

以发光二极管(light emitting diode, LED)为核心的新一代半导体照明(semiconductor lighting,也称为 solid state lighting, SSL,即固态照明)是对传统照明体系的一场革命性的颠覆,作为一种安全、健康的“绿色光源”,节能环保效果非常明显。2007 年美国《自然》杂志发表文章称:照明占全球能源消耗的 8.9%、电力消耗的 19%,对 GDP 的贡献率仅是 0.63%。如果采用半导体照明技术,有望使 2050 年的照明用电量仍维持 2007 年的水平,而对 GDP 的贡献率将上升至 1.63%。不仅如此,拥有无限潜能的半导体照明技术还将在人类健康、信息、农业、航空、航天等领域发挥重要的作用,其数字化的特性也是未来智能及物联网时代的技术支撑之一,它将引起人类生产、生活方式的巨大变化,其发展前景毋庸置疑。

LED 是典型的电致发光光源,是半导体照明的核心。目前,蓝光 LED+黄色荧光粉合成白光光源的发光效率已经超过 300lm/W(2015 年实验室水平),显色指数达到 80 以上。但是,作为照明光源 LED 仍需彻底解决以下问题:光、电、色参数随电流、温度的改变而变化;即使发光效率达到 300lm/W,其外量子效率也仅在 50% 左右,即仍有 50% 左右的电能转化为无用的热量,若考虑整体灯具,则还需要考虑电源效率、灯具效率等因素,则发热的比例会更大。这些热量将引起 LED 结温的升高,不仅影响半导体照明的性能参数与质量,还将大幅降低 LED 的寿命,研究表明结温每升高 10 度,LED 寿命将减少到 50%。因此,LED 热设计与热管理是长期的、重要的工作。

3.1 LED 基本原理

典型的 LED 芯片分为垂直结构和平面结构,如图 3-1(a)和(b)所示。由多层不同性质的半导体材料相叠、并分别在最顶层 p 型层和相应的 n 型层上分别制作正负金属电极。半导体材料从下往上依次包括衬底层、过渡层、发光层(有源层)、顶层。

其中,发光层的核心是 pn 结,当给 pn 结加正向偏置时,n 区的电子克服 pn 结势垒扩散到 p 区,p 区的空穴克服 pn 结势垒扩散到 n 区,形成正向注入的扩散电流。同时,在耗尽区两侧分别形成过剩电

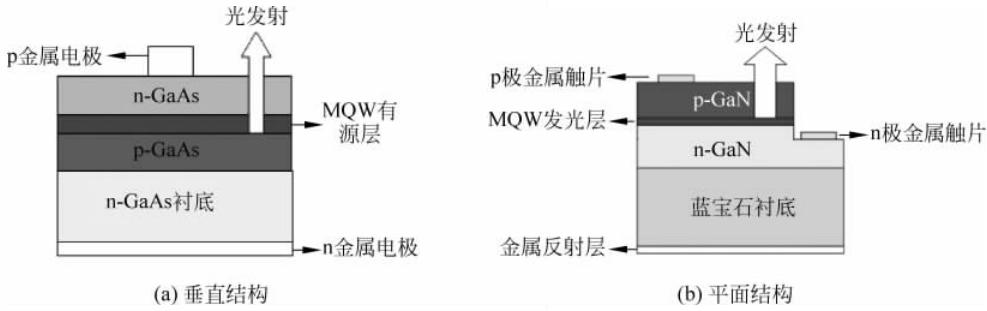


图 3-1 LED 芯片垂直结构和平面结构

子和过剩空穴(简称过剩载流子)分布。在扩散过程中,电子与空穴碰撞发生复合,即电子从导带跃迁至价带的同时释放大小等同于禁带宽度的能量,同时,跃迁过程必须保证能量守恒和电子动量守恒,即 $h\nu = E_g, \Delta k = 0$ 。复合包括辐射复合和非辐射复合,前者是指电子从导带跃迁至价带与空穴复合的同时释放大小等同于禁带宽度的光子,后者是指电子从导带跃迁至价带与空穴复合的同时释放大小等同于禁带宽度的若干个声子。pn 结及发光过程见图 3-2(b)。使用内量子效率 η 表征注入到发光区内的电子-空穴对辐射复合发射光子的程度,所以, $1 - \eta$ 表征 LED 发热的程度。此外,半导体材料本身均具有一定的电阻率,金属电极与半导体材料之间形成欧姆接触时也会产生接触电阻,封装芯片至管壳中也将产生一定的接触电阻。正向偏置的注入电流流经这些电阻产生的焦耳热与非辐射复合的热量一起提高了 LED 中 pn 结区域(有源区)的温度(称为 LED 的结温),从而影响 LED 的性能。为保证 LED 有足够的寿命裕量,正常工作时的结温一般不应超过 110℃。

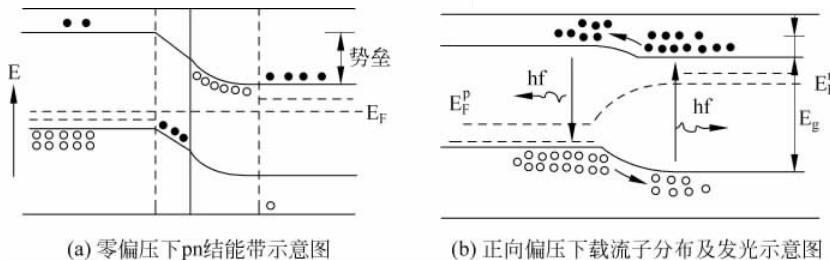


图 3-2 零偏压下 pn 结能带示意图与正向偏压下载流子分布及发光示意图

前面讨论的 pn 结为同质结。由于同质结 LED 有源区中维持不了很高的载流子浓度,即使选择了辐射复合率很高的直接带隙半导体材料,其发光效率仍很低。目前,商用 LED 主要采用双异质结结构(double hetero-structure, DH)和量子阱结构(quantum well, QW)作为有源区。

3.1.1 双异质结结构 LED 原理

典型的双异质结(double heterojunction, DH)LED 器件结构如图 3-3 所示,在 n 型衬底(基板)上外延生长 n 型过渡层以便减少 DH 层的缺陷,过渡层上依次生长宽禁带的

N型层(下限制层)、窄禁带的低掺杂p型层(发光区、有源区)、宽禁带的P型层(上限制层),以上三层构成NpP双异质结结构,该结构类似于“三明治”,发光的区域仅限于夹在两个宽禁带材料中央很薄的窄禁带材料中。再在P型层之上生长高掺杂的顶层(cap layer,称为帽层),该层的作用是为金属电极与半导体材料间提供低电阻率及高可靠性的欧姆接触以及控制通过有源区的电流分布。最后分别在p型顶层上部和N型衬底下部制作正负金属电极。

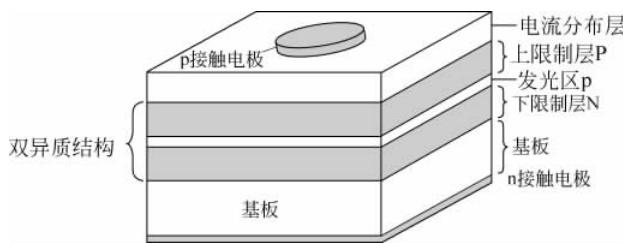


图 3-3 一种 DH-LED 器件结构示意图

以图3-4所示的AlGaAs/GaAs系的红橙光DH-LED为例。图3-4(a)为DH结构示意图,图3-4(b)为未加偏压时的热平衡态下的DH能带图,此时,三种材料具有统一的费米能级 E_F 。为其加上正向偏压后,热平衡态被打破,三种材料的准费米能级分离,Np结的电子有效势垒降低,N区的电子扩散进入至p型层,使得Np结p区内的过剩电子浓度很高。但是,此时空穴的有效势垒仍然很高,继续阻止p区的空穴扩散进入到N区,即p型层的空穴浓度几乎没有减少。扩散进入p型层的过剩电子将向P区方向继续扩散,由于p型层很薄,许多过剩电子将会扩散至pP结位置。由于pP结的电子有效势垒很高,将阻止过剩电子的继续扩散,维持了p区过剩电子的高浓度状态。此外,由于pN结势垒一直阻止p区空穴的扩散,p区的空穴浓度也将维持高浓度状态。p区中电子与空穴发生辐射复合而发光的过程也遵从能量守恒定律和动量守恒定律。图3-5为正向偏压下DH-LED结区过剩载流子分布示意图,与图3-2所示的同质结LED相比,DH-LED有源区中过剩电子与空穴浓度均很高,有利于提升内量子效率。

与同质结LED相比,DH-LED具有以下优势:

(1) 在超注入、高的电子/空穴注入比及高的pP结电子有效势垒综合作用下,能在较小的正向偏压作用(即较小的注入电流密度)下就可维持有源区过剩载流子的高浓度状态,从而保证了内量子效率远高于同质结;

(2) 发光区集中在p型层,且其厚度远低于电子的扩散长度,光子再吸收的几率低于同质结;

(3) P区与N区的禁带宽度均大于发光的p区,故p区发出的光子进入到N、P两区后满足透明条件,可以无吸收的传输。由于实际LED中P、N两区的体积远远大于p区,将明显地提高LED的发光效率。

当然,DH结构也有弱点,如p型层的折射率高于N、P两层,形成了光波导效应,仅有反射角小于全反射角的光子才可以折射至N、P两区,这将引起出光效率(也叫光萃取效率)的降低,从而导致DH-LED发光效率的降低。

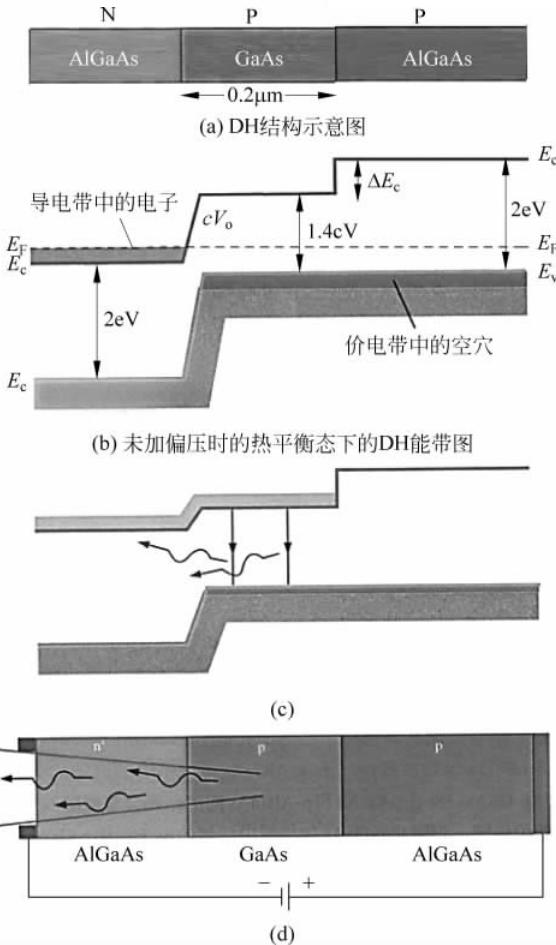


图 3-4 AlGaAs/GaAs 系红橙光 DH-LED 结构示意图以及未加偏压时的 DH 能带图

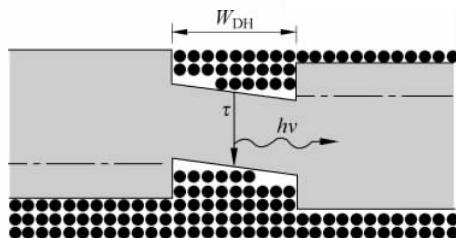


图 3-5 正向偏压下 DH-LED 结区过剩载流子分布示意图

3.1.2 量子阱结构 LED 原理

一种量子阱 LED 的结构如图 3-6 所示,在图形化的 n 型蓝宝石衬底上低温外延生长 n 型 GaN 过渡层,该层的作用是为其上生长的半导体材料提供低缺陷的高质量晶体结构,再在其上生长量子阱诸层。量子阱由势阱和势垒共同组成,如图 3-7 所示。称仅生长

一对势阱和势垒的称单量子阱(single quantum well, SQW),生长多对且势垒厚度远大于势阱厚度的称多量子阱(multi-quantum well, 简称为 MQW)。若势垒厚度与势阱厚度相似,则称之为超晶格结构。再在 QW 层上生长顶层,其作用与 DH 结构相同,金属电极的结构与前述 LED 一致。发光区域集中在 QW 层区。

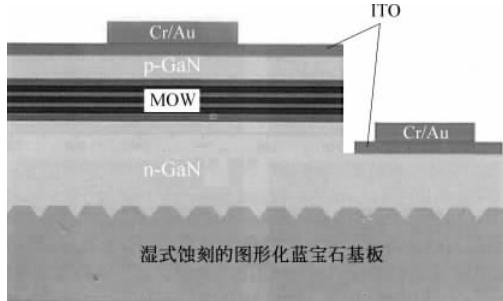


图 3-6 常用的蓝绿光多量子阱 LED 的结构示意图

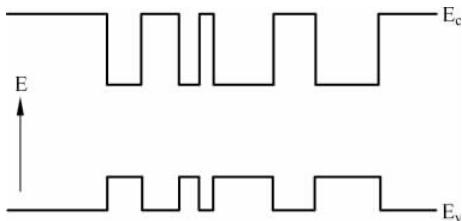


图 3-7 多量子阱结构与能带示意图

量子阱结构 LED 是在 DH 结构基础之上,得益于诸如 MOCVD(金属氯化物化学气相淀积)及 MBE(分子束外延)等精密外延技术的进步而发展起来的新型发光器件结构。SQW 结构与 DH 结构相同,仅当 p 型层的厚度小于德布洛意(De Broglie)波长 λ_d ($\lambda_d = h/p$, 此处, h 为普朗克常数, p 为电子的动量, 通常 λ_d 约为几十纳米量级)时, 导带与价带的能带不再连续, 分别分裂成如图 3-8(a)所示的系列分离能级, 态密度函数也遵从如图 3-8(b)所示的台阶函数分布, 过剩电子将主要分布在导带的 E_{1c} 能级以上, 过剩空穴主要分布在价带的重空穴能级 E_{1h} 和轻空穴能级 E_{2h} 以下, 载流子按照能量的分布更为集中, 如图 3-8(c)所示。势阱中的电子与空穴碰撞发生辐射复合而发光, 量子阱中电子从导带

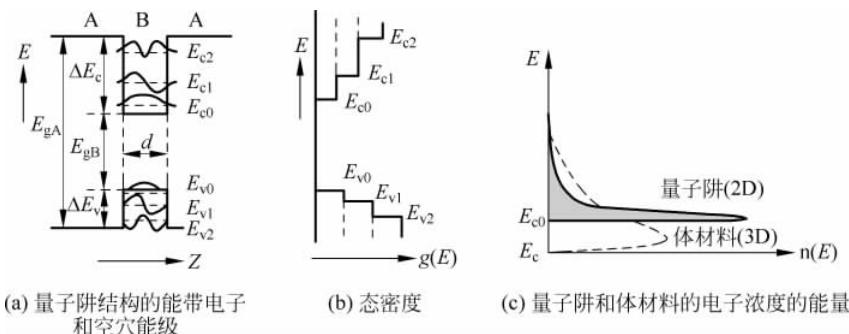


图 3-8 量子阱结构的能带电子和空穴能级和态密度以及量子阱和体材料的电子浓度的能量分布

电子能级到价带空穴能级的跃迁选择定则为 $\Delta n = 0$, 即居于第一电子能级的电子只能跃迁到第一重空穴能级或第一轻空穴能级上, 第二电子能级的电子只能跃迁到第二重空穴能级或第二轻空穴能级上, 依此类推。这是动量守恒定律在 QW 结构中的表现形式, 如图 3-9 所示。

与 DH-LED 相比, QW-LED 更具优势, 主要体现在:

- (1) 势阱厚度更薄, 较低注入电流密度下即可获得高的载流子浓度, 内量子效率更高, 光子吸收更小;
- (2) 分立能级结构使注入效率更高、辐射光子的能量更为集中、光谱更纯;
- (3) 采用 MQW 结构可以使 LED 获得更大的输出光通量。

目前, QW-LED 最大的问题是发光效率随注入电流的增大而减小, 除大注入引起的“载流子溢流”(overflow of carriers)、俄歇复合外, 其他物理机理尚未完全清楚。研究发现蓝宝石衬底 c-plane 方向外延生长会在晶体内产生自发极化与压电极化, 极化电场将使 QW 能带倾斜, 致使量子阱中电子波函数与空穴波函数在空间上分离, 从而减少了发生复合的几率。还发现由于电子与空穴的迁移率不同, 造成 MQW 各阱中的载流子浓度不均匀匹配, 降低了发光效率。此外, 随着注入电流的增加, 俄歇复合快速增加, 也将降低发光效率。该领域的研究还在不断深入, 比如, 蓝宝石图形衬底外延、无极化方向外延及量子阱中生长高能量的电子势垒、渐变量子阱等。此外, 新型衬底材料的出现将使得蓝绿光 LED 的同质外延成为可能。这些技术均可大幅提升 LED 的内量子效率。

3.2 芯片

3.2.1 LED 衬底材料与芯片结构

从结构上 LED 芯片可分为垂直结构和平面结构, 如图 3-1 所示。上述芯片均为正装结构, 即封装时直接将芯片衬底贴装在支架或管壳电极处, p 型电极通过键合金丝与管壳电气连接。垂直结构工艺简单, 电极位于芯片上下端面, 发光体积大, 容易获得均匀的电流分布, p 电极遮光效应低。而平面结构工艺复杂, 需要在 p 面挖槽至 n 型过渡层, 然后分别在顶部的 p 型层和 n 型过渡层制作正负电极。n 型电极减小了发光区体积, 且这种电极结构也很难实现均匀的电流分布。

常用的 LED 衬底材料包括: 蓝宝石(Al_2O_3)、碳化硅(SiC)、硅(Si)、砷化镓(GaAs)等。前三种材料为常用的蓝光、绿光 LED 的衬底, 在其上生长辐射蓝、绿光的 AlGaN 系列有源层。砷化镓为常用的红、橙、黄光 LED 的衬底, 在其上生长 AlGaAs、AlGaAsP 系列有源层。常用 LED 衬底材料性能如表 3-1 所示。

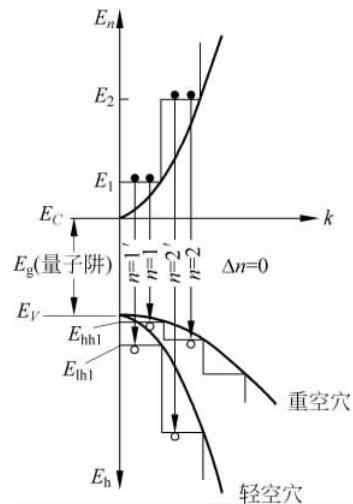


图 3-9 量子阱中电子跃迁选择定则

由于 Al_2O_3 晶体生长技术成熟、单晶质量高、理化性能稳定、机械强度高、成本低，蓝宝石是最常用的蓝光、绿光 LED 的衬底。但是，蓝宝石也存在一些问题，例如：

- (1) 由于晶格热失配，难于直接生长高质量外延层；
- (2) 由于绝缘体无法制作简单的垂直结构 LED，只能制作平面结构 LED，造成有效发光面积的减少、工艺复杂化；
- (3) 难于高浓度 p 型掺杂，很难制作出小的有效电极面积、低电阻的金属电极；
- (4) 蓝宝石的热导率很低，若将 LED 芯片的衬底直接粘接到管壳（正装）则从发光区产生的热流量需要通过几乎整个芯片厚度（ $100\sim200\mu\text{m}$ ）的距离才能将热流量传导出管芯，造成芯片热阻很大。对于大功率 LED 器件应用，正装方式将造成 LED 结温升高、器件性能大幅降低，甚至不能正常使用。

表 3-1 常用 LED 衬底材料的性能

衬底材料	导热系数/ W/(m·K)	膨胀系数/ $\times 10^{-6}$	稳定性	导热性	成本	静电释放 能力
蓝宝石(Al_2O_3)	46	1.9	一般	差	中	一般
硅(Si)	150	5~20	良	好	低	好
碳化硅(SiC)	490	-1.4	良	好	高	好
砷化镓(GaAs)	56	6	良	好	高	好
钨铜合金	180~260	7.0~11.7	良	好	中	差

碳化硅化学稳定性优良、导电性能好、热导率高、禁带宽度宽、晶格热失配小，也适合用于蓝绿光 LED 衬底，并具有以下优势：

- (1) 由于导电性能好，可以制备工艺简单的垂直结构 LED 芯片；
- (2) 热导率比于蓝宝石衬底高约 10 倍，芯片热阻也将降低到 10%，即使正装也可以满足大功率 LED 的正常使用；
- (3) 由于晶格热失配小，容易生长出缺陷少的高质量发光层，内量子效率更高。

碳化硅的单晶质量还没有达到蓝宝石的水准，机械加工能力也较弱，特别是高的单晶制作成本是阻碍碳化硅衬底快速普及发展并替代蓝宝石的瓶颈。

3.2.2 功率型 LED 芯片

一般将电功率 0.5W 以上的 LED 芯片称为功率型。为保证器件可靠稳定地工作，需要较低的器件热阻，如 luxeon 系列 1W 的 LED 器件的热阻小于 10K/W ，如图 3-10 所示。该热阻包括了芯片本身的热阻（简称芯片热阻）和封装材料、封装工艺带来的热阻（简称封装热阻）。对于功率高于 0.5W 的 LED 芯片设计必须要考虑散热结构，常用的功率型 LED 芯片结构包括：正装型芯片、倒装型芯片(flip-chip, FC)、置换衬底型芯片。

1. 正装芯片

正装芯片也称为常规芯片 (conventional chip, CC)，图 3-11 为晶元公司 1W 正装芯片的结构图。该芯片的衬底为蓝宝石，在 p 型层上挖槽依次通过有源层(图中虚线)、n 型

缓冲层中部制出n型电极。围绕n电极在p型层上制作出p电极,见图中对称的两条细曲线。这种电极图形可以使得流过有源层的电流均匀化。该芯片的尺寸为:芯片的长和宽38mil(965μm),厚度5.9mil(150μm),p型电极键合垫(bonding pad,BP)材质为金,直径3.9mil(100μm),n型电极键合垫材质也为金,直径4.1mil(105μm)。芯片的主要指标见表3-2。



图 3-10 luxeon 系列 1W 的 LED 器件结构示意图

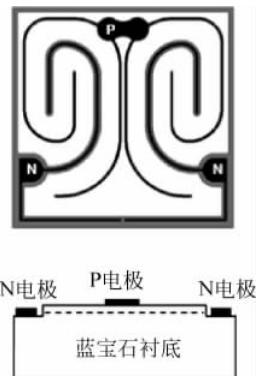


图 3-11 晶元公司 1W 正装芯片的结构图

表 3-2 晶元公司 1W 正装芯片的光电参数

参数	符号		条件	最小值	典型值	最大值	单位
正向电压	V_{f1}		$I_f = 350\mu A$	1.6	—	—	V
	V_{f2}		$I_f = 350mA$	—	3.5	3.8	V
反向电流	I_r		$V_r = 5V$	—	—	2	μA
主波长	λ_d		$I_f = 350mA$	455	460	465	nm
辐射功率	P_o	H13	$I_f = 350mA$	185	—	220	mW
		H14		220	—	255	

2. 倒装芯片

倒装芯片(flip chip,FC)为常用的功率型LED芯片。图3-12为Lumileds公司生产的1W倒装LED芯片及载体器件、封装结构示意图。由图可知,芯片正负电极均制作在p面,直接将p面处的正负电极焊接到基板上,发光区距离芯片p面仅约10μm左右的距离,大大降低了芯片热阻。为了获得均匀的电流分布和小的热应变、高可靠的焊接质量,正负电极采用了大面积半透明镍金合金“插指”结构正负电极,图3-12(a)中三个“细指”为n电极,它是在p面挖槽至n型缓冲层并形成欧姆接触而成,p电极为与之交叉的4个“粗指”。并分别在图3-12(a)中p、n电极的适当位置制作金球焊点(bump)用于焊接,如图3-12(a)所示。封装中,首先将芯片的金球焊点与一硅基过渡基片(硅热沉)上对应的电极焊点对准之后共晶焊接制出载体器件,见图3-12(b)。为易于封装在圆形管壳上,可将硅热沉设计为六角形。然后,再将该载体器件安装至支架或管壳中。由于在硅基片上容易制作齐纳二极管用于LED的静电放电(electro static discharge,ESD)保护,这种结构可以大大缓解由于绝缘性蓝宝石衬底引起的静电损伤。这种LED芯片与硅热沉间的

焊接需要高精度的金球焊点对金球焊点共晶焊接设备,技术要求高、设备昂贵、有效焊接面积小造成的焊接热阻较高。封装厂家直接购买载体器件进行二次封装,既增加了附加热阻,也增加了成本。

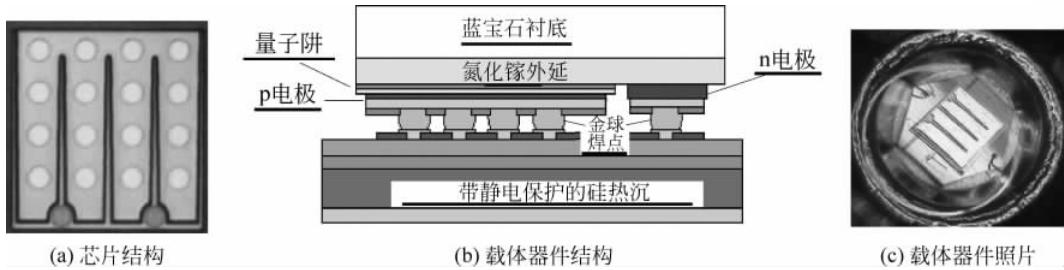


图 3-12 Lumileds 公司 1W 倒装 LED 芯片结构和载体器件结构及载体器件照片

图 3-13 为另一种近几年发展起来的实用化倒装 LED 芯片,可以直接封装在普通基板或管壳内。由图 3-13(a)可知,芯片正负电极为尺寸相等的两个均匀大面积加厚金属层外电极,制作在蓝宝石衬底的背面,间隔约为芯片长度的 1/3。其中,外电极的阴极(n 电极)内部通过在其局部挖槽或微孔至量子阱有源层背部的 n 型缓冲层形成 n 型欧姆接触。由于外电极有效散热面积的增加,热阻较前一种更低,使用常规的芯片贴片机、800 目以上银锡或银铜锡系列焊膏即可进行贴装,之后可在气氛炉中经预热浸润和高温熔融两个过程获得满意的焊接结果。但是,这种结构的芯片电流分布劣于前一种,对基板的热膨胀系数要求更为严格,芯片设计中必须考虑背向反射光的增强处理。图 3-13(b)为封装在 2835 管壳的倒装芯片的照片。

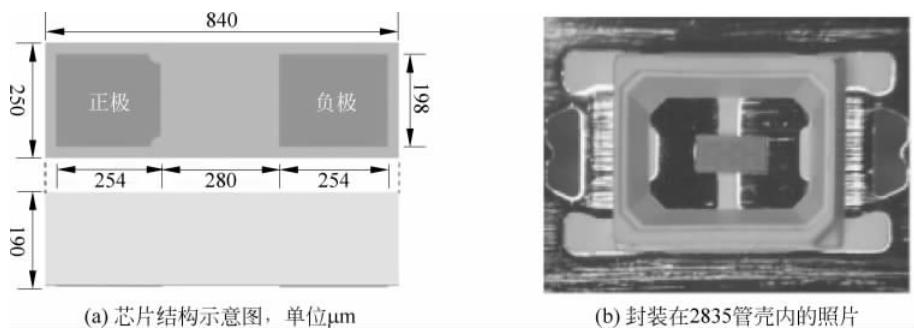


图 3-13 一种实用倒装 LED 芯片结构示意图及封装在 2835 管壳内的照片

主要指标见表 3-3,典型的光电曲线见图 3-14~图 3-19。

表 3-3 芯片典型光电参数(测试环境温度 $T_a=25^\circ\text{C}$)

参 数	符 号	测 试 条 件	最 小 值	最 大 值	单 位
正向电压	V_{f1}	$I_f=90\text{mA}$	2.8	3.4	V
	V_{f2}	$I_f=10\text{A}$	2	—	V
漏电压	I_r	$V_r=-5\text{V}$	0	2	A
亮度	L_{op}	$I_f=90\text{mA}$	125	140	mW
主波长	λ_d	$I_f=90\text{mA}$	450	460	nm

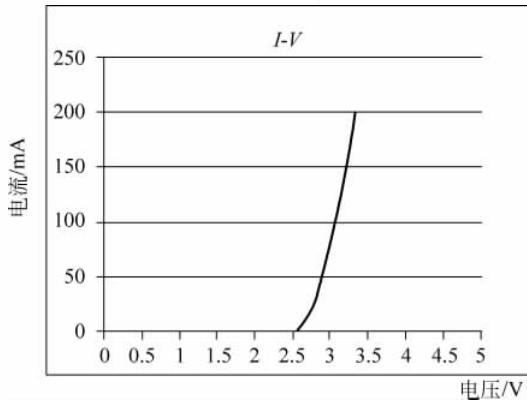


图 3-14 驱动电流与工作电压关系

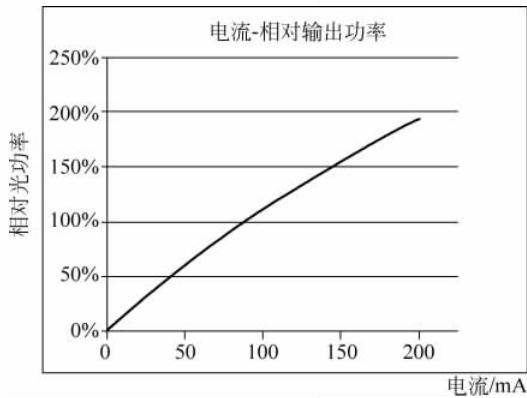


图 3-15 驱动电流与输出功率关系

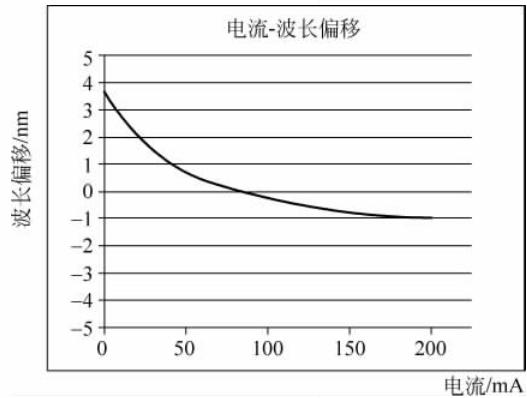


图 3-16 驱动电流与波长偏移关系曲线

3. 置换衬底型芯片

另外一种降低芯片热阻的方法是将热导率低的衬底置换成热导率高的材料，制作思路为将制出的 LED 外延结构片从 n 型缓冲层处与衬底分离，然后将分离后的 p 型层与

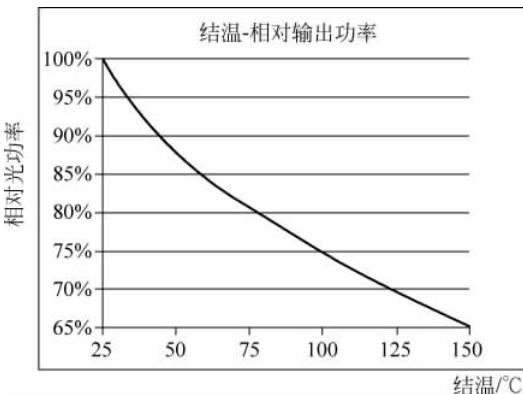


图 3-17 结温与输出功率关系曲线

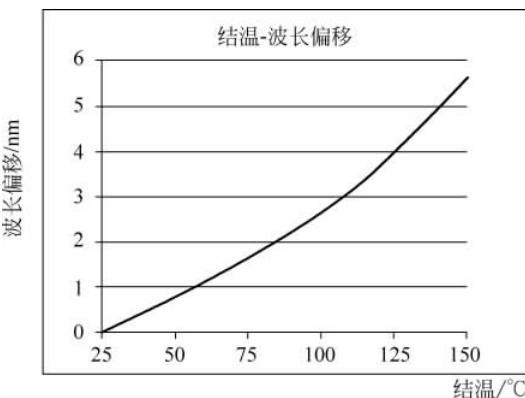


图 3-18 结温与波长偏移关系曲线

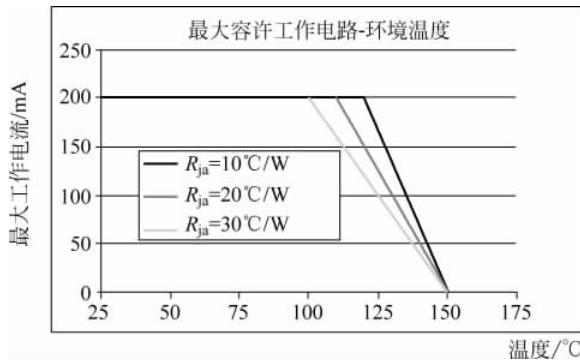


图 3-19 环境温度与最大容许工作电流关系曲线

高热导率材料键合或焊接为一体，最后在 n 型缓冲层、置换衬底处分别制作正负电极。

分离工艺有许多方法，比如对于易腐蚀的衬底材料（如砷化镓）采用湿法腐蚀至缓冲层。对于难腐蚀的衬底材料（如蓝宝石）可以采用激光剥离技术（laser lift off, LLO）。LLO 原理为波长为 248nm 的氩离子激光辐射至 GaN 与蓝宝石界面，激光能量热分解 GaN 为 Ga 原子和氮气，加温外延片至 Ga 的熔点，即可将 GaN/AlGaN 系外延层与蓝宝

石衬底分离。

为获得低热阻,置换衬底后待键合材料的热导率要更高,其热膨胀系数与外延材料接近,同时还要考虑置换后新衬底对光的吸收问题。若禁带宽度低于所发光子能量,则应考虑在键合界面增加光反射层,以提高出光效率。对于常用的蓝宝石衬底生长的AlGaN/GaN基LED,典型的置换衬底为硅,由表2-1可知,硅的热导率大约是蓝宝石的3倍,置换衬底后LED芯片热阻减少了2/3。但是,由于硅的禁带宽度小于蓝宝石,为避免硅的光吸收,应在硅与p-GaN键合界面设置反光层。也可将剥离掉蓝宝石后的LED焊接至铜合金衬底上,或者在金属化后的p型GaN层外电镀铜层形成衬底,如图3-20所示,称之为垂直薄膜(vertical thin film,VTF)LED芯片,原因是芯片侧面的出光尺寸很小,光通量几乎100%从芯片表面向上输出。当然,也可将倒装LED结构片键合至对应的高导热绝缘衬底(如硅)上,并在绝缘硅衬底上制出正负电极及焊接垫。然后再进行激光剥离、切割划片等工艺,最终制成倒装的薄膜结构芯片(thin film flip chip,TFFC)。与传统的倒装芯片和垂直薄膜LED芯片相比,TFFC具有更高的亮度、更大的输出光通量及更好的热特性。

3.3 LED芯片热特性

LED是热敏发光器件,结温的升高将引起LED性能与寿命的劣化。

3.3.1 结温与热阻

1. LED的结温(pn junction temperature, T_j)

LED工作过程中,在非辐射复合及光子吸收产生的晶格振动、半导体材料体电阻、金属—半导体欧姆接触电阻、封装材料电阻等原因产生的焦耳热共同作用下,热平衡后pn结区将维持在某个高于外部环境的温度,称此温度为LED的结温。利用LED各物理量与温度的关系可以求出结温,也可利用LED光电参数与温度的关系直接测出结温,最常用的方法为正向电压法。首先,将LED器件安装在一散热功率足够的散热器上,在小电流条件下测出室温 T_0 下的正向偏压 V_{f0} ,再将该LED器件置于温度为 T 的烘箱中待热平衡,在相同小电流条件下测出温度 T 下的正向偏压 V_{fT} ;依据经验公式(3-1)测出LED的温度系数 k_v

$$k_v = (V_{f0} - V_{fT}) / (T_0 - T) \quad (3-1)$$

所谓小电流条件是指该电流对LED结温不产生明显的温升,一般应小于标称工作电流的3%,如工作电流为350mA,测试用的小电流不高于10mA。最后,将该LED再次移出烘箱置于室温环境,待完全冷却至 T_0 时施加正常标称工作电流,此时,LED的结温

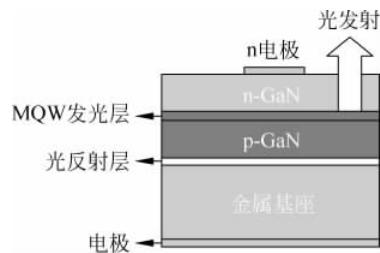


图3-20 垂直薄膜(VTF)LED芯片示意图

升高至 T_j , 依据经验公式(3-2)即可测出 LED 的结温

$$T_j = k_v(V_f - V_{f0}) + T_0 \quad (3-2)$$

式中, V_f 为标称工作电流下的正向电压。

2. 稳态热阻(steady state thermal resistance, R)

简称热阻, 指系统热平衡后 LED 的结温与环境温度差与所输入的产生该温度差的电功率之比, 可由下式表示:

$$R = \frac{T_j - T_a}{Q} = \frac{T_j - T_a}{P_d} = \frac{T_j - T_a}{IV_f - P_0} \quad (3-3)$$

需要注意的是, 式中的 Q 为 LED 工作时产生的热流量, 即为热设计功率(thermal design power), 用 P_d 表示。由前述的 LED 发光原理可知, 它为输入的总电功率 IV_f 与发光功率 P_0 之差。系统总热阻等于各个不同结构层的热阻串联之和, 包括: LED 芯片+热沉的热阻(封装后的 LED 器件热阻)、PCB 铝基板(包括热沉与基板的接触热阻)、散热器至空气界面的热阻(包括散热器与基板的接触热阻及对流热阻、辐射热阻)。

对于已确定芯片、封装结构及工艺制作出的 LED 器件, 其热阻是确定的, 外量子效率也是确定的。此时, LED 的结温与环境温度之间存在一个由公式(3-3)确定的关联关系, 环境温度的升高、注入电流的增加、封装制程中的不良操作等均可造成结温的升高, 导致 LED 性能变差。

3. 瞬态热阻(transient thermal resistance)

指热平衡前的热阻, 是时间的函数, 初始值很小, 逐步增加, 直至达到稳态热阻。

LED 系统的热平衡时间正比于传热/散热材料的质量、表面积、热容量, 也与散热环境条件相关。例如, 在散热环境相同的条件下, 未加散热器的 LED 器件的热平衡时间短于加有散热器的; 对于安装在结构相同、材料不同(如铜和铝)散热器的 LED 器件, 由于铝的比热容($880\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)大于铜($390\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)的, 所以, 前者的热平衡时间长于后者。

热设计中使用的是稳态热阻, 也是半导体热设计相关国际标准与国家标准需要检测的参数。热设计中不直接使用瞬态热阻, 但是, 通过测试 LED 的瞬态热阻特性可以分析系统的热结构, 从而获得系统各个部分的热阻值, 详细内容见第 6 章。

3.3.2 光通量与温度的关系

结温升高后, 电子动能增大, 使得阱内电子越过势垒逃出势阱的几率增加, 造成阱内载流子逃溢。同时, 结温增高也导致辐射复合速率降低, 这均将造成 LED 光通量、光功率、发光强度(简称光强)随温度的升高而下降。它们之间的关系可由下述经验公式表示:

$$I(T) = I(T_0)\exp[-k_\phi(T - T_0)] \quad (3-4)$$

式中, T 为工作温度; T_0 为参考温度(一般为室温); $I(T)$ 为该温度下的发光强度; k_ϕ 为温度系数, 与 LED 材料等相关。图 3-21 为三种不同半导体材料制成的红、绿、蓝 LED 的光强与温度的关系曲线。由图可见: 蓝光 LED 的光强随温度的变化率最小, $k_{\phi B} \approx 1.2 \times 10^{-3}$; 红光 LED 的光强随温度的变化率最大, $k_{\phi R} \approx 9.5 \times 10^{-3}$; 绿光 LED 的变化介于二者之间。

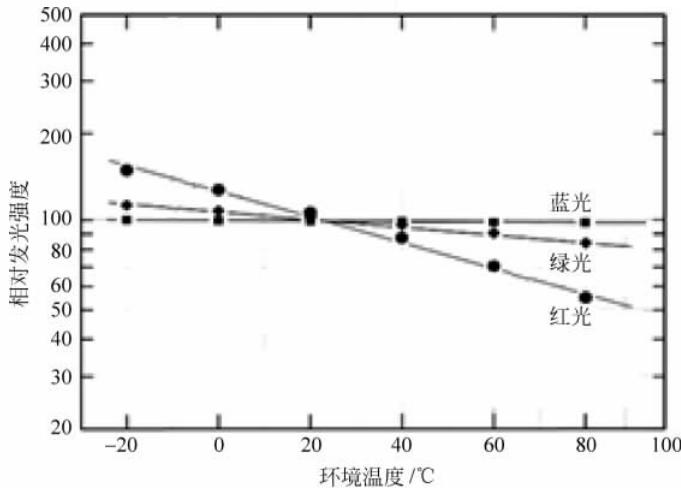


图 3-21 三种 LED 的光强与环境温度的关系曲线

3.3.3 辐射波长、色温与温度的关系

同样,结温升高后,激子间的复合几率增加,造成 LED 辐射波长发生红移(向长波段漂移)。同时,光谱半宽也将增大。中心波长与温度之间的关系可由下述经验公式表示:

$$\lambda_0(T) = \lambda_0(T_0) + k_\lambda(T - T_0) \quad (3-5)$$

式中, k_λ 为温度系数, 约为 $0.1\sim0.3\text{nm/K}$, 与 LED 的材料等相关。实测结果见图 3-22。采用蓝光 LED+黄色荧光粉制成的白光光源的色温也将随温度发生漂移, 同时, 蓝光波长漂移出荧光粉的最佳吸收波长后还将造成吸收效率和发光强度的下降。

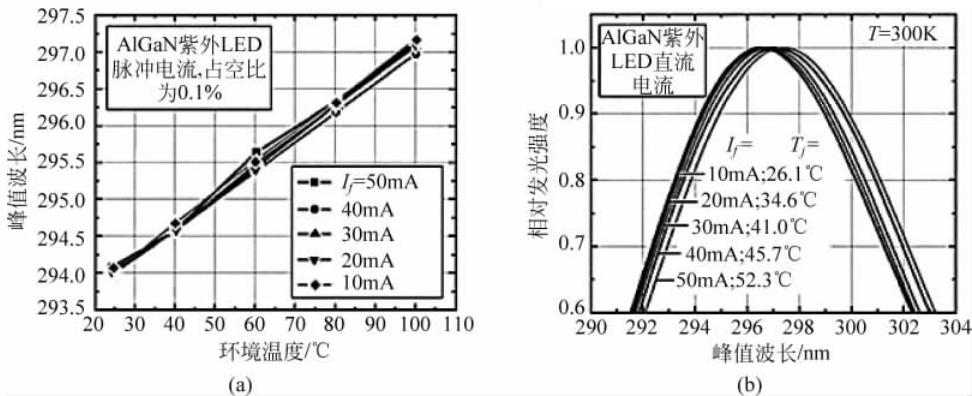


图 3-22 蓝光、白光 LED 中心波长、色温与环境温度的关系

3.3.4 正向电压与温度的关系

由 pn 结电流—电压公式可知, 结温升高, 反向饱和电流 I_0 快速增大, 正向电压将减

小,实际工作中多用以下经验公式描述:

$$V(T) = V(T_0) - k_v(T - T_0) \quad (3-6)$$

式中, k_v 为温度系数,约为 $1.5\sim2.5\text{mV/K}$,与 LED 的材料等相关。在 LED 使用过程中需要特别注意,如若采用恒压源驱动 LED,当结温升高后,由于正向电压(开启电压)的减小,将会导致驱动电流的急剧增加,很容易损伤 LED。因此,采用恒流源驱动 LED 更为可取。

3.3.5 寿命与温度的关系

LED 各半导体材料层及表面均存在缺陷,结温的升高加速了缺陷的繁衍。当缺陷进入有源区时将产生非辐射复合中心,造成输出光功率的下降,一般定义当光功率下降至初始值的 70% 时对应的工作时间为 LED 的寿命。LED 光通量随时间的变化遵从阿伦尼茨模型,如下式所示:

$$\Phi(t) = \Phi(0)\exp(-\beta t) \quad (3-7)$$

式中, t 为时间; $\Phi(t)$ 为 t 时刻的光通量; β 为寿命衰减系数,由下式决定:

$$\beta = \beta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3-8)$$

式中, E_a 为激活能,由 LED 有源区材料、器件结构决定; k 为玻尔兹曼常数。由上述两式可以看出,随着结温的升高,衰减系数急剧增大,LED 的寿命快速衰减。图 3-23 为实测的 K2 型 LED 结温与工作寿命的关系曲线。由图可见,结温 55°C 时,LED 的寿命大于 10 万小时,而当结温升至 105°C 时,LED 的寿命仅 1 万多小时。通过分组测试不同结温下的光通量随时间的变化,从实验数据中拟合出激活能,从而可以推算出常温下 LED 的工作寿命。

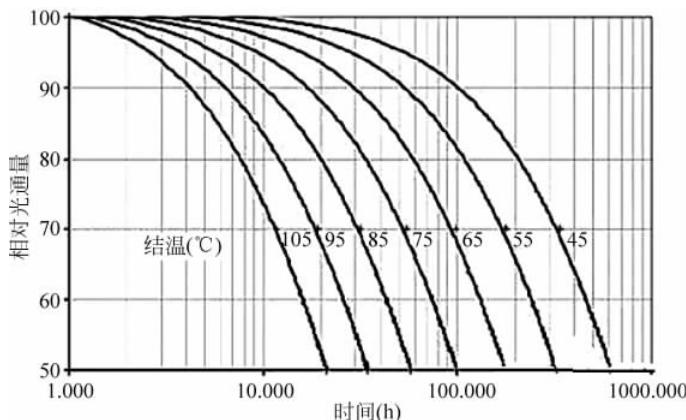


图 3-23 Luxeon K2 型 LED 结温与寿命的实验曲线

思考题

1. 垂直结构芯片与平面结构芯片的区别与各自的优势分别是什么?
2. 试说明同质结 LED 工作原理与其存在的主要问题。
3. 与同质结相比,双异质结和量子阱 LED 的优势及原因。

4. LED 发热的根本原因是什么？能否根除？
5. 与正装蓝宝石衬底 LED 相比，倒装结构在封装中的优势是什么？解释原因。
6. 倒装 LED 有几类？各自的特点是什么？
7. 何为薄膜型 LED？主要特点是什么？
8. 何为 LED 的结温？与热阻的关系是什么？
9. 计算热阻时为何要用热功率而不能直接使用输入电功率？
10. 为何说 LED 是热敏感型器件？举例说明其参数与温度的关系？
11. 温度升高 LED 光通量降低的主要原因是？
12. 何为开启电压？它与禁带宽度的关系是什么？其物理本质是什么？温度升高 LED 开启电压降低的主要原因是？
13. 温度升高 LED 辐射波长红移的主要原因是？
14. LED 寿命与结温的关系是什么？举例说明。
15. 图 3-19 曲线的物理意义是什么？如何推导出该曲线？工作中如何用好该曲线？

习题

1. Ge、Si、AlGaInP、AlGaInN 的禁带宽度分别为 0.7eV 、 1.1eV 、 2.0eV 和 2.7eV ，试计算它们对应的发光波长，并解释为何不将 Ge、Si 材料作为 LED 的有源层。
2. 蓝宝石衬底上生长 GaN 分别制作正装、倒装 LED，设衬底厚度 $100\mu\text{m}$ 、发光层等厚度 $10\mu\text{m}$ ，在不考虑电极沟槽的情况下，试计算正装、倒装 LED 的芯片热阻。
3. 一只 1W 的 LED 其输出光功率为 0.3W ，结温为 100°C ，试计算室温下的热阻。
4. 分别计算蓝宝石衬底的蓝光 LED 在环境 25°C 和 50°C 时的光通量、中心波长的变化量，若在其外涂覆黄色荧光粉制作白光 LED，试讨论对色温的影响。设波长的温度系数为 0.3nm/K 。
5. 以 Luxeon K2 型 LED 为例，分别论述其寿命为 10 万小时、 5 万小时、 1 万小时的结温条件，若将其热阻降低一半，其寿命分别提高到多少？