

吴懿平 博士

华中科技大学 教授/博导

上海交通大学 兼职教授

Email: ypwu@public.wh.hb.cn

半导体照明封装技术

摘要：半导体照明是 21 世纪最具发展前景的高技术领域之一，其封装是连接半导体照明产业和市场的纽带。本文对功率型 LED 的封装特点作了简要的叙述，对正装式 LED 和倒装式 LED 两种封装方法作了论述并对功率型 LED 封装技术的应用前景作了展望。

关键词：半导体照明，LED 封装，倒装芯片式封装

1 前言

随着半导体发光技术的进步以及人们对绿色照明技术的需求，新兴的固体照明（solid-state lighting, SSL）光源，特别是高亮度发光二极管（high-brightness light emitting diodes, HB-LED）引起了人们密切的关注和深入的研究：它具有发光效率高、使用寿命长、耐震动冲击以及对环境友好等一系列优点，而且不同光色的固体光源组成的照明系统可通过矩阵、网络等实现照明亮度和光色的细微控制，得到丰富多彩的照明效果。固体照明光源被认为是人类照明史上继白炽灯、荧光灯和高压放电灯之后的第四代人工光源。欧、美、日等发达国家和地区均制定了相应的半导体照明发展计划，中国大陆也于 2003 年启动了国家半导体照明工程，大力扶持这一新兴产业。

在 LED 产业链中，衬底晶片及衬底生产处于上游，LED 芯片设计及制造处于中游，而下游属于 LED 封装与测试。对于用作通用照明的大功率 LED，目前研发目标之一是将单个 LED 的发光量提高到 1000 流明的水平，这除了需要增加芯片的面积并提高输入功率外，还需要改善芯片封装方法并提高固定设备的集成度，从而使 LED 芯片结点与周围环境间的热阻降到 10K/W 以下的水平。因此研发低热阻、优异光学特性、可靠性高而低成本的封装是高亮度 LED 进入通用照明市场的关键技术之一，从某种意义上讲，LED 的封装是连接产业与市场的纽带，只有封装良好的产品才能赢得市场，为顾客接受，让人类早日跨入半导体照明时代。

2 LED 封装的特点

LED 是由数层很薄的掺杂半导体材料在衬底（蓝宝石或 SiC 等）上通过 MOCVD 法外延生长而成，其中一层带过量的电子，另一层因缺乏电子而形成带正电的“空穴”，当有电流通过时，电子和空穴复合并以辐射光子的形式释放出能量，从而直接将电能转化为可见光、紫外光或红外光，图 1 是其发光原理示意图。LED 作为半导体器件，其封装技术基本上是在分立半导体器件的封装技术基础上发展演化而来的，但是作为半导体发光器件，LED 的封装又有自己的特点：LED 封装不但要完成电信号的输入输出，保护芯片在正常的电流下工作，还得维持工作状态下芯片的温度不超过允许的范围，这对于功率型 LED 的封装来说显得尤为重要，因为当芯片的结点温度升高到一定的水平后，会发生明显的颜色漂移和发光效率下降等现象；LED 封装结构和材料要有利于提高出光效率，减少对芯片出射光的阻挡和吸收；另外还得尽量采用现有的标准封装材料，从而降低生产成本，毕竟价格是 LED 光源进入通用照明市场的关键之一。

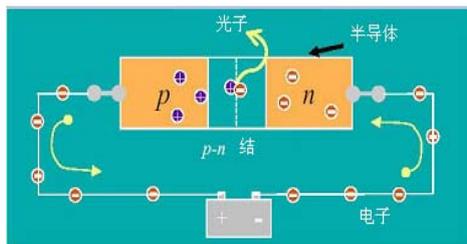


图 1. 半导体发光示意图

随着发光半导体芯片设计与制造等技术的进步，下游的封装技术和产业也获得了很大的发展。目前市场上

已有不同引脚数目、不同封装外形以及单芯片和多芯片组合等多种封装形式，并且很多已经形成了系列。按照芯片的电极触点在封装时与基板的位置，LED 的封装可主要分为芯片正装式封装和倒装式封装。

3 芯片正装式封装

LED 芯片正装式封装是将芯片的电极触点朝上，通过引线键合方式实现器件的电气互连，光线由芯片的正面出射，芯片底部通过导热树脂粘结在小尺寸的反光碗中或载片台上，最后用环氧树脂塑封而成。由于小型 LED 芯片散失的热量不大，引脚数较少，而引线键合工艺很成熟且成本低廉，因此到目前为止，小功率 LED 主要以引线键合的正装式封装为主。

图 2 为目前市场上可大批量提供的 GaN 基正装 LED 芯片结构示意图，衬底为蓝宝石。这种正装 LED 的出光效率受到下面两个因素的制约：首先，由于 P 型 GaN 层导电率较低，需要在其表面覆盖一层半透明的 NiAu 材料作为电流扩展层，由于 NiAu 是部分吸光材料，厚了会增加对光的吸收，太薄又不利于电流在扩展层上的均匀性和大电流在 P 型 GaN 表面扩展的可靠性，不得不综合考虑；其次，芯片产生的热量大部分需通过导热性差的蓝宝石衬底再传递到热沉上，这不利于热量的迅速散失，从而限制了芯片发光效率和输入功率的提高。基于这两个影响因素和芯片面积的不断增大以及输入功率的不断提高，功率型 LED 倒装式封装逐渐发展起来。

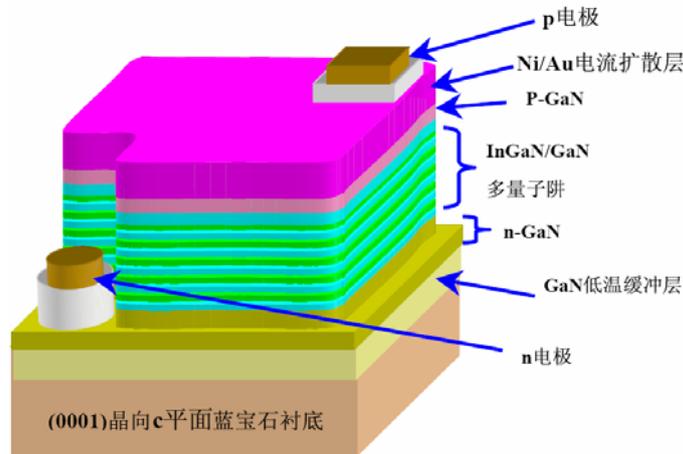


图 2 正装 LED 芯片结构示意图

4 倒装芯片(Flip Chip)式封装

LED 倒装式封装是将 LED 芯片的电极触点朝下，直接贴装到硅载体或 PCB 基板上，中间通过焊料/导电胶互连，然后粘贴到热沉上，外面采用棱镜塑封而成，芯片产生的光束通过透明的蓝宝石衬底出射。此封装结构中采用的倒装型 LED 芯片是在外延半导体上形成高反射率的金属层，比如 Ag 和 Al，它既充当半导体的电接触层，又充当光反射层。对 470~520nm 波长的光，0.12 微米厚的 Ag 和 Al 的反射率可分别达到 96% 和 84%，图 3 是倒装 LED 芯片的结构示意图。

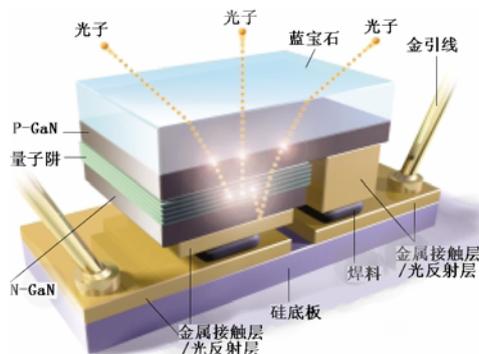


图 3 倒装封装的 LED 芯片

倒装型 LED 由于采用的是厚而不透明的金属接触层作为电流扩展层，因而与正装型 LED 相比，它能够在大的工作电流下工作并保持很高的可靠性，同时，封装到底板上后，由于芯片的激发区更靠近热沉，元件产生的热量能很快从导电金属层通过焊料传递到热沉而散失掉，有利于保持较高的发光效率。因此，目前大多数功

率型 LED(输入功率 $\geq 1\text{W}$)均采用倒装型封装结构,这也是未来通用半导体照明的希望。

美国 Lumileds 公司的 LUXEON 系列 LED 是倒装型大功率 LED 封装的代表,如图 4 所示。该封装结构采用的是热电分离的形式:芯片倒装焊接在具有焊料凸点的硅载体上,然后把完成倒装焊接的硅载体装入热沉与管壳中,通过键合引线实现电互连;硅载体与热沉之间采用很薄的一层导热树脂连接形成导热通道,其封装热阻只有 $4\sim 10\text{K/W}$,不到常规 $\phi 5\text{mm}$ LED 的十分之一;设计良好的反射杯和光学透镜使辐射图案可控和光学效率最高;为了提高金丝互连可靠性,器件内部填充有性能稳定的硅橡胶,能有效的吸收热冲击条件下($-40\sim 120^\circ\text{C}$)产生的应力,最后将封装好的芯片通过焊料焊接到导热性能优良的金属基 PCB 板上。LUXEON 系列 LED 由于采用了上述新型封装结构和材料,使其从热、光和电的角度都达到了较佳的水平,这也是目前市场上大功率 LED 单芯片封装的主流形式。

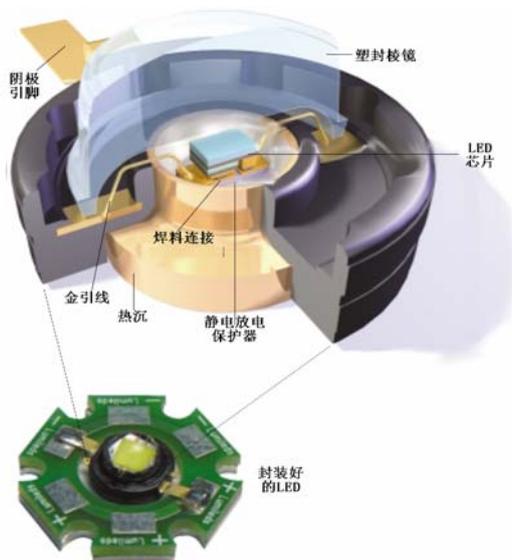


图 4 LUXEON 系列 LED 封装结构示意图

除了 LUXEON 这种单芯片封装方法外,2003 年, Lamina Ceramics 公司推出了自己的专利封装技术—多层低温陶瓷金属基烧结(LTCC-M)技术,生产出集成度很高的 LED 阵列,如图 5 所示。通过倒装封装工艺,该多芯片组装器件的发光亮度在 $840\text{cd}/\text{in}^2$ 以上,流明效率超过 40lm/W ,而使用寿命长达 10 年,并且能在高达 250°C 的环境下正常工作。美国 UOE 公司研制的 NORLUX 系列大功率 LED 也为多芯片组合封装结构,见图 6。NORLUX 采用六角形铝基金属线路板作为热沉,直径为 1.25 英寸,发光区位于其中央部位,可根据所需输出光功率的大小在金属线路板上排列多达 40 个超高亮度倒装型 LED 芯片,包括 AlGaInN 和 AlGaInP ,它们的发射光可为单色、彩色(RGB)、白色(RGB 三基色合成或蓝色黄色二元色合成)。这些多芯片组合封装的功率型 LED 设计独到,不仅散热性能良好,而且可在大电流下工作,具有很高的光输出量,是一种很有发展前途的 LED 固体光源。

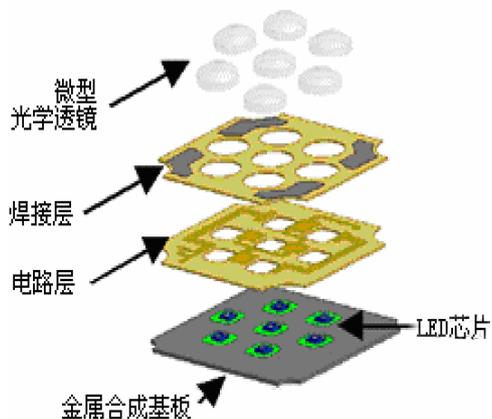


图 5 Lamina Ceramics 公司的 LTCC-M 封装示意图

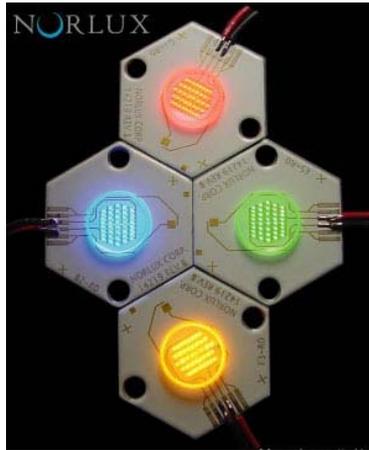


图 6 NORLUX 系列大功率 LED

5 功率型 LED 封装发展趋势及应用前景

近几年, 大功率 LED 芯片设计与制造技术发展日新月异, 芯片的面积、输入功率和发光效率等均取得了很大进步, 这也推动了功率型 LED 的封装技术不断改进以适应形势的发展, 如下图所示: LED 封装从最初的双芯片双引脚圆头型封装, 发展到扩展引线框架式封装再到如今的多芯片倒装阵列式封装, 其输入功率不断提高, 而封装热阻显著降低。根据美国光电工业发展协会(OIDA)制定的目标, 到 2012 年, LED 的发光效率将提高到 150 lm/W, 输入功率密度达到 400W/cm², 而成本则降到荧光灯的水平。为了实现这些目标, 进一步改善 LED 封装的热管理将是关键之一, 另外芯片设计制造与封装工艺的有机融合也非常有利于产品性价比的提升, 如美国 Cree 公司与 Berkeley 国家实验室合作, 开发出了光通量超过 1000 lm, 发光效率达 57 lm/W 的 LED 灯泡, 并已进入商业应用。随着表面贴装技术(SMT)在工业上的大规模应用, 采用透明型封装材料和功率型 MOSFET 封装平台将是 LED 封装发展的一个方向, 功能集成(比如驱动电路)也将进一步的推动 LED 封装技术的发展。

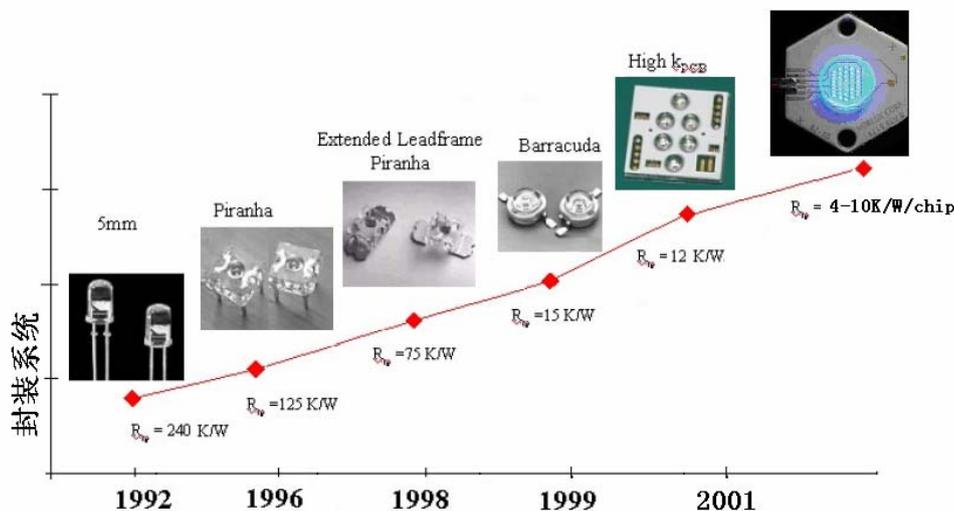


图 7 功率型 LED 的封装发展史

6 结语

实现通用照明是 LED 发展的最终目标, 目前离此仍有一段较长的距离。当前 LED 已经在建筑物亮化、装饰照明、大屏幕显示用背光源以及汽车内部照明等特殊照明领域获得了广泛的使用, 这既是 LED 应用领域的拓展, 又为 LED 向通用照明领域发展积累了技术与资金支持。LED 封装产业具有技术密集和知识密集的双重特点, 在这领域我国与国外的技术差距也较小, 因而优先发展该产业, 在短期内形成与国外一流企业竞争的态势, 必定将提升我国 LED 产业的实力。抓住 2008 年奥运会和 2010 年世博会举办的机遇, 中国 LED 照明产业必将获得长足的发展, 封装作为连接 LED 照明产业和市场的纽带, 必须引起我们足够的关注和重视!

(2005 年 3 月 12 日)