

高出光品质LED封装: 现状及进展

余兴建, 舒伟程, 胡润, 谢斌 and 罗小兵

Citation: 中国科学: 技术科学 ; doi: 10.1360/N092017-00061

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092017-00061>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in



高出光品质LED封装: 现状及进展

余兴建, 舒伟程, 胡润, 谢斌, 罗小兵*

华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074

* E-mail: luoxb@hust.edu.cn

收稿日期: 2017-03-01; 接受日期: 2017-05-02; 网络出版日期: 2017-08-10

国家自然科学基金(51625601, 51576078, 51606074)资助项目

摘要 发光二极管(light-emitting diode, LED)具有电光转换效率高、节能环保、体积小等优点, 被誉为21世纪绿色照明光源。随着LED在越来越多的照明场合的应用推广和人们对于光源质量的要求的提高, LED出光品质越来越被重视。评价LED出光品质的指标主要有效率、空间颜色均匀性和显色指数, 这些参数和LED封装密切相关。LED封装是将芯片和其他封装材料集成在一起形成最终的照明产品, 起着机械保护、外部信号和电连接、散热和光学参数调控等关键性功能。本文从封装的角度, 对LED的效率、空间颜色均匀性和显色指数的调控技术进行了系统阐述。具体到封装中的关键技术, 主要包含以下3方面: (1) 热设计。LED在工作过程中约有60%的输入电能被转化为热量, 如果产生的热量不能及时有效地散到环境中, 将会造成LED的温度急剧升高, 导致LED的效率下降并带来可靠性问题。(2) 光学设计。LED的光从芯片有源层中通过电子-空穴复合的方式产生后, 在经过芯片、荧光粉、封装胶和透镜等材料后, 由于散射和折射等作用, 光的传播方向和路径会发生改变。此外由于吸收作用, 部分的光被吸收并转换成热量。因此通过光学设计不仅可以调控LED光源能量分布, 还可以减少光在封装材料中的吸收从而提高光效。(3) 荧光粉涂覆。相比于多色发光LED芯片组合获得期望出光品质LED的封装形式, 将单色或者多色荧光粉涂覆在单色LED芯片上的封装形式具有更强的相关色温可调性和工艺灵活性而被广泛应用于LED工业生产中。对于荧光粉结合芯片的白光LED封装形式, 荧光粉涂覆起着调控空间颜色均匀性和显色指数的关键作用。

关键词 LED封装, 热设计, 光学设计, 荧光粉涂覆

1 简介

发光二极管(light emitting diode, LED)于1962年由Holonyak和Bevacqua发明, 在过去几十年, LED在外延生长、芯片设计、封装工艺和应用等方面取得了飞速的发展和卓越的成果^[1-5]。在1991年和1993年, Nakamura等人^[6,7]在低成本的蓝宝石衬底上通过引入

氮化镓缓冲层制备出了大功率蓝光LED芯片。蓝光LED芯片结合黄色荧光粉获得白光LED方法的发明, 使LED产业化并推广到通用照明领域成为可能^[1]。白光LED具有电光转换效率高、节能环保、可靠性高、体积小等优点, 被誉为21世纪绿色照明光源, 同时也被认为是可以取代白炽灯、荧光灯和高压钠灯的第4代照明光源^[1,2]。如今, LED已广泛应用于日常生活的

引用格式: 余兴建, 舒伟程, 胡润, 等. 高出光品质LED封装: 现状及进展. 中国科学: 技术科学, 2017, 47
Yu X J, Shu W C, Hu R, et al. LED packaging for high light quality: Status and perspectives (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47, doi: [10.1360/N092017-00061](https://doi.org/10.1360/N092017-00061)

方方面面,例如各种背光光源(液晶电视、显示器、手机屏)、景观照明、指示灯、路灯、汽车照明、室内照明灯等^[8-11].

1.1 LED基本概念

LED芯片是LED模块中将电能转换为光能的核心部件. 芯片的功能结构是由P型半导体和N型半导体组成的PN结结构,其工作原理如图1所示. 在P型半导体中, 输运电能的载流子是空穴,而在N型半导体中, 输运电能的载流子是电子. 在电场的驱动下, 电子和空穴相对运动, 在多量子阱中发生电子空穴对的复合, 发射出光子, 实现了电能向光能的转化. 但是, 电能除了转化成光能外, 还会有部分电能转化为热能, 包括电子和空穴运动过程中产生的焦耳热、电子和空穴复合过程中产生的非辐射热等. 这些热量最终是以声子的形式在半导体中传输.

白光LED是目前市面上最主要的LED光源, 然而单一的LED芯片并不能直接发出白光. 目前实现白光LED的方法分为2类: 一是单色LED芯片激发相应荧光粉混合获得白光, 也被称为荧光粉转化LED, 如蓝光LED芯片配合钇铝石榴石($Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, YAG)黄色荧光粉或多色(红光、绿光、黄光)荧光粉^[12,13]; 二是采用2个互补单色LED芯片或多个三基色LED芯片出光混合获得白光^[14,15]. 图2为3种常见的白光LED技术的原理示意图. 图2(a)所示的为目前工业生产中应用最为广泛的蓝光芯片配合黄色荧光粉的白光LED封装技术, 其白光合成原理图如图3所示. LED芯片在电激发下发出峰值为454 nm左右的蓝光, 涂覆在芯片外面的荧光粉硅胶层吸收部分蓝光, 并发射出峰值为570 nm左右的黄光, 透射的蓝光与激发黄光相互混合得到白

光^[16]. 该封装技术由于工艺简单和流明效率高而被工业界广泛使用, 但是这种封装技术存在显色指数低等缺点, 不适用于对显色指数要求高的照明场合, 如博物馆照明等. 图2(b)所示的蓝光芯片配合多色荧光粉的封装技术在前者的基础上添加红色荧光粉或者绿色荧光粉来取得较高的显色指数, 使荧光粉转化LED能适用于高显色要求照明场所, 但是由于红色荧光粉的量子效率低, 且多色荧光粉的调配方式复杂, 因此其工艺复杂且可靠性较差. 图2(b)所示的为多色LED芯片合成白光的封装技术, 该技术具有产品流明效率高、显色性好等优势, 但不同芯片间在驱动电压、温度特性等方面的差异导致产品结构复杂、成本偏高、可靠性较低.

图4所示的是典型的大功率LED照明产品封装工艺过程, 其主要包括芯片固晶、金线键合、荧光粉涂覆、透镜安装、封装胶填充和模块集成等6个工艺步骤, 各个工艺过程及其功能如下.

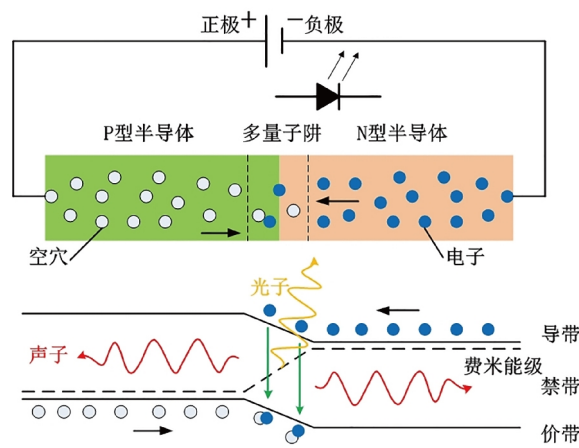


图1 (网络版彩图)LED芯片发光原理示意图

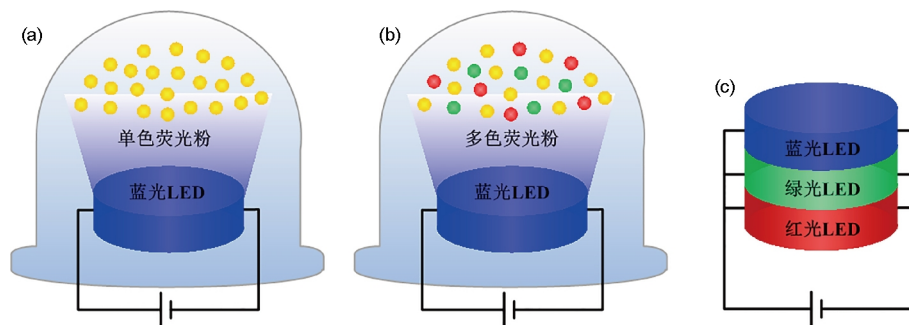


图2 (网络版彩图)白光LED技术原理. (a) 蓝光LED芯片+黄色荧光粉; (b) 蓝光LED芯片+多色荧光粉; (c) 多色LED芯片

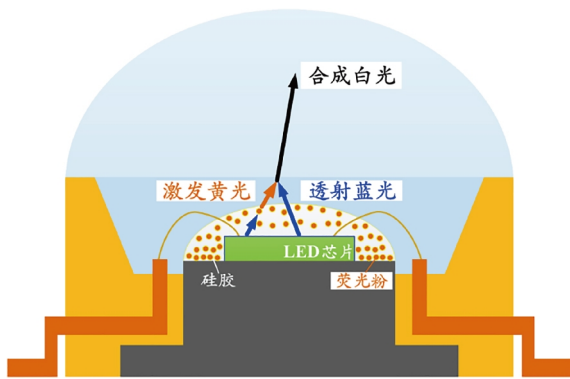


图3 (网络版彩图) 荧光粉转换白光LED的原理示意图

(1) 芯片固晶: 将芯片通过焊料或银膏键合在热沉上, 保证LED芯片产生的热量能及时传递到热沉上, 防止热量积累导致的LED结温过高而效率下降甚至烧毁。

(2) 金线键合: 通过键合金线将芯片电极和支架连通, 完成LED封装的电信号输入, 金线键合工艺不仅会影响LED的电连接可靠性, 也会影响LED的光学性能。

(3) 荧光粉胶涂覆: 将一定量的粉末状荧光粉颗粒分散到环氧树脂或硅胶中形成荧光粉胶体, 然后通过涂覆设备将荧光粉胶体点涂或喷涂到LED芯片表面并通过高温加热将其固化。荧光粉涂覆工艺是影响白光LED光学性能的关键工艺。

(4) 透镜安装: 将透镜扣在模塑料的机械结构中固定。透镜作为LED封装中主要的光学器件, 是提高取光效率、调控光斑形状的关键部件, 通过对透镜的合理设计可以获得满足不同照明需求的产品。

(5) 封装胶灌注: 将封装胶填充到透镜和LED支架之间的空隙中, 排除空气和湿气, 提高LED的可靠性, 增加封装取光效率。

(6) 模块集成: 将一定数量的单芯片LED模块集成

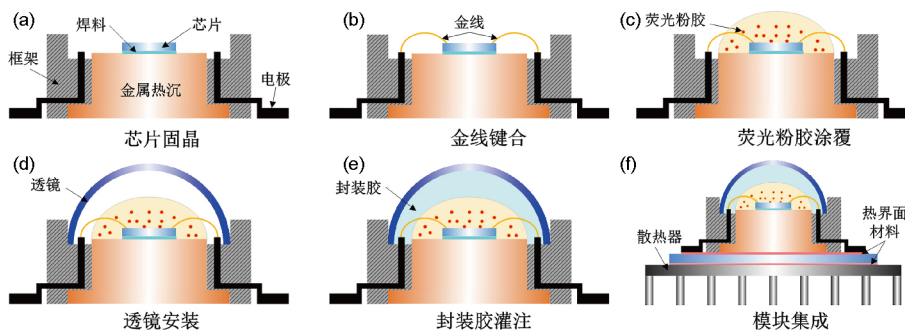


图4 (网络版彩图) LED封装工艺流程图

到翅片、热沉等散热设备上, 并集成反光杯和二次光学透镜等组件形成可用于照明的大功率LED产品。

1.2 LED的主要出光品质评价指标

评价LED出光品质的指标主要有光效率、颜色均匀性和显色指数, 下面将对各个指标进行详细说明。

1.2.1 效率

效率主要分为光效率和流明效率。光效率被定义为封装模块发出的光功率与总输入电功率的比值, 其计算公式如下:

$$\eta = \frac{\Phi_e}{P_e}, \quad (1)$$

式中, η 为光效率, Φ_e 和 P_e 分别是LED模块发出的光功率和输入的电功率。

光功率仅仅为一个能量概念, 其计算公式如下:

$$\Phi_e = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中, $P(\lambda)$ 为不同光波长的功率, λ 为光波长。

但是由于人眼对不同颜色的光敏感程度不同, 因此对于不同颜色的光, 即使功率相同, 人眼的观感亮度也会有所不同。为了表征人眼感官上的光的强弱, 引入光通量和流明效率概念。光通量的定义为

$$\Phi_{\text{lum}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中, Φ_{lum} 为光通量, 其单位为流明(lm); $V(\lambda)$ 为明视觉情况下的光谱视觉系数, 表征人眼对波长的敏感程度。

流明效率的定义为

$$L_{\text{lum}} = \frac{\Phi_{\text{lum}}}{P_e}. \quad (4)$$

图5所示为明视觉情况下的光谱视觉系数分布^[17]和典型的蓝光芯片结合黄色荧光粉型白光LED的光谱. 从图中可以看出光谱视觉系数随着波长发生显著改变, 在波长为555 nm时视觉系数最大, 其值达到1, 而两端波长视觉系数小于0.1. 由于黄色荧光粉的辐射光落在光谱视觉函数较大的波长区间中且黄色荧光粉的量子效率比其他颜色的荧光粉高^[18-20], 因此蓝光芯片结合黄色荧光粉的白光LED可以取得很好的流明效率.

1.2.2 空间颜色均匀性

物体温度升高至一定程度时, 将能够向外辐射可见光, 可见光颜色将随温度发生改变, 普朗克定律揭示了黑体辐射光谱与热力学温度之间的关系. 根据这个物理现象和规律定义一个表征可见光的颜色的物理量——相关色温(correlated color temperature, CCT). 当光源辐射光的颜色与黑体热辐射光颜色相同时, 此时黑体的热力学温度即为该光源的CCT, 其单位为K. 此外CCT和光谱是密切相关的, 可以通过光源的光谱来计算其CCT^[21-23].

由于芯片与荧光粉发光特性不同, 芯片发出的蓝光与荧光粉发出的黄光在空间的能量分布也有所不同, 最终导致在不同视角接收到的CCT有所不同. 光在空间角度上CCT分布的均匀性定义为LED的颜色均匀性, 当CCT偏差较大时, 人眼可以直接观察到光的颜色在空间角度上的差别. 图6为一点亮状态下的LED封装模块, 可以看到其空间颜色分布很不均匀, 中心的光颜色偏蓝, 边缘的光颜色偏黄. 这种不均匀的光色分布, 不但降低了LED的照明质量, 更影响了用户的照明舒适性. 为此必须对LED照明的空间颜色均匀性进行评估, 目前常用空间视角中的CCT偏差(最高CCT与最低CCT之差)来表示颜色均匀性能^[24], 其表述为

$$U_{color} = CCT_{max} - CCT_{min} \quad (5)$$

式中, U_{color} 为空间颜色均匀性指数, CCT_{max} 和 CCT_{min} 分别为最高CCT和最低CCT.

对于应用最为广泛的蓝光芯片配合黄色荧光粉型白光LED, 其颜色均匀性也常用LED照明视角中的最小黄蓝比与最大黄蓝比来表示^[25]:

$$U_{color} = YBR_{min} / YBR_{max} \quad (6)$$

式中, YBR为黄光和蓝光的能量比值.

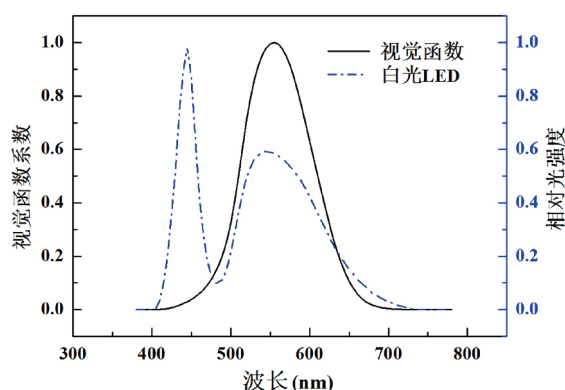


图5 (网络版彩图)明视觉情况下的光谱视觉系数分布和典型白光LED光谱分布

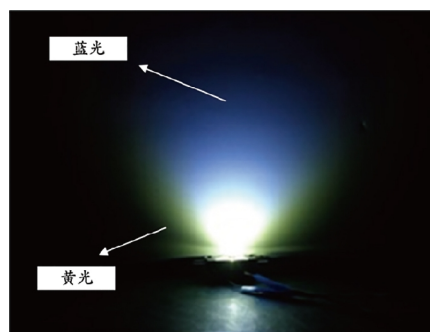


图6 (网络版彩图)空间颜色均匀性差的LED照明效果

1.2.3 显色指数

显色指数(CRI)表征光源对照明物体颜色的显示能力, 是通过与同CCT的参考或基准光源(太阳光)下物体外观颜色的比较. 显色指数越高, 其照射下的物体的颜色越真实、饱和. 太阳光的显色指数定为100, 常见的光源中白炽灯的显色指数接近100, 但是典型的蓝光LED芯片结合黄色荧光粉的白光LED的显色指数一般低于80^[26]. 如图7所示的为白炽灯和白光LED的光谱图以及对对应光照下的实物图, 可以看出白炽灯照射下的物体的颜色更鲜艳饱和.

光源的显色指数和光源的发光光谱是密切相关的, 已知光源的发光光谱, 可以通过公式计算出其显色指数^[23]. 同一显色指数下的光谱不是唯一的, 如图8所示, 虽然太阳光和白炽灯光的显色指数都为100, 但是两者的光谱组成差别很大.

1.3 LED光性能调控关键技术和挑战

图9所示的为白光LED的封装结构及出光品质调

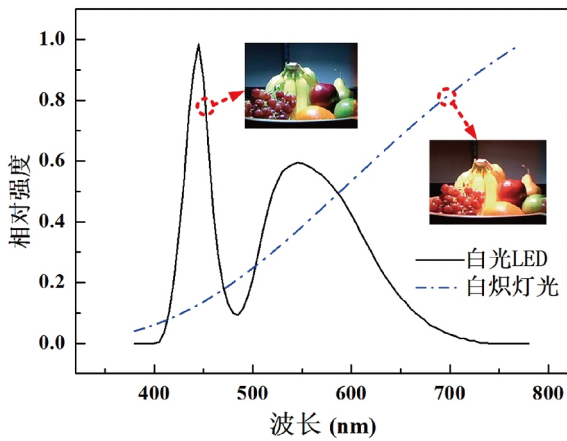


图7 (网络版彩图)白炽灯和白光LED的光谱分布及其显色效果对比

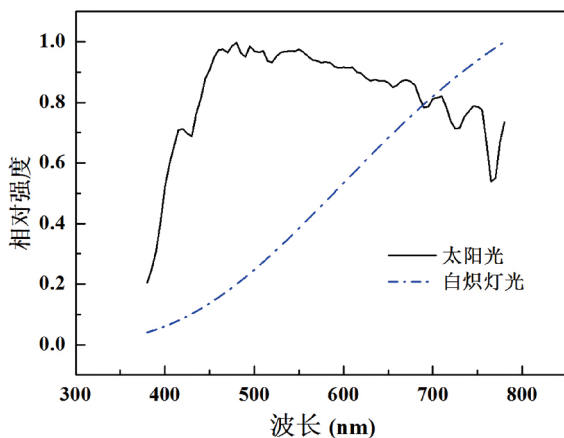


图8 (网络版彩图)太阳光和白炽灯的光谱组成

控关键技术示意图. 典型的大功率LED产品是由单颗芯片封装成模块后阵列排布贴合在散热器上实现的,

因此单个封装模块的封装技术和阵列模块封装技术决定着最终LED产品的光学性能. 从图中可以看出, LED出光品质调控的关键技术包含3点: 热设计、光学设计、荧光粉涂覆技术.

(1) 热设计. LED的热量来源主要有芯片产热和荧光粉产热2部分. 芯片产热: LED芯片通电后在有源层产生光子的过程中, 由于电子的非辐射跃迁, 部分电能被转化为热量, 此外产生的光子在向芯片外辐射的过程中部分被芯片材料吸收转化成热量, 40%左右的输入电能能在芯片中被转化成热量损失, 这导致芯片的结温很高^[27]. 荧光粉产热: 荧光粉在光转化的过程中由于非辐射跃迁和Stokes损失, 部分的光能量被转化成热量, 结合芯片产热和荧光粉产热造成的损失, 最终LED产品的效率只有40%左右^[27]. 综合来说, LED器件内部传热存在以下几个特点: 1) 热量产生于微小尺寸的芯片和荧光粉, 传递需要经过多种尺度、多个界面和多种材料, 界面增多将导致光损失增加, 热阻加大; 2) 光热传递紧密耦合, 芯片电光转化效率和荧光粉光转化效率随温度升高而降低^[28,29], 因此散热不良会导致芯片结温和荧光粉温度升高并进一步增大光损失.

(2) 光学设计. LED芯片的辐射光和荧光粉的激发光需要经过芯片、荧光粉胶、封装胶和透镜等光学元件才能辐射到环境中, 考虑到材料对光线的吸收, 减小光线在封装材料中的传播光程是提高光效的关键, 因此必须对各光学元件的结构形状进行设计以减少不必要的散射、折射和全反射. LED芯片的照明光斑为中间偏亮的圆形区域, 因此形成的LED产品照明均匀度差, 相比之下, 矩形的照明光斑能实现较佳的照明均匀度. 此外部分照明场合要求准直照射光以及特

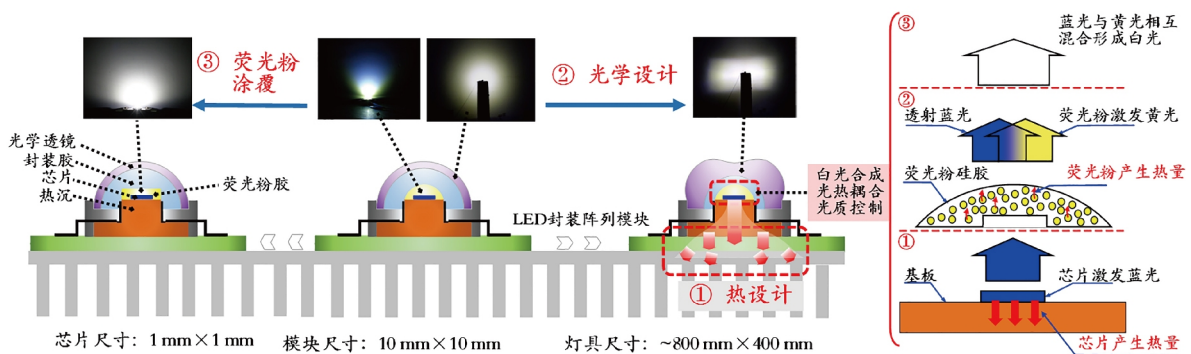


图9 (网络版彩图)白光LED的封装结构及光学性能调控关键技术示意图

殊的照明光斑, 例如射灯和汽车大灯等. 为了使LED灯具满足更多的照明场合需求, 必须增加曲面透镜和反光杯等二次光学元件来改变光的传播方向从而获得想要的光斑形貌, 因此必须通过光学设计来减少光在光学元件中的吸收损失.

(3) 荧光粉涂覆技术. 荧光粉转化白光LED是市场上使用最广泛的白光LED, 通过在芯片上涂覆单色或者多色荧光粉来实现白光. 对于荧光粉转化LED, 荧光粉和硅胶均匀混合后涂覆在芯片的上方和周围, 从芯片辐射出的光在经过荧光粉胶层时发生吸收、转化、散射和折射, 因此荧光粉层的参数对LED的光效、空间颜色均匀性和显色指数的影响主要取决于荧光粉层的参数(浓度、配比、形貌、颗粒分布、空间位置等)^[30-34], 而荧光粉层的参数由荧光粉涂覆技术决定, 开发具有优异出光品质的荧光粉涂覆技术对LED的发展和运用至关重要.

光效、空间颜色均匀性和显色指数等出光品质的提高对于LED进一步推广应用到各种照明场合至关重要, 但是LED出光品质的调控面临诸多技术挑战, 主要包含热设计、光学设计和荧光粉涂覆技术. 近年来, 诸多技术被开发并应用于LED出光品质调控. 本文将结合关键的封装技术对LED出光品质的调控进行概述, 主要包含3方面: 效率的调控技术; 空间颜色均匀性的调控技术; 显色指数的调控技术.

2 效率

影响LED效率的因素主要分为2方面: 1) 温度. 输入LED芯片的电能不能大部分被转化成热量, 热量的产生造成LED芯片和荧光粉的温度上升, 温度升高导致芯片和荧光粉的量子效率下降并造成芯片和荧光粉失效等问题^[35-38]. 2) 光吸收. 芯片辐射光和荧光粉激发光需要经过芯片、荧光粉、硅胶和透镜等封装材料辐射到环境中, 由于这些封装材料对光的吸收、折射、散射和反射等作用, 部分光在传播的过程中被封装材料吸收并转化成热量. 提高光效率的途径主要有2个: 1) 热设计, 开发高效散热技术将芯片和荧光粉层产生的热量及时传递到环境中, 保证LED芯片结温和荧光粉层温度处于较低的水平; 2) 光学设计, 设计合理的光学元件结构及光学界面, 减小光在封装材料中的吸收损失.

2.1 热设计

目前, 输入LED的电能有60%左右被转化成热量, 由于LED体积小、功率大, 且热量传递需要经过多个尺度, 因此热设计一直是LED封装的难点. LED芯片和荧光粉的量子效率与温度密切相关, 因此准确地测量或者评估LED芯片结温和荧光粉温度是热设计的关键.

由于荧光粉的尺寸在十几微米左右, 因此其温度很难通过常见的热电偶等设备来准确测量^[39,40]. 由于LED中的热量大部分产生于LED芯片, 很长一段时间芯片结温被认为是LED器件中的最高温度, 研究者将监测和降低芯片结温作为LED散热设计的首要目的, 而针对荧光粉温度的检测和控制技术几乎空白. 2013年, Luo等人^[41]通过实验发现在大功率输入下, 荧光粉的温度会远高于芯片结温并造成如图10所示的荧光层碳化现象. 经过分析, 他们发现这是由于荧光粉颗粒弥散在导热系数很低(大约为 $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)的树脂和硅胶等聚合物中, 其产生的热量很难传递出去而不断累积, 从而导致温度高于芯片结温. 为了计算荧光粉层的温度, Luo和Hu^[42], Hu等人^[43], Ma等人^[44], 胡润^[45]在考虑荧光粉光致发热的基础上建立了荧光粉光热耦合模型, 并用此模型预测不同封装结构的LED的荧光粉温度.

目前对LED芯片结温的实验监测往往依赖于昂贵精密的设备或者复杂的方法进行测试, 如T3ster^[46,47]、红外热像仪^[48]和磁感应法^[49]等, 并且受测试设备的限制, 能进行测试的LED封装结构的类型、尺寸和测试精度也受到了极大的限制. 因此通过数值求解计算方法来准确预测各种类型的LED模块内包含芯片结温在内的各部件的温度对于设计高光效高可靠性的LED有着重要的意义. 想要通过数值求解方法预测LED模块内的温度分布, 就必须掌握LED器件内各部分热阻以及总热阻的计算方法, 在这种应用需求下, LED热阻网络模型被提出并成功地运用于LED热阻的分析和预测^[50-53]. 图11所示的为单芯片LED的热阻网络模型示意图, 该模型将各封装层的热阻通过串联或者并联的方式联系在一起来计算LED的总热阻 R_{LED} :

$$R_{\text{LED}} = R_{\text{chip}} + R_{\text{TIM1}} + \dots + R_{\text{TIM3}} + R_{\text{sink-ambient}} \quad (7)$$

LED热阻网络模型的求解关键在于各封装层热阻

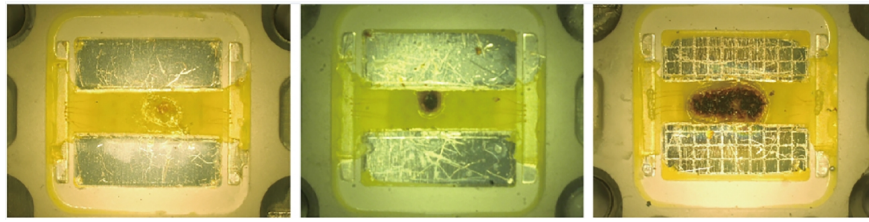


图 10 (网络版彩图) 荧光粉层温度过高导致荧光粉胶碳化^[41]

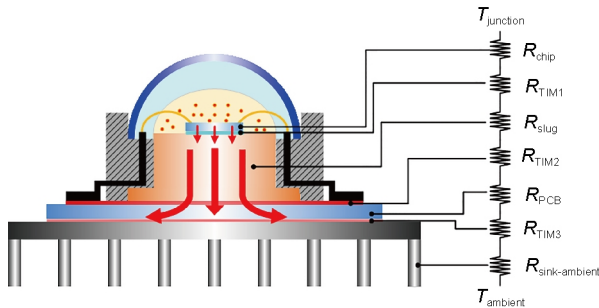


图 11 (网络版彩图) LED的热阻网络示意图

的准确求解. LED器件内部热阻复杂,除了材料的体热阻和环境热阻,还涉及热量从芯片扩散到热沉和从热沉扩散至散热器过程中的扩散热阻,以及热量在相邻两个部件的接触界面上传递的界面热阻. LED散热设计要求总热阻最小,因此需要根据不同热阻的影响机制采取相应的调控技术,下面主要对扩散热阻、界面热阻和环境热阻进行详细介绍.

2.1.1 扩散热阻

图12为扩散热阻示意图,热量 Q 从图12(a)所示的结构的上表面的部分面积传入,然后扩散至整个基板后向周围环境传递.如图12(c)所示,当热量从物体的部分表面传入后,一部分热量不改变热流方向向温度低的表面传递,另一部分热量改变热流方向并向温度低的区域传递.如图12(d)所示,假定热量先沿垂直方向传导,后沿水平方向扩散,最后通过周围表面以对

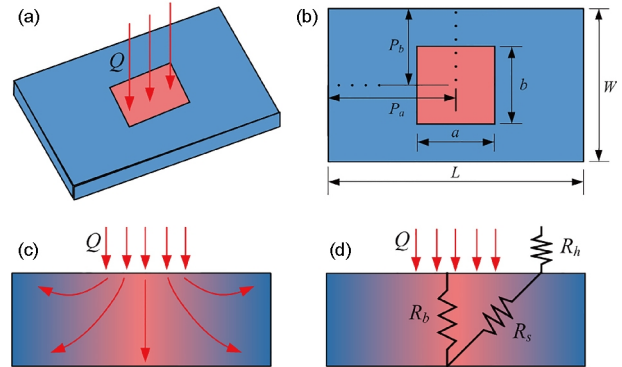


图 12 (网络版彩图) 扩散热阻示意图. (a) 物理模型; (b) 几何参数; (c) 热量传递; (d) 热阻结构

流换热方式传递给流体,则上述传热路径的热阻可以表示为

$$R = R_b + R_s + R_h, \tag{8}$$

式中, R_b 表示材料体热阻, R_s 表示扩散热阻, R_h 表示对流换热热阻.

不少研究者提出了关于扩散热阻的计算模型. Kennedy^[54]得到了一端为恒定热流量输入的圆柱体的扩散热阻的解析解. Kadambi和Abuaf^[55], Krane^[56]分别得到了二维和三维矩形的扩散热阻的解析解. Muzychka等人^[57,58]从多个方面研究了扩散热阻,包括热源的位置、边界条件和热通道的类型,并提出了扩散热阻的近似计算公式:

$$R_s = \frac{8}{WLk_{sub}} \left\{ \frac{1}{a^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos^2(\lambda_{x,m} P_a) \sin^2(\lambda_{x,m} a/2)}{\lambda_{x,m}^3 \phi(\lambda_{x,m})} + \frac{1}{b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos^2(\lambda_{y,n} P_b) \sin^2(\lambda_{y,n} b/2)}{\lambda_{y,n}^3 \phi(\lambda_{y,n})} + \frac{8}{ab} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos^2(\lambda_{x,m} P_a) \sin^2(\lambda_{x,m} a/2) \cos^2(\lambda_{y,n} P_b) \sin^2(\lambda_{y,n} b/2)}{\varepsilon_{m,n} \lambda_{x,m}^2 \lambda_{y,n}^2 \phi(\varepsilon_{m,n})} \right\}, \tag{9}$$

式中, k_{sub} 为材料的导热系数,

$$\lambda_m = m\pi/L, \lambda_n = n\pi/W, \beta_{m,n} = \sqrt{\lambda_m^2 + \lambda_n^2}.$$

扩散热阻是LED热阻的重要组成部分, 尤其是当不同部件之间尺度跨度较大时, R_s 可达到总热阻的60%~70%, 当 R_s 很大的时候, 热量将无法均匀地分散在整个板上并会导致芯片处热点的产生. 减小扩散热阻的方法主要有2种: (1) 对热沉性能进行优化(例如: 材料、尺寸、结构等), 但是这种方法对整体扩散电阻的减小是相当有限的. Yang等人^[59]研究了LED封装中铜基板的厚度对扩散热阻的影响, 他们发现, 铜基板的扩散热阻随着厚度增大而减小, 但是当厚度大于0.6 mm, 体积热阻的增大会导致总热阻的增大. (2) 减小热源和热沉的尺寸差异, 如增大芯片尺寸或者采用低功率芯片的LED阵列. Yang等人^[60]通过模拟和实验分析了LED芯片尺寸对扩散热阻的影响. 他们发现, 在基板尺寸不变的情况下, 当芯片尺寸从15 mil增加到40 mil, 总热阻呈指数下降. Cheng等人^[61]应用扩散热阻网络模型, 对一个80 W LED灯进行LED芯片布置的优化, 结果表明芯片布置的优化减弱了热点现象并提高了LED灯具的温度均匀性.

2.1.2 界面热阻

LED器件中不同材料之间通过一层很薄的热界面材料(TIM)黏合在一起, 常见的TIM有导热胶、导电银浆、导电锡浆和金锡合金等, 这些材料通过加热融化再固化工艺将2种材料黏合在一起. 如图13所示, 由于固体接触面不是完全光滑的, TIM不能完全填满固体表面上的空隙^[62], 因此在固体接触面和TIM接触面上产生了很多的空气腔. 空气的导热系数很低, 因此热量在传递过程中很难通过空气腔进行传递, 从宏观上看, 热量往下传递时, 在基板-TIM界面处会有很大的温差 ΔT , 这就是界面热阻 R_c 产生的原因. 从图13可以看出, TIM层的热阻 R_{TIM} 由2个部分组成: TIM层厚度引起的体热阻 R_{bulk} 以及由于不能完全润湿造成的在TIM-固体界面的热阻 R_c . 因此, R_{TIM} 可以表达为

$$R_{\text{TIM}} = R_{\text{bulk}} + R_{c1} + R_{c2}, \quad (10)$$

式中, Hamasaiid等人^[63,64]提出了一种液体-固体接触的界面热阻 R_c 的计算模型, 他们在考虑了微接触点的有效导热系数 k_s 、表面粗糙度 σ 、表面微凸体的峰顶间

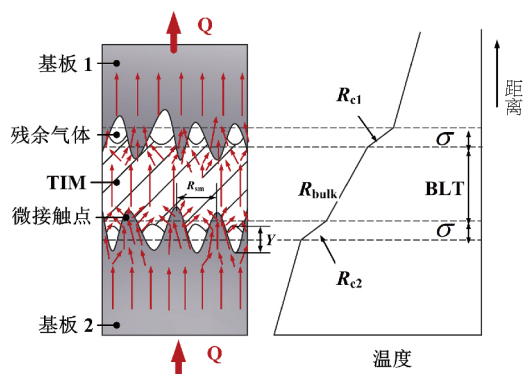


图13 (网络版彩图)TIM-固体界面各个主要参数示意图

隔 R_{sm} 和在液体与固体之间留截空气高度 Y 的基础上得到了 R_c 的表达式:

$$R_c = \frac{1.5\pi^2 R_{\text{sm}} \left(1 - \left(\exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma^2}\right) - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{Y}{\sigma} \operatorname{erfc}\left(\frac{Y}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right)^{1.5}}{8k_s \operatorname{erfc}\left(\frac{Y}{\sqrt{2}\sigma}\right) \left(\exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma^2}\right) - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{Y}{\sigma} \operatorname{erfc}\left(\frac{Y}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right)}. \quad (11)$$

从式(11)可以看出, Y 对 R_c 的影响很大, 但是Hamasaiid等人^[63,64]在他们的模型中并没有给出 Y 的准确计算公式. 在Hamasaiid模型的基础上, Yuan等人^[65]进一步改善了TIM-固体界面热阻 R_c 的预测模型, 他们通过分析TIM对固体表面的润湿性能来计算 Y , 并将实验测量TIM-铝界面之间的界面热阻 R_c 和预测模型计算得到的界面热阻结果进行比较, 发现模拟结果和实验结果吻合, 当施加压力为0.1 MPa时其误差在14.3%以内.

而TIM层厚度引起的体热阻 R_{bulk} 则可以根据下式计算:

$$R_{\text{bulk}} = \frac{\text{BLT}}{k_{\text{TIM}}}, \quad (12)$$

式中, BLT表示TIM层厚度, k_{TIM} 表示TIM的导热系数.

由于LED模块中存在诸多界面, 因此界面热阻是LED热阻的重要组成部分. 研究者在减小界面热阻上做了很多的工作. 主要包含: 1) 提高黏合过程中所施加的压力、使用具有高表面张力和导热性的TIM, 以及加工低表面粗糙度的基板来减小BLT^[62,65]; 2) 使用高热传导率材料, 例如碳纳米管、纳米线锡和石墨烯等^[66-68]; 3) 对于复合颗粒型TIM材料, 增加填充颗粒的体积分数来增大TIM的导热系数^[69-71], 但是提高颗粒

的体积分数会增加BLT从而增加TIM的体积热阻^[72,73];
4) 采用非均匀尺寸填充颗粒, 通过多尺寸颗粒的混合, 更小的颗粒可以填补较大的颗粒与基体之间的空隙, 形成了热传导的有效路径^[74]; 5) 对填充颗粒表面进行处理减小基质与填料之间的界面热阻^[75]; 6) 改变填充颗粒的分布方向, 研究表明, 当片状颗粒排布方向和热流密度方向一致时可以极大地提高TIM的导热系数^[76-79]. 如图14所示, Yuan等人^[79]通过实验研究了片状六方氮化硼(hBN)在聚合物中的3种排布方式对TIM的导热系数的影响, 结果表明当填充颗粒的方向垂直于TIM层(图14(c))导热性能最好, 而颗粒各向同性和平行取向(图14(a)和(b))的情况下导热性能则相对较差.

2.1.3 环境热阻

热量经过散热设备传递到环境过程中的热阻称为环境热阻, 它不仅和散热器的材料结构有关, 还取决于散热器的热边界条件.

将LED的热量传递到环境当中是LED热设计的终极目标. 在LED封装中, 往往根据功率、热源区域、散热区域、应用场合等散热条件选择不同的散热方式, 概括来说可分为被动散热方式和主动散热方式. 这2种方法之间的主要区别在于是否需要一个外接电源. 被动散热通常不使用电源, 例如通过自然对流和热管的散热器, 然而, 主动散热方式需要一个电源, 例如风扇和液体输送泵驱动来实现强制对流换热.

(1) 被动散热

目前实现被动散热的散热器件主要包含翅片和热管.

翅片散热器是最广泛使用的散热设备, 它不仅可以用作被动散热, 也可用于主动散热. 在LED灯具的

设计中, 将LED模块贴在翅片散热器上, LED产生的热量经由自然对流或强制对流由散热器传递到环境中. Luo等人^[80]于2009年开发了一种适用于板翅式散热器优化的工程算法, 该算法中同时将翅片高度、翅片厚度和水平板翅片换热器的散热片间隔等重要参数考虑在内, 并将该算法成功运用于112 W路灯的设计. Yang等人^[81]利用换热器中工作流体的相变开发了一个热虹吸换热器, 其设计兼备热管和传统散热翅片的优点, 并在LED路灯上实现了良好的效果.

热管是一种先进有效的散热部件, 往往应用于高热流密度器件散热. 热管的工作原理是利用工作介质的相变传热来实现热量的传递: 工作介质在高温蒸发区吸收热量发生相变成为蒸气并在热管内部流动, 然后在低温冷凝区凝结成液体, 最后冷凝液体将通过毛细芯回流到蒸发区域, 如此循环, 电子设备的热量会有效地传递到周围环境中. LED模块的尺寸和散热器的尺寸相差很大, 因此要求散热器能及时地将LED的热量传递至整个散热器表面以实现高效的散热, 热管很好地迎合了LED的散热需求而被越来越多地应用于结构紧凑的大功率LED封装中^[82-84]. Luo等人^[84]制备了一种硅玻璃微型热管(MHP)来冷却10 W的大功率LED模块, 在硅晶片上制造细槽并以去离子水作为工作介质, 实验结果表明该均热板具备较好的散热能力. Lin等人^[85]制备了一种铝板振动热管(OHP)来冷却64 W LED灯的模块, 在铝基板上制造一系列平行矩形通道构成一个曲折的闭环通道, 结果表明, 在自然对流条件下使用OHP极大地降低了LED的温度. 当热流密度极大的时候, 传统的热管已经无法满足散热需求, 此时需要结合其他散热设备一起进行散热^[82,86]. Fu等人^[86]设计和制造带热管翅式空气冷却系统的用于1000 W的大功率LED的网球场灯, 模拟结果表明, LED

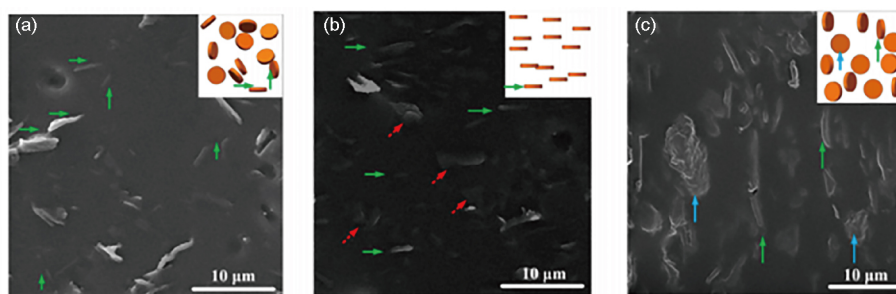


图14 (网络版彩图)聚合物TIM的片状填充颗粒可能取向. (a) 随机分布; (b) 水平分布; (c) 垂直分布^[79]

最高温度控制在92℃.

(2) 主动散热

随着LED集成度和功率的增加, 在单位面积上产生的热量越来越多, 被动散热器已经不能及时地对这些LED器件散热, 除非在尺寸和重量上指数增加. 在这种情况下, 就需要采用主动散热来达到散热要求. 一般来说, 适合于LED的主动冷却方法包括强制空气冷却和液体冷却.

空气冷却经常应用到体积和表面积比值较小或环境温度较高的场合^[87-89], 通过风扇或泵产生高空气流速从而实现散热表面的强制对流换热, 对比自然对流换热其传热系数可以提高1~2个数量级, 从而使系统与环境的温差维持在一个更低的水平. 相比被动散热, 空气冷却往往伴随着震动和噪音, 系统更复杂且成本和能量消耗较高.

相比于空气冷却, 液体冷却系统具有结构简单、体积小等优点. 和空气冷却一样, 液体以较高的流速流过散热模块, 不仅可以进行换热, 还可以将吸收的热量通过液体带走, 因此其传热系数比固体大很多. 目前, 液体冷却方法主要分为微通道冷却和微喷冷却.

微通道散热器具有比表面积大、对流换热系数大、质量和体积小以及冷却剂需求量小等特点^[90-95], 这些特点使这些微通道非常适合于冷却大功率LED或LED阵列. Luo和Mao^[96], Yuan等人^[97]发现通过优化微通道内几何结构、流速和总功率等参数可以有效降低LED的平均温度, 但是在微通道的下游, 工作流体温度的升高导致其冷却性能下降从而导致温度分布不一致. 为了实现均匀冷却性能, 毛章明^[98]建立了一个分形树状微通道液冷模型. 模型的示意图和实物

图如图15所示, 通过增加微通道截面积补偿在工作液体和基板之间的传热系数的下降, 从而保持冷却能力均匀, 实验结果表明, 3颗芯片的结温温差小于0.3℃.

微喷冷却方法可以有效地降低LED的温度并解决LED的热点问题^[99,100]. 如图16所示, 微喷冷却系统主要由微射流阵列器件, 微泵和散热器组成. Luo等人^[101]和Liu等人^[102]通过实验和模拟的方法研究了微喷冷却系统在大功率LED热管理上的应用, 他们将尺寸为1 mm×1 mm的芯片以2×2方式排布在尺寸为15 mm×15 mm的基板上, 结果表示当输入功率为5.6 W, 流量为9.7 mL/s, 芯片的最大温升为36.7℃. 此外, 他们还对微喷冷却进行了参数分析, 综合优化了微喷直径、顶腔高度、流速等参数, 根据设计结果制备了用于冷却220 W LED灯的微喷冷却系统, 结果表明在室内温度为30.8℃时, LED基板温度只有69.4℃^[103].

2.2 光学设计

从LED芯片有源层发出的光在经过芯片出光面、荧光粉胶、封装胶、封装透镜和二次光学系统等部件时, 由于材料的直接吸收和全反射造成的间接吸收等原因导致相当大一部分光能量转化为热量, 因此,

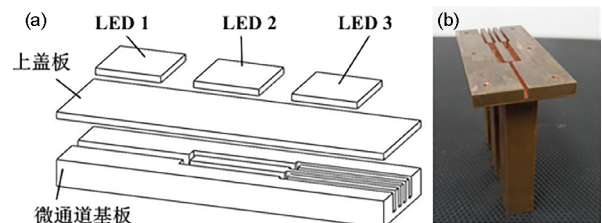


图15 (网络版彩图)分形树状微通道液冷基板. (a) 示意图; (b) 实物图^[98]

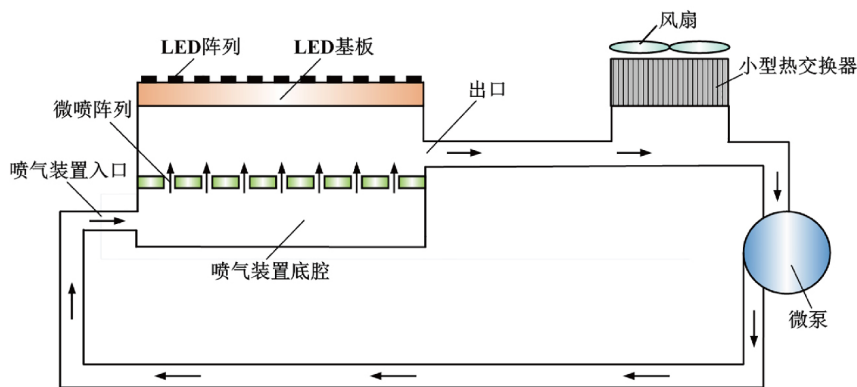


图16 (网络版彩图)微喷冷却系统图

必须进行光学设计减小这部分的光损失以提高LED的整体光效。

LED光学设计分为一次光学设计和二次光学设计。一次光学设计直接影响到LED封装模块的效率,是指与LED封装模块相关的光学设计,包括LED芯片、荧光粉胶、反光杯、封装胶、封装透镜等,以及LED芯片表面微结构与封装协同设计、封装透镜与二次光学集成设计等。二次光学设计直接影响照明器件的系统光效,是指除了LED封装模块以外的光学设计,如照明系统的反光杯和透镜等设计。

2.2.1 一次光学设计

当光线从高折射率材料传播至低折射率材料,当入射角大于临界角 θ 时,光线会在2种材料的界面上发生全发射。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right), \quad (13)$$

式中, n_1 为低折射率材料的折射率, n_2 为高折射率材料的折射率, θ 为发生全反射的临界角。

如图17所示的为未添加光学设计部件的LED封装模块内光传播过程,其中主要存在2个容易发生全反射的光学界面:1)芯片-荧光粉胶界面。通常芯片的折射率在2.5左右,荧光粉胶的折射率在1.4~1.7之间,两种材料折射率的差异导致光线从芯片传播至荧光粉胶的过程中会在芯片-荧光粉胶界面发生全反射,根据式(13)可知发生全反射的临界角为 $34^\circ\sim 43^\circ$ 。2)荧光粉胶-空气界面。荧光粉胶的折射率在1.4~1.7之间,

空气的折射率为1,这导致光线从荧光粉胶传播至空气的过程中会在荧光粉胶-空气界面发生全反射,根据式(13)可知发生全反射的临界角为 $36^\circ\sim 46^\circ$ 。在界面上发生全反射的光在封装材料中反复传播的过程大部分被吸收转化为热量,这不仅直接造成了光效的损失,更间接地导致芯片和LED封装模块温度的升高,从而降低芯片的效率和荧光粉的效率,因此必须采取有效的技术来抑制界面全反射的发生。接下来对这2个主要全反射界面的光学设计进行详细介绍。

2.2.1.1 芯片-荧光粉胶界面全反射的减小

提高芯片取光效率对LED效率的提高至关重要,目前抑制芯片-荧光粉胶界面全反射的方法主要有以下3种。

(1) 芯片表面粗化或者图案化。表面粗化和图案化是通过化学腐蚀、沉积、刻蚀或者印刷等技术,使芯片出光表面形成规则或者不规则的微结构,如锥形、圆柱形、半球形等^[104,105]。如图18所示,当芯片表面被粗化或者图案化后,光线在芯片-荧光粉胶界面上就能实现随机的折射和反射从而使更多的光线逸出芯片,进而提高芯片的出光效率。如图19所示,Tsai等人^[106]制备出了一种半球状图案化芯片表面结构,实验结果表明该结构相比平坦芯片表面在350 mA驱动电流下提高出光效率65%。

(2) 衬底图案化。衬底图案化的基本原理是在衬底的顶面或者底面制作一些图形化的结构,例如规则排布的半球形阵列、柱形阵列或者锥形阵列^[107,108]。如图20所示,相比于平坦表面衬底,图案化衬底能实

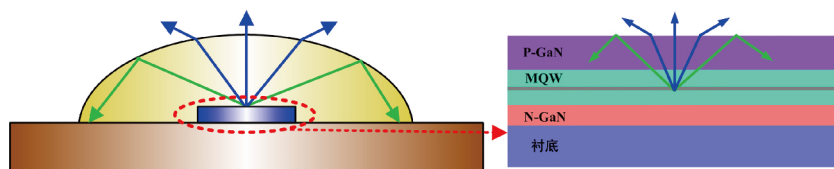


图17 (网络版彩图)LED光线传播过程中主要的全反射界面

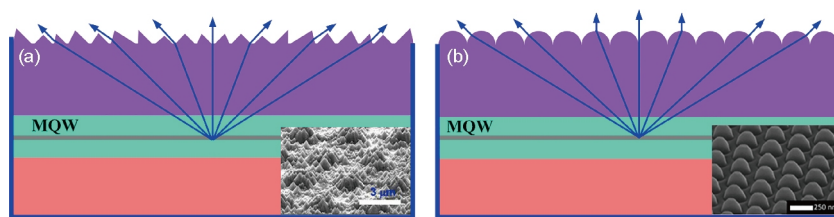


图18 (网络版彩图)表面粗化或图形化芯片的光辐射示意图。(a) 粗化;(b) 图案化

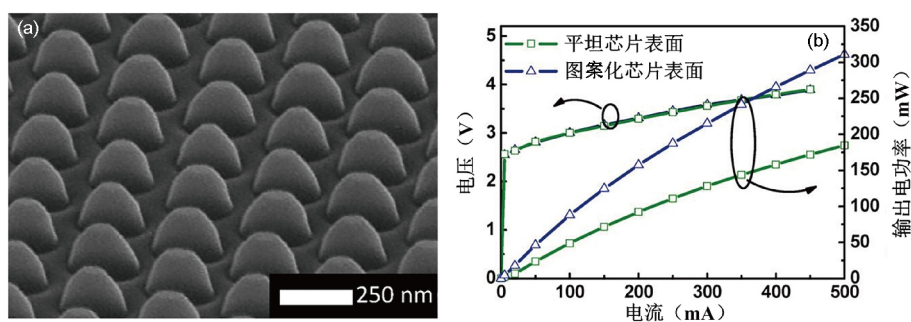


图 19 (网络版彩图)图案化芯片表面结构及其光效提升效果^[106]. (a) 表面结构; (b) 平坦表面芯片和图案化表面芯片光效对比

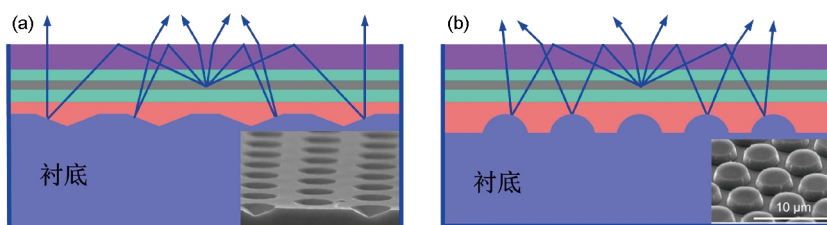


图 20 (网络版彩图)衬底图形化的原理示意图. (a) 锥形图案; (b) 半球形图案

现反射光线的漫反射, 改变光线在芯片内部传播的方向和路径从而增加光线逸出芯片的几率, 最终提高出光效率. Lee等人^[108]通过湿法刻蚀的方法实现圆锥形图案化衬底, 测试结果表明该衬底可以提高芯片取光效率接近15%.

(3) 光子晶体. 光子晶体是一种利用折射率周期性变化的介质结构, 入射到光子晶体中的光线严格按结构中的特定方向传播^[109,110]. 从芯片有源层发出的光线进入光子晶体后将沿晶体的轴向方向从芯片顶部发射, 从而可以使大部分光线成为有效的出射光线. 理论上光子晶体可以将芯片的出光效率提高到90%以上. 如图21所示, Lai和Yang^[111]在LED芯片的P-GaN表面上制备光子晶体, 实验结果显示光子晶体将LED芯片的出光效率提高了26%.

2.2.1.2 荧光粉胶-空气界面全反射的减小

LED芯片上涂覆荧光粉来获得白光是最常见的白光LED封装方式, 荧光粉颗粒往往和环氧树脂或者硅胶等流体均匀混合后通过荧光粉涂覆工艺涂覆在芯片上. 由于硅胶和环氧树脂的折射率大于空气, 因此涂覆了荧光粉胶之后芯片的取光效率会进一步提升, 但是荧光粉颗粒对光的散射和吸收、环氧树脂和硅胶对光的吸收以及胶体-空气界面上的全反射成了LED封装效率下降的又一个原因. 减小荧光粉胶-空

气界面全反射的方法主要有以下几种:

(1) 提高封装材料的透光率. 研究表明硅胶相比于环氧树脂透光率和热可靠性更好^[112-115], 因此使用硅胶作为荧光粉分散基质相比环氧树脂对光的吸收更少, 出光效率也较高.

(2) 改进封装结构, 如增加透镜^[116-120]和反光杯. 图22阐释了透镜和反光杯的工作原理. 如图22(a)所示, 对于平面荧光粉胶形貌, 在全反射角 θ_c 外的光线都会发生全反射, 这部分光线在反射过程中被封装材料再吸收造成了LED封装效率的下降; 如图22(b)所示, 透镜控制了封装胶出光界面的形貌, 从而有效地减少了封装胶-空气界面上的全反射; 如图22(c)所示, 边缘角度的光线在反光杯上反射并改变了原来的传播方向, 从而有效地减少了边缘光线的在封装胶-空气界面的全反射. 透镜相比反光杯有更大设计自由度, 且实现方式灵活, 因此被广泛地应用在LED封装中. 如图23所示的为Wang等人^[116]提出的一次透镜与二次透镜相结合的应用导向型LED封装模块(ASLP), 不仅实现了通常需要二次透镜才能实现的矩形光斑照明效果, 而且其效率大于“普通LED封装+二次透镜”的效率.

(3) 封装基板和荧光粉胶出光面的粗化或者图案化. 增加半球形透镜和反光杯的方法虽然可以减小光的全反射, 但是这种封装结构只适用于单芯片模块或

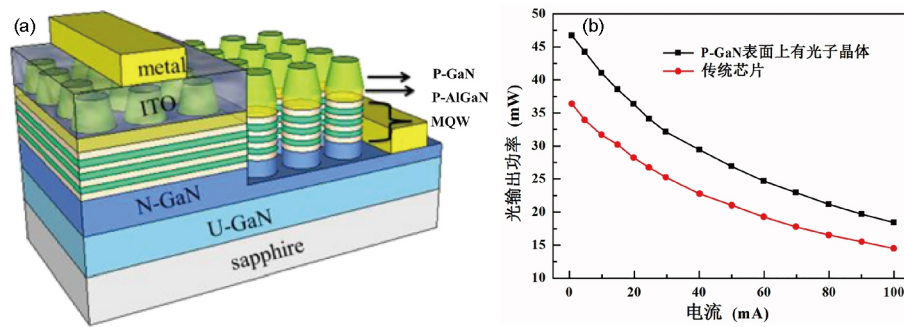


图 21 (网络版彩图)光子晶体及其光效提升效果. (a) 带光子晶体结构的LED芯片示意图; (b) 带/不带光子晶体结构的LED光输出功率^[111]

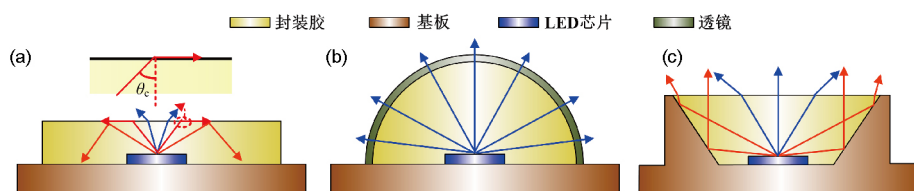


图 22 (网络版彩图)曲面透镜和反光杯的原理示意图. (a) 平面荧光粉胶形貌; (b) 透镜; (c) 反光杯

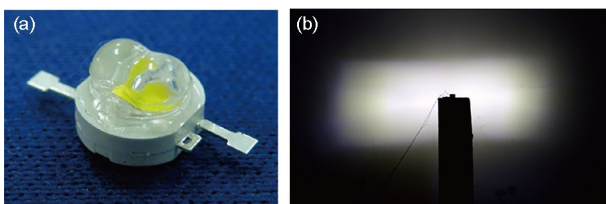


图 23 (网络版彩图)应用导向型LED封装模块及其辐射光斑^[116]. (a) LED封装模块; (b) 辐射光斑

者尺寸较小的封装模块. 随着LED向大功率发展, 阵列LED封装逐渐取代了单芯片模块. 对于阵列LED模块, 由于其尺寸是单芯片模块的数十倍, 且其芯片排布紧密, 因此半球形透镜和反光杯难以应用. 此外由于其尺寸较大, 荧光粉胶的形貌难以控制成曲面形貌, 现有的阵列LED封装模块的荧光粉胶出光面往往表面为平面形状, 这导致了很严重的全反射, 进一步造成光效的衰减. 对于阵列LED封装, 目前主要的改善方法是粗糙化或者图案化封装基板^[121]和荧光粉胶出光面^[112,122]. 图24阐释了图案化封装基板和荧光粉胶出面的工作原理. 图24(a)所示的为传统的阵列LED结构, 临界角之外的光线在模块内反复反射造成严重的光效损失; 图24(b)所示的为图案化封装基板结构, 光线在荧光粉胶出光面被反射至基板后被改变传播方向, 使其再次到达荧光粉胶出光面时角度小于临界角;

图24(c)所示的为图案化荧光粉胶出光面结构, 通过图案化出光面, 使光线到达出光面时与出光面的夹角小于临界角, 从而使光线逸出模块. Wu等人^[122]通过模具压印的方式制备了内凹半球形、内凹圆柱形槽道和内凹V形槽道等图案化荧光粉胶出光面, 实验结果显示表面3种形貌分别可以提高取光效率12.13%, 10.23%和7.44%.

(4) 掺杂高散射性能的微纳米颗粒^[123,124]. 其原理如图25所示, 光子撞击到颗粒时被散射到任意角度, 处于临界角之外的光线原本会发生全反射, 但是经过颗粒散射后光线改变了原来的传播方向, 改变方向后减小了在荧光粉胶-空气界面上的全反射概率, 从而提高了整体的光效. Zheng等人^[123]在涂覆荧光粉胶之前现在基板表面涂覆一层纳米TiO₂涂层, 实验结果表明随着荧光粉浓度从0.12 g/mL变化到0.035 g/mL, 光效提升6%~24%.

(5) 微流体控制实现曲面荧光粉胶出光面. 理论上半球形荧光粉胶出光面是最有利于LED取光的, 但是实际上荧光粉胶在大多数基板上都呈现润湿状态, 接触角在30°左右^[125,126]. 对于小尺寸单芯片LED模块, 荧光粉胶的涂覆量比较小, 因此荧光粉胶铺展实现的最终形貌多为曲率较小的球帽形; 而对于尺寸较大的阵列LED模块, 荧光粉胶涂覆体积和面积较大, 最终形

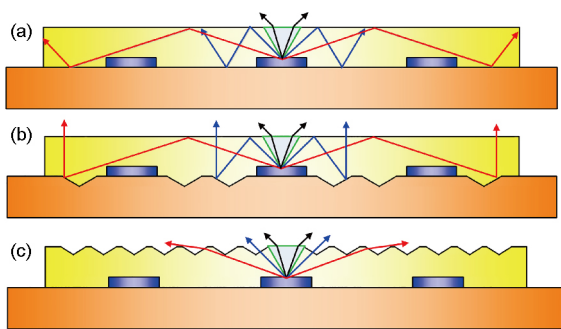


图 24 (网络版彩图)图案化基板和荧光粉胶出光面的原理图。(a)传统结构;(b)图案化封装基板;(c)图案化荧光粉胶出光面

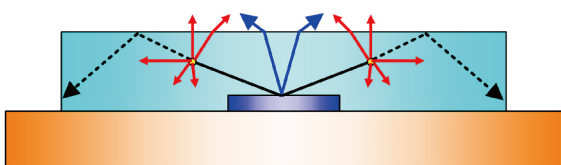


图 25 (网络版彩图)微纳米颗粒提高LED光效的原理示意图

貌往往表面为平面状形貌. 可以通过改变荧光粉胶的流体特性、基板的表面物性和结构来增大荧光粉胶出光面的曲率. 对于单芯片LED模块, Lee等人^[127]对荧光粉颗粒表面进行等离子处理,用处理后的荧光粉颗粒配置而成的荧光粉胶在基板上能实现大于 150° 的接触角; Jang等人^[128]通过在硅基板上涂覆一层疏水涂层改变基板的表面特性,当荧光粉胶的胶体为甘油时,其在基板上能实现 140.5° 的接触角; Huang等人^[129]通过在荧光粉胶中添加纳米Pt颗粒催化硅胶的固化从而获得如图26(a)所示的球状荧光粉层形貌,实验验证相比于图26(b)所示的自然铺展下的荧光粉胶形貌,该形貌将效率提高了20.6%. 对于阵列LED模块, Zhang和Lee^[130]通过在基板上加工微槽来限制封装胶的流动,从而得到和基板之间具有较大接触角的晶圆级荧光粉涂覆方法; Yu等人^[131]通过高温加热使荧光粉胶快速固化得到半圆柱形荧光粉胶形貌,实验结果表明该形貌可以提高光效11.7%.

2.2.2 二次光学设计

单个LED封装模块的功率有限,需要将多个LED封装和散热系统及二次光学系统集成在一起形成大功率LED照明产品. 和一次光学系统一样,光线从单个LED模块发出后经过二次光学系统时同样会被吸

收和全反射,尤其是一些特殊应用场合中对照明的要求较高,如非圆对称光斑形貌、准直照明等,其二次光学系统结构复杂,光线将在二次光学系统内反复反射传播并被吸收,因此必须进行有效的二次光学设计以达到光斑光型控制和高光效的目的. 目前常见的二次光学系统元件主要有反光杯和透镜.

绝大多数反光杯底部口径小于顶部口径,对入射光线起到会聚作用,主要应用于LED手电筒、汽车大灯和探照灯等需要会聚准直光束照明的场合. 如图27所示,准直型反光杯内表面一般为抛物全反射面,其工作原理为:置于抛物反射面焦点的LED光源发出的所有光线入射到反光杯内表面发生全反射从而改变传播方向,通过控制抛物内表面的曲率理论上可以获得完全准直光束. 但是在实际使用过程中,反光杯并不能实现良好的准直照明,主要原因有以下2点: (1) 要想实现所有光线的准直射,必须使得反光杯的口径和高度足够大,实际应用中考虑到成本、体积和重量等因素,需要将反光杯的口径和高度限制在一定的范围内,因此从LED光源中发出的小发散角光束不会入射到反光杯内表面而是将直接出射,使得这部分光仍保持原有的出射方向而没有受到控制,反光杯的高度越低,准直效果越差; (2) 反光杯设计中把LED光源当成一个尺寸忽略不计的点光源,但是实际的LED封装

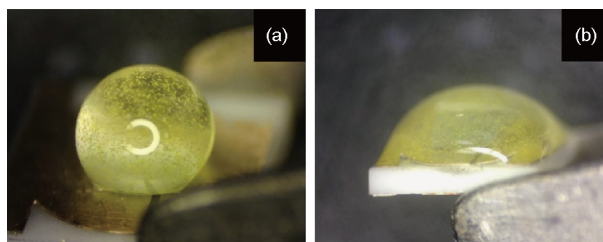


图 26 (网络版彩图)不同荧光粉胶形貌。(a)球状荧光粉层形貌;(b)球帽状荧光粉层形貌^[129]

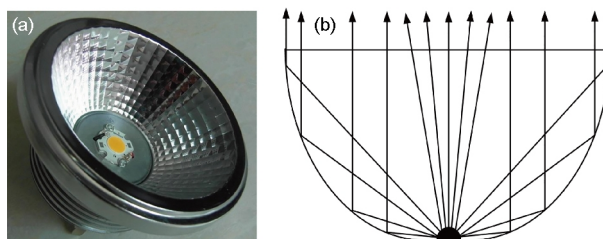


图 27 (网络版彩图)准直型反光杯及其原理。(a)带反光杯的LED模块;(b)反光杯准直原理

模块不能完全忽略其尺寸对光学效果的影响,因此反光杯的准直效果又会有所衰减。

除了应用于准直光束照明中,反光杯也可以被用于发散光束。例如在道路照明中,两灯的间距比较大,因此需要发散型光束实现两灯间距之内的均匀照明,可以采用多个反光杯空间三维组合的方法来实现^[132]。但是这种方法会增大整灯体积和重量,且不利于散热设计。

透镜作为LED照明另一种主要的光型控制手段,不但能产生会聚光束,同时也能产生发散光束,并且可以对LED发出的各个角度的光进行有效控制,设计自由度大,实现方式灵活,因此被广泛应用于LED二次光学设计实现准直照明和光斑光型控制。

在准直照明应用上,市场上最常用的LED二次透镜为内全反射(total internal reflection)透镜,简称为TIR透镜^[133],主要应用于需要光束准直或小出光角度的LED灯具,如射灯、舞台灯、探照灯等。图28所示的为TIR透镜及其准直原理,从LED光源发出的小角度入射光线经过中间自由曲面折射后准直出射,大角度入射光线经过两边内全反射面反射后准直出射。受限于其工作原理,TIR透镜无法实现大角度照明。此外和反光杯一样,存在出射光斑照度分布不均匀的问题,虽然可以通过将透镜出光面雾化来改善照明均匀度,但是该方法效果有限,而且会降低光效,使得TIR透镜效率降低为80%左右。

在光斑光型控制应用上,最常用的是自由曲面透镜,它可以实现对光能的重新分配,具有体积小、效率高、光型准确可控和设计自由度高等优点^[117,118,134,135]。自由曲面是指无法用解析式、不适合用统一的方程式来描述的曲面,因此其设计依赖于复杂先进的算法,目前自由曲面透镜的设计算法主要有剪裁(Tailored)法、SMS法、能量对应算法等。

在进行自由曲面透镜设计时,根据透镜尺寸和LED光源尺寸的相对大小关系,可以分为点光源和扩展光源2种情况。当透镜外表面到光源的距离大于光源尺寸的5倍时,可以认为是点光源情况,当该比例小于5时,则应该认为是扩展光源情况。在点光源情况下,透镜设计时可以忽略光源的真实大小,将发光区域看成无体积大小的点,应用能量对应算法时相对简单;在扩展光源情况下,不能再将光源发光区域看成点发光,因此设计过程相对复杂,对LED光源的布置形式

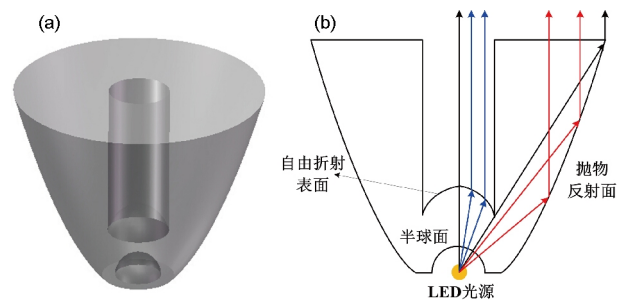


图28 (网络版彩图)TIR透镜。(a)透镜模型;(b)透镜准直原理

也要求较高。

剪裁法是Ries和Muschaweck^[136]于2002年提出的,其基本思路就是根据目标面的照度分布和光源特性建立一个关于光学面形的非线性偏微分方程组,通过解这个微分方程组得到光学曲面。剪裁法的优点是将原本光学曲面的求解过程转换成求解一系列非线性偏微分方程,但应用于任意配光曲线时也有计算求解复杂的缺点,且该算法不能用于扩展光源。

针对于扩展光源,Munon等人^[137]和Benitez等人^[138]于2004年提出多曲面同时设计法(Simultaneous Multiple Surfaces, SMS),其基本思路是,根据LED光源和给定目标平面的光能量空间分布,建立2对输入波前与2对输出波前的能量对应关系,然后设计一个光学系统的2个自由曲面,从而使入射波前通过这2个自由曲面折射或反射后能与出射波前一一对应,达到光型可控的目的。

剪裁法与SMS方法都是基于入射波前与出射波前的耦合关系而来,计算较为繁琐,针对自由曲面透镜,另一种更为实用的方法是能量对应算法,即建立光源能量分布与目标平面能量分布之间的对比关系。该方法的基本思路是:假定从光源出射的光能量都无损耗地入射到目标平面上,也就是光源和目标平面光能量相等;然后将光源的光能量与目标平面的面积划分为多个网格;由边缘光线理论,通过求解能量守恒方程,得到光源光能量与目标平面面积的对应关系,最后由向量形式的折射定律-斯涅耳(Snell)定律,计算获得自由曲面上各个点的坐标,从而得到自由曲面。Wang等人^[139-142]结合反馈优化方法和能量对应算法设计了多种能实现均匀照明和特殊光斑照明的自由曲面透镜。

3 空间颜色均匀性

LED的空间颜色均匀性的本质是空间角度上的发光光谱的均匀性. 对于荧光粉配合LED芯片合成白光LED的封装结构, 荧光粉与硅胶或者树脂等高分子聚合物均匀混合后涂覆在芯片上方, 荧光粉吸收芯片辐射光后激发出不同颜色的光, 激发光与芯片辐射光混合得到白光. LED芯片的初始空间辐射光强分布呈中间强两侧弱的朗伯型分布, 但是经过荧光粉胶层时被荧光粉和胶体的吸收、转化、散射和折射后, 其光强分布也会发生很大的改变. 荧光粉颗粒吸收芯片辐射光后激发出的黄光呈各向同性辐射, 因此激发光的空间光强分布主要取决于荧光粉颗粒的空间位置分布, 由于荧光粉颗粒是弥散在硅胶中的, 因此其颗粒空间位置分布取决于荧光粉胶层位置和形貌. 综上所述, 荧光粉胶的位置和形貌是实现优异的空间颜色均匀性的关键.

实现优异的空间颜色均匀性的关键是让从芯片辐射出的蓝光在荧光粉层中传播相同的光程. 如图29所示为2种能实现优异空间颜色均匀性的荧光粉层形貌. 如图29(a)所示, 荧光粉层为覆盖于芯片上的一层均匀厚度薄膜, 芯片辐射光在较大的辐射角内传播的光程接近, 此外, 荧光粉颗粒的散射作用可以进一步改善LED的空间颜色均匀性. 如图29(b)所示, 当半球形荧光粉胶层的尺寸大于芯片尺寸5倍以上, 那么芯片可以看成点光源, 光线在荧光粉胶层中传播的距离处处相等, 从而取得优异的空间颜色均匀性. 但是在实际LED应用中, 采用上述2种荧光粉层形貌不能确保实现很好的空间颜色均匀性, 主要原因有2个: (1) LED芯片的辐射光是中间强两侧弱的朗伯型光强分布, 即使空间各个方向的荧光粉层厚度相等, 空间各个方向的蓝光强度不等会导致空间各个角度的CCT相差很大, 引起空间颜色的不均匀; (2) 荧光粉胶的价格较贵, 为了降低成本, 荧光粉胶的使用量越少越好, 因此实际封装中不可能使用大量的荧光粉胶来使芯片满足点光源条件. 因此, 实际LED生产中, 要综合考虑LED的生产成本和封装结构等因素设计合理的荧光粉层形貌.

荧光粉胶层的位置和形貌取决于荧光粉胶涂覆工艺, 因此荧光粉胶涂覆工艺一直被视为是LED封装工艺中至关重要的一个工艺过程, 该工艺直接决定了荧光粉层的参数, 进一步决定LED的空间颜色均匀性、

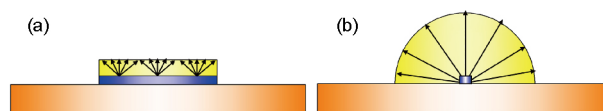


图29 (网络版彩图)两种理想的荧光粉胶层. (a) 均匀薄层形貌; (b) 大尺寸半球形形貌

光效和显色指数等光学性能^[143-148]. 图30所示为典型的自由点胶荧光粉涂覆工艺, 荧光粉和硅胶或者树脂等高分子聚合物混合均匀后抽真空并装入注射器中, 通过机械或者气动点胶设备将荧光粉胶涂覆在LED模块上, 荧光粉胶在重力和表面张力等力的作用下润湿LED芯片和基板, 当荧光粉胶达到稳定形貌后将LED模块放入高温设备中加热使其固化获得稳定的荧光胶层.

图31所示的为目前3种典型的荧光粉胶涂覆方法及其对应的荧光粉胶的位置和形貌: 自由点胶涂覆、保形涂覆、远离涂覆. 从图中可以看出这3种荧光粉涂覆工艺实现的荧光粉层的位置和形貌差别较大, 因此其在空间颜色均匀性和光效等光学性能上的表现也有很大的差别. 接下来具体概述这3种涂覆工艺及其技术发展.

3.1 自由点胶涂覆

自由点胶涂覆是最传统荧光粉胶涂覆方法, 优点是工艺简单和成本低, 因此被工业界广泛应用. 但是该工艺也有着很大的缺陷. 从图30可以看出, 该工艺是基于流体在自然状态下流动铺展成型的, 其形貌受到流体润湿性能的影响而难以对荧光粉形貌进行精确调控, 往往表现为图32(a)所示的曲率较小的球帽状, 这导致两侧的光线在荧光粉胶层传播的光程远大于中间角度, 因此在两侧更大比例的蓝光被转化成黄光, 导致在CCT上体现为两侧黄中间蓝的“黄圈现象”. 此外金线键合和涂覆固化过程发生的的荧光粉沉淀也会造成产品的光色品质差、可重复性差、产品一致性差等问题^[149-153].

为了改善空间颜色均匀性, 可以增加中间角度上荧光粉层的厚度或者减小两侧荧光粉层的厚度来减小中间荧光粉层厚度与两侧的差别. Zheng等人^[154]通过在传统LED基板上增加一个方形凸台结构, 如图32(b)所示, 该凸台尺寸和芯片尺寸相近, 从而减小两侧荧光粉胶的厚度以取得优异的空间颜色均匀性, 其对空

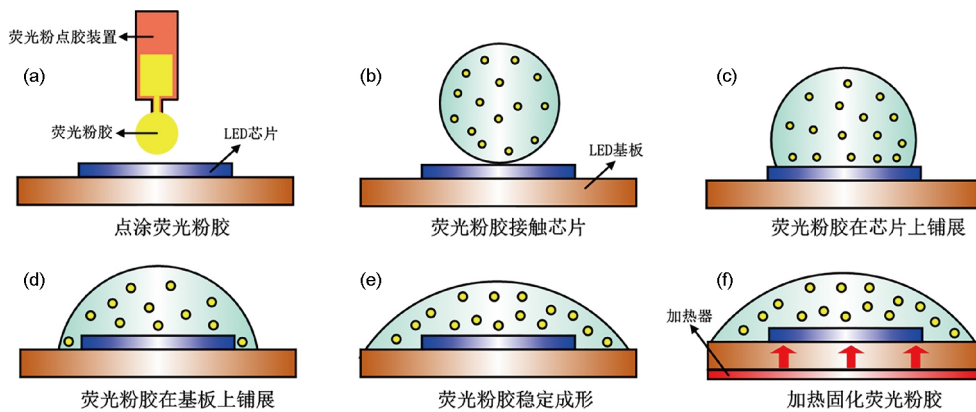


图 30 (网络版彩图)LED 荧光粉点涂工艺过程图

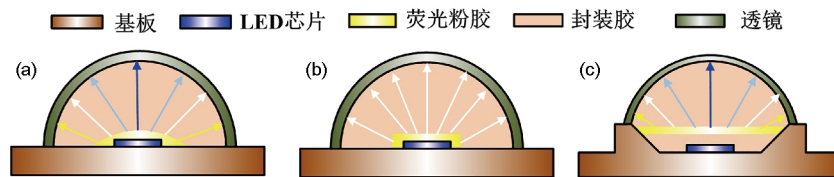


图 31 (网络版彩图)3种典型的荧光粉涂覆方法. (a) 自由点胶涂覆; (b) 保形涂覆; (c) 远离涂覆

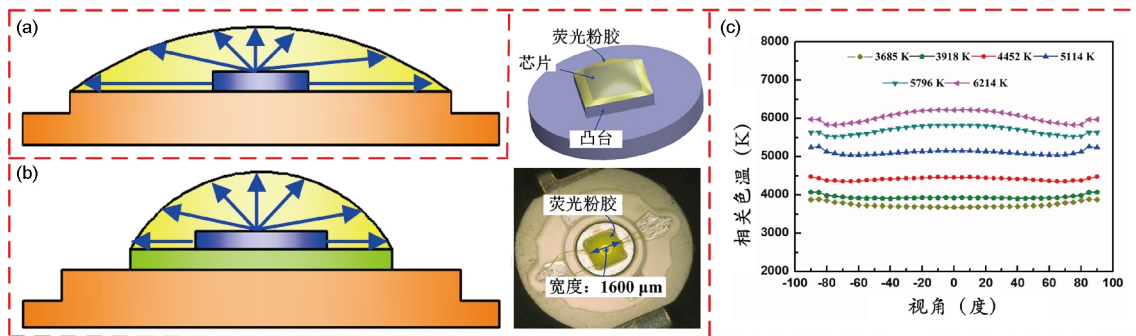


图 32 (网络版彩图)传统基板与改进基板^[154]. (a) 传统基板及其荧光粉胶形貌; (b) 带方形凸台基板及其荧光粉胶层形貌; (c) 带方形凸台基板的荧光粉胶层在不同CCT下的空间颜色均匀性

间颜色均匀性的改进效果如图32(c)所示, 在CCT为4000~6000 K之间实现空间CCT偏差小于200 K. Sun等人^[155]通过将荧光粉胶直接灌注到硅胶透镜中来得到尺寸大于芯片的半球形荧光粉胶层, 他们发现增大半球形荧光粉胶层的半径可以有效地提高LED的空间颜色均匀性, 此外, 他们还指出由于芯片的朗伯型辐射光强分布, 当荧光粉胶层中间厚度大于两侧厚度时可以进一步提高空间颜色均匀性, 在6463 K的CCT下, CCT偏差仅为182 K. 除了通过改变LED模块结构来控制荧光粉胶层形貌, 还可以通过控制荧光粉胶的流动来实现形貌控制. Lei等人^[156]通过静电场驱动硅胶形

貌变化实现了一种中间厚度大于两侧厚度的圆锥形荧光粉胶形貌.

除了改变荧光粉胶的形貌, 也可以通过透镜等光学元件来调控蓝光和黄光在空间角度上的能量分布来实现较佳的空间颜色均匀性. Wang等人^[157]针对自由点胶实现的球帽形荧光粉层形貌, 设计了一种自由曲面透镜来调控蓝光和黄光分布, 结果表明相比于传统的半球形透镜, 所设计的自由曲面透镜将空间颜色均匀性提高了186.5%. Li等人^[158]设计了一种TIR透镜来将LED模块侧面的光反射到中间, 这样就能有效地改善中间颜色偏黄、两侧颜色偏蓝的现象, 结果表明

相比于半球形透镜, 所设计的TIR透镜将空间颜色均匀性提高了84%.

3.2 保形涂覆

保形涂覆为在芯片周围涂覆一层均匀厚度的薄荧光粉层, 该方法最早由Lumileds公司提出来, 他们通过电泳法使带电的荧光粉颗粒沉积在LED芯片上方, 该工艺通过调节电压和沉积时间可以准确地控制荧光粉层的厚度并实现微米级别的精度^[159]. 其他实现保形涂覆的方法有美国的Cree公司的溶液蒸发法^[160], 德国的Osram公司开发出晶圆级旋涂法^[161], Hou等人^[162]和李君飞等人^[163]提出的粉浆法和紫外固化胶实现的芯片级保形涂覆、喷涂法^[164,165]等. 该工艺相对于传统点胶涂覆, 实现的荧光粉胶层在空间角度上的厚度一致性好从而在空间颜色均匀性上有着很好的改善效果. 但是荧光粉层的浓度过高且靠近芯片, 因此有50%~60%芯片辐射光在通过荧光粉胶层时被荧光粉颗粒后向散射回到芯片, 大部分的后向散射光被芯片吸收并转化为热量, 热量的聚集导致芯片温度升高并进一步降低芯片的量子效率. 此外, 该工艺复杂且高度依赖于大型精密设备, 且成本较高; 而且目前的保形涂覆往往只能实现一种均匀的荧光粉层或者特定的封装结构, 缺少不同形貌的荧光粉胶层的调控能力.

为了在降低保形涂覆的工艺成本和复杂度的同时保持其优异的光学性能, 研究者们针对单芯片LED模块和阵列LED模块提出了一些新型保形涂覆实现工艺.

对于单芯片模块. 如图33所示, Zheng等人^[125]通过改变反光杯角度来控制荧光粉层形貌, 通过模拟和实验对反光杯进行了优化并发现当反光杯角度为31°时可以很好地实现荧光粉胶的保形涂覆, 他们还设计了一种基于毛细润湿现象的微通道结构用于实现荧光粉胶的保形涂覆^[166]. 除此Hu等人^[135]结合透镜设计和荧光粉层形貌优化提出了一种用于实现保形荧光粉胶涂覆的新型透镜结构, 并通过模拟验证该新型透镜相比传统透镜能有效地提高LED的空间颜色均匀性.

对于阵列LED模块. 如图34所示, Huang等人^[164]提出了一种脉冲多层喷雾涂覆方法实现了芯片晶圆级保形涂覆和单颗芯片的保形涂覆, 实验结果表明该方法可以控制CCT从2500~9500 K变化并且保证不同CCT下均能实现很好的空间颜色均匀性. Lee等人^[167]

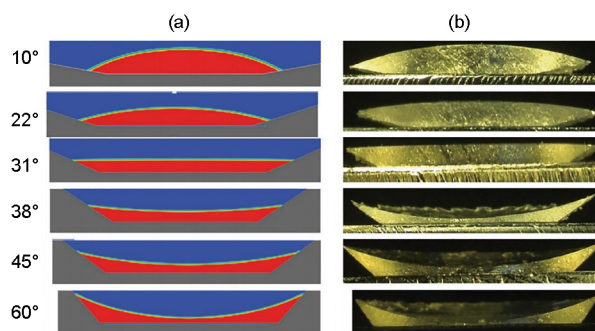


图33 (网络版彩图) 模拟和实验荧光粉层形貌. (a) 模拟形貌; (b) 实验形貌^[125]

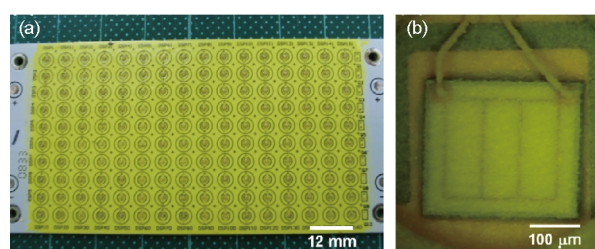


图34 (网络版彩图) 喷雾涂覆工艺结果图. (a) 晶圆级芯片保形涂覆; (b) 单颗芯片保形涂覆^[164]

提出了一种丝网印刷晶圆级保形荧光粉涂覆工艺并将该工艺应用在倒装芯片封装中, 通过刻蚀技术制备出具有方形通孔的印刷模具并将其覆盖在阵列芯片上方, 通过改变模具尺寸来控制荧光粉胶在芯片侧面和上面的厚度来实现不同CCT的调控.

3.3 远离涂覆

远离荧光粉涂覆是在远离芯片的位置涂覆一层荧光粉层, 相对于自由点胶涂覆和保形涂覆, 该方法能减小后向散射导致的光吸收从而提高LED的取光效率, 此外, 荧光粉远离芯片可以减小芯片产热对荧光粉的加热效果, 从而降低荧光粉层的温度并提高光效和光色稳定性^[168,169]. 实现远离涂覆的方法主要有2种: (1) 先在LED芯片上方涂覆一层硅胶或者树脂等高分子透明聚合物并将其固化, 然后将荧光粉胶涂覆在聚合物上方; (2) 是将荧光粉胶做成膜片后和LED模块组装在一起, 膜片的制备工艺除了直接将荧光粉胶旋涂并固化成薄膜, 还有将荧光粉通过喷涂和烧结的方法涂覆在聚合物或者玻璃平板上^[170,171].

虽然目前大多数的远离涂覆工艺实现的荧光粉

层形貌是均匀厚度薄膜,但是由于芯片辐射光不是均匀强度准直光,因此荧光粉颗粒的分布和芯片辐射光强分布的不匹配导致其空间颜色均匀性较差.为了提高远离涂覆的空间颜色均匀性,有的学者提出了半球形等曲面状荧光粉胶层^[30,172].如图35所示, Li等人^[172]通过模具压印的方法实现了均匀厚度的拱桥形、半球形、球帽形和圆锥形等远离荧光粉胶层形貌,实验结果表明,圆锥形荧光粉层形貌能取得最好的光效和空间颜色均匀性.

和自由点胶一样,为了更好地匹配芯片辐射光的朗伯型光强分布,中间厚度大于两侧厚度的荧光粉胶层形貌具有更好的空间颜色均匀性. Cheng等人^[173]提出一种基于透镜润湿的远离荧光粉涂覆工艺来实现均匀厚度和非均匀厚度的荧光粉胶层,其实现原理如图36所示,先将荧光粉胶涂覆在半球形透镜的内凹表面上,荧光粉胶在重力和表面张力的作用下润湿内凹表面,等形貌稳定后将透镜倒置,荧光粉胶在重力的作用下进一步润湿透镜内表面,待形貌稳定后将荧光粉胶层固化,通过改变荧光粉胶的体积可以实现均匀厚度和非均匀厚度的荧光粉胶层,实验证明非均匀厚度的荧光粉胶层比均匀厚度具有更好的LED的空间颜色均匀性. Yu等人^[174]通过分层涂覆纯硅胶和荧光粉胶的方法,通过高温加热使涂覆在硅胶层上方的荧光粉胶迅速固化从而避免了涂覆量过大导致荧光粉溢出的问题,这种方法实现了一种非均匀厚度的半球形远离荧光粉胶形貌,相比于传统自由点胶涂覆,半球形非均匀厚度形貌将光效提升了5%,同时在CCT为4300 K时CCT偏差仅为90 K. Lei等人^[175]提出了一种自调整的远离荧光粉涂覆方法实现非均匀厚度荧光粉

胶层,并证明该方法在提高光效及热可靠性的同时提高了空间颜色均匀性. Wang等人^[171]通过烧结工艺将荧光粉逐层涂覆在玻璃表面,通过逐层减小烧结面积来实现中间厚度更厚的远离荧光粉胶层,实验结果表明该工艺可以提高空间颜色均匀性,当CCT为6000 K时,三层涂覆的CCT偏差为171 K,而单层均匀厚度的CCT偏差为761 K.

除了改变荧光粉胶层的厚度分布,还有一些方法提高远离涂覆的空间颜色均匀性.例如制备粗糙荧光粉胶表面和玻璃粉基板等. Yu等人^[176]通过将具有表面微结构的聚二甲硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)膜片和荧光粉胶薄膜贴合来提高LED的空间颜色均匀性,其实验结果如图37所示,当荧光粉胶薄膜两侧都贴PDMS时,空间颜色均匀性相比传统无微结构的薄膜提高了50%以上.

4 显色指数

显色指数(color rendering index, CRI)表征光源对照明物体颜色的显示能力,与光源发出光的光谱相关.自然光下显示出来的颜色被认为是其真实颜色,通过与太阳光的显示能力对比来表征其他光源的显色指数,因此光谱和自然光的光谱越接近的光源其显色指

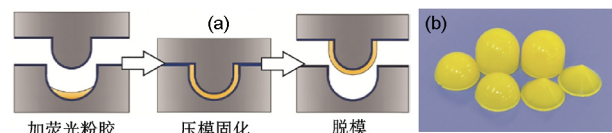


图35 (网络版彩图)曲面远离荧光粉胶形貌制备^[172]. (a) 工艺流程; (b) 不同曲面远离荧光粉层形貌

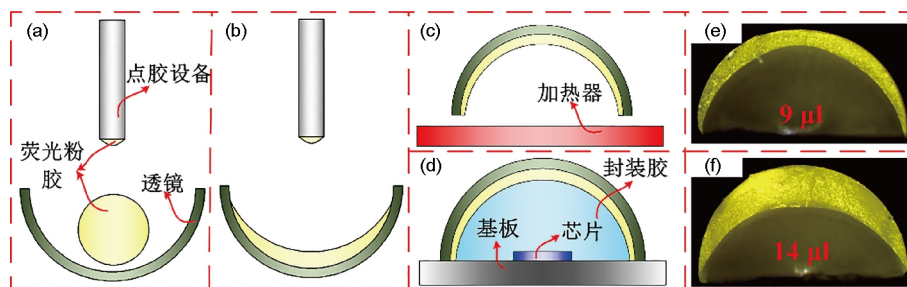


图36 (网络版彩图)基于透镜润湿原理的远离荧光粉涂覆工艺^[173]. (a) 将荧光粉胶涂覆在透镜内表面; (b) 荧光粉胶润湿透镜内表面; (c) 透镜倒置并将荧光粉胶加热固化; (d) 将透镜加盖在LED模块上并灌注封装胶完成LED封装; (e) 均匀厚度远离荧光粉胶形貌; (f) 非均匀厚度远离荧光粉胶形貌

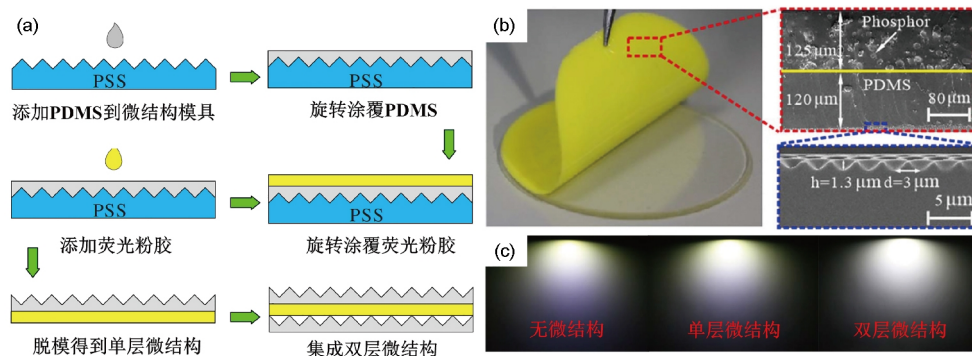


图 37 (网络版彩图)粗糙表面远离荧光粉薄膜制备工艺^[176]。(a) 工艺流程; (b) 表面微结构; (c) 不同结构的颜色空间均匀性

数越高, 其照射下的物体的颜色显示的越真实. 研究表明, 显色指数对人的生理和心理会有影响, 为满足人生活照明的舒适度, 光源的显色指数必须要达到一定的要求.

白光LED的优点之一是其可以通过优化荧光粉配比和封装结构等参数实现包含显色指数在内的各种光学性能的调控. 目前实现白光LED的方法主要有: (1) 荧光粉转换白光LED; (2) 多色LED芯片合成白光; (3) 量子点转换白光LED. 这3种封装方法在显色指数性能和其调控技术上有较大的差异, 接下来分别对这3种技术进行详细介绍.

4.1 荧光粉转换白光LED

荧光粉转换白光LED的封装方法由于其技术简单、成本低和可靠性高等优点被工业界广泛采用. 目前荧光粉转换白光LED主要可以分为2种类型: (1) 蓝光LED芯片结合荧光粉; (2) 紫外LED芯片结合荧光粉.

4.1.1 蓝光LED芯片结合荧光粉

蓝光LED芯片结合单色荧光粉合成白光是目前在工业界中应用最为广泛的封装形式, 这种封装形式技术简单, 成本低, 能取得很高的光效和可靠性. 在单色荧光粉中, YAG:Ce³⁺黄色荧光粉是使用最广泛的, YAG:Ce³⁺荧光粉的量子效率高且其光谱比较宽(100~200 nm), 因此其光效和显色指数相对较高(CRI=60~80)^[177-180], 这相比于荧光灯(CRI=63)和高压钠灯(CRI=20)来说具有一定的优势, 也能适应路灯和聚光灯等应用场合^[26].

但是对于一些高照明要求的场所, 如医用照明和博物馆照明, 往往要求显色指数到达90以上接近自然光的照明品质, 这种情况下, 单色荧光粉LED就不能满

足应用需求了. 为了满足照明需求, 多色荧光粉LED封装被提出并被证明显色指数能提高至90以上^[181]. 在颜色的选择上, 研究表明, 对于单黄色荧光粉LED, 其显色指数低的原因主要是缺乏绿色和红色的光谱段, 因此主光谱为绿色和红色的荧光粉是用于提高LED显色指数的主要荧光粉, 例如红色荧光粉、橙红色荧光粉、绿色荧光粉、黄绿色荧光粉、黄绿橙色荧光粉等. 其中主要的方法有2种: (1) 往YAG:Ce³⁺黄色荧光粉里添加比如红色或橘红色等波长更长的荧光粉^[182,183]; (2) 绿色荧光粉和红色荧光粉混合, 与蓝光芯片组成三基色激发产生白光^[184]. 图38显示了2种配置的光谱, 因为多色荧光粉光谱比单色荧光粉光谱尤其在红色部分要宽的多, 因此多色荧光粉能够实现更高的显色指数.

虽然多色荧光粉LED能有效地提高LED的显色指数, 但是其增加了LED封装难度且流明效率相对单色

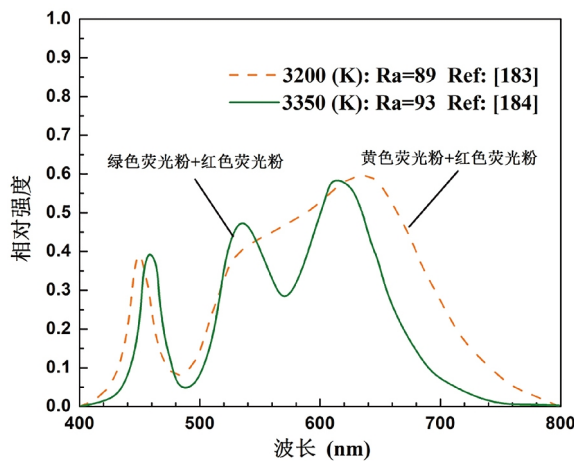


图 38 (网络版彩图)多色荧光粉LED光谱^[183,184]

荧光粉LED低很多. 对于多色荧光粉LED, 荧光粉的材料和配比决定了LED的发光光谱, 这在一定程度上增加了其封装难度. 此外相对黄色荧光粉, 绿色荧光粉和红色荧光粉的量子效率较低, 且绿色波段和红色波段对应的视觉函数系数低, 因此多色荧光粉LED的流明效率也处于一个较低的水平.

为了提高多色荧光粉LED的光效, 一种经济可行的办法是通过成分添加或者替换的方法制备具有红色发射峰的单一相荧光粉. 例如, 在YAG基体中通过将 Gd^{3+} 替代 Y^{3+} [185], Si^{4+} - N^{3-} 替代 Al^{3+} - O^{2-} [186], Mg^{2+} - Si^{4+}/Ge^{4+} 替代 Al^{3+} - Al^{3+} [187,188]来增加YAG:Ce³⁺的红色峰. 另外还有其他不同的成分替代策略, 比如阳离子/阴离子替代和化学单位替代.

除了改善荧光粉的材料与性能外, 改进封装形式也能进一步提高多色荧光粉LED的光效. 传统的多色荧光粉LED封装是直接多种荧光粉均匀混合在硅胶基质中, 然后将其涂覆在LED芯片上, 由于波长更长的荧光粉会对波长较短的荧光粉激发光进行再吸收, 因此合成的白光光效较低. 为了解决这个问题, 有人提出了分层涂覆[189]和分区域涂覆[190,191]的技术, 这样可以降低短波长荧光粉激发光的吸收损失, 从而提高光效. 如图39所示, Peng等人[189]以近紫外LED芯片作为激发光源, 配合RGB三基色荧光粉合成白光, 他们研究了均匀混合和自下而上R-G-B分层涂覆2种封装方式, 结果表明采用R-G-B依次向上分层涂覆可避免再吸收损失, 在保证CCT(均匀涂覆, 3011 K; R-G-B分层涂覆, 2984 K)和显色指数(均匀涂覆, 87.2; R-G-B分层涂覆, 86.8)相近的情况下, R-G-B分层涂覆相比均匀涂覆光效提升了8.2%. Kim等人[190]提出了一个分区域涂覆的方法, 他们将一个圆形薄膜分割成多个扇形区域, 在每一个扇形区域内填充不同颜色的荧光粉颗粒, 这样可以减少光损失从而提高光效, Peng等人[191]进一步研究了不同结构的分区域涂覆技术对光效和空间颜色均匀性等性能的影响.

4.1.2 紫外LED芯片结合荧光粉

基于蓝光芯片结合荧光粉实现的白光LED在各个方向上的发光强度差异较大, 产生眩光现象, 造成光线刺眼等问题, 影响了照明质量. 而且当驱动电流增大时, 热效应导致的能带间隙缩小使得芯片的中心峰值波长发生细微变化, 峰值连线与横坐标不垂直, 发

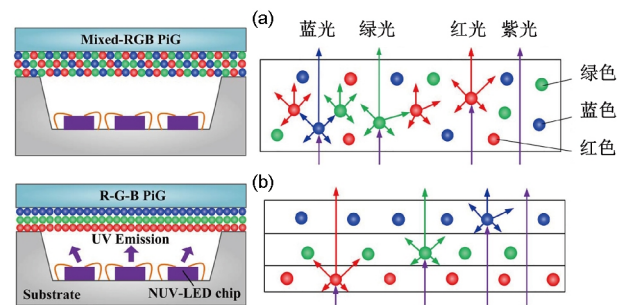


图39 (网络版彩图)RGB荧光粉混合涂覆与分层结构混光原理图. (a) 均匀混合; (b) 自下而上R-G-B分层[189]

生红移现象, 造成白光的颜色发生变化.

为了弥补基于蓝光芯片的白光LED的缺陷, 基于紫外LED芯片实现的白光LED被提出, 通过在紫外芯片上涂覆蓝、绿、红三基色荧光粉来合成白光[192-194]. 紫外(UV)LED是指激发波长主要在200~400 nm之间的LED, 由于在400 nm左右的发光效率最高, 因此, 目前主要利用波长在400 nm左右的近紫外芯片作为激发光源[195]. 利用近紫外激发与荧光粉结合的技术方案可以提高LED照明的显色性, 且颜色稳定[194]. 由于人眼对紫外光不敏感, 所以近紫外LED照明的白光主要是由相匹配的荧光粉所决定的, 荧光粉对紫外光具有散射作用, 有效地扩大了发光角度, 改善了眩光问题. 此外人眼对紫外光不敏感, 驱动电流不会像对蓝光芯片一样对LED色度造成影响[195].

利用紫外三基色法配得白光, 一般需要用多种荧光粉按三基色原理进行配色, 这一体系不仅需要各色荧光粉的物性一致, 同时还需要其激发衰减速率一致, 使LED器件获得持久、稳定的白光. 此外由于不同颜色荧光粉存在吸收、能量损耗、配比调控及老化速率不同等问题, 导致效率和色彩还原性受到较大的影响, 因此研制白光LED用的单一基质多色荧光粉是一种重要趋势. 目前, 已出现了紫外激发单一基质的白色荧光粉应用于LED器件的组装中, 但是性能稳定、效率高的单一基质白色荧光粉仍然有待发展[196]. Yu等人[197]研究了 $SrGa_2S_4$ 掺杂 Ce^{3+} - Na^+ - Pb^{2+} 的荧光粉的发光特性, 他们用360 nm的近紫外光作为激发光源激发 $SrGa_2S_4:Ce, Na, Pb$ 发光, Ce^{3+} 的446和486 nm的蓝光波段加上 Pb^{2+} 的592 nm的宽的橙光波段合成产生白光, 结果表明白光的色调、CCT以及显色指数的调整可以轻易地通过改变Ce/Pb的浓度比例来实现. Fang

等人^[198]提出了一种在紫外光激发下的单一基质荧光粉, 最终的封装产品的Ra, R9均超过95, 此外单一基质荧光粉的发展可以更方便地改善不同CCT和显色指数、提高颜色均匀性。

4.2 多色LED芯片合成白光

2种或3种单色的LED来混合形成白光。通过调控每个LED的驱动电流可以动态地对颜色进行调控。这种方法的优势是具有很好的量子效率, 但缺点也很明显, 多LED芯片合成白光的成本昂贵。利用三基色原理和红、绿、蓝3种LED按比例进行混光而形成白光^[26]。但是目前来说, 由于三基色LED的光输出随温度的升高而显著下降, 且不同颜色的LED光输出下降的程度也有较大差别, 结果造成混合后得到的白光的CCT不稳定, 容易发生改变。三基色LED芯片混光的可靠性也因此受到严重挑战, 制约了三基色LED芯片组装实现白光照明的应用。Sheu等人^[180]提出了三色GaIn基LED, 它发出近紫外、蓝色和绿色的光谱, 并结合红色荧光粉合成形成白光, 该方式形成的白光具有低CCT、高显色指数。这种LED的结构中, 蓝光和绿光单极InGaIn/GaN多量子阱(MQWs)堆积在包含发射近紫外光的InGaIn/GaN多量子阱的p-i-n结构上方, 它们外延生长在一个单独的基板上。三色LED芯片拥有一个垂直的传导结构, 通过晶片键合和激光剥离技术制造在一个硅衬底上。当LED被正向电流驱动时, 近紫外光激发蓝色和绿色InGaIn/GaN多量子阱产生低能量光子。发射光谱的3个峰值分别为405, 468和537 nm。而且, 三色LED芯片结合荧光粉可以混合形成CCT为2900、显色指数Ra为92的白光。

4.3 量子点转换白光LED

近年来, 量子点(quantum dots, QDs)荧光材料的发展为LED器件显色指数的进一步提高带来了新的希望。由于传统荧光粉的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)较宽(50~100 nm)^[199,200], 因此单色荧光粉LED的显色指数难以突破85, 多色荧光粉LED的显色指数难以突破95, 且R9指数较低(60~70)。相比于荧光粉, 量子点的半峰全宽非常窄(25~50 nm)^[201,202], 基于多色量子点转化的LED能够获得Ra>95, R9>95的优良显色性能^[203,204]。因此, 新型量子点白光LED将是下一代半导体照明与显示的重要发展趋势, 市场前景

广阔。

虽然量子点LED具有优异的显色指数性能, 但是目前量子点LED的光效相比荧光粉LED还有很大的差距, 主要的原因以下几方面。

(1) 氧气、湿气可靠性较差: 氧气与湿气会渗透至膜片内的量子点表面, 并与配体或表面原子发生不可逆反应, 造成膜片的光学效果退化。量子点与氧气接触, 在激发光照射下会发生光氧化作用, 引起量子点光降解。因此, 量子点材料如要在LED产业中得到成功应用, 需要将量子点材料与PMMA、硅胶等载体材料复合, 形成量子点-聚合物复合材料, 提高其抗氧热湿的稳定性^[205-207]。

(2) 热可靠性较差: 温度升高将导致量子点表面配体会发生脱落或者失效, 暴露出表面缺陷, 造成可逆或不可逆的荧光效率降低^[208-210]。提高量子点LED热可靠性的主要途径分为2类: 优化量子点复合物的结构, 提升量子点配体的耐热性, 以提高发生荧光猝灭的温度阈值^[211]; 对量子点LED进行合理封装, 降低膜片对于入射光的非辐射吸收, 以减少复合膜片的发热^[212]。

(3) 兼容性问题: 量子点与树脂等高聚物混合的过程中, 量子点配体表面的疏水性有机配体会使聚合物的催化剂失效从而破坏聚合反应^[211]。量子点与基质兼容性的较差会带来许多问题: 量子点团簇、催化剂中毒等^[213-215]。目前解决兼容性的方法主要分为以下几种: 对量子点表面配体进行修饰, 提高兼容性^[216-219]; 对量子点进行表面钝化, 降低量子点表面活性^[220,221]; 将量子点融入高聚物微球, 实现量子点与基质之间的物理分隔^[222,223]。

(4) 封装难题: 由于量子点半峰带宽非常窄, 因此通过单色量子点结合LED芯片很难取得高显色指数, 相反, 单色量子点LED的显色指数还会低于单色荧光粉LED, 这是因为单色量子点LED的发光光谱中缺少很多光谱成分。所以量子点在LED的应用上, 往往通过在LED芯片涂覆多色量子点^[224,225]或者荧光粉和量子点结合^[148,226,227]来实现高显色指数。和多色荧光粉LED一样, 如果简单地将多色量子点均匀混合后应用在LED上, 短波长的量子点辐射光会被长转换波长的量子点再次吸收, 导致量子点的光效较低。因此, 先进的封装技术对于量子点LED有着重大的意义, 例如上文提到的多层^[228,229]和分区域涂覆技术。

5 总结和展望

5.1 总结

随着大功率LED封装模块流明效率的不断提高和制造成本的不断下降, 大功率LED在通用照明与特种照明领域得到了越来越多的应用, 如LED路灯、隧道灯、室内照明灯、基于LED背光的大尺寸电视、LED汽车前照灯等等. 高出光品质是LED封装的最终目标, 为了实现这个目标, 必须解决包含热设计、光学设计和荧光粉涂覆等关键封装技术难点. 这篇综述概述了LED的主要光学品质的调控技术及其研究现状, 主要概括为以下3方面.

(1) 效率的调控. 温度和光吸收是影响LED效率的关键因素. LED芯片和荧光粉的量子效率随着温度的升高而降低, 在LED工作过程中, 约有60%的输入电能被转化成热量, 热量的累积会导致LED芯片结温和荧光粉及其他关键工作模块的温度上升从而降低LED的光效、使用寿命和可靠性. 因此对LED进行有效的热设计是LED封装的关键技术难题. 为了对LED封装模块的散热性能进行合理准确地评估, LED热阻网络模型被建立并成功应用于预测各种LED封装模块的热阻, 本文对热阻网络模型及模型中的扩散热阻、界面热阻和环境热阻的调控技术进行了系统阐述. LED芯片辐射光和荧光粉激发光在经过芯片、荧光粉、封装胶和透镜等封装材料时, 由于封装材料对光的吸收、散射、折射和反射等作用, 导致部分光被封装材料吸收并转化成热量, 因此必须进行合理的光学设计减小光在封装材料中的吸收损失. 本文从一次光学设计和二次光学设计两方面综述了效率的调控技术, 减小光损失的关键是设计合理的光学元件结构, 减小光在界面上的全反射和散射等作用从而减小光在封装材料中的传播距离.

(2) 空间颜色均匀性的调控. 对于目前应用最广泛的荧光粉转化白光LED, 其空间颜色均匀性主要取决于荧光粉涂覆技术, 本文对自由点胶涂覆、保形涂覆和远离涂覆这3种最常见的荧光粉涂覆技术在空间

颜色均匀性的研究现状进行了概述. 针对目前市场上广泛应用的自由点胶涂覆技术的空间颜色均匀性差以及保形涂覆光效低的缺点, 综述了对现有的技术的改进和新型的荧光粉胶涂覆技术.

(3) 显色指数的调控. 显色指数取决于LED模块的发光光谱, 不同的LED辐射光谱和荧光粉激发光谱组成对LED显色指数的影响很大. 本文概述了几种常见的白光LED封装方式的显色指数的调控技术, 包含荧光粉转换白光LED、多色LED芯片合成白光和量子点转换白光LED, 其中量子点转换白光LED在显色指数上显示出了独特的优势.

5.2 展望

LED经过半个世纪的发展, 其封装技术已经相对较为完善, 在工艺设计、散热设计和光学设计上也取得了很多重大的突破. 但是随着LED小型化、集成化和大功率发展, 以及越来越多地应用到不同需求的照明场合, 尤其是一些超大功率或者光色品质要求极高的照明场合, 现有的LED封装技术也需要进一步提高以适应新的应用需求. 以下是作者认为LED封装技术未来的3个发展方向和研究热点: (1) 新型封装工艺开发. 目前针对单芯片或者小体积的LED模块的封装工艺已经比较成熟, 但是LED未来必然朝着多芯片大功率集成化发展, 如晶圆级封装(wafer-level packaging)和直接白光(chip-scale packaging)等封装技术都是LED封装的发展方向. (2) 新型封装材料研究. 新型封装胶、透镜和荧光粉等材料对LED光效的提升和光色品质的改善至关重要, 新型界面材料和新型材料制备的散热器为LED散热性能的提升提供了可能. (3) 高取光效率技术的开发. LED芯片有源层将电能转化成光能量, 但是很大一部分光能量在传播过程中被芯片、荧光粉、封装胶和透镜等吸收, 提高取光效率对LED光热性能的提升至关重要. 不过, 要在以上3点的任何一点取得重大的突破, 都离不开对LED封装过程中的散热设计、光学设计和荧光粉涂覆技术的深入了解.

参考文献

- 1 Luo X B, Hu R, Liu S, et al. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications. *Prog Energ Combust Sci*, 2016, 56: 1–32

- 2 Liu S, Luo X B. LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing, and Testing. Beijing: Chemical Industry Press, 2011
- 3 Holonyak Jr N, Bevacqua S F. Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions. *Appl Phys Lett*, 1962, 1: 82–83
- 4 Dupuis R D, Krames M R. History, development, and applications of high-brightness visible light-emitting diodes. *J Lightwave Technol*, 2008, 26: 1154–1171
- 5 Lee Y J, Lu T C, Kuo H C, et al. High brightness GaN-based light-emitting diodes. *J Display Technol*, 2007, 3: 118–125
- 6 Nakamura S, Mukai T, Senoh M. High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes. *Jpn J Appl Phys*, 1991, 30: L1998–L2001
- 7 Nakamura S, Senoh M, Mukai T. High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 1993, 62: 2390–2392
- 8 熊慰. 大功率LED路灯散热设计与分析. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2009
- 9 Steranka F M, Bhat J, Collins D, et al. High power LEDs-technology status and market applications. *Phys Stat Sol A*, 2002, 194: 380–388
- 10 Wang K, Luo X B, Liu Z, et al. Optical analysis of an 80-W light-emitting-diode street lamp. *Opt Eng*, 2008, 47: 013002
- 11 Jones E D. Light emitting diodes (LEDs) for general illumination. OIDA Report, 2001
- 12 Leung V Y F, Legendijk A, Tukker T W, et al. Interplay between multiple scattering, emission, and absorption of light in the phosphor of a white light-emitting diode. *Opt Express*, 2014, 22: 8190–8204
- 13 余珊. 大功率LED晶圆级封装荧光粉涂覆技术研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012
- 14 Hu N C, Wu C C, Chen S F, et al. Implementing dynamic daylight spectra with light-emitting diodes. *Appl Opt*, 2008, 47: 3423–3432
- 15 Uchida Y, Taguchi T. Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes. *Opt Eng*, 2005, 44: 124003
- 16 Hu R, Yu S, Zou Y, et al. Near-/mid-field effect of color mixing for single phosphor-converted light-emitting diode package. *IEEE Photonic Tech L*, 2013, 25: 246–249
- 17 Guo Z Q, Shih T M, Lu Y J, et al. Studies of scotopic/photopic ratios for color-tunable white light-emitting diodes. *IEEE Photon J*, 2013, 5: 8200409
- 18 Wang Z, Li P, Guo Q, et al. Solid-state synthesis and luminescent properties of yellow-emitting phosphor NaY(MoO₄)₂:Dy³⁺ for white light-emitting diodes. *Luminescence*, 2015, 30: 842–846
- 19 Min X, Fang M H, Huang Z H, et al. Synthesis and optical properties of Pr³⁺-doped LaMgAl₁₁O₁₉—A novel blue converting yellow phosphor for white light emitting diodes. *Ceramics Int*, 2015, 41: 4238–4242
- 20 Dong L M, Zhao J T, Li Q, et al. Sr_{2-x}Ba_xTiO₄:Eu³⁺, Gd³⁺: A novel blue converting yellow-emitting phosphor for white light-emitting diodes. *J Nanomater*, 2015, 2015: 1–5
- 21 McCamy C S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Res Appl*, 1992, 17: 142–144
- 22 Zhang J J, Hu R, Xie B, et al. Energy-saving light source spectrum optimization by considering object's reflectance. *IEEE Photon J*, 2017, 9: 1–11
- 23 Zhang J J, Hu R, Yu X J, et al. Spectral optimization based simultaneously on color-rendering index and color quality scale for white LED illumination. *Opt Laser Tech*, 2017, 88: 161–165
- 24 Zheng H, Luo X B. Color consistency enhancement of white light-emitting diodes through substrate design. *IEEE Photonic Tech L*, 2013, 25: 484–487
- 25 Hu R, Luo X B, Liu S. Study on the optical properties of conformal coating light-emitting diode by Monte Carlo simulation. *IEEE Photonic Tech L*, 2011, 23: 1673–1675
- 26 Ohno Y. Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra. In: Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting, International Society for Optics and Photonics, 2004. 88–98
- 27 Bardsley N, Bland S, Hansen M, et al. Solid-state lighting R&D plan. DOE SSL Program, US Dep Energy, 2015
- 28 Titkov I E, Karpov S Y, Yadav A, et al. Temperature-dependent internal quantum efficiency of blue high-brightness light-emitting diodes. *IEEE J Quantum Electron*, 2014, 50: 911–920
- 29 Ryu G H, Ryu H Y. Analysis of the temperature dependence of phosphor conversion efficiency in white light-emitting diodes. *J Opt Soc Korea*, 2015, 19: 311–316
- 30 Liu Z Y, Liu S, Wang K, et al. Optical analysis of color distribution in white LEDs with various packaging methods. *IEEE Photonic Tech L*, 2008, 20: 2027–2029
- 31 Sommer C, Krenn J R, Hartmann P, et al. The effect of the phosphor particle sizes on the angular homogeneity of phosphor-converted high-power white LED light sources. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2009, 15: 1181–1188
- 32 余兴建, 郑怀, 李岚, 等. 大功率LED荧光粉胶涂覆流动铺展的实验研究. *工程热物理学报*, 2015, 5: 1096–1100
- 33 Liu Z Y, Liu S, Wang K, et al. Studies on optical consistency of white LEDs affected by phosphor thickness and concentration using optical

- simulation. *IEEE Trans Compon Pack Technol*, 2010, 33: 680–687
- 34 Shuai Y, He Y Z, Tran N T, et al. Angular CCT uniformity of phosphor converted white LEDs: Effects of phosphor materials and packaging structures. *IEEE Photonic Tech L*, 2011, 23: 137–139
- 35 Park J H, Lee J W, Kim D Y, et al. Variation of the external quantum efficiency with temperature and current density in red, blue, and deep ultraviolet light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2016, 119: 023101
- 36 Prajoon P, Nirmal D, Menokey M A, et al. Temperature-dependent efficiency droop analysis of InGa_N MQW light-emitting diode with modified ABC model. *J Comput Electron*, 2016, 15: 1511–1520
- 37 Chen Y, Cheah K W, Gong M L. Low temperature quenching and high efficiency Tm³⁺, La³⁺ or Tb³⁺ co-doped CaSc₂O₄:Ce³⁺ phosphors for light-emitting diodes. *J Lumin*, 2011, 131: 1770–1775
- 38 付星. LED封装中结温和荧光粉自发热研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2014
- 39 Chen Q, Ma Y P, Yu X J, et al. Phosphor temperature overestimation in high-power light-emitting diode by thermocouple. *IEEE Trans Electron Devices*, 2017, 64: 463–466
- 40 Fu X, Luo X B. Can thermocouple measure surface temperature of light emitting diode module accurately? *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 65: 199–202
- 41 Luo X B, Fu X, Chen F, et al. Phosphor self-heating in phosphor converted light emitting diode packaging. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 58: 276–281
- 42 Luo X B, Hu R. Calculation of the phosphor heat generation in phosphor-converted light-emitting diodes. *Int J Heat Mass Transfer*, 2014, 75: 213–217
- 43 Hu R, Luo X B, Zheng H. Hotspot location shift in the high-power phosphor-converted white light-emitting diode packages. *Jpn J Appl Phys*, 2012, 51: 09MK05
- 44 Ma Y P, Hu R, Yu X J, et al. A modified bidirectional thermal resistance model for junction and phosphor temperature estimation in phosphor-converted light-emitting diodes. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 106: 1–6
- 45 胡润. LED封装中荧光粉光热耦合研究及工艺应用. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2015
- 46 陈全. 大功率LED结温测试及其在封装热管理中的应用研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012
- 47 Juntunen E, Tapaninen O, Sitomaniemi A, et al. Effect of phosphor encapsulant on the thermal resistance of a high-power COB LED module. *IEEE Trans Compon Pack Manufact Technol*, 2013, 3: 1148–1154
- 48 Chung T, Chiou S C, Chang Y Y, et al. Study of temperature distribution within pc-WLEDs using the remote-dome phosphor package. *IEEE Photon J*, 2015, 7: 1–11
- 49 Hu R, Du Z Z, Cheng T, et al. Noninvasively probing the light-emitting diode temperature by magnetic nanoparticles. *J Appl Phys*, 2015, 118: 124501
- 50 Luo X B, Cheng T, Xiong W, et al. Thermal analysis of an 80 W light-emitting diode street lamp. *IET Optoelectron*, 2007, 1: 191–196
- 51 Huang W, Ghosh S, Velusamy S, et al. HotSpot: A compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design. *IEEE Trans VLSI Syst*, 2006, 14: 501–513
- 52 Luo X B, Mao Z, Yang J, et al. Engineering method for predicting junction temperatures of high-power light-emitting diodes. *IET Optoelectron*, 2012, 6: 230–236
- 53 Weng C J. Advanced thermal enhancement and management of LED packages. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2009, 36: 245–248
- 54 Kennedy D P. Spreading resistance in cylindrical semiconductor devices. *J Appl Phys*, 1960, 31: 1490–1497
- 55 Kadambi V, Abuaf N. An analysis of the thermal response of power chip packages. *IEEE Trans Electron Dev*, 1985, 32: 1024–1033
- 56 Krane M J M. Constriction resistance in rectangular bodies. *J Electron Packag*, 1991, 113: 392–396
- 57 Muzychka Y S, Yovanovich M M, Culham J R. Influence of geometry and edge cooling on thermal spreading resistance. *J Thermophys Heat Tr*, 2006, 20: 247–255
- 58 Muzychka Y S, Bagnall K R, Wang E N. Thermal spreading resistance and heat source temperature in compound orthotropic systems with interfacial resistance. *IEEE Trans Compon Pack Manufact Technol*, 2013, 3: 1826–1841
- 59 Yang C T, Liu W C, Liu C Y. Measurement of thermal resistance of first-level Cu substrate used in high-power multi-chips LED package. *Microwelectron Reliab*, 2012, 52: 855–860
- 60 Yang K S, Chung C H, Tu C W, et al. Thermal spreading resistance characteristics of a high power light emitting diode module. *Appl Therm Eng*, 2014, 70: 361–368
- 61 Cheng T, Luo X B, Huang S Y, et al. Thermal analysis and optimization of multiple LED packaging based on a general analytical solution. *Int J Thermal Sci*, 2010, 49: 196–201

- 62 Prasher R S. Surface chemistry and characteristics based model for the thermal contact resistance of fluidic interstitial thermal interface materials. *J Heat Transfer*, 2001, 123: 969–975
- 63 Hamasaiid A, Dour G, Loulou T, et al. A predictive model for the evolution of the thermal conductance at the casting-die interfaces in high pressure die casting. *Int J Therm Sci*, 2010, 49: 365–372
- 64 Hamasaiid A, Dargusch M S, Loulou T, et al. A predictive model for the thermal contact resistance at liquid-solid interfaces: Analytical developments and validation. *Int J Therm Sci*, 2011, 50: 1445–1459
- 65 Yuan C, Duan B, Li L, et al. An improved model for predicting thermal contact resistance at liquid-solid interface. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 80: 398–406
- 66 Shahil K M F, Balandin A A. Graphene-multilayer graphene nanocomposites as highly efficient thermal interface materials. *Nano Lett*, 2012, 12: 861–867
- 67 Biercuk M J, Llaguno M C, Radosavljevic M, et al. Carbon nanotube composites for thermal management. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 2767–2769
- 68 Feng B, Faruque F, Bao P, et al. Double-sided tin nanowire arrays for advanced thermal interface materials. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 093105
- 69 Hasselman D P H, Johnson L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance. *J Compos Mater*, 1987, 21: 508–515
- 70 Felske J D. Effective thermal conductivity of composite spheres in a continuous medium with contact resistance. *Int J Heat Mass Transf*, 2004, 47: 3453–3461
- 71 Davis L C, Artz B E. Thermal conductivity of metal-matrix composites. *J Appl Phys*, 1995, 77: 4954–4960
- 72 Prasher R S, Shipley J, Prstic S, et al. Thermal resistance of particle laden polymeric thermal interface materials. In: ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2003. 431–439
- 73 Singhal V, Siegmund T, Garimella S V. Optimization of thermal interface materials for electronics cooling applications. *IEEE Trans Compon Pack Technol*, 2004, 27: 244–252
- 74 Yung K C, Liem H. Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing. *J Appl Polym Sci*, 2007, 106: 3587–3591
- 75 Xu Y S, Chung D D L. Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments. *Compos Interf*, 2000, 7: 243–256
- 76 Tian X, Itkis M E, Bekyarova E B, et al. Anisotropic thermal and electrical properties of thin thermal interface layers of graphite nanoplatelet-based composites. *Sci Rep*, 2013, 3: 1710
- 77 Yuan C, Li L, Duan B, et al. Locally reinforced polymer-based composites for efficient heat dissipation of local heat source. *Int J Therm Sci*, 2016, 102: 202–209
- 78 Yuan C, Xie B, Huang M, et al. Thermal conductivity enhancement of platelets aligned composites with volume fraction from 10% to 20%. *Int J Heat Mass Transf*, 2016, 94: 20–28
- 79 Yuan C, Duan B, Li L, et al. Thermal conductivity of polymer-based composites with magnetic aligned hexagonal boron nitride platelets. *ACS Appl Mater Interface*, 2015, 7: 13000–13006
- 80 Luo X B, Xiong W, Cheng T, et al. Design and optimization of horizontally-located plate fin heat sink for high power LED street lamps. In: IEEE 59th Electronic Components and Technology Conference. San Diego, 2009. 854–859
- 81 Yang K, Chen Y Q, Lin B, et al. Thermal design based on thermosyphon heat sink of high-power LED street light. In: International Conference on Electronics and Optoelectronics. Dalian, 2011. 374–377
- 82 Lu X Y, Hua T C, Wang Y P. Thermal analysis of high power LED package with heat pipe heat sink. *Microelectron J*, 2011, 42: 1257–1262
- 83 Li J, Lin F, Wang D M, et al. A loop-heat-pipe heat sink with parallel condensers for high-power integrated LED chips. *Appl Therm Eng*, 2013, 56: 18–26
- 84 Luo Y, Liu G, Zou L L, et al. Experimental investigation of microheat pipes for high-power light-emitting diode modules. *Micro Nano Lett IET*, 2013, 8: 646–649
- 85 Lin Z R, Wang S F, Huo J P, et al. Heat transfer characteristics and LED heat sink application of aluminum plate oscillating heat pipes. *Appl Therm Eng*, 2011, 31: 2221–2229
- 86 Fu X, Mao Z M, Luo X B. System packaging of thousands watt high power LEDs with heat pipe-fin air cooling system: Design and manufacturing. In: IEEE 14th International Conference on Electronic Packaging Technology. Dalian, 2013. 1146–1149
- 87 Morgan V T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. *Adv Heat Transf*, 1975, 11: 199–264
- 88 Moores K A, Joshi Y K. Effect of tip clearance on the thermal and hydrodynamic performance of a shrouded pin fin array. *J Heat Transf*, 2003, 125: 999–1006

- 89 Short B E, Raad P E, Price D C. Performance of pin fin cast aluminum coldwalls, part 2: Colburn j-factor correlations. *J Thermophys Heat Tr*, 2002, 16: 397–403
- 90 Qu W L, Mala G M, Li D Q. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels. *Int J Heat Mass Transf*, 2000, 43: 353–364
- 91 Ghiaasiaan S M, Laker T S. Turbulent forced convection in microtubes. *Int J Heat Mass Transf*, 2001, 44: 2777–2782
- 92 Peng X F, Peterson G P. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures. *Int J Heat Mass Transf*, 1996, 39: 2599–2608
- 93 Kandlikar S G, Grande W J. evaluation of single phase flow in microchannels for high heat flux chip cooling—Thermohydraulic performance enhancement and fabrication technology. *Heat Transfer Eng*, 2004, 25: 5–16
- 94 Luo X B, Liu Y L, Liu W. A honeycomb microchannel cooling system for microelectronics cooling. *Heat Transfer Eng*, 2011, 32: 616–623
- 95 胡润, 朱晓磊, 郭庭辉, 等. 小型平板蒸汽腔的实验研究. *工程热物理学报*, 2011, 32: 637–640
- 96 Luo X B, Mao Z M. Thermal modeling and design for microchannel cold plate with high temperature uniformity subjected to multiple heat sources. *Int Commun Heat Mass*, 2012, 39: 781–785
- 97 Yuan L L, Liu S, Chen M X, et al. Thermal analysis of high power LED array packaging with microChannel cooler. In: *IEEE 7th International Conference on Electronics Packaging Technology*. Shanghai, 2006. 6–10
- 98 毛章明. 树形分叉微通道均温散热器的紧凑热模型及其验证. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012
- 99 Husain A, Kim S M, Kim J H, et al. Thermal performance analysis and optimization of microjet cooling of high-power light-emitting diodes. *J Thermophys Heat Transf*, 2013, 27: 235–245
- 100 Ramezanpour A, Shirvani H, Mirzaee I. A numerical study on the heat transfer characteristics of two-dimensional inclined impinging jet. In: *IEEE 5th Electronics Packaging Technology Conference*. Singapore, 2003. 626–632
- 101 Luo X B, Chen W, Sun R X, et al. Experimental and numerical investigation of a microjet-based cooling system for high power LEDs. *Heat Transf Eng*, 2008, 29: 774–781
- 102 Liu S, Yang J H, Gan Z Y, et al. Structural optimization of a microjet based cooling system for high power LEDs. *Int J Therm Sci*, 2008, 47: 1086–1095
- 103 Luo X B, Liu S. A microjet array cooling system for thermal management of high-brightness LEDs. *IEEE Trans Adv Packag*, 2007, 30: 475–484
- 104 Kim H, Choi K K, Kim K K, et al. Light-extraction enhancement of vertical-injection GaN-based light-emitting diodes fabricated with highly integrated surface textures. *Opt Lett*, 2008, 33: 1273–1275
- 105 Fujii T, Gao Y, Sharma R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 855–857
- 106 Tsai M A, Yu P, Chiu C H, et al. Self-assembled two-dimensional surface structures for beam shaping of GaN-based vertical-injection light-emitting diodes. *IEEE Photonic Tech L*, 2010, 22: 12–14
- 107 Lee C E, Lee Y C, Kuo H C, et al. High-brightness inGaN-GaN flip-chip light-emitting diodes with triple-light scattering layers. *IEEE Photonic Tech L*, 2008, 20: 659–661
- 108 Lee Y J, Hwang J M, Hsu T C, et al. Enhancing the output power of GaN-based LEDs grown on wet-etched patterned sapphire substrates. *IEEE Photonic Tech L*, 2006, 18: 1152–1154
- 109 Cho H K, Jang J, Choi J H, et al. Light extraction enhancement from nano-imprinted photonic crystal GaN-based blue light-emitting diodes. *Opt Express*, 2006, 14: 8654–8660
- 110 Lee J, Ahn S, Kim S, et al. GaN light-emitting diode with monolithically integrated photonic crystals and angled sidewall deflectors for efficient surface emission. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 101105
- 111 Lai F I, Yang J F. Enhancement of light output power of GaN-based light-emitting diodes with photonic quasi-crystal patterned on p-GaN surface and n-side sidewall roughing. *Nanoscale Res Lett*, 2013, 8: 244
- 112 Kim S M, Baek J H, Hwang N, et al. Efficiency enhancement of white light-emitting diodes via nano-textured silicone encapsulant. *J Nanosci Nanotechnol*, 2013, 13: 7112–7115
- 113 Narendran N, Gu Y, Freyssonier J P, et al. Solid-state lighting: Failure analysis of white LEDs. *J Cryst Growth*, 2004, 268: 449–456
- 114 Bahadur M, Norris A W, Zarisfi A, et al. Silicone materials for LED packaging. In: *6th International Conference on Solid State Lighting*. San Diego, 2006. 63370F
- 115 Norris A W, Bahadur M, Yoshitake M. Novel silicone materials for LED packaging. In: *5th International Conference on Solid State Lighting*. San Diego, 2005. 594115
- 116 Wang K, Chen F, Liu Z, et al. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging. *Opt Express*, 2010, 18: 413–425

- 117 Xie B, Hu R, Chen Q, et al. Design of a brightness-enhancement-film-adaptive freeform lens to enhance overall performance in direct-lit light-emitting diode backlighting. *Appl Opt*, 2015, 54: 5542–5548
- 118 Hu R, Gan Z Q, Luo X B, et al. Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses. *Optik-Int J Light Electron Optics*, 2013, 124: 3895–3897
- 119 Chen F, Wang K, Qin Z, et al. Design method of high-efficient LED headlamp lens. *Opt Express*, 2010, 18: 20926–20938
- 120 Chen F, Liu S, Wang K, et al. Free-form lenses for high illumination quality light-emitting diode MR16 lamps. *Opt Eng*, 2009, 48: 123002
- 121 Li Z T, Wang Q H, Tang Y, et al. Light extraction improvement for LED COB devices by introducing a patterned leadframe substrate configuration. *IEEE Trans Electron Dev*, 2013, 60: 1397–1403
- 122 Wu D, Wang K, Liu S. Enhancement of light extraction efficiency of multi-chips light-emitting diode array packaging with various microstructure arrays. In: IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference. Lake Buena Vista, 2011. 242–245
- 123 Zheng H, Li L, Lei X, et al. Optical performance enhancement for chip-on-board packaging LEDs by adding TiO₂/silicone encapsulation layer. *IEEE Electr Device L*, 2014, 35: 1046–1048
- 124 Liang R, Wu F, Wang S, et al. Enhanced optical and thermal performance of eutectic flip-chip ultraviolet light-emitting diodes via AlN-doped-silicone encapsulant. *IEEE Trans Electron Dev*, 2017, 64: 467–471
- 125 Zheng H, Ma J L, Luo X B. Conformal phosphor distribution for white lighting emitting diode packaging by conventional dispensing coating method with structure control. *IEEE Trans Compon Pack Manufact Technol*, 2013, 3: 417–421
- 126 Yu X J, Shang B F, Xie B, et al. Spreading behaviors of silicone droplet impact on flat solid surface: Experiments and VOF simulations. In: 16th International Conference on Electronic Packaging Technology. Changsha, 2015. 1058–1061
- 127 Lee K H, Cho S C, Jo S Y, et al. Hydrophobic coating of Y₂O₃:Eu phosphors by using hmso/toluene plasma at low pressure and their wettability. *J Korean Phys Soc*, 2008, 53: 631
- 128 Jang D I, Jo J O, Ko R, et al. Plasma-mediated hydrophobic coating on a silicate-based yellow phosphor for the enhancement of durability. *Korean Chem Eng Res*, 2013, 51: 214–220
- 129 Huang K C, Huang Y R, Ting S Y, et al. Facile fabrication of spherical silicone encapsulant with Pt nanoparticles for applications as white light-emitting diode. *Mater Lett*, 2014, 134: 244–247
- 130 Zhang R, Lee S W R. Moldless encapsulation for LED wafer level packaging using integrated DRIE trenches. *Microelectron Reliab*, 2012, 52: 922–932
- 131 Yu X J, Xie B, Shang B F, et al. A cylindrical tuber encapsulant geometry for enhancing optical performance of chip-on-board packaging light-emitting diodes. *IEEE Photon J*, 2016, 8: 1–9
- 132 Wang K, Liu S. A sensor integrated ultra-long span LED street lamp system. In: 8th International Conference on Electronics Packaging Technology. Shanghai, 2007. 1–3
- 133 Zhen Y K, Jia Z N, Zhang W Z. The optimal design of TIR lens for improving LED illumination uniformity and efficiency. In: Conference on Optical Design and Testing III. Beijing, 2007. 68342K
- 134 Hu R, Luo X B. Adding an extra condition: A general method to design double freeform-surface lens for LED uniform illumination. *J Solid State Light*, 2014, 1: 3
- 135 Hu R, Luo X B, Zheng H, et al. Design of a novel freeform lens for LED uniform illumination and conformal phosphor coating. *Opt Express*, 2012, 20: 13727
- 136 Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19: 590–595
- 137 Munoz F, Benitez P, Dross O, et al. Simultaneous multiple surface design of compact air-gap collimators for light-emitting diodes. *Opt Eng*, 2004, 43: 1522–1530
- 138 Benitez P, Min J C, Dross O, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions. *Opt Eng*, 2004, 43: 1489–1502
- 139 Wang K, Wu D, Qin Z, et al. New reversing design method for LED uniform illumination. *Opt Express*, 2011, 19: A830–A840
- 140 王恺. 大功率LED封装与应用的自由曲面光学研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2011
- 141 Wang K, Liu S, Chen F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination. *J Opt A-Pure Appl Opt*, 2009, 11: 105501
- 142 Wang K, Liu S, Chen, F, et al. Novel application-specific LED packaging with compact freeform lens. In: 59th IEEE Electronic Components & Technology Conference. San Diego, 2009. 2125–2130
- 143 Sommer C, Reil F, Krenn J R, et al. The impact of inhomogeneities in the phosphor distribution on the device performance of phosphor-converted high-power white LED light sources. *J Lightwave Technol*, 2010, 28: 3226–3232
- 144 Hu R, Cao B, Zou Y, et al. Modeling the light extraction efficiency of bi-layer phosphors in white LEDs. *IEEE Photonic Tech L*, 2013, 25: 1141–1144

- 145 Hu R, Zheng H, Hu J, et al. Comprehensive study on the transmitted and reflected light through the phosphor layer in light-emitting diode packages. *J Display Technol*, 2013, 9: 447–452
- 146 Hu R, Fu X, Zou Y, et al. A complementary study to “Toward scatter-free phosphors in white phosphor-converted light-emitting diodes:” comment. *Opt Express*, 2013, 21: 5071–5073
- 147 Hu R, Luo X. A model for calculating the bidirectional scattering properties of phosphor layer in white light-emitting diodes. *J Lightwave Technol*, 2012, 30: 3376–3380
- 148 王依蔓. 大功率LED用荧光粉胶中颗粒沉淀现象理论和实验研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2014
- 149 Wu B L, Zheng H, Fu X, et al. Effect of gold wire bonding on optical performance of high power light-emitting diode packaging. *J Ceram Process Res*, 2012, 13: s351–s354
- 150 Wu B L, Luo X B, Zheng H, et al. Effect of gold wire bonding process on angular correlated color temperature uniformity of white light-emitting diode. *Opt Express*, 2011, 19: 24115–24121
- 151 Hu R, Wang Y, Zou Y, et al. Study on phosphor sedimentation effect in white light-emitting diode packages by modeling multi-layer phosphors with the modified Kubelka-Munk theory. *J Appl Phys*, 2013, 113: 063108
- 152 Wang Y M, Zheng H, Hu R, et al. Modeling on phosphor sedimentation phenomenon during curing process of high power LED packaging. *J Solid State Light*, 2014, 1: 2
- 153 Hu R, Luo X B, Feng H, et al. Effect of phosphor settling on the optical performance of phosphor-converted white light-emitting diode. *J Lumin*, 2012, 132: 1252–1256
- 154 Zheng H, Wang Y M, Li L, et al. Dip-transfer phosphor coating on designed substrate structure for high angular color uniformity of white light emitting diodes with conventional chips. *Opt Express*, 2013, 21: A933–A941
- 155 Sun C C, Chen C Y, Chen C C, et al. High uniformity in angular correlated-color-temperature distribution of white LEDs from 2800 K to 6500 K. *Opt Express*, 2012, 20: 6622–6630
- 156 Lei X, Zheng H, Guo X, et al. Enhancing angular color uniformity of white light-emitting diodes by cone-type phosphor layer geometry. In: 16th International Conference on Electronic Packaging Technology. Changsha, 2015. 884–887
- 157 Wang K, Wu D, Chen F, et al. Angular color uniformity enhancement of white light-emitting diodes integrated with freeform lenses. *Opt Lett*, 2010, 35: 1860–1862
- 158 Li S M, Chen F, Wang K, et al. Design of a compact modified total internal reflection lens for high angular color uniformity. *Appl Opt*, 2012, 51: 8557–8562
- 159 Collins III W D, Krames M R, Verhoeckx G J, et al. Using electrophoresis to produce a conformally coated phosphor-converted light emitting semiconductor. US patent, 6576488, 2003-06-10
- 160 Loh B P, Medendorp Jr N W, Andrews P, et al. Method of uniform phosphor chip coating and LED package fabricated using method. US Patent, 7943952, 2011-05-17
- 161 Braune B, Petersen K, Strauss J, et al. A new wafer level coating technique to reduce the color distribution of LEDs. In: Conference on Light-Emitting Diodes-Research, Manufacturing, and Applications X. San Jose, 2007. 64860X
- 162 Hou B, Rao H B, Li J F. Methods of increasing luminous efficiency of phosphor-converted LED realized by conformal phosphor coating. *J Display Technol*, 2009, 5: 57–60
- 163 李君飞, 饶海波, 侯斌, 等. 提高基于粉浆法的功率型白光LEDs发光效率的研究. *半导体学报*, 2008, 29: 984–987
- 164 Huang H T, Tsai C C, Huang Y P. Conformal phosphor coating using pulsed spray to reduce color deviation of white LEDs. *Opt Express*, 2010, 18: A201–A206
- 165 Li Z T, Tang Y, Liu Z Y, et al. Detailed study on pulse-sprayed conformal phosphor configurations for LEDs. *J Display Technol*, 2013, 9: 433–440
- 166 Zheng H, Luo X B, Hu R, et al. Conformal phosphor coating using capillary microchannel for controlling color deviation of phosphor-converted white light-emitting diodes. *Opt Express*, 2012, 20: 5092
- 167 Lee K H, Lee S W R. Process development for yellow phosphor coating on blue light emitting diodes (LEDs) for white light illumination. In: 8th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore, 2006. 379–384
- 168 周青超, 柏泽龙, 鲁路, 等. 白光LED远程荧光粉技术研究进展与展望. *中国光学*, 2015, 8: 313–328
- 169 Lin M T, Ying S P, Lin M Y, et al. Ring remote phosphor structure for phosphor-converted white LEDs. *IEEE Photonic Tech L*, 2010, 22: 574–576
- 170 Chen H C, Chen K J, Lin C C, et al. Improvement of lumen efficiency in white light-emitting diodes with air-gap embedded package. *Microelectron Reliab*, 2012, 52: 933–936

- 171 Wang S M, Chen X, Chen M X, et al. Improvement in angular color uniformity of white light-emitting diodes using screen-printed multilayer phosphor-in-glass. *Appl Opt*, 2014, 53: 8492–8498
- 172 Li J S, Li Z T, Li Z, et al. Improvement in optical performance and color uniformity by optimizing the remote phosphor caps geometry for chip-on-board light emitting diodes. *Solid State Electron*, 2016, 126: 36–45
- 173 Cheng T, Yu X J, Ma Y P, et al. Angular color uniformity enhancement of white LEDs by lens wetting phosphor coating. *IEEE Photonic Tech L*, 2016, 28: 1589–1592
- 174 Yu X J, Xie B, Chen Q, et al. Thermal remote phosphor coating for phosphor-converted white-light-emitting diodes. *IEEE Trans Compon Packag Manufact Technol*, 2015, 5: 1253–1257
- 175 Lei Q L, Rao H B, Wang X M, et al. Self-adaptive structure of remote phosphor for phosphor-converted white LEDs. *J Display Technol*, 2014, 10: 1042–1046
- 176 Yu S D, Li Z T, Liang G W, et al. Angular color uniformity enhancement of white light-emitting diodes by remote micro-patterned phosphor film. *Photon Res*, 2016, 4: 140–145
- 177 Mueller-Mach R, Mueller G O, Krames M R, et al. High-power phosphor-converted light-emitting diodes based on III-Nitrides. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2002, 8: 339–345
- 178 Chen L Y, Chang J K, Cheng W C, et al. Chromaticity tailorable glass-based phosphor-converted white light-emitting diodes with high color rendering index. *Opt Express*, 2015, 23: A1024–A1029
- 179 Tsai C C. Color rendering index thermal stability improvement of glass-based phosphor-converted white light-emitting diodes for solid-state lighting. *Int J PhotoEnerg*, 2014, 2014: 1–6
- 180 Sheu J K, Chen F B, Wang Y C, et al. Warm-white light-emitting diode with high color rendering index fabricated by combining trichromatic InGaN emitter with single red phosphor. *Opt Express*, 2015, 23: A232
- 181 Wu H, Zhang X, Guo C, et al. Three-band white light from InGaN-based blue LED chip precoated with Green/red phosphors. *IEEE Photonic Tech L*, 2005, 17: 1160–1162
- 182 Chou H Y, Yang T H. Effective method for improving illuminating properties of white-light LEDs. In: *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications IX*. Bellingham, 2005, 5739: 486–491
- 183 Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, et al. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *J Display Technol*, 2007, 3: 160–175
- 184 Summers C J, Wagner B K, Menkara H. Solid state lighting: Diode phosphors. In: *SPIE 5187, Third International Conference on Solid State Lighting*. San Diego, 2004. 123–132
- 185 Li K, Gan S C, Hong G Y, et al. Relationship between crystal structure and luminescence properties of $(Y_{0.96-x}Ln_xCe_{0.04})_3Al_5O_{12}$ (Ln=Gd, La, Lu) Phosphors. *J Rare Earths*, 2007, 25: 692–696
- 186 Setlur A A, Heward W J, Hannah M E, et al. Incorporation of $Si^{4+}-N^{3-}$ into Ce^{3+} -doped garnets for warm white LED phosphors. *Chem Mater*, 2008, 20: 6277–6283
- 187 Katelnikovas A, Bareika T, Vitta P, et al. $Y_{3-x}Mg_xAlSi_2O_{12}:Ce_x^{(3+)}$ phosphors-prospective for warm-white light emitting diodes. *Opt Mater*, 2010, 32: 1261–1265
- 188 Shang M M, Fan J, Lian H Z, et al. A double substitution of $Mg^{2+}-Si^{4+}/Ge^{4+}$ for $Al_{(1)}^{3+}-Al_{(2)}^{3+}$ in Ce^{3+} -doped garnet phosphor for white LEDs. *Inorg Chem*, 2014, 53: 7748–7755
- 189 Peng Y, Wang S M, Li R X, et al. Luminous efficacy enhancement of ultraviolet-excited white light-emitting diodes through multilayered phosphor-in-glass. *Appl Opt*, 2016, 55: 4933
- 190 Kim E, Unithrattil S, Sohn I S, et al. Facile one-step fabrication of 2-layered and 4-quadrant type phosphor-in-glass plates for white LEDs: An insight into angle dependent luminescence. *Opt Mater Express*, 2016, 6: 804–814
- 191 Peng Y, Li R X, Cheng H, et al. Facile preparation of patterned phosphor-in-glass with excellent luminous properties through screen-printing for high-power white light-emitting diodes. *J Alloys Compd*, 2017, 693: 279–284
- 192 Nayama S, Itoh K. Case study on combination of fluorescent materials for white LED to obtain high color rendering indexes. *J Light Vis Env*, 2006, 30: 39–42
- 193 Kobashi K, Taguchi T. Warm white LEDs lighting over $Ra=95$ and its applications. In: *Conference on Light-Emitting Diodes-Research, Manufacturing, and Applications XI*. San Jose, 2007. 648610
- 194 Deressa G, Park K W, Jeong H S, et al. Spectral broadening of blue $(Sr, Ba)_3(PO_4)_2Cl:Eu^{2+}$ phosphors by changing Ba^{2+}/Sr^{2+} composition ratio for high color rendering index. *J Lumin*, 2015, 161: 347–351
- 195 Sheu J K, Chang S J, Kuo C H, et al. White-light emission from near UV InGaN-GaN LED chip precoated with blue/green/red phosphors. *IEEE*

- [Photonic Tech L](#), 2003, 15: 18–20
- 196 Yang W J, Luo L, Chen T M, et al. Luminescence and energy transfer of Eu-and Mn-Coactivated $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ as a potential phosphor for white-light UVLED. [Chem Mater](#), 2005, 17: 3883–3888
- 197 Yu R, Wang J, Zhang J, et al. A single-phase white-emitting $\text{SrGa}_2\text{S}_4\text{:Ce, Na, Pb}$ phosphor with tailored color temperature and color rendering index. [J Electrochem Soc](#), 2011, 158: J86–J89
- 198 Fang M H, Ni C, Zhang X, et al. Enhance color rendering index via full spectrum employing the important key of cyan phosphor. [ACS Appl Mater Interface](#), 2016, 8: 30677–30682
- 199 Wang X J, Zhou G H, Zhang H L, et al. Luminescent properties of yellowish orange $\text{Y}_3\text{Al}_{5-x}\text{Si}_x\text{O}_{12-x}\text{N}_x\text{:Ce}$ phosphors and their applications in warm white light-emitting diodes. [J Alloys Compd](#), 2012, 519: 149–155
- 200 Cho J, Kim H, Sone C, et al. Study of UV excited white light-emitting diodes for optimization of luminous efficiency and color rendering index. [Phys Stat Sol-R](#), 2009, 3: 34–36
- 201 Cho K S, Lee E K, Joo W J, et al. High-performance crosslinked colloidal quantum-dot light-emitting diodes. [Nat Photon](#), 2009, 3: 341–345
- 202 Zhang Y, Xie C, Su H P, et al. Employing heavy metal-free colloidal quantum dots in solution-processed white light-emitting diodes. [Nano Lett](#), 2011, 11: 329–332
- 203 Zhong P, He G X, Zhang M H. Optimal spectra of white light-emitting diodes using quantum dot nanophosphors. [Opt Express](#), 2012, 20: 9122–9134
- 204 Erdem T, Nizamoglu S, Sun X W, et al. A photometric investigation of ultra-efficient LEDs with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores. [Opt Express](#), 2010, 18: 340–347
- 205 Jang E, Jun S, Jang H, et al. White-light-emitting diodes with quantum dot color converters for display backlights. [Adv Mater](#), 2010, 22: 3076–3080
- 206 Yang Y, Shi H Q, Li W N, et al. Tunable photo-luminescent properties of novel transparent CdSe-QD/silicone nanocomposites. [Compos Sci Technol](#), 2011, 71: 1652–1658
- 207 Mutlugun E, Hernandez-Martinez P L, Eroglu C, et al. Large-area (over $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$) freestanding films of colloidal InP/ZnS quantum Dots. [Nano Lett](#), 2012, 12: 3986–3993
- 208 Zhao Y, Riemersma C, Pietra F, et al. High-temperature luminescence quenching of colloidal quantum dots. [ACS Nano](#), 2012, 6: 9058–9067
- 209 Chatterjee S, Mukherjee T K. Thermal luminescence quenching of amine-functionalized silicon quantum dots: A pH and wavelength-dependent study. [Phys Chem Chem Phys](#), 2015, 17: 24078–24085
- 210 Woo J Y, Kim K N, Jeong S, et al. Thermal behavior of a quantum dot nanocomposite as a color converting material and its application to white LED. [Nanotechnology](#), 2010, 21: 495704
- 211 Kim H, Jang H S, Kwon B H, et al. *In situ* synthesis of thiol-capped $\text{CuInS}_2\text{-ZnS}$ quantum dots embedded in silica powder by sequential ligand-exchange and silanization. [Electrochem Solid St](#), 2011, 15: K16–K18
- 212 Erdem T, Nizamoglu S, Demir H V. Computational study of power conversion and luminous efficiency performance for semiconductor quantum dot nanophosphors on light-emitting diodes. [Opt Express](#), 2012, 20: 3275–3295
- 213 Qu H, Cao L X, Su G, et al. Effect of inorganic shells on luminescence properties of ZnS:Ag nanoparticles. [J Mater Sci](#), 2013, 48: 4952–4961
- 214 Reitingner N, Hohenau A, Köstler S, et al. Radiationless energy transfer in CdSe/ZnS quantum dot aggregates embedded in PMMA. [Phys Stat Sol A](#), 2011, 208: 710–714
- 215 Wang X B, Li W W, Sun K. Stable efficient CdSe/CdS/ZnS core/multi-shell nanophosphors fabricated through a phosphine-free route for white light-emitting-diodes with high color rendering properties. [J Mater Chem](#), 2011, 21: 8558–8565
- 216 Murakoshi K, Hosokawa H, Saito M, et al. Control of surface coverage and solubility of thiophenolate-capped CdS nanocrystallites. [J Colloid Interf Sci](#), 1998, 203: 225–228
- 217 Tamborra M, Striccoli M, Comparelli R, et al. Optical properties of hybrid composites based on highly luminescent CdS nanocrystals in polymer. [Nanotechnology](#), 2004, 15: S240–S244
- 218 Erskine L L, Emrick T, Alivisatos A P, et al. Preparations of semiconductor nanocrystal-polystyrene hybrid materials. [Am Chem Soc](#), 2000, 219: U413
- 219 Zhang H, Cui Z C, Wang Y, et al. From water-soluble CdTe nanocrystals to fluorescent nanocrystal-polymer transparent composites using polymerizable surfactants. [Adv Mater](#), 2003, 15: 777–780
- 220 Ziegler J, Xu S, Kucur E, et al. Silica-coated InP/ZnS nanocrystals as converter material in white LEDs. [Adv Mater](#), 2008, 20: 4068–4073
- 221 Zhao B X, Yao Y L, Gao M Y, et al. Doped quantum dot@silica nanocomposites for white light-emitting diodes. [Nanoscale](#), 2015, 7: 17231–17236

- 222 Han M Y, Gao X H, Su J Z, et al. Quantum-dot-tagged microbeads for multiplexed optical coding of biomolecules. *Nat Biotechnol*, 2001, 19: 631–635
- 223 Chen W, Wang K, Hao J J, et al. Highly efficient and stable luminescence from microbeads integrated with cd-free quantum dots for white-light-emitting diodes. *Part Part Syst Char*, 2015, 32: 922–927
- 224 Chen H S, Hsu C K, Hong H Y. InGaN-CdSe-ZnSe quantum dots white LEDs. *IEEE Photonic Tech L*, 2006, 18: 193–195
- 225 Xie B, Hu R, Luo X B. Quantum dots-converted light-emitting diodes packaging for lighting and display: Status and perspectives. *J Electron Packag*, 2016, 138: 020803
- 226 Shen C Y, Chu J L, Qian F, et al. High color rendering index white LED based on nano-YAG:Ce³⁺ phosphor hybrid with CdSe/CdS/ZnS core/shell/shell quantum dots. *J Modern Optics*, 2012, 59: 1199–1203
- 227 Wang R, Zhang J, Xu X, et al. White LED with high color rendering index based on Ca₈Mg(SiO₄)₄Cl₂:Eu²⁺ and ZnCdTe/CdSe quantum dot hybrid phosphor. *Mater Lett*, 2012, 84: 24–26
- 228 Xie B, Chen W, Hao J J, et al. Structural optimization for remote white light-emitting diodes with quantum dots and phosphor: Packaging sequence matters. *Opt Express*, 2016, 24: A1560
- 229 Xie B, Hu R, Yu X J, et al. Effect of packaging method on performance of light-emitting diodes with quantum dot phosphor. *IEEE Photonic Tech L*, 2016, 28: 1115–1118

LED packaging for high light quality: Status and perspectives

YU XingJian, SHU WeiCheng, HU Run, XIE Bin & LUO XiaoBing

School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Light-emitting diode (LED) is regarded as the green lighting source in 21st century due to its advantages of high efficiency, energy saving, environmental protection and compact size, etc. With the popularization and application of LED in more and more lighting occasions and the improvement of people's requirement for the quality of light source, more and more attention has been paid to the light quality of LED. The main indexes for evaluating the light quality of LED are the efficiency, angular color uniformity (ACU) and color rendering index (CRI), which are closely related to LED packaging. LED packaging is a process of assembling the chip and other packaging materials together to form the final lighting products, it plays a key role in mechanical protection, external signals and electrical connections, heat dissipation and light quality control. This paper makes a systematic exposition of the control technology of efficiency, ACU and CRI from the view of LED packaging, mainly involves three key packaging technologies: 1) thermal management. For LED products, about 60% of the input electrical power is converted to heat, therefore, the failure of the effectively heat dissipation would cause sharply increase of the temperature, which leads to the decrease of efficiency and induces reliability problems. 2) Optical design. The LED light is generate by the electron-hole recombination from the active layer of the chip, then it across the chip, phosphor layer, encapsulant layer, lens and other packaging materials. Due to scattering, refraction and absorption of the packaging materials, the light propagation direction and path would be changed, and part of the light is absorbed and converted into heat. Therefore, the optical design not only can control the LED light energy distribution, but also can reduce the light absorption in the packaging materials to improve the efficiency. 3) Phosphor coating. Compared to the multi-color LED chips packaging method, coating the monochromatic or polychromatic fluorescent powder on the LED chip to achieve white light is more popular and widely applied in the LED industrial due to its correlated color temperature (CCT) adjustability and process flexibility. For the phosphor-converted white LED, the phosphor coating plays a key role in deciding the ACU and CRI.

LED packaging, thermal management, optical design, phosphor coating

doi: 10.1360/N092017-00061