

文章较详尽地阐述了结温升高对 LED 光输出强度、LED P-N 结的正向电压及发光颜色的影响.指出当结温升高时,输出光强变弱,正向电压减小,发光波长发生红移.在结温升得足够高时,这些变化将从可逆变为不可恢复的永久性衰变.文章进一步指出,LED 输入功率是器件热效应的唯一来源,设法提高器件的电光转换效率及提高器件的散热能力是减小 LED 温升效应的主要途径.

一、引言

众所周知,LED 是一种电发光器件,其基本的物理过程是电能向光能的转变.所谓提高 LED 的功率,即是提高电输入能量,同时又能获得尽可能大的光功率输出.通常将单位输入功率所产生的光能(光通量)谓之光电转换功率,简称光效.早期的 LED 由于光效很低(-0.1 lm/w),亮度很低,通常只用于表示亮、暗的状态,作指示灯之用.上世纪九十年代初,超高亮四元素 LED 的出现,使器件亮度有了数量级的增长,特别是紧接着的 GaN 基蓝、绿光及白光 LED 的出现,使 LED 的应用方向发生了巨大的改变.固态照明已成为 21 世纪人类追求的重要目标.显然,不断地提高 LED 的输入功率与发光效率是实现通用照明的必由之路.假设 LED 的光效为 100 lm/w ,那么要达到一只 40 支光(瓦)的白炽灯所发出的 600 lm 的光通量,LED 的输入功率必须达到 6w .然而,目前一只 $\Phi 5$ 的标准 LED 的输入功率通常为 $0.04\sim 0.07\text{w}$,远不能满足实用照明的需要.大量实践表明,LED 不能加大输入功率的基本原因,是由于 LED 在工作过程中会放出大量的热,使管芯结温迅速上升,输入功率越高,发热效应越大.温度的升高将导致器件性能的变化与衰减,甚至失效.本文就功率器件中的升温效应对性能的影响及其如何减小这种升温效应的途径作一些简明的讨论.

二、LED 器件温升估计

设芯片面积为 $1.2\times 1.2\text{mm}^2$,厚度为 $200\mu\text{m}$,GaAs 衬底.由于外延层很薄,忽略外延层材料与衬底之间的差异,不考虑电极的影响,那么芯片的体积约为 $2.88\times 10^{-4}\text{cm}^3$.GaAs 晶体的比重为 $5.318(\text{克}/\text{cm}^3)$,故芯片重量约为 15.3×10^{-4} 克.设器件的工作电流为 100mA ,如其中约 90%的电功率转变为热,那么在不考虑芯片向周围环境散热的条件下,器件在接通电流 20 分钟后,计算得芯片的温度可达到 $5\times 10^5\text{C}$,计算中使用的 GaAs 晶体比热数据为 $0.33 \text{ 焦耳}/\text{克}\cdot\text{度}$.可见其温升效应的严重性.这里只是把芯片作为一个均匀的发热体加以考虑,如考虑到结处温升的集中效应,情况将更加严重.庆幸的是,在芯片的升温过程中,芯片不可能处于绝热状态,而总是以某种方式与其周围的介质或环境进行着热交换,最终达到热平衡,使芯片的温度维持在一个较低的水准上.

三、结温对 LED 性能的影响

1、结温对 LED 光输出的影响

实验指出,发红、黄光的 InGaAlP LED 与发蓝、绿光的 InGaN LED,其光输出强度均明显依赖于器件的结温.也就是说,当 LED 的结温升高时,器件的输出光强度将逐渐减小;而当结温下降时,光输出强度将增大,一般情况下,这种变化是可逆与可恢复的,当温度回到原来的值,光强也会回复到原来的状态.

图 1(a)指出了 InGaAlP LED 的光输出相对量随温度的变化,这里以 25C 作为器件性能的基准点.由图可知,InGaAlP 橙色的 LED 比红色的 LED 具有更高的温度灵敏度.当结温升至 100C 时,琥珀色器件的输出通量降去了 75%.图 1(b)是 InGaAlP LED 的另一组光输出的温度数据,设 25C 时 LED 的值为 100,那么当结温升至 100C 时,640nm、620nm 与 590nm 的 InGaAlP LED 的光输出分别为原始值的 42%、30%与 20%.

结温对光输出影响的数学表达式如式(1)所示:

$$\Phi V(T_2)=\Phi V(T_1)e^{-K\Delta T} \quad (1)$$

其中, $\Phi V(T_2)$ 表示结温 T_2 的光通量输出; $\Phi V(T_1)$ 表示结温 T_1 的光通量输出; K 为温度系数; $\Delta T=T_2-T_1$.

一般情况下,K 值可由实验测定,对于 InGaAlP LED 相关的 K 值如表 1 所示:

由上表可知,对于 InGaAlP LED,温度系数仅与器件的发光波长有关,而与衬底是否透明无关,进一步的实验指出,InGaAlP 的发光波长越短,K 值越大.器件的出光通量随温度增加衰减得越快.对于 InGaN 系列的 LED,出光通量随温度的变化远小于 InGaAlP LED.典型结果如图 2 所示.由图可知,随着发光波长变短,光输出通量随温度的变化越不明显.表 2 列出了相对于 25°C 而言,100°C 结温时光输出通量的相对数值.

式(2)指出了光输出通量随结温变化的另一种表示形式

$$\Phi_{T2}=\Phi_{T1}e^{-(T2-T1/T0)} \quad (2)$$

这里 T_0 代表一种特征温度. T_0 值与材料有关,实验指出,对于红色的 InGaAlP LED, $T_0=85^\circ\text{C}$;对于琥珀色的 InGaAlP LED, $T_0\approx 85^\circ\text{C}$;而对于 InGaN LED, T_0 值约为 840°C ,表明 InGaN 器件的温度系数远小于发红、黄光的 InGaAlP 器件,也即光通量随温度增加而减小的速率要比 InGaAlP LED 小得多.

一般情况下,光输出通量随结温的增加而减小的效应是可逆的,也即当温度回复到初始温度时,光输出通量会有一个恢复性的增长.这种效应的发生机制显然是由于材料的一些相关参数会随温度发生变化,从而导致器件参数的变化.如随温度的增加,电子与空穴的浓度会增加,禁带宽度会减小,电子迁移率也将减小.这些参量的变化必须引致器件输出光通量的改变.然而当温度恢复至初态时,器件参数的表化也将随之消失,输出光通量也会恢复至初态值.

表 3 是大功率器件 AP-HLR-01 的测试结果,每一次测量之间进行了 -40°C - 140°C 的冷热循环老化试验.测量数据指出,每次测量的数据都能很好地重复,冷热循环老化试验也未改变器件的性能,表明在一定的条件下,LED 器件的性能随电流的变化是可逆的.显然,在大电流时光效的变小是由于温度上升所引起的,当测试电流减至小电流时,光效数据又恢复到初始值.

2、高温下器件性能的衰变

在高温下,LED 的光输出特性除会发生可恢复性的变化外,还将随时间产生一种不可恢复的永久性的衰变.图 3 指出了 Lumileds 公司型号为 Luxeon 大功率器件的光输出通量随时间的衰变情况.由图可见,对于同一类 LED 器件,在相同的工作电流时,结温越高器件的输出光强衰减得越快.对于一个确定的器件而言,一般来说,结温的大小取决于工作电流与环境温度.工作电流固定以后,环境温度越高,结温就越高,器件性能的衰减速率就越快.反之,当环境温度确定后,器件的工作电流越大,结温也将越高,器件性能衰减的速率就越快.

图 4 指出了一只典型的 InGaAlP 器件在不同的工作电流时,输出光通量的相对值随时间的衰减曲线.很显然,当器件的工作电流加大时,器件的光输出特性将衰变得更快.

为确保一个 LED 器件的正常工作条件,让器件的结温低于某一个确定的值 T_j ,是十分必要的.为此,当环境温度升高时,应适当减小工作电流,直至当环境温度升至临界温度 T_j 时,将工作电流减至零,此时结温将等于环境温度,如图 5 所示.

通常有二种原因促成高温条件下 LED 器件输出性能的永久性衰减,一个原因是材料内缺陷的增殖,众所周知,现代的高亮 LED 器件通常都采用 MOCVD 技术在 GaAs,蓝宝石等异质衬底上外延生长 InGaAlP 或 InGaN 等材料制成,为提高发光效率,外延材料均含有多层结构,由于各外延层之间存在着或多或少的晶格失配,从而在界面上形成大量的诸如位错等结构缺陷,在较高温度时,这些缺陷会快速增殖,繁衍,直至侵入发光区,形成大量的非辐射复合中心,严重降低器件的注入效率与发光效率.另外,在高温条件下,材料内的微缺陷及来自界面与电极的快扩杂质也会引入发光区,形成大量的深能级,同样会加速 LED 器件的性能衰变.

高温时,LED 封装环氧的变性,是 LED 性能衰变乃至失效的又一个主要原因.通常,LED 用的封装环氧存在着一个重要特性,即当环氧温度超过一个特定温度 $T_g=125^\circ\text{C}$ 时,封装环氧的特性将从一种刚性的类玻璃状态转变成一种柔软的似橡胶态物质.此时材料的膨胀系数急剧增加,形成一个明显的拐点,如图 6 所示.这个拐点对应的温度即为环氧树脂的玻璃状转

换温度,其值通常为 125°C.当器件在此温度附近或高于此温度变化时,将发生明显的膨胀或收缩,致使芯片电板与引线受到额外的压力,而发生过度疲劳乃至脱落损坏.此外,当环氧处于较高温度时(即使未超过转变温度 T_g),特别是与芯片临近部分的封装环氧会逐渐变性,发黄,影响封装环氧的透光性能.这是一个潜移默化的过程,随着工作时间的延长,LED 将逐渐失去光泽.显然工作温度越高,这种过程将进行得越快.为解决这一困难,特别在大功率器件的制作过程中,一些先进的封装结构已摒弃了环氧树脂材料而改用一些性能更为稳定的诸如玻璃、PC 等材料制作透镜;另一个重要方法是让环氧不直接接触芯片表面,之间填充一种胶状的,性能稳定的透明硅胶.实践证明,通过如此改进,器件的性能与稳定度获得了明显改善.

3、结温对发光波长的影响

LED 的发光波长一般可分成峰值波长与主波长二类,前者表示光强最大的波长,而主波长可由 X、Y 色度坐标决定,反映了人眼所感知的颜色.显然,结温所引致的 LED 发光波长的变化将直接造成人眼对 LED 发光颜色的不同感受.对于一个 LED 器件,发光区材料的禁带宽度值直接决定了器件发光的波长或颜色.InGaAlP 与 InGaN 材料属 III-V 族化合物半导体.它们的性质与 GaAs 相仿,当温度升高时,材料的禁带宽度将减小,导致器件发光波长变长,颜色发生红移.

通常可将波长随结温的变化表示如下:

$$\lambda(T_2) = \lambda(T_1) + \Delta T \cdot K (\text{nm}/^\circ\text{C}) \quad (3)$$

其中: $\lambda(T_2)$ 表示结温 T_2 时的波长; $\lambda(T_1)$ 表示结温 T_1 时的波长; K 表示波长随温度变化的系数.

表 4 指出了 InGaAlP 与 InGaN 器件的主波长与峰值波长 K 值,由表可知,对于 InGaN 有 InGaAlP LED,峰值波长随温度的变化要大于主波长随温度的变化,其中 InGaAlP LED 尤甚.

人眼对不同波长的颜色感知灵敏度是存在着很大的差异,如图 7 所示:在蓝、绿、黄区域,很小的波长变化就将引致人眼感觉上的变化.从而对蓝、绿、黄器件的温升效应提出了更高的要求.一般来说,2~5nm 的波长变化人眼就可以感觉到;而对红光波长的变化,人眼的感觉就要相对迟钝一些,但也能感觉到 15nm 的波长差异.为定量地表明人眼对不同波长颜色的感知程度,有些公司的产品将颜色与波长的关系列出了主波长的颜色仓,如表 5 所示.

显然,对于琥珀(黄)颜色,由于人眼最为灵敏,因此颜色仓的波长间隔分得很细,仅为 2-3nm,但对于红色区域,其间隔扩大到 15nm.这就是说,为什么对黄色交通信号灯的颜色标定与均匀度的要求较高,而红色交通灯的颜色要求相对要低得多.

4、结温对 LED 正向电压的影响

正向电压是判定 LED 性能的一个重要参量,它的数值取决于半导体材料的特性,芯片尺寸以及器件的成结与电极制作工艺.相对于 20mA 的正向电流通常 InGaAlP LED 的正向电压在 1.8V~2.2V 之间,而发蓝、绿光的 InGaN LED 的正向电压处在 3.0V—3.5V 之间.在小电流近似下,LED 器件的正向压降可由式(4)表示:

$$V_f = (nKT/q) \ln(I_f/I_o) + R_s I_f \quad (4)$$

式中 V_f 为正向电压, I_f 为正向电流, I_o 为反向饱和电流, q 为电子电荷, K 是玻尔兹曼常数, R_s 是串联电阻, n 是表征 P/N 结完美性的一个参量,处在 1-2 之间.分析式(4)的右边发现只是反向饱和电流 I_o 与温度密切相关, I_o 值随结温的升高而增大,导致正向电压 V_f 值的下降.实验指出,在输入电流恒定的情况下,对于一个确定的 LED 器件,二端的正向压降与温度的关系可由式(5)表示:

$$V_{fT} = V_{fT_o} + K(T - T_o) \quad (5)$$

式中 V_{fT} 与 V_{fT_o} 分别表示结温为 T 与 T_o 时的正向压降, K 是压降随温度变化的系数,对于 InGaAlP 与 InGaN LED,其 K 值大致可由表 6 所示.有人给出了详细的实验数据,如表 7、表 8 所示.

电压随温度的变化是可恢复的,但如在高温情况下,由于结区缺陷与杂质的大量增殖与集聚,也将造成额外复合电流的增加,而使正向电压下降.通常,恒流是 LED 工作的较好模式,如在恒压条件下,由于温升效应使正向电压下降与正向电流增加,并形成恶性循环,最终导致器件损坏.

四、减小 LED 温升效应的对策

LED 的输入功率是器件热效应的唯一来源,能量的一部分变成了辐射光能,其余部分最终均变成了热,从而抬升了器件的温度.显然,减小 LED 温升效应的主要方法,一是设法提高器件的电光转换效率(又称外量子效率),使尽可能多的输入功率转变成光能,另一个重要的途径是设法提高器件的热散失能力,使结温产生的热,通过各种途径散发到周围环境中去.

1、LED 器件的量子效率

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_f 和出光效率 η_o 的总和.

$$\eta_{ex} = \eta_J \cdot \eta_i \cdot \eta_f \cdot \eta_o \quad (6)$$

对于 InGaAlP 与 InGaN LED 器件中,由于 P-N 结二边的禁带宽度 E_g 与掺杂浓度均有一个较大差异,通常 $\eta_J < 1$; 由于器件发光区等结构,一切外延生长形成,发光区的 P-N 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 ,如将管芯看作是一个吸收系数为 α , 体积为 v ,被面积为 A_i 的 N 个面所包围的光学腔,那么该管芯的出光效率可表示为:

$$\eta_N = \sum A_i T_i / \left(\sum (1 - R_i) A_i + 4 \alpha v \right) \quad (7)$$

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 管芯,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.其起因是由于芯片表面二侧物质所存在的较大的折射率差异,如图 8 所示,当芯片内的光沿方面 1 射向表面并沿方向 2 射入空气,根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

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.

2、提高 LED 出光效率的几个途径

(1) 透明衬底技术

InGaAlP LED 通常是在 GaAs 衬底上外延生长 InGaAlP 发光区 GaP 窗口区制备而成. 与 InGaAlP 相比, GaAs 材料具有小得多的禁带宽度,因此,当短波长的光从发光区与窗口表面射入 GaAs 衬底时,将被悉数吸收,成为器件出光效率不高的主要原因.在衬底与限制层之间生长一个布喇格反射区,能将垂直射向衬底的光反射回发光区或窗口,部分改善了器件的出光特性.一个更为有效的方法是先去除 GaAs 衬底,代之以全透明的 GaP 晶体.由于芯片内除去了衬底吸收区,使量子效率从 4% 提升到了 25-30%. 三年前,为进一步减小电极区的吸收,有人将这种透明衬底型的 InGaAlP 器件制作成截角倒锥体的外形,使量子效率有了更大的提高,如图 9 所示.显然,这种截角倒锥体形状的器件使透光面积增得更大,在红光区,这类器件的外量子效率可超过 50%.

图 10 指出了各类器件的光通量与正向电流的关系,明显表明了三类器件光通量的差异.对于吸收衬底的器件,由于量子效率很低,极大部分的输入能量变成了热,在很小的正向电流下,器件的结温就升得很高,使光通量迅速下降.透明衬底的 LED 器件,由于相当一部分输入电能变成了光能,相对地减少了升温效应,使器件可在大得多的电流状态下工作.

(2)金属膜反射技术

如果说明透明衬底工艺首先起源于美国的 HP、Lumileds 等公司,那么金属膜反射法主要被日本、台湾等地的一些公司进行了大量的研究与发展.这种工艺不但回避了透明衬底专利,而且,更利于规模生产.其效果可以说与透明衬底法具有异曲同工之妙.该工艺通常谓之 MB 工艺,其基本要点如图 11 所示.首先去除 GaAs 衬底,然后在其表面与 Si 基底表面同时蒸镀 Al 质金属膜,然后在一定的温度与压力下熔接在一起.如此,从发光层照射到基板的光线被 Al 质金属膜层反射至芯片表面,从而使器件的发光效率提高 2.5 倍以上.实验证明,MB 型红色 LED,当电流为 400mA 与 800mA 时,光通量可分别达到 37lm 与 74lm.该类器件已在日本三肯电气、台湾国联、全新等公司进入小批量生产.与传统器件相比,光效得到了大幅度提高.除 MB 结构的器件外,台湾国联还开发了一种谓之 GB 型的高亮度 InGaAlP LED 的新一代器件.所谓 GB 是英文 Giga Bright 的缩写.该工艺是采用一种新型的透明胶,将具有 GaAs 吸收衬底的 LED 外延片与一片蓝宝石基板粘合在一起,随后再将 GaAs 吸收衬底去除,并在外延层上制作电极,从而获得了很高的发光效率.

(3)表面微结构技术

表面微结构工艺是提高器件出光效率的又一个有效技术,该技术的基本要点是在芯片表面刻蚀大量尺寸为光波长量级的小结构,每个结构呈截角四面体状,如此不但扩展了出光面积,而且改变了光在芯片表面处的折射方向,从而使透光效率明显提高.图 12 指出了在具有纹理结构 LED 芯片的 N 种出光模式,由于纹理边缘的存在,使许多本来大于临界角的光可通过边缘部位的反射或折射透射出器件表面.显然,表面处纹理结构的存在,在出光机理上等同于大幅度增加了窗口层的厚度.窗口层的厚度越薄,纹理腐蚀得越深,则出光率的增加将越明显.测量指出,对于窗口层厚度为 20 μm 的器件,出光效率可增长 30%.当窗口层厚度减至 10 μm 时,出光效率将有 60% 的改进.对于 585-625nm 波长的 LED 器件,制作纹理结构后,发光效率可达 30lm/w,其值已接近透明衬底器件的水平.

(4)倒装芯片技术

通常兰绿光及白光 LED 的结构如图 13 所示.通过 MOCVD 技术在兰宝石衬底上生长 GaN 基 LED 结构层,由 P/N 结发光区发出的光透过上面的 P 型区射出.由于 P 型 GaN 传导性能不佳,为获得良好的电流扩展,需要通过蒸镀技术在 P 区表面形成一层 Ni-Au 组成的金属电极层.P 区引线通过该层金属薄膜引出.为获得好的电流扩展,Ni-Au 金属电极层就不能太薄.为此,器件的发光效率就会受到很大影响,通常要同时兼顾电流扩展与出光效率二个因素.但无论在什么情况下,金属薄膜的存在,总会使透光性能变差.此外,引线焊点的存在也使器件的出光效率受到影响.

采用 GaN LED 倒装芯片的结构可以从根本上消除上面的问题,如图 14 所示.由于芯片倒装于 Si 基垫上,LED 发出的光直接透过兰宝石射出,不存在上述的 Ni-Au 金属膜与引线电极,因此出射的光没有损失,加上下面 P-GaN 层上蒸镀有 Ag 反射膜,进一步增强了出射光的强度.图 15 指出了兰绿光 LED 的量子效率随峰值波长的变化.实验指出,在 450~530nm 的峰值波长区域,倒装功率型 LED 器件的量子效率要比普通型器件高出 1.6 倍.

3、LED 散热机制的分析

正如上述,对于一个常规的 LED 器件,90% 以上的输入功率将转换成热.为使器件能维持一个合适的温度,正常工作,这些热量必须通过管壳基板等媒介散发到周围环境中去.

通常将二个节点间单位热功率输运所产生的温度差定义为该二个节点间的热阻,其数学表达式为:

$$R_{\theta} = \Delta T / P_D \quad (9)$$

其中 R_{θ} 为节点 1 与 2 之间的热阻, ΔT 为节点 1 与 2 之间的温差, P_D 为二点间的热功率流.热阻 R_{θ} 表示了二点间的热散失能力, R_{θ} 越大,散热能力越差;反之 R_{θ} 越小,散热能力越

强,当电功率 $V=VF \cdot IF$ 施加到 LED 上后,在器件的 P-N 结处将产生大量的热,致使芯片温度迅速升高,由于器件良好的散热特性,大部分热量将通过银浆、管壳、散热基板、PCB 散发到周围环境中去,从而抑制了器件芯片的升温。

类同于电学中的电阻特性,热阻也存在着相同的运算法则,当 n 个 LED 安装于同一块基板上时,其热流图如图 17 所示。

图中 T_j 、 T_c 与 T_B 分别代表了某个 LED 管的 P-N 结区、管壳与基板处的温度、 $R_{\theta J-C}$ 、 $R_{\theta C-B}$ 、 $R_{\theta B-A}$ 分别代表 P-N 结与管壳、管壳与基板、基板与环境之间的热阻,那么,该 LED 列阵的总热阻可表示为:

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta J-C} + R_{\theta C-B} + R_{\theta B-A} \quad (10)$$

其中, $1/\Sigma R_{\theta J-C} = \Sigma (1/R_{\theta J-C})$, $1/\Sigma R_{\theta C-B} = \Sigma (1/R_{\theta C-B})$, 上式满足的基本条件是阵列中所有 LED 具有完全相同的参数。

热阻 R_{θ} 是 LED 的一个重要参量,当我们知道了某一器件的热阻的 R_{θ} 数值,那么根据式(9),即可求得 LED 的结温:

$$T_j = T_A + PDR_{\theta J-A} \quad (11)$$

其中 T_j 为器件的 P-N 结温, T_A 为环境温度, $PD=I \cdot V$ 为器件的耗散功率, $R_{\theta J-A}$ 为器件 P-N 结与环境之间的热阻。

显然,LED 的热阻将严重影响器件的使用条件与性能,图 18 指出了不同热阻值的器件的最大正向电流与环境温度的关系,由图可见,当热阻较小时,光通量几乎与正向电流成正比例增加,当热阻较大时,由于 P-N 结温的上升,当正向电流加大到某值时,光通量将趋于饱和,并随之逐渐下降。对于一个 LED 管,设法降低 P-N 结与采用环境之间的热阻是提高器件散热能力的根本途径。由于环氧胶是低热导材料,因此 P-N 结处产生的热量很难通过透明环氧向上散失到环境中去,大部分热量通过衬底、银浆、管壳、环氧粘接层、PCB 与热沉向下发散。显然,相关材料的导热能力将直接影响器件的热散失效率。表 9 与表 10 指出了若干常用衬底与热沉材料的导热系数值,银浆与环氧的数据未在表中列出。他们的导热系数值分别为 2.7 与 0.2~0.8(w/mk)。实验指出,对于一个普通型($\Phi 5$)的 LED,从 P-N 结区环境温度的总热阻在 300~600°C/w 之间;对于一个具有良好结构的功率型 LED 器件,其总热阻约为 15~30°C/w。巨大的热阻差异表明普通型器件只能在很小的输入功率条件下,才能正常地工作,而功率型器件的耗散功率可大到瓦级甚至更高。

四、减小 LED 温升效应的对策

LED 的输入功率是器件热效应的唯一来源,能量的一部分变成了辐射光能,其余部分最终均变成了热,从而抬升了器件的温度。显然,减小 LED 温升效应的主要方法,一是设法提高器件的电光转换效率(又称外量子效率),使尽可能多的输入功率转变成光能,另一个重要的途径是设法提高器件的热散失能力,使结温产生的热,通过各种途径散发到周围环境中去。

1、LED 器件的量子效率

所谓 LED 器件的量子效率,即是器件的电转换成光能的能力,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_f 和出光效率 η_o 的总和。

$$\eta_{ex} = \eta_J \cdot \eta_i \cdot \eta_f \cdot \eta_o \quad (6)$$

对于 InGaAlP 与 InGaN LED 器件中,由于 P-N 结二边的禁带宽度 E_g 与掺杂浓度均有一个较大差异,通常 $\eta_J \ll 1$;由于器件发光区等结构,一切外延生长形成,发光区的 P-N 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 ,如将管芯看作是一个吸收系数为 α ,体积为 v ,被面积为 A_i 的 N 个面所包围的光学腔,那么该管芯的出光效率可表示为:

$$\eta N = \sum A_i T_i / (\sum (1-R_i) A_i + 4 \alpha v) \quad (7)$$

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 管芯, 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. 其起因是由于芯片表面二侧物质所存在的较大的折射率差异, 如图 8 所示, 当芯片内的光沿方面 1 射向表面并沿方向 2 射入空气, 根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

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.

2、提高 LED 出光效率的几个途径

(1) 透明衬底技术

InGaAlP LED 通常是在 GaAs 衬底上外延生长 InGaAlP 发光区 GaP 窗口区制备而成. 与 InGaAlP 相比, GaAs 材料具有小得多的禁带宽度, 因此, 当短波长的光从发光区与窗口表面射入 GaAs 衬底时, 将被悉数吸收, 成为器件出光效率不高的主要原因. 在衬底与限制层之间生长一个布喇格反射区, 能将垂直射向衬底的光反射回发光区或窗口, 部分改善了器件的出光特性. 一个更为有效的方法是先去除 GaAs 衬底, 代之以全透明的 GaP 晶体. 由于芯片内除去了衬底吸收区, 使量子效率从 4% 提升到了 25-30%. 三年前, 为进一步减小电极区的吸收, 有人将这种透明衬底型的 InGaAlP 器件制作成截角倒锥体的外形, 使量子效率有了更大的提高, 如图 9 所示. 显然, 这种截角倒锥体形状的器件使透光面积增得更大, 在红光区, 这类器件的外量子效率可超过 50%.

图 10 指出了各类器件的光通量与正向电流的关系, 明显表明了三类器件光通量的差异. 对于吸收衬底的器件, 由于量子效率很低, 极大部分的输入能量变成了热, 在很小的正向电流下, 器件的结温就升得很高, 使光通量迅速下降. 透明衬底的 LED 器件, 由于相当一部分输入电能变成了光能, 相对地减少了升温效应, 使器件可在大得多的电流状态下工作.

(2) 金属膜反射技术

如果说透明衬底工艺首先起源于美国的 HP、Lumileds 等公司, 那么金属膜反射法主要被日本、台湾等地的一些公司进行了大量的研究与发展. 这种工艺不但回避了透明衬底专利, 而且, 更利于规模生产. 其效果可以说与透明衬底法具有异曲同工之妙. 该工艺通常谓之 MB 工艺, 其基本要点如图 11 所示. 首先去除 GaAs 衬底, 然后在其表面与 Si 基底表面同时蒸镀 Al 质金属膜, 然后在一定的温度与压力下熔接在一起. 如此, 从发光层照射到基板的光线被 Al 质金属膜层反射至芯片表面, 从而使器件的发光效率提高 2.5 倍以上. 实验证明, MB 型红色 LED, 当电流为 400mA 与 800mA 时, 光通量可分别达到 37lm 与 74lm. 该类器件已在日本三肯电气、台湾国联、全新等公司进入小批量生产. 与传统器件相比, 光效得到了大幅度提高. 除 MB 结构的器件外, 台湾国联还开发了一种谓之 GB 型的高亮度 InGaAlP LED 的新一代器件. 所谓 GB 是英文 Giga Bright 的缩写. 该工艺是采用一种新型的透明胶, 将具有 GaAs 吸收衬底的 LED 外延片与一片蓝宝石基板粘合在一起, 随后再将 GaAs 吸收衬底去除, 并在外延层上制作电极, 从而获得了很高的发光效率.

(3) 表面微结构技术

表面微结构工艺是提高器件出光效率的又一个有效技术, 该技术的基本要点是在芯片表面刻蚀大量尺寸为光波长量级的小结构, 每个结构呈截角四面体状, 如此不但扩展了出光面积, 而且改变了光在芯片表面处的折射方向, 从而使透光效率明显提高. 图 12 指出了在具有纹理结构 LED 芯片的 N 种出光模式, 由于纹理边缘的存在, 使许多本来大于临界角的光可通过边缘部位的反射或折射透射出器件表面. 显然, 表面处纹理结构的存在, 在出光机理上等同于大幅度增加了窗口层的厚度. 窗口层的厚度越薄, 纹理腐蚀得越深, 则出光率的增加将越明显.

测量指出,对于窗口层厚度为 20 μm 的器件,出光效率可增长 30%.当窗口层厚度减至 10 μm 时,出光效率将有 60%的改进.对于 585-625nm 波长的 LED 器件,制作纹理结构后,发光效率可达 30lm/w,其值已接近透明衬底器件的水平.

(4)倒装芯片技术

通常兰绿光及白光 LED 的结构如图 13 所示.通过 MOCVD 技术在兰宝石衬底上生长 GaN 基 LED 结构层,由 P/N 结发光区发出的光透过上面的 P 型区射出.由于 P 型 GaN 传导性能不佳,为获得良好的电流扩展,需要通过蒸镀技术在 P 区表面形成一层 Ni-Au 组成的金属电极层.P 区引线通过该层金属薄膜引出.为获得好的电流扩展,Ni-Au 金属电极层就不能太薄.为此,器件的发光效率就会受到很大影响,通常要同时兼顾电流扩展与出光效率二个因素.但无论在什么情况下,金属薄膜的存在,总会使透光性能变差.此外,引线焊点的存在也使器件的出光效率受到影响.

采用 GaN LED 倒装芯片的结构可以从根本上消除上面的问题,如图 14 所示.由于芯片倒装于 Si 基垫上,LED 发出的光直接透过兰宝石射出,不存在上述的 Ni-Au 金属膜与引线电极,因此出射的光没有损失,加上下面 P-GaN 层上蒸镀有 Ag 反射膜,进一步增强了出射光的强度.图 15 指出了兰绿光 LED 的量子效率随峰值波长的变化.实验指出,在 450~530nm 的峰值波长区域,倒装功率型 LED 器件的量子效率要比普通型器件高出 1.6 倍.

3、LED 散热机制的分析

正如上述,对于一个常规的 LED 器件,90%以上的输入功率将转换成热.为使器件能维持一个合适的温度,正常工作,这些热量必须通过管壳基板等媒介散发到周围环境中去.

通常将二个节点间单位热功率输运所产生的温度差定义为该二个节点间的热阻,其数学表达式为:

$$R_{\theta} = \Delta T / P_D \quad (9)$$

其中 R_{θ} 为节点 1 与 2 之间的热阻, ΔT 为节点 1 与 2 之间的温差, P_D 为二点间的热功率流.热阻 R_{θ} 表示了二点间的热散失能力, R_{θ} 越大,散热能力越差;反之 R_{θ} 越小,散热能力越强.当电功率 $P = V_F \cdot I_F$ 施加到 LED 上后,在器件的 P-N 结处将产生大量的热,致使芯片温度迅速升高,由于器件良好的散热特性,大部分热量将通过银浆、管壳、散热基板、PCB 散发到周围环境中去,从而抑制了器件芯片的升温.

类同于电学中的电阻特性,热阻也存在着相同的运算法则,当 n 个 LED 安装于同一块基板上时,其热流图如图 17 所示.

图中 T_j 、 T_c 与 T_B 分别代表了某个 LED 管的 P-N 结区、管壳与基板处的温度、 $R_{\theta J-C}$ 、 $R_{\theta C-B}$ 、 $R_{\theta B-A}$ 分别代表 P-N 结与管壳、管壳与基板、基板与环境之间的热阻,那么,该 LED 列阵的总热阻可表示为:

$$R_{\theta J-A} = R_{\theta J-C} + R_{\theta C-B} + R_{\theta B-A} \quad (10)$$

其中, $1/\Sigma R_{\theta J-C} = \Sigma (1/R_{\theta J-C})$, $1/\Sigma R_{\theta C-B} = \Sigma (1/R_{\theta C-B})$,上式满足的基本条件是阵列中所有 LED 具有完全相同的参数.

热阻 R_{θ} 是 LED 的一个重要参量,当我们知道了某一器件的热阻的 R_{θ} 数值,那么根据式(9),即可求得 LED 的结温:

$$T_j = T_A + P_D R_{\theta J-A} \quad (11)$$

其中 T_j 为器件的 P-N 结温, T_A 为环境温度, $P_D = I \cdot V$ 为器件的耗散功率, $R_{\theta J-A}$ 为器件 P-N 结与环境之间的热阻.

表 9. LED 衬底材料的热导系数

材料 热导系数(w/cm $\cdot$ k)

Si 1.5

Al₂O₃ 0.46

GaAs 0.54

SiC 4.9

表 10. 常用的热沉材料的热导系数

材料 热导系数(w/cm•k)

碳钢 39.2-36.7

黄铜 109

铝合金 162

钼 138

银 427

锡 67

锌 121

纯铜 398

纯铝 236

纯铁 81.1

显然,LED的热阻将严重影响器件的使用条件与性能,图 18 指出了不同热阻值的器件的最大正向电流与环境温度的关系,由图可见,当热阻较小时,光通量几乎与正向电流成正比例增加,当热阻较大时,由于 P-N 结温的上升,当正向电流加大到某值时,光通量将趋于饱和,并随之逐渐下降.对于一个 LED 管,设法降低 P-N 结与采用环境之间的热阻是提高器件散热能力的根本途径.由于环氧胶是低热导材料,因此 P-N 结处产生的热量很难通过透明环氧向上散失到环境中去,大部分热量通过衬底、银浆、管壳、环氧粘接层、PCB 与热沉向下发散.显然,相关材料的导热能力将直接影响器件的热散失效率.表 9 与表 10 指出了若干常用衬底与热沉材料的导热系数值,银浆与环氧的数据未在表中列出.他们的导热系数值分别为 2.7 与 0.2~0.8(w/mk).实验指出,对于一个普通型(Φ5)的 LED,从 P-N 结区环境温度的总热阻在 300~600°C/w 之间;对于一个具有良好结构的功率型 LED 器件,其总热阻约为 15~30°C/w.巨大的热阻差异表明普通型器件只能在很小的输入功率条件下,才能正常地工作,而功率型器件的耗散功率可大到瓦级甚至更高.