

电子工程技术丛书

大功率 LED 照明技术 设计与应用

● 周志敏 纪爱华 编著

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

大功率 LED 照明技术 设计与应用

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合我国绿色照明工程计划及国内外大功率 LED 照明技术发展动态,全面系统地阐述了大功率 LED 的基础知识和大功率 LED 照明最新应用技术,深入浅出地阐述了 LED 固体照明技术、大功率 LED 的热设计与封装技术、大功率 LED 驱动技术、LED 照明灯具及设计、大功率 LED 照明工程设计等内容。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事大功率 LED 照明设计和应用的工程技术人员的必备读物。

本书可供电信、信息、航天、汽车、国防、建筑、景观照明等领域从事大功率 LED 照明研发、设计、应用和生产企业的工程技术人员及相关专业高等院校的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大功率 LED 照明技术设计与应用/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2011.1

(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-12442-6

I. ① 大… II. ① 周… ② 纪… III. ① 发光二极管-照明 IV. ① TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 233946 号

策划编辑:富 军

责任编辑:雷洪勤

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:448 千字

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

在 21 世纪,大功率 LED 照明技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注,现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。近年来,随着我国国民经济的高速发展及低碳社会进程的加快,人们对高效新光源的需求与日俱增,大功率 LED 照明产品的开发、研制、生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。随着我国绿色照明工程的组织实施,促进了大功率 LED 照明技术的创新和发展,使得大功率 LED 照明技术在照明领域得以广泛应用,其潜在的市场使大功率 LED 照明技术显示出了强大的发展潜力。

随着 LED 照明技术的不断创新和发展,大功率白光 LED 相对于传统的白炽灯、荧光灯、节能灯、高压气体灯等传统的照明光源,具有节电、使用寿命长及反应速度快等诸多优点,因此在 LCD 背光照明、交通照明、汽车照明、通用照明、景观照明、舞台灯光等市场具有竞争优势。在未来几年中,大功率白光 LED 照明灯具将逐渐普及至一般家庭的各种照明灯具,将成为 21 世纪最具有发展潜力的照明新光源。

本书结合我国能源规划的方针政策和大功率 LED 在我国照明领域应用和发展现状,系统地把大功率 LED 照明设计基础知识与大功率 LED 照明技术的工程应用有机地结合起来,系统地讲述了大功率 LED 设计与应用必备的基础知识。本书在写作中尽量做到针对性和实用性,在保证科学性的同时,注意通俗性。力求做到通俗易懂和结合实际工程应用,以便于读者掌握大功率 LED 的设计方法和大功率 LED 的最新工程应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬等,本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者和同行的大力支持。在此表示衷心的感谢。

由于编写时间短,加之作者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 LED 固体照明技术	1
1.1 大功率 LED 的结构与特性	1
1.1.1 大功率 LED 的结构	1
1.1.2 大功率 LED 的优点及特性	4
1.2 大功率白光 LED	7
1.2.1 大功率白光 LED 的发展及特点	7
1.2.2 大功率白光 LED 的效率及参数	11
1.2.3 大功率白光 LED 的实现方法	21
1.2.4 大功率白光 LED 的特性	24
1.3 照明用白光 LED 及研发动态	27
1.3.1 照明用白光 LED	27
1.3.2 照明用白光 LED 研发动态	35
第2章 大功率 LED 的热设计与封装技术	40
2.1 大功率 LED 的结温	40
2.1.1 结温对 LED 性能的影响	40
2.1.2 LED 的散热分析	42
2.1.3 大功率 LED 的热分析	44
2.2 大功率 LED 的热设计	49
2.2.1 大功率 LED 的热计算	49
2.2.2 大功率 LED 的散热技术	59
2.3 LED 高导热基板和整体散热方案	62
2.3.1 LED 散热基板	62
2.3.2 大功率 LED 的整体散热方案	66
2.4 LED 封装技术	68
2.4.1 LED 封装作用及类型	68
2.4.2 大功率 LED 的封装技术	74
第3章 大功率 LED 驱动技术	84
3.1 大功率 LED 驱动器	84
3.1.1 LED 驱动器的分类及驱动方法	84
3.1.2 LED 驱动器的特性	87
3.1.3 LED 与驱动器的匹配	91
3.2 大功率 LED 驱动器	96
3.2.1 大功率 LED 驱动器的拓扑结构	96

3.2.2 LED 驱动电源的解决方案	108
3.2.3 LED 驱动电路的设计要素	112
3.2.4 LED 驱动器的可靠性设计	117
3.2.5 大功率 LED 的驱动电源设计实例	119
第 4 章 LED 照明灯具及设计	126
4.1 LED 照明灯具及结构	126
4.1.1 LED 照明灯具	126
4.1.2 LED 照明灯具结构	133
4.2 LED 灯具设计	154
4.2.1 LED 灯具设计程序	154
4.2.2 LED 道路照明灯具设计	161
第 5 章 大功率 LED 照明工程设计	172
5.1 道路 LED 照明的方案设计	172
5.1.1 道路照明要素	172
5.1.2 道路照明规划设计	176
5.1.3 LED 路灯的配光形状及优势	187
5.1.4 LED 路灯照明设计实例	191
5.2 道路隧道 LED 照明设计	192
5.2.1 道路隧道照明设计	192
5.2.2 LED 隧道灯具	202
5.2.3 隧道 LED 照明的设计实例	205
5.3 建筑物 LED 泛光照明设计	208
5.3.1 建筑物泛光照明设计	208
5.3.2 LED 泛光灯及 LED 洗墙灯	211
5.3.3 建筑物泛光照明的设计方法	214
5.4 LED 在汽车照明中的应用	218
5.4.1 汽车 LED 照明分类及性能优点	218
5.4.2 LED 在汽车照明系统中的应用	220
5.4.3 汽车 LED 照明方案设计	223
5.4.4 车内 LED 照明驱动电路	226
5.4.5 汽车外部 LED 照明驱动电路	237
5.5 LED 背光驱动电路的设计与解决方案	242
5.5.1 LED 背光源的技术特性	242
5.5.2 白光 LED 用于 LCD 背光照明	245
5.5.3 LED 背光照明技术优势	248
5.5.4 RGB LED 背光照明技术	250
5.5.5 LED 背光驱动电路解决方案	256
参考文献	272

第1章 LED 固体照明技术

1.1 大功率 LED 的结构与特性

1.1.1 大功率 LED 的结构

1. 大功率 LED

从消耗功率来讲,通常把毫瓦级 LED 称为小功率 LED,把瓦级 LED 称为大功率 LED。目前常见的大功率 LED 分为单芯片大尺寸和多芯片小尺寸模组两种,如图 1-1 所示。大功率 LED 相对于传统的白炽灯泡,因具备了节电、使用寿命长及反应速度快等主要优点,因此很快地抢占了 LCD 背光板、交通信号灯、汽车照明、通用照明、景观照明等市场。大功率 LED 采用次黏着基台的进阶封装方式,可有效提高 LED 的照明效果。大功率 LED 的主流生产技术是 InGaN,但此技术仍有一些瓶颈需要克服,目前针对这些瓶颈(静电释放敏感性和热膨胀系数)已提出新的解决方案。

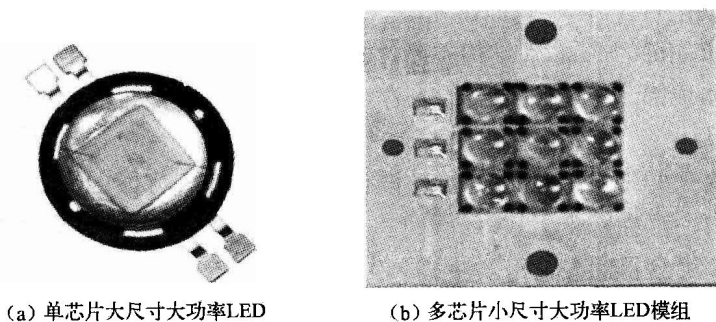


图 1-1 大功率 LED 芯片

大功率 LED 应用中的 4 个技术指标是:光强分布、色温分布、热阻及显色性。

① 掌握瓦级大功率 LED 的光强分布图,是正确使用大功率 LED 所必需的。

② 大功率 LED 的色温分布是否均匀,将直接影响到照明效果;而且色温与显色指数是互相关联的,色温的改变会引起显色指数的变化。

③ 大功率 LED 的热阻直接影响到 LED 器件的散热。热阻越低,散热越好;热阻越高,散热越差。LED 器件温度升高会影响光的波长漂移。根据经验,温度每升高 1°C ,光波长要漂移 $0.2 \sim 0.3\text{nm}$,这样会直接影响器件的发光质量。温升过高也直接影响瓦级大功率 LED

的使用寿命。

④ 显色性是白光 LED 的重要指标,用于照明的大功率白光 LED 的显色性必须在 80 以上。

要想得到大功率 LED 器件,就必须制备合适的大功率 LED 芯片。国际上通常的制造大功率 LED 芯片的方法有如下几种。

① 加大尺寸法。通过增大单体 LED 的有效发光面积和增大尺寸后,为使得流经 TCL 层的电流均匀分布而采用特殊设计的电极结构(一般为梳状电极),以达到预期的光通量。但是,简单地增大发光面积无法解决散热问题和出光问题,并不能达到预期的光通量和实际应用效果。

② 硅底板倒装法。首先制备出具有适合共晶焊接的大尺寸 LED 芯片,同时制备出相应尺寸的硅底板,并在硅底板上制作出供共晶焊接的金导电层及引出导电层(超声金丝球焊点)。再利用共晶焊接设备将大尺寸 LED 芯片与硅底板焊接在一起。这样的结构较为合理,既考虑了出光问题又考虑到了散热问题,这是目前主流的高功率 LED 的生产方式。

③ 陶瓷底板倒装法。先利用 LED 晶片通用设备制作出具有适合共晶焊接电极结构的大出光面积的 LED 芯片和相应的陶瓷底板,并在陶瓷底板上制作出共晶焊接导电层及引出导电层。之后利用共晶焊接设备将大尺寸 LED 芯片与陶瓷底板焊接在一起。这样的结构既考虑了出光问题也考虑到了散热问题,并且采用的陶瓷底板为高导热陶瓷板,散热的效果非常理想,价格又相对较低,所以是目前较为适宜的底板材料,并为将来的集成电路一体化封装预留了安装空间。

④ 蓝宝石衬底过渡法。按照传统的 InGaN 芯片制造方法,在蓝宝石衬底上生长出 PN 结后,将蓝宝石衬底切除再连接上传统的四元材料,制造出上下电极结构的大尺寸蓝光 LED 芯片。

⑤ AlGaInN 碳化硅(SiC)背面出光法。美国 Cree 公司采用 SiC 衬底制造 AlGaInN-HB-LED,几年来,AlGaInN/SiC 芯片结构不断改进,亮度不断提高。由于 P 型和 N 型电极分别位于芯片的底部和顶部,单引线键合,兼容性较好,使用方便,因此成为 AlGaInN LED 发展的另一主流产品。

由于大功率白光 LED 制造工艺、器件设计、组装技术三方面的进展,LED 发光性能一直在提高,其成本一直在降低。PN 结设计、再辐射磷光体和透镜结构都有助于提高效率,因此也有助于提高可获得的光输出。

LED 的外量子效率取决于外延材料的内量子效率和芯片的取光效率,由于大功率 LED 采用了 MOCVD 外延生长技术和多量子阱结构,在精确控制生长和掺杂以及减少缺陷等方面取得了突破性进展,其外延片的内量子效率已有很大的提高,但获得高发光通量的最大障碍仍是芯片的取光效率低。现有的大功率 LED 的设计采用了倒装焊新结构来提高芯片的取光效率,改善芯片的热特性,并通过增大芯片面积,加大工作电流来提高器件的光电转换效率,从而获得较高的发光通量。

大功率 LED 器件的顶部透镜的光学设计也是十分重要的,通常的做法是:在进行光学透镜设计时应充分考虑最终照明器具的光学设计要求,尽量配合应用照明器具的光学要求进行设计。常用的透镜形状有:凸透镜、凹锥透镜、球镜、菲涅耳透镜、组合式透镜等。透镜与大功率 LED 器件的装配,其理想的方法是采取气密性封装,如果受透镜形状所限,也可

采取半气密性封装。透镜材料应选择高透光的玻璃或亚克力等合成材料。也可以采用传统的环氧树脂模组式封装, 加上二次散热设计也基本可以达到提高出光率的效果。

2. 大功率 LED 结构

AlGaInN 虽不及 AlGaInP, 但波长为 615nm 的 AlGaInP 的内量子效率已接近极限 100%, 由于半导体与封装的环氧树脂折射率相差较大, 致使内部的全反射临界角很小, 有源层产生的光只有小部分被取出, 大部分在芯片内部经多次反射而被吸收, 成为大功率 LED 芯片取光效率很低的根本原因。提高取光效率主要有以下几种结构。

(1) AlGaInN 蓝宝石大功率 LED 芯片倒装结构

为满足光源对高发光通量的需求, 美国 AXT 公司将 AlGaInN 芯片面积由常规的 $0.325\text{mm} \times 0.375\text{mm}$ 增大至 $1.26\text{mm} \times 1.26\text{mm}$, 制成的 P2 系列大结面积正面出光的大功率 LED 芯片, 能够在 350mA 大电流下工作。不同波长 450nm、505nm、525nm 下的辐射光通量分别为 35mW、30mW、27mW, 流明效率分别为 6lm/W、12.5lm/W、17.5lm/W, 尽管对芯片结构进行了优化设计, 具有良好的电流扩展和背反射层, 但其取光效率仍然受到了很大的限制, 其原因是: AlGaInN 一般是外延生长在绝缘的蓝宝石衬底上, 欧姆接触的 P 电极和 N 电极只能在外延表面的同一侧, 正面射出的光将被接触电极吸收和键合引线遮挡。造成光吸收的主要因素是: P 型 GaN 层电导率较低, 为满足电流扩展的要求, 覆盖于外延层表面大部分的半透明 NiAu 欧姆接触层的厚度应大于 50nm, 但是, 要使光吸收最小, 则 NiAu 欧姆接触层的厚度必须非常薄, 这样在透光率和扩展电阻率二者之间则要给以适当的折中, 折中设计的结果必定使其功率转换的提高受到了限制。

美国 Lumileds 公司研制出的 AlGaInN 大功率倒装芯片 (FCLED) 结构, 则使这一突出矛盾得到了解决, 这种结构是通过透明的蓝宝石衬底取光, 这样不仅能避免 P 型、N 型欧姆接触电极吸光和键合引线挡光的影响, 而且还可不必考虑 NiAu 欧姆接触层的透光性, 将其厚度增至 50nm 以上, 从而改善了注入电流扩展的效果, 降低了正向压降; 同时还起到了背反射作用, 将有源层发出的光经过底部的 NiAu 层反射, 从蓝宝石衬底取出, 因此 AlGaInN 倒装芯片结构使取光效率有了明显提高。其制造过程如下:

① 在外延片顶部的 P 型 GaN: Mg 淀积厚度大于 50nm 的 NiAu 层, 用于欧姆接触和背反射。

② 采用掩模选择刻蚀掉 P 型层和多量子阱有源层, 露出 N 型层。

③ 淀积、刻蚀形成 N 型欧姆接触层, 芯片尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$, P 型欧姆接触为正方形欧姆接触, 以梳状插入其中, 这样可缩短电流扩展距离, 把扩展电阻降至最小。

④ 将金属化凸点的 AlGaInN 芯片倒装焊接在具有防静电保护二极管 (ESD) 的硅载体上。

⑤ 通过倒装 AlGaInN 芯片的硅载体与外壳底盘进行电气连接, 并将其封装在具有良好光学特性允许大电流和高温工作的外壳之中。

大功率 AlGaInN 背面出光 (倒装芯片) LED 结面积为 0.7mm^2 , 大功率 AlGaInN 正面出光 LED 结面积为 0.7mm^2 , 常规型 AlGaInN LED 结面积为 0.07mm^2 。三种器件相比较, 常规型 LED 由于较小的芯片尺寸, 在大电流 (150mA) 下工作仅几小时就出现明显退化而永久失效, 而大功率 LED 即使在 1A 电流下工作也都未出现功率下降和失效, 同时还可看出大功

率 LED 的背面出光比正面出光具有更高的功率转换效率, 在 200mA 电流下光通量约为 16 ~ 27lm, 在 1A 电流下可达到 48lm。为便于对正面出光和背面出光两种大功率 LED 在不同波长下的外量子效率进行比较, 两种器件均来自于同一外延片, 并采用脉冲方式工作, 以避免热阻的影响。在驱动电流 25 ~ 1000mA 和蓝光到绿光波长的覆盖范围内, 大功率 LED 背面出光比正面出光的外量子效率高 1.6 倍, 具有更高的取光效率。AlGaInN 大功率倒装芯片 LED 在正向电流 200mA、正向电压 2.95V 下的外量子效率为 21%; 正向电流 1A、正向电压的 3.3V 时光输出功率约为 400mW; 200mA 时的功率转换效率为 20%。当热衬温度为 55℃、电流密度为 50A/cm² 时, 器件的工作寿命数据为: 80 只器件连续工作 1000h 的光输出功率仅下降 3%。上述结果表明: AlGaInN 大功率倒装芯片 LED 的性能是最优异的。

使用芯片的倒装技术可以比传统的 LED 芯片封装技术得到更多的有效出光。但是, 如果不在芯片的发光层的电极下方增加反射层来反射出浪费的光能, 则会造成约 8% 的光损失。所以底板材料上必须增加反射层。芯片侧面的光也必须利用热沉的镜面加工法加以反射, 增加器件的出光率。而且在倒装芯片的蓝宝石衬底部分与环氧树脂导光结合面上应加上一层硅胶材料, 以改善芯片出光的折射率。经过上述光学封装技术的改善, 可以大幅度提高大功率 LED 器件的出光率 (光通量)。

(2) AlGaInN/碳化硅 (SiC) 背面出光的大功率 LED 芯片结构

美国 Cree 公司是采用 SiC 衬底制造 AlGaInN 大功率 LED, AlGaInN/SiC 有正面出光和背面出光两种结构, 芯片尺寸为 0.3mm × 0.3mm。由于背面出光结构芯片的内部反射光可通过背面的反射层有效地从正面取出, 因而亮度比正面出光结构提高 50%, 紫外 (395 ~ 405nm) 芯片的外量子效率约为 25%。美国 Cree 公司推出的新一代 XBTM 系列背面出光的大功率 LED 芯片, 尺寸为 0.9mm × 0.9mm, 顶部引线键合垫 (直径 122μm) 处于中央位置, “米” 字形电极 (宽度 30μm) 使注入电流能够较为均匀地扩展, 底部采用 AuSn 合金将芯片倒装焊接在外壳底盘上, 具有较低的热阻。工作电流 400mA 时波长为 405nm 和 470nm 的输出光功率分别为 250mW 和 150mW。由于 SiC 不仅导电而且具有良好的导热性能, 适宜做成耐高温的大功率器件, 因此, AlGaInN/SiC 背面出光的大功率 LED 在未来的照明变革中将是一种非常有竞争力的固体光源。

Cree 公司生产的 1W 白光 LED XL7090WHT, 采用小尺寸封装, 封装尺寸仅为 9mm × 74.3mm; 工作温度范围是 -20℃ ~ +80℃。XL7090WHT 的发光强度大, 电流 350mA 时的典型光通量为 60lm, 在瞬态脉冲电流 700mA 时典型光通量可达 98lm, 视角宽达 100°。

1.1.2 大功率 LED 的优点及特性

1. 大功率 LED 的优点

大功率 LED 是一种半导体器件, 只允许电流按一个方向流动。大功率 LED 与标准 LED 的差别在于它的输出功率, 传统 LED 的输出功率一般都限定在 50mW 以内, 而大功率 LED 可达 1 ~ 5W。在照明行业中, 将其与传统光源比较分析, 某些方面表现出难以替代的优点。LED 作为光源用于照明具有以下优点:

① 寿命长。可靠耐用, 维护费用极为低廉, 产品寿命长达 50000h, 24h 连续点亮可用 7 年, 比普通白炽灯泡长 100 倍。

② 高效率。大功率 LED 的光谱几乎全部集中于可见光频段,其发光效率可达 80% ~ 90%,光效为 75lm/W 的 LED 较同等亮度的白炽灯耗电减少约 80%,大功率 LED 比节能灯还要节能 1/4。

③ 色彩鲜艳、纯正,无须滤光镜。可用红、绿、蓝三色元素调成各种不同的颜色,可实现多变、逐变、混光效果,显色效果极佳。亮度和色彩的动态控制容易:可实现亮度连续可调,可实现色彩动态变换和数字化控制。

④ 点亮速度快。汽车信号灯是 LED 光源应用的一个重要领域,由于 LED 响应速度快(ns 级),在汽车上安装大功率 LED 刹车灯,可以减少汽车追尾事故的发生。

⑤ 外形尺寸灵活:可实现与建筑、车体等的有机融合。

⑥ 环保:无有害金属汞,无红外线和紫外线辐射。

尽管大功率 LED 具有许多优点,但目前仍存在下述缺点:

① 功率低。市场上的单体大功率 LED 的功率一般在 5W 以下,还没有出现更大功率的,这是目前 LED 难以成为照明首选的最大瓶颈。

② 需要严格控制温度。LED 是一种半导体材料,与普通二极管一样具有 PN 结,由于大功率 LED 的功率相对比较大,所以与功率半导体器件相同,需要考虑散热问题,结温过高会直接影响 LED 的寿命,并且会增大 LED 的光衰,情况严重时会将 LED 损坏。

③ 价格高。除了功率低外,价格是 LED 难以成为照明主流光源的主要因素,虽然 LED 目前已被大多数人认识,也被多数人看好,但其高昂的价格难以被消费者接受。目前,单体黄色 LED 大约 0.6 元/只,绿色与蓝色单体 LED 在 1.8 元/只左右,白色 LED 的价格达到了 2.2 ~ 5.5 元/只左右;如果将几十只单体 LED 组合,其成本将大大增加,如把一只 LED 安装在草坪灯里,其单价就相当于一般草坪灯的几倍,LED 要成为未来照明的主流光源,就一定要朝着高流明、低成本方向发展,市场才有可能突破。

④ 显色性偏低。目前用黄色荧光粉和蓝光产生的白光 LED,其显色性指数约为 80。作为一般照明还可以,但对于一些色彩分辨要求较高的场所就显得不够用。虽然通过增加适当红色荧光粉等方法,可以使显色指数提高到 90 或者更高,但是与白炽灯的 99 相比较,还是有一定的差距,而且其效率会受到影响。通过 RGB 混色处理也可以提高显色性,但是在技术的普及应用上还需要做更多的工作,因此在显色性方面,LED 还需要进一步提升。

2. 大功率 LED 特性

图 1-2 为大功率 LED 正向导通压降 (V_F) 和正向电流 (I_F) 的非线性关系曲线图。由图 1-2 可知,当正向电压超过某个阈值,即通常所说的导通电压之后,可近似认为, I_F 随着 V_F 的上升而急剧上升;即大功率 LED 是低电压、大电流的发光器件,当前大功率 LED 的最高 I_F 可达 1A,而 V_F 一般为 2 ~ 4V。

由于大功率 LED 的光特性通常都描述为电流 (I_F) 的函数,而不是电压 (V_F) 的函数。加上 LED 生产工艺和温度的不同,大功率 LED 的正向压降 (V_F) 变化范围会出现比较大的波动(最大可达 1V 以上),而由图 1-2 所示的 $V_F - I_F$ 曲线可知, V_F 的微小变化会引起 I_F 较大的变化;LED 的发光强度由流过 LED 的电流决定,电流过强会引起 LED 寿命衰减,电流过弱会影响 LED 的发光强度。所以,采用恒压源驱动不能保证 LED 亮度的一致性,并且影响 LED 的可靠性和寿命。因此,大功率的 LED 通常采用恒流源驱动,以保证大功率 LED 使

用的安全性,同时达到理想的发光强度。

图 1-3 是 LED 的光通量 (Φ_F/lm) 和温度 ($^{\circ}\text{C}$) 的关系曲线,由图 1-3 可知,光通量与温度成反比,温度的变化对 LED 的波长也有一定的影响,因此,良好的散热是 LED 保持恒定亮度的保证。

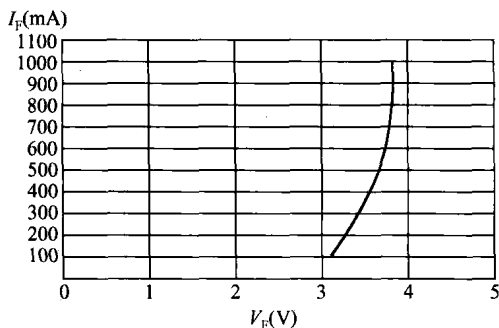


图 1-2 大功率 LED V_F 和 I_F 的关系曲线

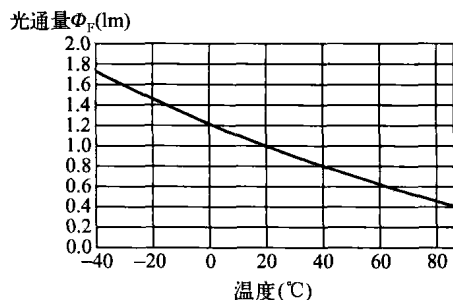


图 1-3 大功率 LED 的光通量和温度的关系曲线

LED 芯片及封装正在朝大功率方向发展,在大电流下产生比 $\phi 5\text{mm}$ LED 大 10 ~ 20 倍的光通量,必须采用有效的散热与不劣化的封装材料解决光衰问题,因此,外壳及封装也是其关键技术,能承受数瓦功率的 LED 封装已出现。5W 系列白、绿、蓝绿、蓝大功率 LED 已开始投放市场,白光 LED 光输出达 1871m,光效为 44.31m/W,就光衰问题,开发出可承受 10W 功率的 LED 大面积芯片;其尺寸为 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$,可在 5A 电流下工作,光输出达 2001m,作为固体照明光源有很大的发展空间。

Luxeon 系列功率 LED 是将 AlGaInN 功率型芯片,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外壳中,键合引线后进行封装。这种封装对于取光效率、散热性能、加大工作电流密度的设计都是最佳的。其主要特点:热阻低,一般仅为 $14^{\circ}\text{C}/\text{W}$,只有常规 LED 的 1/10;可靠性高,封装内部填充稳定的柔性胶凝体,在 $-40 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 范围,不会因温度骤变产生的内应力,使金丝与引线框架断开,并防止环氧树脂透镜变黄,引线框架也不会因氧化而玷污;反射杯和透镜的最佳设计使辐射图样可控和光学效率最高。另外,其输出光功率、外量子效率等性能优异,将 LED 固体光源提升到一个崭新的水平。

Norlux 系列功率 LED 的封装结构为六角形铝板做底座(使其不导电)的多芯片组合,底座直径为 31.75mm ,发光区位于其中心部位,面积约为 $0.375\text{mm} \times 25.4\text{mm}$,可容纳 40 只 LED 芯片,铝板同时作为热沉。芯片的键合引线通过底座上制作的两个接触点与正、负极连接,根据所需输出光功率的大小来确定底座上排列芯片的数目,可组合封装的超高亮度的 AlGaInN 和 AlGaInP 芯片,其发射光分别为单色、彩色或合成的白色,最后用高折射率的材料按光学设计形状进行包封。这种封装采用常规芯片高密度组合封装,其光效率高、热阻低,能较好地保护芯片与键合引线,在大电流下有较高的光输出功率,也是一种有发展前景的 LED 固体光源。

在应用中,可将已封装产品组装在一个带有铝夹层的金属芯 PCB 上,PCB 可作为器件电极连接的布线的载体,铝芯夹层则可作为热沉使用,以获得较高的发光通量和光电转换效率。此外,封装好的 SMDLED 体积很小,可灵活地组合起来,构成模块型、导光板型、聚

光型、反射型等多姿多彩的照明光源。大功率 LED 的热特性直接影响到 LED 的工作温度、发光效率、发光波长、使用寿命等,因此,对大功率 LED 芯片的封装设计、制造技术更显得尤为重要。

1.2 大功率白光 LED

1.2.1 大功率白光 LED 的发展及特点

1. 大功率白光 LED 的发展

自从出现 LED 以来,人们一直在努力追求实现固体白光照明光源,随着 LED 制造工艺的不断进步和新型材料(氮化物晶体和荧光粉)的开发及应用,使发白光 LED 的性能不断完善,并进入实用阶段。白光 LED 的出现,使白光 LED 应用领域跨足至高效率照明光源市场,白光 LED 发展历程如图 1-4 所示。

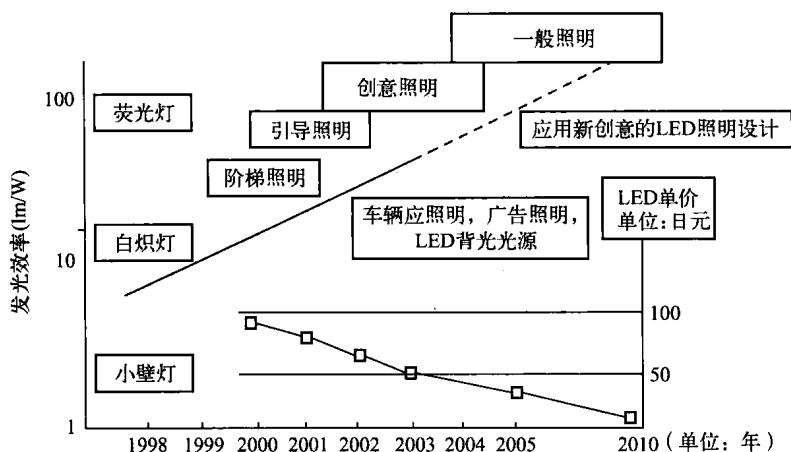


图 1-4 白光 LED 发展历程

可见光光谱的波长范围为 380 ~ 760nm, 是人眼可感受到的七色光, 红、橙、黄、绿、青、蓝、紫, 但这七种颜色的光都各自是一种单色光。例如 LED 发出红光的峰值波长为 565nm。在可见光的光谱中是没有白色光的, 因为白光不是单色光, 而是由多种单色光合成的复合光, 正如太阳光是由七种单色光合成的白色光, 彩色电视机中的白色光也是由三基色红、绿、蓝合成的。由此可见, 要使 LED 发出白光, 它的光谱特性应包括整个可见光谱的范围。但要制造这种性能的白光 LED, 在目前的工艺条件下是不可能的。根据人们对可见光的研究, 人眼睛所能见的白光, 至少需两种光的混合, 即二波长光(蓝色光 + 黄色光)或三波长光(蓝色光 + 绿色光 + 红色光)的混合模式。上述两种模式复合的白光, 都需要蓝色光, 所以摄取蓝色光已成为制造白光的关键技术, 即当前各大 LED 制造公司追逐的“蓝光技术”。目前国际上掌握“蓝光技术”的厂商仅有少数几家, 所以白光 LED 的推广应用, 尤其是大功率白光 LED 在我国的推广还有一个过程。

在 1998 年, 白光 LED 的光效只有 5lm/W, 到了 1999 年已达到 15lm/W, 这一指标与一

般家用白炽灯相近,而在 2000 年时,白光 LED 的光效已达 25lm/W,这一指标与卤钨灯相近。预计到 2015 年时,白光 LED 的光效可达到 150~200lm/W,其工作电流可达安培级。

普通照明用的白炽灯和卤钨灯虽然价格便宜,但光效低、寿命短、维护工作量大,若用白光 LED 做照明,不仅光效高,而且寿命长(连续工作时间为 10000h 以上),几乎无须维护。目前,德国 Hella 公司利用白光 LED 开发了飞机阅读灯;澳大利亚首都堪培拉的一条街道已用白光 LED 作为路灯照明。可以预见在不久的将来,白光 LED 一定会进入家庭取代现有的照明光源。

对于一般照明而言,人们更需要白色的光源。1998 年,白光 LED 开发成功。这种白光 LED 是将 GaN 芯片和钇铝石榴石(YAG)封装在一起做成的。GaN 芯片发蓝光($\lambda_p = 465\text{nm}$, $W_d = 30\text{nm}$),高温烧结制成的含 Ce^{3+} 的 YAG 荧光粉受此蓝光激发后发出峰值为 550nm 的黄色光。蓝光 LED 基片安装在碗形反射腔中,覆盖以混有 YAG 的树脂薄层,约 200~500nm。蓝光 LED 基片发出的蓝光部分被荧光粉吸收,另一部分蓝光与荧光粉发出的黄光混合,可以得到白色光。现在,对于 InGaN-YAG 白色 LED,通过改变 YAG 荧光粉的化学组成和调节荧光粉层的厚度,可以获得色温 3500~10000K 的各色白光,白色 LED 的结构如图 1-5 所示。图 1-6 所示为白色 LED 和普通白炽灯的发光光谱,表 1-1 列出了目前白色 LED 的种类及其发光原理。

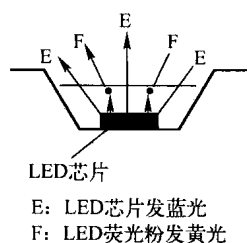


图 1-5 白色 LED 的结构

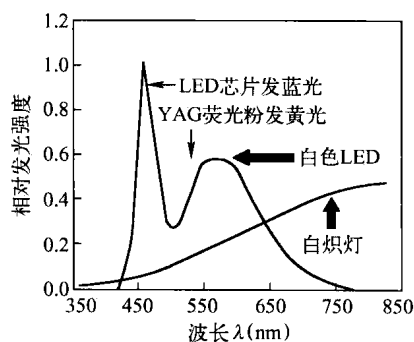


图 1-6 白色 LED 和普通白炽灯的发光光谱

表 1-1 目前白色 LED 的种类及其发光原理

芯片数	激发源	发光材料	发光原理
1	蓝色 LED	InGaN/YAG	InGaN 的蓝光与 YAG 的黄光混合成白光
	蓝色 LED	InGaN/荧光粉	InGaN 的蓝光激发的红绿蓝三基色荧光粉发白光
	蓝色 LED	ZnSe	由薄膜层发出的蓝光和在基板上激发出的黄光混色成白光
	紫外 LED	InGaN/荧光粉	InGaN 的紫外激发的红绿蓝三基色荧光粉发白光
2	蓝色 LED 黄绿 LED	InGaN、GaP	将具有补色关系的两种芯片封装在一起,构成白色 LED
3	蓝色 LED 绿色 LED 红色 LED	InGaN AlInGaP	将发三基色的三种小片封装在一起,构成白色 LED
多个	多种光色的 LED	InGaN、GaP、AlInGaP	将遍布可见光区的多种光芯片封装在一起,构成白色 LED

从表 1-3 可以看出某些种类的白色 LED 光源离不开四种荧光粉：即三基色稀土红、绿、蓝粉和石榴石结构的黄色粉，在未来较被看好的是三波长光，即以无机紫外光晶片加 RGB 三基色荧光粉，但此三基色荧光粉的粒度要求比较小，稳定性要求也高，具体应用方面还在探索之中。目前，白色 LED 已达到单只用电超过 1W，光输出 25lm，也增大了它的实用性。表 1-2 列出了白色 LED 的长远发展目标。

表 1-2 白色 LED 的长远发展目标

单只白色 LED	
输入功率	10W
发光效率	100lm/W
输出光能	1000lm/W

2. 大功率白光 LED 的特点

白光 LED 是最被看好的 LED 产品，其在照明市场的发展潜力值得期待。与白炽灯及荧光灯相比，白光 LED 具有体积小（多只、多种组合）、发热量低（没有热辐射）、耗电量小（低电压、低电流启动）、寿命长（10000h 以上）、反应速度快（可在高频操作）、环保（耐震、耐冲击不易破、废弃物可回收，没有污染）、可平面封装易开发成轻薄短小产品等优点，没有白炽灯高耗电、易碎及日光灯废弃物含汞污染等缺点，白光 LED 与现行照明设备比较见表 1-3。白光 LED 很被业界看好，在未来 10 年内，可能成为最具有潜力替代传统照明器具的照明器具。

表 1-3 白光 LED 与现行照明设备比较

照明方式	特 点
白光 LED	具有发热量低、耗电量少（白炽灯泡的 1/8，荧光灯泡的 1/2）、寿命长（数万小时以上，是荧光灯的 10 倍）、反应速度快、体积小、可平面封装等优点，易开发成轻薄短小的产品，被业界看好，在未来 10 年内，可能成为替代传统照明器具的一潜力商品
荧光灯	荧光灯省电，但废弃物有汞污染、易碎等问题
白炽钨丝灯泡	效率低、耗电高、寿命短、易碎

随着白光 LED 发光效率的逐步提高，将白光 LED 应用在照明的可能性也越来越大，但是很明显的是，单只白光 LED 的光通量偏低，因此以目前的封装形式不太可能以单只白光 LED 来达到照明所需要的流明数。为了得到光输出功率很大的光源，发光组件的大小很关键。如果期望提高光通量，就必须增加发光组件的尺寸，才能承受用来激发发光的大电流。但是，从光学系统角度来看，发光组件越小，光的利用效率越高，这是相当矛盾且必须面对的问题。针对这个问题，改善大功率白光 LED 的发光效率，目前有两方向：

① 将多只白光 LED 组成光源模块来使用，利用小功率 LED 芯片封装成一个模组，这样能够达到高亮度的要求。例如，Citizen 就是将 8 只小型 LED 封装在一起，让模组的发光效率达到 60lm/W。

② 使用较大面积的芯片，也就是说，将目前面积为 1mm^2 的小型芯片的面积提高到

10mm² 以上,借此增加发光量。虽然将 LED 芯片的面积予以大型化,借此能够获得较多的亮度,但因面积过大,在应用过程和结果上也会出现适得其反的现象。所以,针对这样的问题,部分 LED 业者就根据电极构造的改良和覆晶的构造,在芯片表面进行改良,来达到 50lm/W 的发光效率。

无论使用何种方法,都必须在极小的 LED 封装中处理极高的热量,若组件无法散去这些热量,除了各种封装材料会因为彼此间膨胀系数的不同而影响产品的可靠性外,芯片的发光效率更会随着温度的上升而明显地下降,并造成使用寿命的明显缩短。因此,如何散去组件中的热量,成为目前白光 LED 封装技术的重要课题。

例如,在白光 LED 覆晶封装的部分,由于发光层很接近封装,具有发光层的光向外部散出时,电极不会被遮蔽的优点,但缺点是所产生的热不容易消散。并非进行芯片表面改善后,再加上增加芯片面积就绝对可以提升亮度,因为当光从芯片内部向外散射时,芯片中这些改善的部分无法进行反射,所以在取光上会受到一点限制。根据计算,最佳发挥光效率的 LED 芯片尺寸是在 7mm² 左右。

大功率白光 LED 通常是用内含荧光体材料的密封树脂直接包覆 LED 芯片,此时密封树脂中荧光体材料的浓度可能出现偏差,最后造成白光 LED 的色温分布不均,因此将含荧光体材料的树脂性薄片与 LED 芯片结合,由于薄片厚度与荧光体材料的浓度经过严谨的管理,因此白光 LED 的色温分布不均比传统方式减少了 4/5。使用荧光体覆盖方式,配合 LED 芯片的发光特性,改变荧光体的浓度与薄片的厚度,就可以使白光 LED 的色温变化控制在预期范围内。

对于大功率白光 LED 而言,其最重要的是输出的光通量及光色,所以白光 LED 的一端不能遮光,需使用高透明效果的环氧树脂材料包覆。然而,目前的环氧树脂几乎都是不导热材料,因此对于目前的白光 LED 封装技术而言,其主要的散热均是利用其白光 LED 芯片下方的金属脚座散去组件所发出的热量。就目前的趋势看来,金属脚座材料的选择主要是以高热传导系数的材料组成,如铝、铜甚至陶瓷材料等,但这些材料与芯片间的热膨胀系数差异甚大。若将其直接接触,很可能因为在温度升高时材料间产生的应力而造成可靠性问题,所以一般都会在材料间加上兼具传导系数及膨胀系数的中间材料作为间隔。松下电器将多只白光 LED 制成在金属材料与金属系复合材料所制成的多层基板模块上以形成光源模块,利用光源基板的高导热效果,使光源的输出在长时间使用下仍能维持稳定。Lumileds 生产的白光 LED 基板所使用的材料为具有高传导系数的铜材,再将其连接至特制的金属电路板,兼顾电路导通及增加热传导效果。

大功率白光 LED 产品的芯片制造技术、封装技术似乎已经成为生产大功率白光 LED 的主流技术,然而大芯片相关的制造技术及封装技术不只是将芯片面积做大,若希望将白光 LED 应用于高亮度照明领域,相关技术仍有待进一步研究。

大功率白光 LED 应用于一般照明领域还有诸多问题需要解决,首先是白光 LED 的效率提升,例如 GaInN 系的绿光、蓝光以及近紫外光 LED 的效率仍有很大的开发裕度。而 LED 内部量子效率提升是最重要的项目,内部量子效率是由活性层的非发光再结合百分比与发光再结合百分比所决定的,因此可以把焦点锁定在非发光再结合这部分,并设法降低结晶缺陷。减少紫外光 LED 的转位密度可以明显提高内部量子效率,未来必须针对降低紫外光 LED 的转位密度进行研究。不过这项对策对绿光、蓝光 LED 并没有明显的

影响。

目前,白光 LED 仍处于发展阶段,在使用寿命上仍待改进,但基本上没有白炽灯、荧光灯的缺点,价格过高是未能普及的主要原因。未来白光 LED 的应用市场将非常广泛,包括手电筒、装饰灯、LCD 背光源、汽车照明市场、投影光源、通用照明市场等,不过最被看好的市场以及最大的市场还是通用照明市场。

白光 LED 亮度和功率每一次提高,都进一步扩展了它的应用范围。目前,白色 LED 在景观照明、庭园灯、汽车内部照明、中小尺寸的 LCD 背光源等方面已大量应用。若白光 LED 以 $1\text{lm}/\text{个}$ 单位为基础,每单位降到 1 元,将进入一般家庭的户外照明;当降到 0.5 元时,可望进入室内照明、走廊照明等市场;当降到 0.25 元时,将开始置换荧光灯。从发光效率看,一旦跨进 $60\text{lm}/\text{W}$,相当于 20W 的荧光灯,白光 LED 将迅速普及。在未来几年中,白光 LED 照明将逐渐普及至一般家庭的各种照明灯具,正式担当 21 世纪的照明新光源。

1.2.2 大功率白光 LED 的效率及参数

1. 大功率白光 LED 的量子效率

所谓 LED 器件的量子效率,即是器件的电能转换成光能的能力,通常可将这种电光转换能力定义为外量子效率 η_{ex} ,它是器件的注入效率 η_{J} 、内量子效率 η_{i} 、电子输运效率 η_{t} 和出光效率 η_{o} 的乘积。

$$\eta_{\text{ex}} = \eta_{\text{J}} \times \eta_{\text{i}} \times \eta_{\text{t}} \times \eta_{\text{o}} \quad (1-1)$$

对于 InGaAlP、InGaN LED 器件,PN 结两边的禁带宽度 E_{g} 与掺杂浓度均有较大差异。由于器件的外延生长形成,发光区的 PN 结为突变结,电子输运效率也接近于 1。此外,鉴于当前 InGaAlP 与 InGaN 的器件结构与生长工艺十分成熟,实践证明,现代技术已足够使内量子效率提高到接近 100% 的水平,因此,LED 器件的外量子效率主要取决于出光效率 η_{o} 。如果将芯片做一个吸收系数为 α ,体积为 v ,被面积为 A_{i} 的 N 个面所包围的光学腔,那么该芯片的出光效率可表示为:

$$\eta_{\text{N}} = \sum A_{\text{i}} \times T_{\text{i}} / [\sum (1 - R_{\text{i}}) A_{\text{i}} + 4\alpha \times v] \quad (1-2)$$

这里, T_{i} 与 R_{i} 分别是 A_{i} 的透过率与反射率。对于一个实际的 LED 芯片,计算表明,芯片表面很小的透过率是 LED 器件出光效率变得很小的主要原因。其起因是芯片表面两侧物质所存在的较大的折射率差异,根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1-3)$$

通常芯片材料的折射率 $n_1 \approx 3.6$,空气的折射率 $n_2 = 1$ 。可算得界面处发生全反射 ($\theta_2 = 90^\circ$) 的临界角 $\theta_1 = \theta_0 = 16.2^\circ$ 。也就是说,从芯片内部射向表面的光束,只有 4% 可以射出表面,其余的光能大部分反射回芯片材料内部而被(衬底)吸收。

根据折射定律,光线从光密介质入射到光疏介质时,当入射角达到一定值,即大于等于临界角时,会发生全发射。以 GaN 蓝色芯片来说, GaN 材料的折射率是 2.3,当光线从晶体内部射向空气时,根据折射定律,临界角

$$\theta_0 = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1-4)$$

其中 n_2 等于 1,即空气的折射率, n_1 是 GaN 的折射率,由此计算得到临界角 θ_0 约为