

对发光二极管效率跌落的探讨

(北京大学物理学院 黄响 编译自 Ashley G. Smart. *Physics Today*, 2013, (7):12, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

如果发光二极管(简称为LED)不再仅仅用于指示灯或者数字显示器,而是将它们应用到建筑物或街道照明时,氮化镓基半导体就成为大家关注的焦点。氮化镓基LED的主要魅力是它们的效率。从理论上讲,向LED注入电子-空穴对所需的能量与它们在复合时发射光子的能量几乎相当,但实际上有一些电子和空穴在复合时并不发生辐射,称为无辐射事件。2007年,美国飞利浦照明公司的工程师们曾给出一个实验报告,报告表明:这些无辐射事件发生的概率是与注入电流密度 n 的三次方成正比。LED的内部量子效率是与 n 的平方成正比的。因此单位电子-空穴对所产生的光子数将会在超出某个电流密度阈值时急剧下降,这种下降现象被称为跌落(droop)。对于氮化镓基发光二极管来说,合适的电流密度约为 10 A/cm^2 。

对于跌落现象有两种解释:飞利浦公司的研究者认为,跌落是由于俄歇复合(Auger recombination)所形成的;但伦斯勒理工学院的 F.Schubert

的研究组认为,跌落是由于漂移泄漏现象所造成。这两种说法都能解释与 n 的三次方关系。

为了解决这个有争议的问题,美国加州大学圣巴巴拉分校的 C.Weisbuch 教授和法国巴黎综合理工学院 J.Speck 教授组成的研究组决定利用电子发射光谱仪来测试数据。他们的实验装置包括两块氮化镓基板,分别是掺杂电子的n型层和掺杂空穴的p型层。两者之间是氮化铟镓量子阱,它是由一个发光区和一个薄绝缘的电子阻挡层所组成,如图1所示。

加上适当的偏置电压后,电子将向p型层迁移,而空穴将向相反方向迁移,两者在量子阱中被俘获,最理想的情况是两者复合并辐射一个光子。电子阻挡层提供一个势垒阻挡了电子从量子阱中泄漏,从而提高了复合的概率。

如果电子-空穴对发生了一次俄歇复合,它能使其邻近的电子提高约 2.7 eV 的能量,这样就能越过能带隙,并超越电子阻挡层成为一个俄歇电子

eV之间,它高于导带的最小能量,所以落入侧谷的俄歇电子在飞越p型层时能保持其初始能量。第二步是在LED的暴露部分寻找和测量俄歇电子。涂上铯层后就可以控制LED的表面电场和同轴电缆设备,这样电子可被光谱仪收集。图1是典型的发射光谱,两个重叠的低能峰,界限模糊,物理意义也不是很清楚,可能是对应于量子阱中的隧道效应,也可能是对应于从侧谷中快速地逃逸时所产生的泄漏。相反,高能峰的意义比较明确,这个能量只可能是由侧谷中俄歇电子将能量携带到表面所产生的。所以 Weisbuch 教授明确地表示:不可能有其他的物理机制来解释这个现象。

高能峰的出现无疑证实了在LED中存在着俄歇复合,但问题是它在效率跌落中起多大的作用。为了能清晰地说明问题,研究组将他们得到的发射光谱与相应的LED的光输出测量进行了对比。真实的氮化镓基LED的辐射强度与无效率跌落时的期望值之差反映的是电流的损耗和补偿。在高能区探测到的俄歇电子流与补充电流高度线性相关,拟合线的斜率表明,每当补充电流达到100万个电子时才能探测到一个俄歇电子。由于各种原因,从实验上测定俄歇电子是有一定难度的。所以研究组仍然确信,俄歇电子是造成效率跌落的主要因素。

即使 Weisbuch 研究组对实验有正确的解释,但在测量方面,还有不足,如对漂移泄漏等因素没有细致考虑。所以真正解决LED的效率跌落,还需要多学科的科学家共同努力。

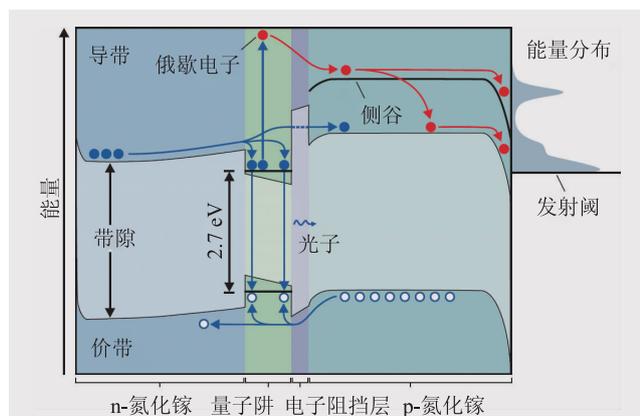


图1 氮化镓基发光二极管的能带图。在p型与n型间是一个量子阱和一个阻挡层。