

— LED热管理丛书 —

+

LED

热管理及散热 技术应用

李月锋 邹 军 主编

上海科学技术出版社

LED 热管理丛书

LED 热管理及散热技术应用

李月锋 邹 军 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

《LED热管理及散热技术应用》基于传热学基本原理,结合国内外LED热管理最新技术,辅以LED应用中散热技术的工程应用,全面系统地阐述了LED封装、模组和系统各应用体系热管理的基本知识、实用散热技术及工艺。全书共11章,层次分明,基本涵盖了传热基本知识、LED热管理基本知识、LED芯片和封装热管理、LED衬底和基板热管理、LED热界面材料、LED灯具散热设计、先进散热技术、实验热测试方法、数值热模拟及热设计等基础知识和工程解决方案。本书对基础理论阐述通俗易懂,同时将企业生产实践中的工艺流程、案例设计、检测报告等一手资料展示给读者,针对性强,具有很高的参考价值。此外,书中附有大量插图和数据表格,许多表格是各生产企业、供应商及客户的最新产品及性能指标,具有很强的工程指导性。同时,重点章节还有详细的例题解答,供读者练习巩固。

《LED热管理及散热技术应用》不仅对LED装置设计的工程技术人员有极大的帮助,还可作为高等院校、职业院校相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

LED热管理及散热技术应用 / 李月锋,邹军主编. —
上海:上海科学技术出版社,2018.9

(LED热管理丛书)

ISBN 978-7-5478-4109-9

I. ①L… II. ①李… ②邹… III. ①发光二极管—温度控制—研究 IV. ①TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第157669号

LED热管理及散热技术应用

李月锋 邹军 主编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.25

字数 350千字

2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4109-9/TK·20

定价:58.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,请向工厂联系调换

编委会

主 编 李月锋 邹 军

副主编 郑 浩 杨子杰 苏维波 李文博 李 妍

委 员 杨互助 李 杨 居家奇 钱幸璐

顾 问 俞安琪 陈大华 张 东 宋贤杰

前 言

LED 作为第四代照明光源,具有安全可靠性强、耗电量少、稳定性好、发光效率高、响应时间短、颜色可变、适用性强、绿色环保等优点,被广泛应用于背光照明、通信、显示、医疗设备、汽车照明及通用照明灯领域。随着 LED 技术的不断创新,LED 的应用领域及形式不断扩展,逐渐渗透到人们生活的方方面面,引起全球照明领域的变革。

经过近几年的调整,2017 年国内外 LED 市场景气度回升,LED 行业无论是技术工艺还是产品设计,乃至整个行业规模,都朝着一个可喜的方向发展。全球 LED 行业市场规模为 6 480.74 亿美元,同比增长 13.42%,LED 照明渗透率达到 36.7%。国内市场总体规模为 6 368 亿元,同比增长 21%。中国逐渐成为 LED 主要生产市场和消费市场,成为全球 LED 行业的重要组成部分。

LED 的蓬勃发展需要不断突破影响 LED 行业发展的技术瓶颈,散热技术就是需要解决的问题之一。LED 芯片的光电转换效率较低,会产生大量热量。在 LED 灯具及工程应用中,由于热界面材料及结构的不完善,积累的热量会更多。这将导致 LED 芯片温度升高,严重影响了 LED 的光学效果,造成系统的不可靠性及使用寿命的降低。随着人们追求高功效、高密度、轻便化、集成化的 LED 应用,热效应对 LED 的影响会越来越严重。

针对 LED 散热问题,国内外学者分别对 LED 材料、结构、工艺及系统等各层次进行了大量的优化设计。因此,本书在传热学基础上,系统地讲述了 LED 芯片、封装、基板、热界面材料、大功率散热器、灯具及工程应用、热性能测试及热模拟设计,力争将最先进的散热技术有效地推广应用到 LED 热流通道各环节中,最大限度地降低热阻,实现有效控制 LED 结温。

本书的构思及撰写是整个团队集体努力的结果。李月锋参与了各章节的撰写及整理工作,邹军参与了芯片、封装和荧光粉相关章节的编写。嘉善恒杰热管科技有限公司的郑浩技术总监参与了本书整体结构的制定,杨子杰总经理参与了第 9 章内容的编写,苏维波经理提供了散热器生产工艺方面的资料,李妍经理参与了文字校对工作,研究生钱幸璐参与了部分文字的整理工作,杨互助经理提供了 LED 灯具实验测量的资料。

特别感谢浙江嘉熙科技有限公司李居强博士提供的 PCI 资料,以及国内外专家学者和 LED 器件制造商、经销商。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2018 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 半导体照明技术的进展	3
1.2 热效应对 LED 的影响	6
1.2.1 温度对大功率 LED 光电性能的影响(参数失效)	6
1.2.2 温度引起大功率 LED 的失效(灾难性失效)	10
1.3 热管理的作用、目的及思路	12
第 2 章 传热学基本知识	14
2.1 热传导	14
2.2 对流换热	15
2.3 热辐射	17
2.4 界面热阻	18
2.5 扩散热阻	19
2.6 散热器	20
2.6.1 肋片	20
2.6.2 散热器的散热特性	22
第 3 章 LED 热管理基本知识	23
3.1 LED 工作原理	23
3.1.1 LED 发光原理	23
3.1.2 LED 系统及构成	26
3.1.3 LED 发光效率	29
3.1.4 LED 主要参数与特性	33
3.2 LED 发热原因及 LED 温升特性	38
3.2.1 LED 芯片及封装热量产生原因	38

3.2.2	LED 芯片温升特点	39
3.3	LED 器件热阻网络	40
3.3.1	LED 热系统结构	40
3.3.2	LED 串并联热阻	41
3.3.3	LED 结温计算方法	42
3.3.4	LED 热阻的几点说明	42
第 4 章 LED 芯片热管理		44
4.1	GaN 基正装 LED 芯片热阻基本构成	44
4.2	GaN 基正装 LED 芯片制约因素	45
4.3	LED 芯片提高发光效率及热管理方案	47
4.4	LED 芯片常见芯片尺寸、材质及规格	57
第 5 章 LED 封装热管理		61
5.1	LED 封装工艺	61
5.2	LED 封装热阻模型	66
5.3	LED 封装热阻的影响因素分析	70
5.3.1	固晶层	70
5.3.2	支架	76
5.3.3	扩散热阻	85
5.3.4	荧光粉及封装方法	87
5.4	LED 封装热阻计算实例	92
5.5	LED 封装主要厂商、类型及特色	97
第 6 章 热界面材料		113
6.1	材料导热微观机理	113
6.1.1	金属导热机理	113
6.1.2	无机非金属导热	114
6.1.3	聚合物高分子导热	115
6.2	热界面材料分类	116
6.3	有机热界面材料	117
6.3.1	本征型热界面材料	117
6.3.2	填充型热界面材料	119

6.3.3	常见 LED 有机热界面材料	135
6.4	无机热界面材料	139
6.4.1	钎料基础知识	139
6.4.2	典型无铅钎料	139
6.4.3	焊膏	143
6.5	热界面材料涂覆工艺	144
6.6	热界面材料热阻模型	151
6.7	热界面材料生产厂商及产品简介	153
第 7 章 LED 基板热管理		159
7.1	基板类型	159
7.2	印刷电路板基板	160
7.3	金属芯印刷电路板基板	162
7.4	陶瓷基板	164
7.5	挠性印刷电路板基板	168
7.6	基板热阻模型	169
7.7	基板生产厂商及产品简介	171
第 8 章 LED 灯具散热设计		174
8.1	LED 灯具特征及应用	174
8.1.1	LED 灯具介绍	174
8.1.2	LED 灯具应用	176
8.2	LED 灯具常用传热和散热方式	183
8.2.1	传热和散热基本概念	183
8.2.2	LED 强化传热方法	185
8.2.3	LED 常用散热方法	187
8.2.4	LED 灯具散热器热辐射应用技术	195
8.3	LED 电源热管理	198
8.3.1	LED 驱动电源的分类	198
8.3.2	LED 驱动电源的热损耗	200
8.3.3	LED 驱动电源热管理方案	201
8.4	LED 灯具热设计的基本方法及实例	201
8.4.1	LED 灯具热阻模型	201

8.4.2	LED 灯具热管理方法	206
8.4.3	LED 灯具散热器热分析与热设计	207

第 9 章 先进散热技术 214

9.1	热柱	214
9.1.1	热柱工作原理	214
9.1.2	热柱种类	215
9.1.3	铜热柱材料	215
9.1.4	热柱制造工艺	217
9.1.5	热柱的应用	219
9.2	相变抑制(PCI)传热技术	220
9.2.1	PCI 传热技术概述	220
9.2.2	PCI 传热技术优点	221
9.2.3	PCI 传热技术应用	221
9.3	合成喷射式散热技术	221
9.3.1	工作原理	221
9.3.2	技术优点	223
9.3.3	在 LED 灯具散热中的应用	223
9.4	液态金属散热	225
9.4.1	液态金属的基本性质	225
9.4.2	液态金属传热性质	225
9.4.3	液态金属传热在 LED 灯具散热中的应用	226
9.5	离子风散热技术	226
9.5.1	离子风散热基本原理	226
9.5.2	离子风散热特点	227
9.5.3	离子风散热器应用	228

第 10 章 LED 灯具热测试方法 229

10.1	热测试概况	229
10.1.1	测试标准及测量参数	229
10.1.2	测试常见方法	230
10.2	LED 灯具热测试常用仪器	231
10.2.1	温度传感器	231

10.2.2	红外热成像仪	237
10.2.3	热阻测试仪	240
第 11 章	LED 热管理的数值计算	245
11.1	数值计算概况	245
11.1.1	数值解法基本思路	245
11.1.2	计算区域离散化	245
11.1.3	计算时间离散化	246
11.1.4	控制方程离散方法	246
11.1.5	有限差分基本思路	247
11.2	控制方程离散化	248
11.2.1	控制体内节点方程	248
11.2.2	控制体边界节点方程	250
11.3	节点离散方程组求解	253
11.4	常用 LED 照明热仿真软件	254
11.4.1	计算流体力学软件	254
11.4.2	工程流体力学软件	255
11.4.3	专业电子散热软件	257
11.4.4	专用散热器计算软件	258
	参考文献	259

第 1 章

绪 论

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种可以将电能转化为光能的半导体器件。芯片是 LED 的核心部分,不同材料的芯片可以发出红、橙、黄、绿、蓝、紫等不同颜色的光。

LED 产业链可以分成上游、中游、下游三类,如图 1-1 所示。上游为单芯片及其外延、芯片加工,中游为 LED 封装测试,下游为应用。其中,上游和中游技术含量较高,资本投入密度大。从上游到下游,产品在外观上差距相当大。LED 发光颜色与亮度由磊晶材料决定,且磊晶占 LED 制造成本 70%左右,对 LED 产业极为重要。

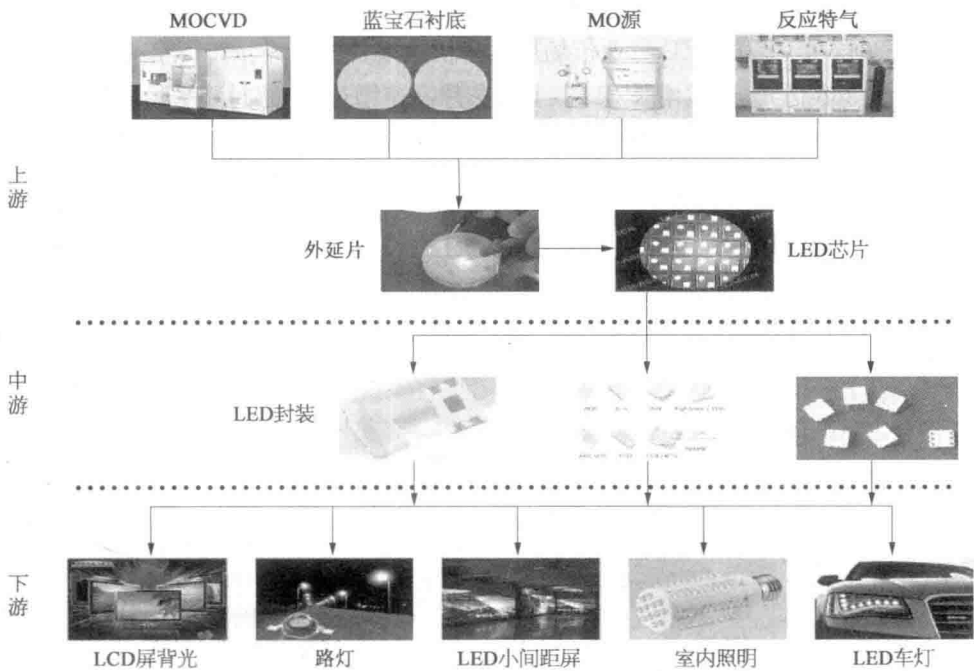


图 1-1 蓝光 LED 产业链

目前,全球 LED 产业可以分为四大地区:一是欧美地区,以通用照明为主攻方向,产品特点是高可靠性和高亮度;二是日本,在通用照明和背光显示都技术领先,并且兼顾通用照明、汽车、手机和电视;三是中国台湾和韩国,以背光显示为主线,包含手机、TV、电脑背光,出货量大但毛利率低;四是中国大陆,主要业务为户外显示屏、广告屏和照明灯等领域。

从全球来看,LED产业正处于稳健发展期。2010—2015年,全球LED行业市场规模呈稳步递增的趋势。2017年LED行业市场规模约为6480.74亿美元,同比增长13.42%。据相关部门预测,未来五年LED行业市场规模增速将保持在12%左右。2014年以来,全球LED产业规模增长的主要增长动力来自照明应用,所占比例为50%。主要应用领域包括LED显示屏、交通信号灯、景观照明、手机应用、汽车用灯、LCD显示背光源、通用照明等。LED照明技术的进步和价格的下降,让LED进入照明领域成为现实。除此之外,智慧照明增长迅速,进入高速发展阶段。LED市场竞争激烈,市场深度细化的趋势将愈加明显,拥有利基优势的企业加速转往LED植物照明、医疗照明、渔业照明、海运港口照明、小间距显示器、红外线及紫外线LED等新兴市场以求获利。

LED于2000年在国内兴起,2009—2010年得到快速发展,主要是背光和照明的推动。但从2014年开始,背光市场的饱和导致价格逐年下滑,主要靠照明的快速渗透支撑整个行业的增速。

中国LED产业已经形成了基本完整的产业链,并初步形成了珠江三角洲、长江三角洲、北方地区、江西及福建地区四大区域,每一区域都初步形成了比较完整的产业链,85%以上的LED企业分布在这些地区。国家半导体照明工程首批批准的半导体照明产业化基地为上海、厦门、大连和南昌,基本反映了这种产业格局。

2010—2017年,我国LED行业市场规模呈快速增长的趋势。2017年中国LED行业总体规模为6368亿元,同比增长21%,上游芯片高速增长,中游封装平稳发展,下游应用维持快速增长态势(见图1-2,数据来自《2016年中国半导体照明产业发展白皮书》)。

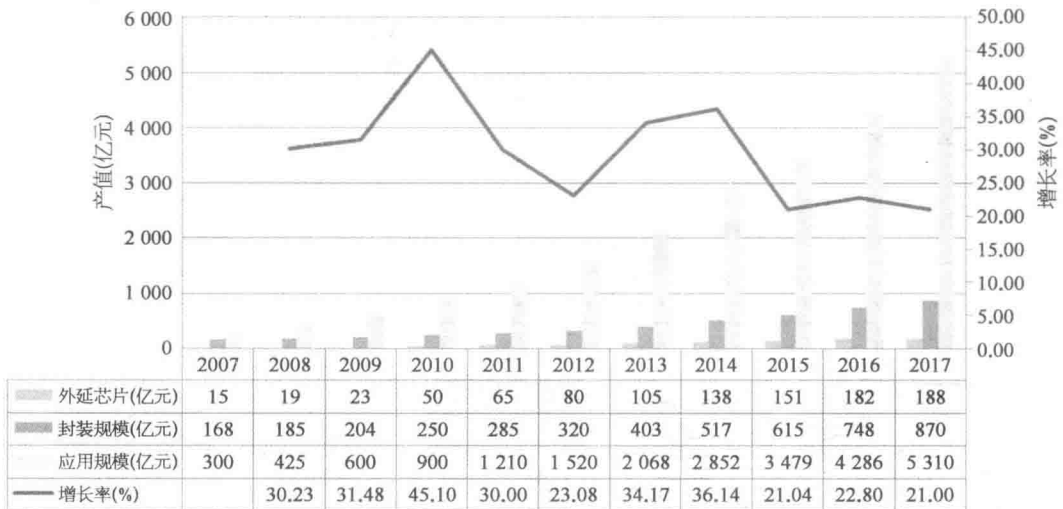


图1-2 我国半导体照明产业各环节产业规模及增长率

目前,中国大陆是LED行业最大的制造基地。受益于关键设备与材料逐渐国产化,国内芯片企业竞争力日趋增强,中国大陆LED芯片在全球的市占率持续提升,2017年占全球LED芯片产值近40%。到了2016年,我国封装企业更是提供了全球70%的封装产量。中国的LED照明已经占到了全球的55%。

借助“十二五”规划的大力扶持,我国已成为半导体照明大国。2017年7月30日发布的《半导体照明产业“十三五”发展规划》又提出了“由大变强”的新目标,即到2020年,半导体照明产业整体产值要达到万亿元规模。展望未来,LED行业将为国民经济做出更大的贡献,在全球照明领域傲视群雄。

1.1 半导体照明技术的进展

1) 发展之路

无机材料中电致发光现象是LED发光的基础, Henry Round 和 Oleg Vladimirovich Losev 于1907年和1927年分别报道LED发光现象——电流通过使得碳化硅(SiC)晶体发光^[1]。这些结果引发了半导体及PN结光电过程的进一步理论研究。

20世纪50、60年代,科学家开始研究Ge、Si(第一代半导体材料)以及一系列Ⅲ-V族半导体(如InGaP、GaAlAs)(第二代半导体材料)的电致发光性能。Richard Haynes 和 William Shockley 证明了PN结中电子和空穴复合导致发光。随后一系列半导体被研究,最终于1962年由Nick Holonyak开发出了第一个红光LEDs^[2]。受其影响,1971年George Craford发明了橙光LEDs,1972年又相继发明了黄光和绿光LEDs(均由GaAsP组成)。

深入的研究迅速使得在宽光谱范围内(从红外到黄色)发光的LEDs实现商业化,主要用于电话或控制面板的指示灯。实际上这些LEDs的效率很低,电流密度有限,使得亮度很低,并不适于普通照明。

高效的蓝光LEDs的研发花费了30年的时间,因为当时没有可应用的足够质量的宽带隙半导体。1989年,第一个基于SiC材料体系的蓝光LEDs商品化,但由于SiC是间接带隙半导体(见图1-3),使得其效率很低。20世纪50年代末就已经考虑使用直接带隙

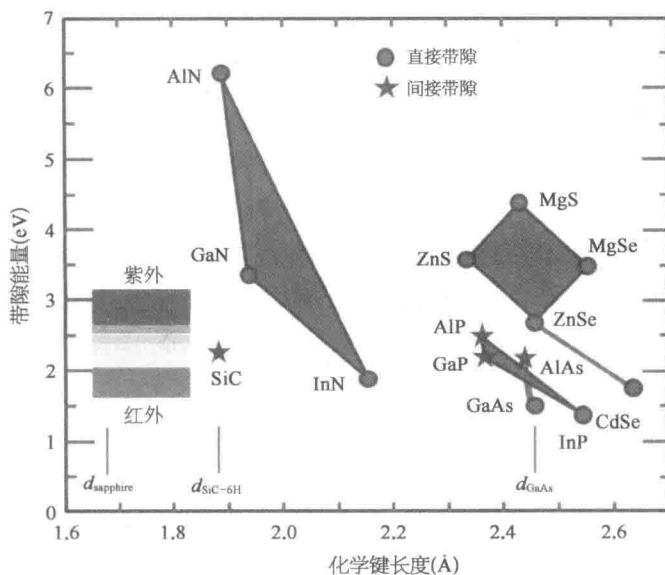


图1-3 LED材料带隙能量、化学键长度示意图

半导体 GaN, 1971 年 Jacques Pankove 展示了第一款发射绿光的 GaN 基 LED。从此, 开始了第三代半导体材料在发光二极管中的研发及应用。然而, 制备高质量 GaN 单晶以及在这些材料中引入 n 型和 p 型掺杂的技术仍然有待开发。

20 世纪 70 年代发展的金属-有机物气相外延(MOVPE)等技术对于高效蓝光 LEDs 的发展具有里程碑意义。1986 年 Isamu Akasaki 与其合作者通过 MOVPE 方法首次合成了高质量的器件级 GaN。

另一个主要挑战是 p 型掺杂 GaN 的可控合成。Shuji Nakamura 提出在热退火之后增加一个简单的后沉积步骤, 分解 Mg 和 Zn 的复杂体, 该方法可轻易实现 GaN 及其三元合金(InGaN、AlGaIn)的 p 型掺杂。这些三元体系的能带可通过 Al 和 In 的成分进行调节, 对于提高其效率具有重要的意义。目前, 这些器件的活性层通常由一系列交替的窄带隙 InGaIn 和 GaN 层以及宽带系的 p 型掺杂 AlGaIn 薄膜(作为载流子的 p 端约束)组成。

1994 年, Nakamura 及其合作者基于 n 型和 p 型掺杂 AlGaIn 之间 Zn 掺杂 InGaIn 活性层的对称双异质结构设计, 首次展示了具有 2.7% 外量子效率(EQE)的 InGaIn 蓝光 LED^[3]。此结构就是经典的 LED 正装结构, 至今仍被采用, 并获得 2014 年诺贝尔物理学奖。

单芯片 LED 不可能发出具有连续光谱的白光, 可通过两种方式获得白光。一种是多晶型组合发光, 是组合发蓝光、绿光和红光的三个不同半导体 LEDs。该方法最大的挑战在于绿光半导体的 EQE 相对较低($\approx 25\%$), 限制了相应白光 LED 的发光效率。另一种是单晶型, 即一只单色的 LED 发光二极管加上相应的荧光粉组合形成白光。

1996 年由 Nichia 开发的第一款商业化白光 LED 就使用 InGaIn 芯片与 Ce^{3+} 掺杂的石榴石材料[如 $\text{Y}_{3-x}\text{Gd}_x\text{Al}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12} : \text{Ce}^{3+}$ (YAG : Ce)]来发射肉眼所需的白光。

只使用单一的荧光, 限制了显色指数(CRI) < 75 光源在冷白光和日光范围内(相关色温 CCT=4 000~8 000 K)的性能。然而, 接近理论极限的高转换效率令这些器件成为那些要求具有与日光相媲美 CCT 值($\sim 6 400$ K)的汽车前灯的重要组成部分。

理想自然色彩感知度的照明应用首选更低的 CCT 值(2 000~4 000 K)和更高的 CRI > 80 。使用两个或两个以上发光材料[例如, 绿光至黄光的 LuAG : Ce 或 YAG : Ce 结合红光 $(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{Si}_5\text{N}_8 : \text{Eu}^{2+}$ 或 $(\text{Sr}, \text{Ca})\text{AlSiN}_3 : \text{Eu}^{2+}$]更容易实现这些参数。 Eu^{2+} 掺杂的氮化物已经作为商用照明级白光 LED 中红光材料。然而, 发射光谱的相关部分超出了人眼灵敏度范围(红外溢出), 限制了器件的整体发光效率。需要开发非常窄红光发射的材料。

通用公司 GE(Trigainphosphors)最近商业化的 Mn^{4+} 掺杂氟化物是一类窄红光发射材料。这些材料的发射图谱中 630 nm 附近出现几条尖线(每条都 < 5 nm), 当其与绿-黄发光石榴石材料结合时, 获得高 CRI、高发光效率的灯。

2) LED 性能指标

与 LED 性能相关的量包括发光效率[与内量子效率(IQE)和外量子效率(EQE)有关]、CCT、CRI 等。

量子限制斯塔克效应、Efficiency Droop 现象、晶格失配(16%)和热膨胀系数失配、电流拥挤效应、反向漏电流等都会影响 LED 的 IQE 和 EQE。

过去 20 年, 蓝光 LED 的 IQE 逐步提高, 这也是不断降低 GaN 晶体结构缺陷密度的

结果。细致优化生长工艺可使缺陷保持在 $10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 范围内。通过覆盖整个 p-GaN 表面的更大 p 型接触来克服其具有相对较低的电导率。通过倒装结构可以有效地降低电流拥挤效应。调整势阱层的结构、增加电子阻挡层、提高 GaN 材料的 p 型掺杂浓度等,都可以提高 LED 的 IQE。

通过芯片异形技术、增加分布布拉格反射层结构、采用光子晶体、利用表面粗化技术等技术,可以有效地提高 LED 的 EQE。

目前,大功率 LED 的 IQE 可达 90% 以上, EQE 也可达 50%, 光电转换效率可达 40% 左右。LED 的光效也显著增加。早在 2014 年 Cree 宣布白光功率型 LED 实验室光效达到 303 lm/W。2016 年我国商业化 LED 光效达 160 lm/W (国际厂商 176 lm/W)。美国能源部设定了 2020 年照明级白光 LED 发光效率为 200 lm/W 的市场标准(见图 1-4)。

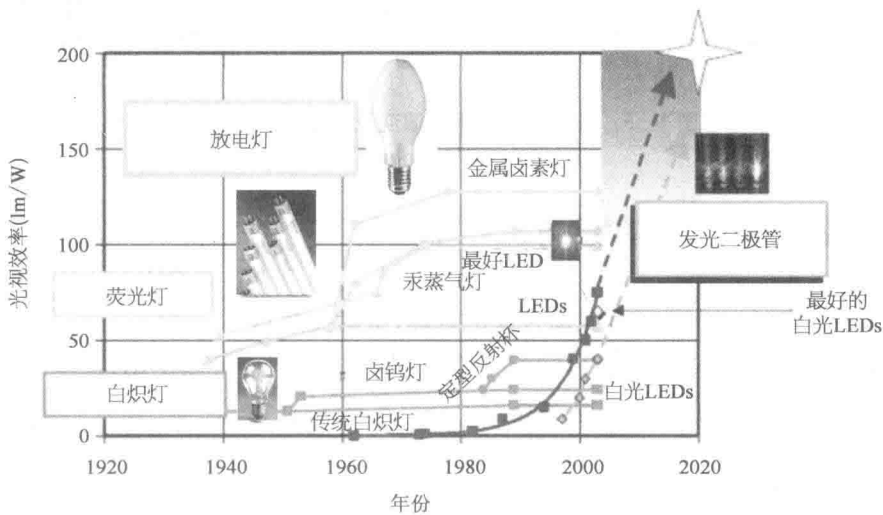


图 1-4 各种光源光效及白光功率 LED 光效发展路径

3) LED 热效应

不断增加光效、提高 LED 功率,也是照明行业发展的趋势之一。据调研机构 Digitimes Research 预估,2017 年全球高亮度 LED 产值年增率将为 2.8%,达 131.8 亿美元。但随着 LED 功率的增加,热量的影响将非常显著。

高功率 LED 热功率密度高、对温度敏感、无红外辐射,因此必须采取必要的措施降低芯片热阻,控制温升。引起 LED 温升的因素主要有结构、工艺和材料的影响。结构包括同侧电极引起的电流拥挤造成欧姆热阻、芯片和基板的形状、结构、散热器的结构等。工艺涉及共晶工艺、涂覆工艺、安装及结合工艺等。材料涉及蓝宝石衬底、热界面材料、支架、荧光粉、基板、散热器等。

科研工作者及厂商也采用了改进材料性能和更改结构等方法降低 LED 热阻。Cree 采用热导率比较高的 SiC 作为正装芯片的衬底,显著提高芯片的散热性能。1998 年 Lumileds 公司封装出世界上第一个大功率倒装(Flip chip)LED(1W LUXOEN 器件),通过金属凸点导热给热导率高的硅衬底[为 $145 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],散热效果更好。南昌大学研发

出 Si 衬底 LED 芯片,热阻也显著改善。后来又出现 CSP、WICOP、FC-COB 等封装形式,热阻显著降低,为 LED 散热提供了有效的途径(见图 1-5)。

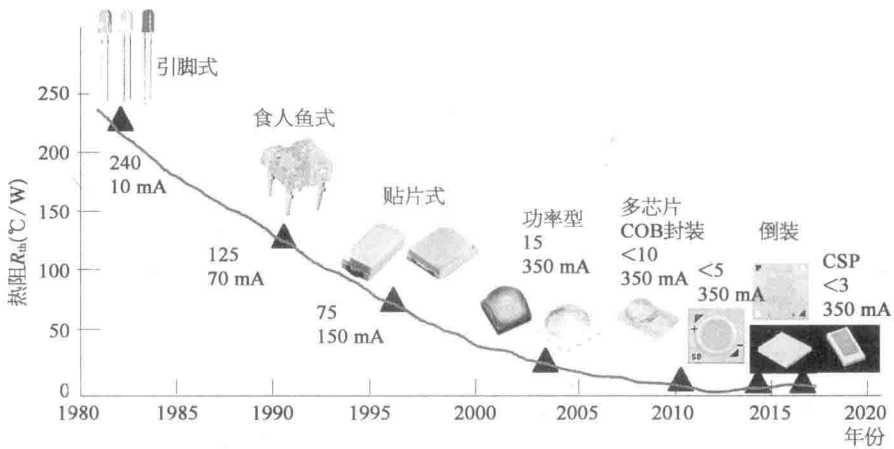


图 1-5 LED 封装结构的演变及热阻的变化趋势

1.2 热效应对 LED 的影响

1.2.1 温度对大功率 LED 光电性能的影响(参数失效)

参数失效指温度升高后,LED 的相关性能指标降低,但仍可以使用,甚至个别参数指标在结温降低时,仍能够恢复到原来值。

1) 温升对 LED 光通量及发光效率的影响

(1) 光通量 Φ_v 与结温 T_j 的关系

$$\Phi_{v(T_2)} = \Phi_{v(T_1)} e^{-k\Delta T_j} \quad (1-1)$$

式中 $\Phi_{v(T_1)}$ —— 结温 T_{j1} 时的光通量;

$\Phi_{v(T_2)}$ —— 结温 T_{j2} 时的光通量;

$\Delta T_j = T_{j2} - T_{j1} (T_{j2} > T_{j1})$;

k —— 温度系数,一般情况下, k 值可由实验测定。

图 1-6 为不同温度系数 k 时光相对输出强度随结温的变化。由图可知,LED 光效温度系数 k 最好在 2.0×10^{-3} 以下,这样由温度引起的 LED 光输出降低才不会很大。例如,InGaN 类 LED 的 k 值约为 1.2×10^{-3} ,结温 125°C 时光相对输出强度相对结温 25°C 时降低约 11%。

不同材料和颜色的 LED 对温度的敏感程度不同(见图 1-7)。目前,使用最多的 GaN 基白光 LED 的温度系数大多在 $2.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$,有的甚至达到了 5.0×10^{-3} 。 k 值偏大的 LED 更要注意控制结温。

(2) 光通量 Φ_v 与室温的关系

环境温度也影响光通量(见图 1-8)。 $t_a = 100^{\circ}\text{C}$ 时,LED 的光通量将下降至室温时的一半左右。LED 的应用必须考虑环境温度对光通量的影响,尤其是在室外应用的路灯、

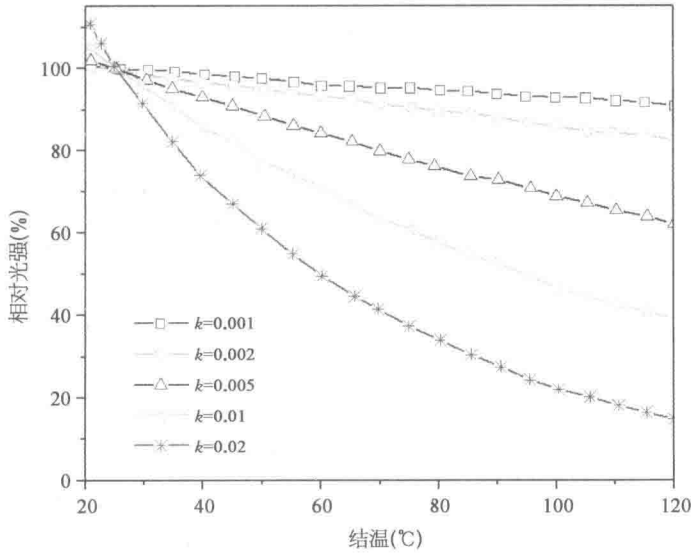
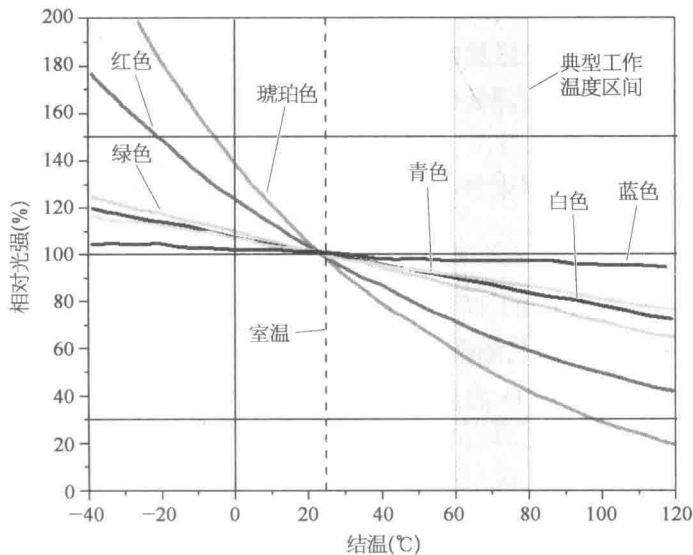
图 1-6 不同温度系数 k 时光相对输出强度随结温的变化曲线

图 1-7 各种色光 LED 芯片结温与出光的关系(来自 LumiLEDs 产品报告)

广场灯、泛光灯等。

(3) 发光效率 η_v 与温度的关系

根据发光效率公式可知,光通量 Φ_v 与发光效率直接相关,光通量 Φ_v 随着温度降低,发光效率 η_v 也随着温度降低。从各大厂商的产品报告里面也可以验证这个变化规律。

2) 温升对 LED 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。峰值波长即光强最大的波长,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