Electronic Enterprise Co. Ltd., Fuzhou 350007)

Liu Xiuhua

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005)

### Abstract

The emission spectra, chromaticity coordinates, luminous flux and luminous efficacy of the InGaN-based blue LEDs have been measured. The results indicated that as driving current increases range from 5mA to 20mA, the spectrum morphologies and the peak wavelength  $\lambda_p$  have slightly shifted toward short-wavelength (blue-shift) and luminous flux has enhanced due to radiation recombination of the D-A pairs localized energy state in the InGaN well layer. When continually increasing forward current, a slowly red-shift of the emitting peak wavelength  $\lambda_p$  and reduction of the luminous efficiency have been observed due to the temperature dependence of band-gap energy. On the other hand, the weak UV radiation peak about 358nm of the blue LEDs under a forward current of 20 mA has also been observed.

**Key words:** Blue-LED; InGaN emission spectrum; chromaticity coordinate

## 1 引言

上世纪九十年代, InGaN 蓝光材料研究深入与 LED 技术上的突破及实现产业化, 成为光电子、照明工程和信息显示等科技领域中的一大成就<sup>[1,2]</sup>。特别是高效 InGaN 蓝光 LED 的发展, 导致半导体固体

照明新光源—白光发光二极管 (LEDs) 的崛起。这种以 InGaN 蓝光和近紫外光 LED 芯片与荧光体有机组合的白光 LED 有许多优点, 它有显著的节能前景、庞大的市场及经济效益, 颇受人们的重视与青睐, 有望发展成为第四代新照明光源。

发展白光 LED 有多种技术方案, 其中以发蓝光的 InGaN 半导体芯片和荧光体 (如发黄光的 YAG:

Ce 体系) 组合方案是目前国际上的主导方案, 它们已在一些特殊照明领域中广为应用。显然在这种作为新一代照明光源的白光 LED 中, 使用的蓝光 InGaN 芯片是关键。人们必须以照明光源的要求, 深入认识这类 InGaN 蓝芯片的 EL 光谱, 色品质及光电特性的变化规律, 以便更好地利用这些特性, 设计出性能优良的白光 LED。然而, 迄今缺少对 InGaN 蓝光 LED 上述特性及其变化规律的报导和认识。

本文着重报告了不同正向电流 ( $I_F$ ) 驱动对 InGaN 蓝光 LED 的发射光谱、发射峰和半高宽 (FWHM)、色品坐标  $x$  和  $y$  值、光通和光效等重要参数的影响及其变化规律。探究这些特性变化的原因, 分析不同芯片的光电性能变化, 这些揭示和了解对提高蓝芯片质量及设计白光 LED 是有益的。

## 2 实验

### 2.1 样品

本实验的 InGaN 蓝芯片样品有国产的和海外引进的多家不同等级的 InGaN 蓝光 LED 芯片。它们的发射峰值分为 450 ~ 460nm、460 ~ 465nm 及 465 ~ 470nm 三个波段; 光强一般在 40mcd 以上, 蓝芯片的尺寸大多为 320 × 320 $\mu$ m 左右, 也有 390 × 390 $\mu$ m。采用传统封装工艺, 用透明环氧树脂封装成常规  $\phi$ 5mm 子弹型蓝光 LED。

### 2.2 测试

使用浙大三色仪器有限公司生产的型号为 SPR-920D 型光谱辐射分析仪分别对发射光谱、色品质以及电学特性进行测试记录。该仪器配有一个 0.5 米的积分球及 0 ~ 200mA 量程的直流恒流电源。改变正向电流进行测试, 在保证  $I_F$  输出时, 正向电压  $V_F$  自动调节。所有实验均在室温下进行。

## 3 结果和讨论

### 3.1 EL 发射光谱

图 1 和图 2 分别给出不同厂家生产的 InGaN 蓝芯片制作的蓝光 LED 在 5、20、50、70 和 90mA 的正向电流下的 EL 发射光谱, 光谱呈现高斯分布。两种蓝光 LED 在  $I_F = 20$ mA 下, 发射纯蓝光, 1 号样品 (图 1) 发射峰为 455.2nm, 2 号样品 (图 2) 发射峰为 462.5nm。它们和发黄光的 (Y, Gd)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:

Ce 稀土石榴石荧光体的激发光谱很匹配。由图 1 和图 2 可知, 随着  $I_F$  增加, 发射光谱谱形和发射峰发生变化。和 5mA 电流驱动下的发射光谱相比, 10、15、20mA 下的 EL 发射光谱和发射峰向短波侧移动 (蓝移), 光谱长波侧移动很小。随  $I_F$  增加, 发射峰和发射光谱又慢慢地向长波移动 (红移)。更大  $I_F$  电流时, 光谱和发射峰显著地红移, 半高宽 (FWHM) 明显宽化。实验结果表明不同厂家蓝芯片制作的蓝光 LED, 皆获得上述相同的结果, 只是光谱宽化和发射峰位移程度不同而已。

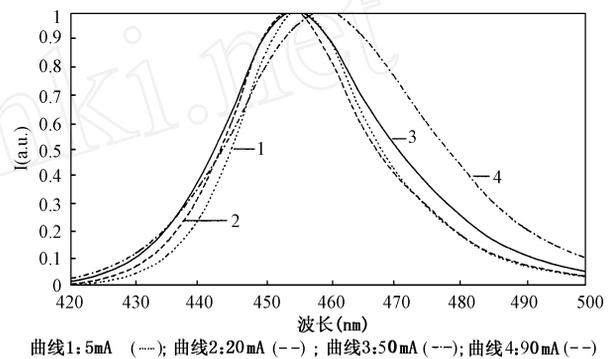


图 1 1 号样品

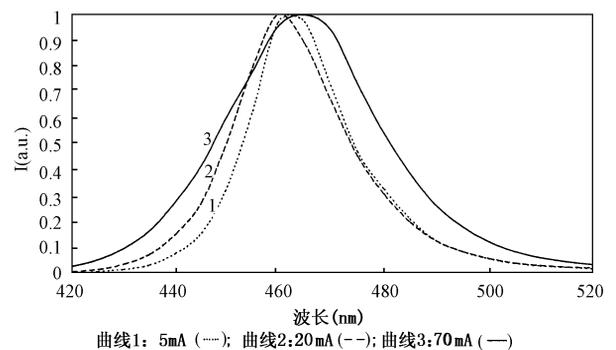


图 2 2 号样品

测量几种蓝光 LED 样品的发射峰  $\lambda_p$  随  $I_F$  的变化规律, 发现先蓝移, 后又红移。当  $I_F$  为 5mA 时,  $\lambda_p$  较长。随  $I_F$  的增加,  $\lambda_p$  逐渐减小, 发生蓝移; 当  $I_F$  增加到某一定值  $I_F(T)$  后,  $\lambda_p$  逐渐增加, 发生红移。4 个 LED 样品的  $\lambda_p$  高宽与  $I_F$  关系分别表示在图 3 和图 4 中。实验发现, 1 号样品和 2 号样品  $\lambda_p$  变化的转折发生在  $I_F(T)$  为 25 ~ 30mA 的区间 (见图 3), 而 3 号和 4 号样品是在  $I_F(T)$  为 50mA 左右 (见图 4)。前者多发生在发射峰较短的 LED 中。这种差异可能与 InGaN 蓝芯片制造工艺、活性层中掺

杂质控制、芯片尺寸及承受的负载等有关。

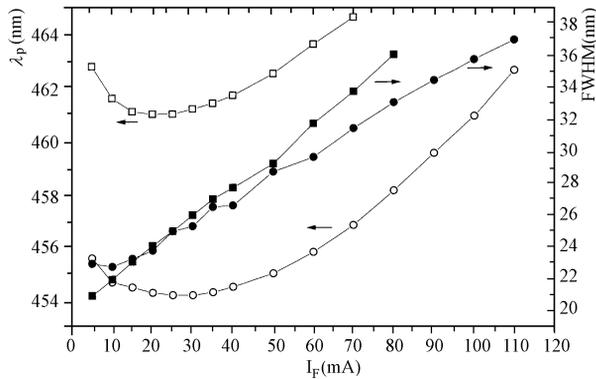


图3 蓝光LED的发射峰 ( $\lambda_p$ ) 和半高宽 (FWHM) 与正向电流  $I_F$  的关系

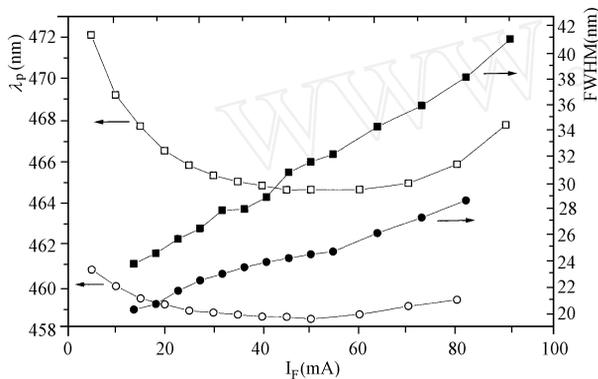


图4 蓝光LED峰值波长、带宽与正向电流  $I_F$  的关系

早期 Nakamuka 报导<sup>[1]</sup>, 在 10~40mA 的  $I_F$  工作下, InGaN/AlGaIn DH 蓝光 LED 的 EL 的发射峰和光谱的半高宽基本是不变的, 且半高宽高达 70nm。后来对 InGaIn 单量子阱结构的蓝光 LED 研究<sup>[3]</sup>, 指出其发射光谱随正向电流增加 (0.1~20mA) 出现蓝移。他认为在 InGaIn 阶层中, In 成份的波动可能形成深的定域态 (290meV), 该深的定域态的能带填充作用, 使光谱中出现蓝移。至于  $I_F > 20\text{mA}$  以上工作时的光谱变化, 他们没有报告。本试验中所观测到当  $I_F > 25\text{mA}$  或 50mA 后, 光谱的发射峰和谱带逐渐向长波移动, 即出现红移。众所周知, 随着  $I_F$  增加, LED 的功耗增大势必导致结温升高。基于 MOCVD 生长的 InGaIn 蓝色 LED 芯片, 其中有一薄层乃是靠掺 Zn, Mg 形成的 P 型活性层 InGaIn, 厚度仅 50nm。当发生载流子注入时, 电子与注入在此活性层借助 Mg 复合中心发生复合辐射光子。此发光机理可用 D-A 对复合机制解析。由施主-受主 (D-

A) 对复合理论可知, 光学跃迁的光子能量  $h\nu$  可表示为<sup>[4]</sup>

$$h\nu = (E_g - E_D + E_A) + e^2/4\pi\epsilon_0 R$$

式中  $E_g$  为禁带宽度,  $E_D$  和  $E_A$  分别为施主和受主的结合能,  $\epsilon_0$  为介电系数,  $R$  代表 d-A 对之间的距离,  $e^2/4\pi\epsilon_0 R$  为库仑能, 与  $R$  有关。大电流 ( $I_F > 30\text{mA}$ ) 驱动下, 功耗增大 PN 结温难免上升, 由于禁带宽度  $E_g$  随温度升高而变小,  $h\nu$  光子能量随之减少。另一方面, 大电流下, 载流子注入使 D-A 对俘获的电子-空穴对增加, D-A 对能级逐渐变宽。D-A 对间距离  $R$  增大, 辐射复合光子能量亦将减少, 导致 LED 的发射波长随温度上升向长波移动 (红移)。温度增加, 半导体 LED 的发射光谱红移现象在 UV、绿色和红色 LED 中均有呈现<sup>[5]</sup>。当 LED 的工作和环境温度保持在室温时,  $I_F$  增加到 150mA 以上时, InGaIn 蓝色 LED 的发射光谱还表现为蓝移<sup>[6]</sup>。

对于光谱半高宽度随  $I_F$  的变化可用位形坐标模型来诠释。由位形坐标模型可知<sup>[4]</sup>, 位形差  $(Ae_m)^2$   $KT$ ,  $T$  为温度, 而光谱半高宽  $w_{em}$ 。因此

$$W(FWHM) \propto T^{1/2}$$

即随温度  $T$  的增加, 光谱的半高宽将逐渐展宽, 这与本实验结果是一致的。

### 3.2 色品坐标 $x$ 和 $y$ 值

为了考察 InGaIn 蓝光 LED 在不同的  $I_F$  驱动下, 发射光谱、 $\lambda_p$  和光谱的半高宽发生变化, 而导致色品坐标  $x$  和  $y$  值发生变化, 分别对 1 号和 2 号蓝光 LED 样品在不同  $I_F$  驱动下, 测量并记录了发射蓝光的  $x$  和  $y$  值的变化曲线并显示在图 5 中。显然两种芯片产地不同的蓝光 LED 的色品坐标  $x$  和  $y$  值随  $I_F$

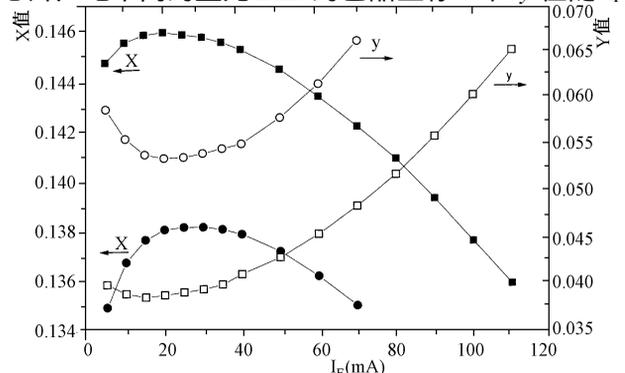


图5 蓝光LED的色坐标  $x$ 、 $y$  值与正向电流  $I_F$  的关系

的变化规律是相同的, 即最初  $x$  值随  $I_F$  增加而增加,  $I_F$  增加到 20~25mA 后,  $x$  值逐渐下降; 而  $y$  值的变化是相反的。 $x$  和  $y$  值的变化导致人们不希望的 LED 发生色漂移。至于 3 号和 4 号 LED 样品, 也具有类似的结果, 只是  $I_F(T)$  发生在 50mA 附近。色品坐标  $x$  和  $y$  值以  $p$  值发生变化的  $I_F(T)$  值是一致的。色品坐标的变化取决于发射光谱的位移以及  $I_F$  的依赖关系。

### 3.3 光通量和光效

在图 6 中分别表示出 1 号和 2 号蓝光 LED 样品的光通量  $\phi$  (lm) 和光效 (lm/w) 与施加的正向电流的依赖关系。由图可知, 随着  $I_F$  增加, LED 的光通呈亚线性增加, 最后趋向饱和, 而光效却逐渐下降。在所有实验的蓝光 LED 均展现类似的结果。1994 年 Nakamura 的实验也指出<sup>[1]</sup>, 蓝光 LED 的输出功率 (mw) 随  $I_F = 0 \sim 40$ mA 呈亚线性关系。

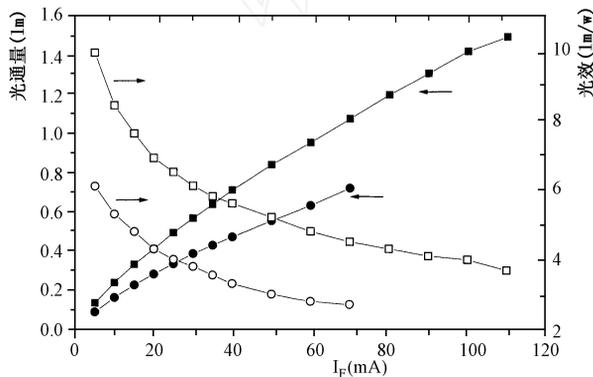


图 6 蓝光 LED 光通量、光效与正向电流  $I_F$  的关系

具有直接带隙半导体 InGaN 内电子—空穴复合主要产生辐射复合—蓝光子发射。复合产生的光子数同注入的电子—空穴对数量成正比。对于较小的正向电流, 其它一些作用, 如陷阱, 无辐射及结温等不利因素影响很小; 随着注入电流增加, 电子—空穴对数量增多并充分复合, 复合效率高, 蓝光发射光强度增强, 故光通  $\phi$  随之呈斜率较大地亚线性增大。随  $I_F$  增加, 亚线性斜率变小, 这可能是 LED 中无辐射成份逐渐上升为主要矛盾, 陷阱和有害中心作用逐渐显露和增强。此时结温、热耗也相当高, 致使蓝光光通 (光强) 增强变缓。Rosner<sup>[7]</sup> 和 Sugahara<sup>[8]</sup> 等人的工作曾指出, 在 GaN 和 InGaN 中因晶格失配率高, 故 In 的组分不宜太高, 只能为 0.06, 由此产生一些线位错 (threading dislocations)

是无辐射中心, 影响 LED 器件质量。大电流注入时大量的载流子可被这些线位错 TDs 产生的无辐射中心俘获。当  $I_F$  更大时, 相当多能量被晶格吸收, 转变为热能, 结温更高, 以致使光辐射产生温度猝灭; 半导体 PN 结温升, 使载流子动能增大, 可能易造成载流子泄漏等等致使 LED 光通呈现饱和现象。

蓝光 LED 的光通变化随正向电流增大呈亚线性增加, 其中相当多的能量被晶格吸收转变为热能而耗。功耗的增加超过了光通的增大, 故蓝光 LED 的光效  $= \phi/w$  (lm/w) 随  $I_F$  的增加而逐渐下降。

### 3.4 UV 辐射

值得注意的是, 仔细分析所测量不同蓝光 LED 样品 EL 光谱, 还观测到在长波紫外区存在弱的紫外光 (UV) 发射。图 7 给出在  $I_F = 20$ mA 记录 5 号样品蓝光 LED 的紫外发射光谱。由于仪器限制, 小于 350nm 的 UV 光谱不能记录。按高斯分布, 进行曲线拟合将 UV 光谱的短波侧用虚线近似表示。其 UV EL 光谱从 310nm 延伸到 400nm, 发射峰在 359nm 附近, 其相对强度大约是 461nm 主峰的 1.9%。另一个 6 号样品类似, 其 EL 发射峰在 357nm 附近, 相对强度为 460nm 主峰的 1.7% 左右。这个 UV 光发射强度随正向电流  $I_F$  的增加而增强。在  $I_F = 20$ mA 时达到最强, 然后又下降。关于 UV 光谱将另行报道。它的揭示有助于改进 InGaN 蓝光和紫外光 LED 芯片的制作与器件工艺。在蓝光 LED 中, UV 辐射存在对 LED 器件可靠性是不利的, 它是导致光衰, 即环氧树脂变黄与荧光粉老化的重要因素。为避免影响

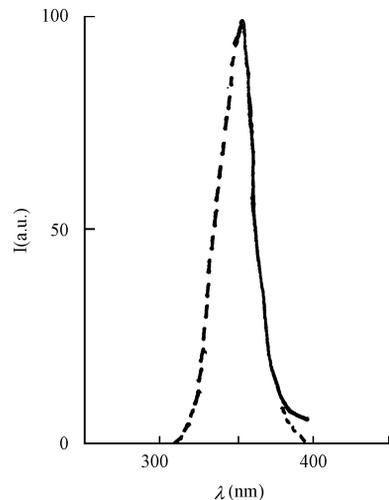


图 7 InGaN 蓝光 LED 的紫外 EL 光谱 ( $I_F = 20$ mA)

蓝光LED的光效和寿命,人们可以设法采用抗UV线的添加剂,甚至另辟蹊径将其转化为有用因素。

## 4 结论

综上所述,InGaN蓝光LED的发射光谱、色品质、光通量和光效等光电特性与施加的正向电流 $I_F$ 密切相关。在较小的 $I_F$ 工作时,光谱出现蓝移,较大 $I_F$ 时又逐渐红移。蓝光的发射峰、半高宽(FWHM)、色品坐标 $x$ 和 $y$ 值也随之发生变化;光通呈亚线性增加,趋向饱和,而光效逐渐下降。初步分析其原因,在UV区还存在一个弱的UV EL光谱,其发射峰位于 $358 \pm 1\text{nm}$ 附近。蓝光LED的光谱和光电特性与 $I_F$ 的关系将直接影响白光LED的性质和质量。蓝光LED的这些特性与InGaN LED芯片的组成、结构和制造工艺,芯片的尺寸等密切相关。蓝光LED的光谱和光电性质决定了蓝光LED和白光LED的使用条件和性能。

致谢:感谢苍乐技术中心同志制作蓝光LED及其性能测试。

### 参 考 文 献

- [1] Nakamura S, Mukai T, and Senoh M. Candelera-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes. [J]. Appl. Phys. Lett. 1994, 64 (13): 1687 - 1689.
- [2] Bando K. Performance and applications of high-brightness InGaN LED in The 8th Intern symposium on the science & Technology of Light sources [A]. PP80-89, Greifswald, Germany, 1998. 8.
- [3] NaKamura S. InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes [J]. J. Crystal Growth, 1999, 201/202: 290 - 295.
- [4] 方容川编著. 固体光谱学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社出版, 2001年5月, PP127 - 134.
- [5] Mukai T, Yamada M and Nakamura S. Current and temperature dependences of electroluminescence of InGaN-based UV/blue/green light-emitting diodes [J]. JPN. J. Appl. Phys. 1998, 37: L1358 - L1361.
- [6] Su Y. K, chi G. C and Sheu J. K. Optical properties in InGaN/GaN multiple quantum wells and blue LEDs [J]. Optical Materials, 2000, 14 (3): 205 - 209.
- [7] Rosner S. J, Carr E. C, Ludowise M. J, Grolami G and Erikson H. I, Correlation of cathodo-luminescence inhomogeneity with microstructural defects in epitaxial GaN grown by metalorganic chemical-Vapor deposition [J]. Appl. Phys. Lett. 1997, 70 (4): 420 - 422.
- [8] Sugahara T, Sato H, Hao M, Naoi Y, Kurai S et al. Direct evidence that dislocations are non-radiative recombination centers in GaN [J]. Jpn. J. Appl. Phys. 1998, 37: L398 - 400.

## 中国照明论坛

### ——高效照明电器产品及其技术专题报告会在京举办

由中国照明学会主办,日本岩崎电气株式会社、品能光电技术(上海)有限公司协办的“中国照明论坛——高效照明电器产品及其技术专题报告会”于2004年3月18日在北京举办,有100余名建筑设计部门、照明工程公司的专家参加了报告会。

报告会上日本岩崎电气株式会社介绍了“高强度放电灯电子镇流器的动向、可充分演绎红色的高显色金卤灯、能抑制害虫行动的黄色灯、UV流水杀菌技术、棒球场的照明设计等内容;品能上海光电技术(上海)有限公司介绍了公司的发展以及LED的发展和成功使用LED的工程和产品介绍等。

国家半导体照明工程协调领导小组办公室以及中国照明学会的领导出席了报告会。