

耦合电致发光附件测试 III-V LED 的应用

前言

早在 1907 年，英国工程师 Henry Joseph Round 在碳化硅晶体上施加一定的电压后，观察到碳化硅发射出微弱的黄色光。这既是最早观测到的电致发光现象，同时也是成功制备的第一个发光二极管(LED) [1-2]。20 世纪早期，Round 的工作被进一步研究 [2-3]，但 LED 尚未达到实用效果[2]。20 世纪 60 年代，第一个商品化的 LED 问世，可以在近红外及红光区域发光。20 世纪 90 年代末，蓝、绿两色高效的 InGaN 基发光二极管得到突破，意味着真正迎来了 LED 时代。

现代 LED 是一种高效、明亮、可靠、应用最为广泛的光源。随着新器件的构建与掺杂方法的深入研究，LED 技术仍在快速发展。电致发光(EL)光谱技术是用于表征新型 LED 并促进其发展的一项重要技术。通过测试电致发光及时间分辨光谱可以研究发光器件的性能。根据发射光谱可以计算得到 LED 的色度坐标和显色指数，以及半导体的带隙等基本性质。时间分辨的电致发光光谱可用于探究器件对短电压脉冲的电发光响应，以研究器件中的载流子动力学，如有机半导体 (OLED) 中的三重态形成。

大多数典型的 LED 由 III-V 族化合物半导体构成。III-V 半导体是指包含元素周期表中第 III 族 (B, Al, Ga, In) 和第 V 族 (N, P, As, Sb) 元素的合金材料。对于蓝色和绿色的 LED，通常为 In、Ga 和 N 元素。InGaN 基 LED 中的 p 型和 n 型区域由 GaN 形成，其带隙较大，为 3.4 eV (360 nm)。可以通过调节 Ga 与 N 比值使其成为 p 型或 n 型。InGaN 基 LED 的有源区由 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 形成，加入 In 元素会降低半导体的带隙。通过改变 In 与 Ga 的摩尔比，可以调谐 LED 的发射波长和发光颜色。但随着 In 含量的增加，InGaN 发光二极管的效率也会随之降低。因此，通过增加 In 的含量使其发射波长大于 550 nm 是没有实用意义的。光谱覆盖范围超过 550 nm 最为常用的 LED 为 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 。可通过增加 Al 和 Ga 的摩尔比，使其带隙增大，发射波长蓝移。采用电致发光技术能够测试 InGaN 和 AlGaInP LED 的发射波长，并确定 LED 的有源区带隙及组成。

本篇应用，通过使用耦合电致发光附件的 FS5 荧光光谱仪测试了四种 III-V 族化合物发光二极管的发光特性并确定它们的带隙和色度坐标。

测试仪器与样品

仪器：FS5 光谱仪 (PMT-900 检测器)；电致发光附件。

样品：蓝色(OVL-5523)，绿色(OVL-5524)，橙色(OVL- 5528)，红色(OVL-5526) 发光二极管均购于 Farnell 公司。

测试结果

图 1 为 4 种 III-VLEDs 的电致发光光谱图。蓝、绿两色 InGaN 基 LED 发射峰分别位于 462 nm 及 516 nm。黄、红两色 AlGaInP 基 LED 的发射峰分别位于 594 nm 及 630 nm。

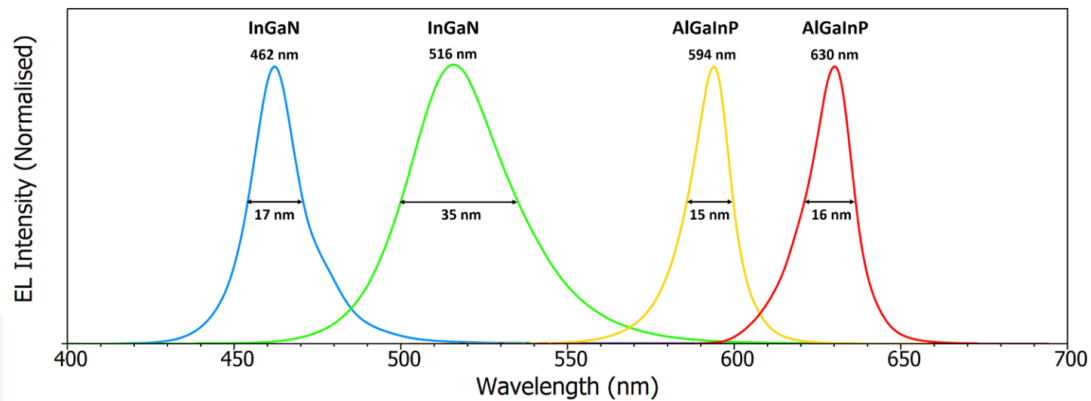


图 1 . InGaN 和 AlGaInP 基 LED 的电致发光光谱及半宽峰

对于显示应用来说，通常是根据色度坐标而不是发射波长来对 LED 发光颜色进行分类的。FS5 的 Fluoracle®软件内置向导能够根据发射光谱图计算生成 CIE 1931 或 CIE1976 色度空间的色度坐标。如图 2 所示是四个 LED 在 CIE 1931 色度空间中的色度坐标。

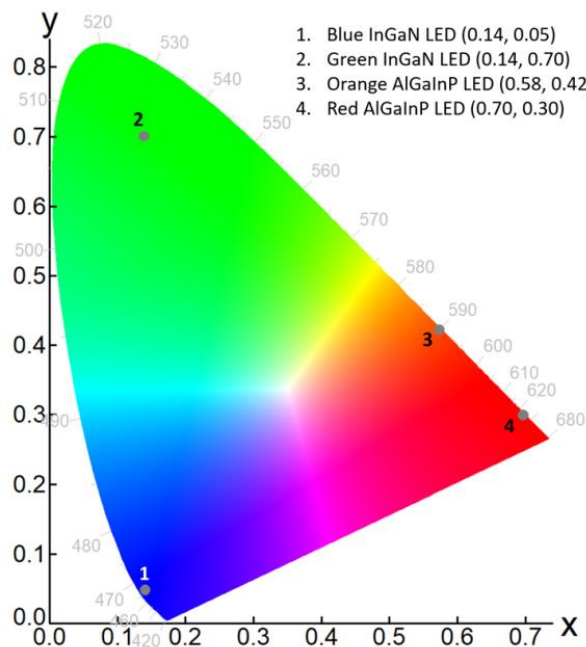


图 2 . CIE 1931 色度空间中四个 LED 的发射色度坐标（由图 3 中的电致发光光谱计算得到）

利用从电致发光光谱获得的信息，通过将 LED 发射峰值转换为能量单位，可以简单地确定 LED 的有源区带隙，如下表 1 所示。根据带隙能可以确定 LED 有源区的组成成分。

对于 InGaN 基 LED，其带隙和成分之间的关系满足于以下经验公式(1):

$$E_g = E_g^{GaN} + (E_g^{InN} - E_g^{GaN})x - x(1-x)E_b$$
 (1)

其中， E_g 表示 $In_xGa_{1-x}N$ 的带隙， E_g^{InN} 和 E_g^{GaN} 代表 GaN 和 InN 的带隙分别为 3.42 eV 和 0.77 eV^[2]， x 为 In 与 Ga 的比值。 E_b 为弯曲常数 2.4 eV^[2,5]。将这些值和表 1 中的带隙值代入到公式 (1) 中可得到蓝、绿两色 LED 的 x 值分别为 0.16 和 0.23。

对于 AlGaInP 基 LED，其带隙和成分之间的关系证实满足于下列经验公式(2)：

$$E_g = E_g^{GaInP} + 0.61x$$
 (2)

其中， E_g 表示 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 的带隙， E_g^{GaInP} 表示 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 的带隙， x 为 Al 与 Ga 的比值。将文献中 $E_g^{GaInP} = 1.91\text{eV}$ ^[2]以及表 1 中的带隙值到公式 (2) 可得到黄色和红色 LED 的 x 值分别为 0.30 和 0.10。

表 1. 四种 LED 的发射波长，带隙以及组成

颜色	发射波长 (nm)	带隙 (eV)	组成
蓝色	462	2.68	$In_{0.16}Ga_{0.84}N$
绿色	516	2.40	$In_{0.23}Ga_{0.77}N$
黄色	594	2.09	$(Al_{0.30}Ga_{0.70})_{0.5}In_{0.5}P$
红色	630	1.97	$(Al_{0.10}Ga_{0.90})_{0.5}In_{0.5}P$

结论

FS5 光谱仪通过耦合电致发光附件成功测试了 4 种 III-V LEDs 的发光性能。FS5 软件可根据电致发光光谱中的发射峰位置以及半高宽计算 LED 的色度坐标。此外，通过发射波长也可计算得到半导体带隙以及组成。实验证明 FS5 可耦合电致发光附件拓展其应用实现对光电器件的测试。

参考文献

[1] H. J. Round, A note on Carborundum, Electrical World, 49, 309 (1907)
[2] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, NY, (2006)
[3] O. V. Lossev, Luminous Carborundum Detector and Detection Effect and Oscillations with Crystals, Philosophical Magazine 6 1024 (1928)
[4] E. P. Wagner Investigating Bandgap Energies, Materials, and Design of Light-Emitting Diodes, J. Chem. Educ. 93 1289 (2006)

[5] L. Siozade, J. Leymarie, P. Disseix, A. Vasson, M. Mihailovic, N. Grandjean, M. Leroux, J. Massies, Modelling of Thermally Detected Optical Absorption and Luminescence of (In,Ga)N/GaN Heterostructures, Solid State Commun. 115 575 (2000)