

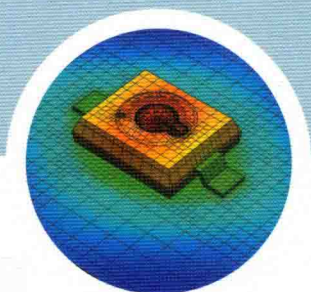
电子信息与电气工程技术丛书

E&E

Mentor®
A Siemens Business

官方推荐用书

THERMAL MANAGEMENT
OF LED'S PACKAGING AND
LIGHT ENGINE



LED封装与光源热设计

柴广跃 李波 王刚 向进 编著

Chai Guangyue

Li Bo

Wang Gang

Xiang Jin

清华大学出版社



非外借

THERMAL MANAGEMENT
OF LED'S PACKAGING
AND LIGHT ENGINE

LED封装与光源热设计

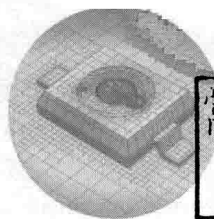
柴广跃 李波 王刚 向进 编著

Chai Guangyue

Li Bo

Wang Gang

Xiang Jin



常州大学图书馆
藏书章

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统论述了发光二极管的封装、灯具原理与热设计。全书共 11 章,分别介绍了 LED 热设计基础、传热学基础、LED 芯片与热性能、LED 封装与热设计、LED 光源组件与灯具热设计、LED 器件的瞬态热测试方法、LED 器件瞬态热测试的实际操作、LED 热仿真分析软件、LED 组件热特性仿真分析、LED 灯具热仿真分析等内容。

本书将 LED 器件封装及光源灯具技术、热设计基础理论及仿真工具、LED 热特性测试与评估相关知识融会贯通为一体,为读者提供了有关 LED 封装与灯具热设计的基本原理与应用,集学术性与应用性为一体,可供相关科研与工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

LED 封装与光源热设计/柴广跃,李波,王刚等编著. —北京:清华大学出版社,2018

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-47024-3

I. ①L… II. ①柴… ②李… ③王… III. ①发光二极管—封装工艺 ②发光二极管—光源—设计 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 102038 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:白 蕾

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.25

字 数:544 千字

版 次:2018 年 9 月第 1 版

印 次:2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:069373-01

以 LED 为核心的半导体照明技术发展迅速,正以超乎人们想象的速度替代传统的电光源。LED 的核心是 pn 结,基于 pn 结的半导体器件具有很强的温度敏感性,随着工作温度的升高,它们的性能变差、可靠性劣化、故障率升高、寿命缩短。目前,商品化 LED 的光电效率远远达不到 50%,LED 正常工作时自身将产生大量的热量,如不将此热量散去将对 LED 产生灾难性的后果。本书结合 LED 封装和灯具设计制作的实际情况,介绍了热设计的基本原理与方法、热特性的评估方法与手段,最后介绍了一种流行的热特性仿真软件。目前,关于半导体照明的参考书籍非常多,但是相关的本科教材却非常匮乏,因此本书的编写致力于解决目前国内缺乏“光源与照明”相关专业基础教材的问题。与现有相关书籍相比,本教材侧重于基础知识介绍,同时希望通过大量的实例分析触发读者创新的灵感。参与编写的人员既有高校教师,也有来自企业的研发人员。希望从学习、研究、产业等不同角度进行问题的梳理,从而帮助读者对 LED 封装与照明灯具技术以及所涉及的热问题有较为全面的了解,并掌握基本的分析方法和手段。

本书层次分明,分为上中下三篇。由柴广跃教授和向进高级经理提出了书稿的编写大纲和目录,并对全部书稿进行了审定。

本书上篇为 LED 热设计基础,共 5 章,由柴广跃教授编写。

第 1 章主要介绍 LED 封装与照明技术发展过程、与热相关的 LED 失效、热设计的必要性及基本流程。

第 2 章主要介绍传热学基础知识,内容包括热的概念、传热机理和基本的定理、热阻概念、热分析的基本方法,最后介绍了几种先进的散热技术。

第 3 章主要介绍 LED 基本原理与热性能,内容包括 LED 基本结构及发光发热的机理、LED 芯片结构及热特性。

第 4 章主要介绍 LED 封装与热设计,内容包括 LED 封装的基本概念、封装的类别及基本方法,最后介绍了 LED 封装的热设计方法。

第 5 章主要介绍半导体照明光源组件与灯具的热设计,内容包括光源组件与灯具的定义、几种典型的光源与灯具、光源与灯具的热设计方法,最后介绍了几种典型 LED 光源与灯具的热设计实例。

本书中篇为 LED 热特性测试方法及测试平台,共 2 章,由王刚高级工程师编写。

第 6 章主要介绍了 LED 器件热特性的瞬态测试,包括 LED 热特性测试的难点、LED 热阻与结温的计算方法、瞬态测试原理与方法等内容。

第 7 章主要介绍了瞬态法测试的实际操作过程,包括进行瞬态热测试所需要的准备工作、实际操作等内容。

本书下篇为 LED 热设计仿真工具原理与应用,共 4 章,由李波高级工程师编写。

前言

第 8 章主要介绍 FloEFD 流体仿真软件的基本情况,内容包括 FloEFD 的基本原理、主要优点、工程应用、软件的安装、应用流程、FloEFD 各个模块的介绍。

第 9 章以一种 LED 组件为例,详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 器件与组件热特性的完整过程。

第 10 章以一种 LED 灯具为例,详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 灯具热特性的完整过程,并讨论了如何通过调整对流和辐射参数来调整 LED 灯具中 LED 器件的结温。

第 11 章以一种带有风扇的 LED 射灯为例,详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 射灯热特性的完整过程,并讨论了如何通过调整风扇参数改善灯具散热能力。

附录 A 由李波高级工程师完成,附录 B 由王刚高级工程师完成。

本书论述深入浅出,注重理论与实践相结合。可作为高等院校相关专业的教材和参考书,也可作为半导体照明行业从业人员及相关工程技术人员的参考资料。

在本书编辑过程中,深圳大学、相关企业、相关网站、行业的专家及学生李华平、章瑞华、李耀东、廖世东、苏丹等给予了大力支持,为本书提供了大量有益的背景资料;传热学基础部分参考并引用了夏班尼所著的《传热学》部分内容与例题;学生刘志慧、刘梦媛帮助作者整理了全部书稿,马雁潮、陈晓媛、徐竟、廖刚也为书稿整理和插图做了大量的工作。在此一并感谢。

本书的出版得到了美国 Mentor 公司的大力支持,感谢 Mentor 公司的资助和技术支持。对于 Mentor 公司的产品和大学计划有兴趣的读者,可以通过 Email 和向进联系:jin_xiang@mentor.com。

还要感谢清华大学出版社的工作人员为本书出版所做的大量工作,特别是盛东亮责任编辑以严谨的作风、认真细致的工作态度、良好的合作精神圆满完成编辑工作,使本书得以高质量出版。

由于作者水平有限,本书难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2018 年 6 月

上篇 LED 热设计基础

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 引言 | 3 |
| 1.1 LED 技术的发展 | 3 |
| 1.2 LED 的失效 | 6 |
| 1.2.1 机械失效 | 7 |
| 1.2.2 腐蚀失效 | 8 |
| 1.2.3 电气失效 | 9 |
| 1.2.4 光学失效 | 9 |
| 1.3 热设计的重要性 | 10 |
| 1.4 热设计流程 | 10 |
| 第 2 章 传热学基础 | 13 |
| 2.1 热与能量 | 13 |
| 2.2 能量传递与传热 | 14 |
| 2.3 基本定律 | 15 |
| 2.3.1 热力学第一定律 | 15 |
| 2.3.2 质量固定的传热 | 16 |
| 2.3.3 体积固定的传热 | 17 |
| 2.4 传热机理 | 19 |
| 2.4.1 热传导 | 19 |
| 2.4.2 热对流 | 24 |
| 2.4.3 热辐射 | 27 |
| 2.5 热阻网络热设计 | 29 |
| 2.5.1 热阻的概念 | 29 |
| 2.5.2 扩散热阻 | 31 |
| 2.5.3 接触热阻及热界面材料 | 33 |
| 2.5.4 热阻网络 | 35 |
| 2.5.5 常用散热器 | 38 |
| 2.6 计算机模拟热设计简介 | 48 |
| 2.7 几种先进的冷却技术 | 50 |
| 2.7.1 相变散热与热管 | 50 |
| 2.7.2 液体冷却与器件 | 51 |
| 2.7.3 热电冷却与器件 | 52 |

目录

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 2.7.4 电流体流动散热 | 54 |
| 第3章 LED芯片与热性能 | 57 |
| 3.1 LED基本原理 | 57 |
| 3.1.1 双异质结结构LED原理 | 58 |
| 3.1.2 量子阱结构LED原理 | 60 |
| 3.2 芯片 | 62 |
| 3.2.1 LED衬底材料与芯片结构 | 62 |
| 3.2.2 功率型LED芯片 | 63 |
| 3.3 LED芯片热特性 | 68 |
| 3.3.1 结温与热阻 | 68 |
| 3.3.2 光通量与温度的关系 | 69 |
| 3.3.3 辐射波长、色温与温度的关系 | 70 |
| 3.3.4 正向电压与温度的关系 | 70 |
| 3.3.5 寿命与温度的关系 | 71 |
| 第4章 LED封装与热设计 | 73 |
| 4.1 封装的层级 | 73 |
| 4.2 LED的封装 | 74 |
| 4.2.1 LED封装的作用 | 74 |
| 4.2.2 设计的基本要素 | 75 |
| 4.2.3 封装的基本材料及原理 | 76 |
| 4.2.4 LED封装基本工艺流程 | 85 |
| 4.2.5 封装的基本设备 | 86 |
| 4.2.6 封装的基本结构 | 92 |
| 4.2.7 减小封装热阻的基本方法 | 93 |
| 4.2.8 LED芯片焊接及新型粘接技术 | 94 |
| 4.2.9 芯片焊接质量的评估 | 102 |
| 4.2.10 芯片固晶的可靠性 | 105 |
| 4.3 功率型LED封装 | 106 |
| 4.3.1 Luxeon系列LED的封装结构 | 106 |
| 4.3.2 Golden Dragon系列LED的封装结构 | 107 |
| 4.3.3 XLAMP系列LED的封装结构 | 107 |
| 4.3.4 多芯片LED光源模组封装 | 108 |
| 4.4 LED芯片级封装 | 111 |
| 4.4.1 芯片级封装LED器件 | 111 |

| | | |
|--------------|------------------------------|------------|
| 4.4.2 | 集成封装倒装 LED 光源模组 | 113 |
| 4.4.3 | 高压倒装 LED 光源模组 | 113 |
| 4.5 | 封装中的热设计 | 115 |
| 4.5.1 | 热设计的分级 | 115 |
| 4.5.2 | LED 器件的典型散热通道 | 116 |
| 4.5.3 | 封装中的热设计方法 | 117 |
| 第 5 章 | LED 光源组件与灯具热设计 | 124 |
| 5.1 | LED 照明组件与灯具的定义 | 124 |
| 5.1.1 | LED 照明模组 | 124 |
| 5.1.2 | LED 照明光源 | 125 |
| 5.1.3 | LED 灯具 | 125 |
| 5.2 | 典型 LED 灯具 | 130 |
| 5.2.1 | LED 射灯 | 130 |
| 5.2.2 | LED 球泡灯 | 132 |
| 5.2.3 | LED 灯管 | 133 |
| 5.2.4 | LED 筒灯 | 134 |
| 5.2.5 | LED 路灯 | 135 |
| 5.3 | LED 灯具热设计基础 | 136 |
| 5.3.1 | LED 灯具设计简述 | 136 |
| 5.3.2 | 热设计目标和原则 | 144 |
| 5.3.3 | 热设计流程 | 144 |
| 5.3.4 | 典型散热器材料与结构 | 145 |
| 5.3.5 | 热沉热阻分析 | 147 |
| 5.4 | LED 灯具热设计实例 | 147 |
| 5.4.1 | 使用翅片散热器的大功率 LED 路灯光源组件 | 147 |
| 5.4.2 | 灯丝型 LED 球泡灯 | 150 |
| 5.4.3 | 地铁用 LED 灯管 | 154 |
| 5.4.4 | LED 投光灯 | 156 |
| 5.4.5 | 球泡灯照明模组的辐射散热 | 160 |

中篇 LED 热特性测试方法及测试平台

| | | |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 第 6 章 | LED 器件的瞬态热测试方法 | 165 |
| 6.1 | LED 器件瞬态热测试的步骤 | 165 |
| 6.1.1 | LED 器件温度敏感参数的测量和校准 | 165 |

目录

| | | |
|--------------|--------------------------|------------|
| 6.1.2 | LED 器件的瞬态热测试 | 167 |
| 6.1.3 | 结构函数的理论基础 | 173 |
| 6.1.4 | LED 器件的电、光、热联合测试平台的实现 | 189 |
| 6.2 | 结构函数的应用和案例分析 | 193 |
| 6.3 | 对 LED 整灯进行瞬态热测试的测试案例 | 199 |
| 第 7 章 | LED 器件瞬态热测试的实际操作 | 205 |
| 7.1 | 瞬态热测试需要的准备工作 | 205 |
| 7.1.1 | T3Ster 系统的安装和接线 | 205 |
| 7.1.2 | 被测 LED 器件的安装与连线 | 210 |
| 7.2 | LED 器件的瞬态热测试 | 211 |
| 7.2.1 | LED 器件温度敏感参数的测量和校准 | 211 |
| 7.2.2 | LED 器件的瞬态热测试 | 225 |
| 7.2.3 | 瞬态热测试结果的分析 | 227 |
| 7.2.4 | 使用瞬态双界面法获得被测 LED 器件的结壳热阻 | 242 |
| 7.2.5 | RC Compact Model 的生成 | 245 |

下篇 LED 热设计仿真工具原理与应用

| | | |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 第 8 章 | LED 热仿真分析软件介绍 | 251 |
| 8.1 | 热仿真分析软件的背景及原理 | 251 |
| 8.2 | FloEFD 特点和优势 | 252 |
| 8.3 | FloEFD 工程应用背景 | 256 |
| 8.4 | FloEFD 软件安装 | 257 |
| 8.4.1 | FloEFD 15.0 软件程序安装 | 257 |
| 8.4.2 | 许可证管理器的安装 | 262 |
| 8.4.3 | FloEFD 15.0 单机版或网络浮动版服务器许可证的安装 | 265 |
| 8.4.4 | FloEFD 15.0 网络浮动版客户端许可证获取 | 270 |
| 8.5 | 热仿真软件使用流程 | 271 |
| 8.6 | FloEFD 软件 LED 模块 | 271 |
| 8.6.1 | 介绍 | 271 |
| 8.6.2 | 仿真功能 | 271 |
| 8.6.3 | 简化模型 | 272 |
| 8.6.4 | LED 数据库 | 273 |
| 8.7 | 热仿真软件的价值 | 276 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 第 9 章 | LED 组件热特性仿真分析 | 277 |
| 9.1 | LED 组件热特性仿真分析介绍 | 277 |
| 9.2 | LED 组件热特性仿真 | 277 |
| 9.2.1 | 建立模型 | 277 |
| 9.2.2 | 求解域调整 | 282 |
| 9.2.3 | 参数设置 | 283 |
| 9.2.4 | 网格设置 | 287 |
| 9.2.5 | 求解计算 | 287 |
| 9.2.6 | 仿真结果分析 | 287 |
| 第 10 章 | LED 灯具热仿真分析 | 293 |
| 10.1 | LED 灯具热仿真分析几何模型 | 293 |
| 10.2 | LED 灯具热仿真分析步骤 | 293 |
| 10.2.1 | 建立模型 | 293 |
| 10.2.2 | 求解域调整 | 298 |
| 10.2.3 | 参数设置 | 298 |
| 10.2.4 | 网格设置 | 305 |
| 10.2.5 | 求解计算 | 306 |
| 10.2.6 | 仿真结果分析 | 306 |
| 第 11 章 | LED 射灯热仿真分析 | 310 |
| 11.1 | LED 射灯热仿真分析介绍 | 310 |
| 11.2 | LED 射灯热仿真分析步骤 | 311 |
| 11.2.1 | 建立模型 | 311 |
| 11.2.2 | 求解域调整 | 315 |
| 11.2.3 | 参数设置 | 316 |
| 11.2.4 | 网格设置 | 325 |
| 11.2.5 | 求解计算 | 326 |
| 11.2.6 | 仿真结果分析 | 326 |
| 11.2.7 | 优化设计 | 331 |
| 参考文献 | | 336 |
| 附录 A | 软件术语中英文对照 | 338 |
| 附录 B | T3Ster 系统介绍 | 339 |
| B.1 | T3Ster 系统概述 | 339 |
| B.2 | 实时测量系统 | 340 |
| B.3 | T3Ster 系统的测试主机 T3Ster Mainsys 介绍 | 341 |

目录

| | | |
|------|------------------------------------|-----|
| B.4 | T3Ster 系统的 T3Ster Booster 介绍 | 344 |
| B.5 | LV 版本 T3Ster Booster 介绍 | 348 |
| B.6 | T3Ster 系统 Thermostat 干式恒温槽介绍 | 350 |
| B.7 | T3Ster 系统其余主要配件介绍 | 351 |
| B.8 | TeraLED 光学测试设备以及与之配合使用的积分球 | 354 |
| 附录 C | 空气在 1atm(101.33kPa)下的物理性质 | 357 |
| 附录 D | 饱和水/水蒸气的性质 | 358 |

上篇 LED热设计基础

第1章 引言

以发光二极管(light emitting diode,LED)为核心的新一代半导体照明(semiconductor lighting)也称为固态照明(solid state lighting,SSL),是一种安全健康的“绿色光源”,节能环保效果非常明显。2007年美国《自然》杂志发表文章称:照明占全球能源消耗的8.9%、电力消耗的19%,对GDP的贡献率仅是0.63%。如果采用半导体照明技术,有望使2050年的照明用电量仍维持2007年的水平,而对GDP的贡献率将上升至1.63%。世界主要发达国家从战略高度对半导体照明产业进行了布局,大力发展半导体照明技术,构筑专利壁垒,同时发布白炽灯等低效照明光源的禁限令及禁限时间表,极力促成世界照明工业的转型与新兴照明产业的崛起。究其原因,除了经济利益的考量外,社会经济的绿色可持续发展已经成为世界各国的治国之本,正在成为全人类的共识。目前,人类面临的最大挑战之一是如何控制碳排放引起的全球变暖问题。为此,联合国气候变化特别谈判通过了《京都议定书》等一系列文件,这是具有约束力的世界性协议,用科学方法决定了全球整体的排放目标及各个成员国的减排目标及时间表。我国政府于2009年郑重承诺:到2020年单位GDP的二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。这些约束性指标已经写入我国国民经济和社会发展的中长期目标中,半导体照明已经成为完成这一伟大目标的重要手段之一。

1.1 LED技术的发展

1907年H. J. Round首次发现在10V电压下碳化硅(SiC)晶体发出微弱的可见光。1923年Losseve将电流注入意外形成的SiC的pn结,在结区发出了微弱的蓝光。1936年Destriau发现在注入电流作用下硫化锡(SnS)粉末可以发光。

1962年,美国通用电气公司的尼克·霍洛亚克(Nick Holonyak)在半导体化合物砷化镓衬底上气相外延(vapour phase epitaxy, VPE)生长了铝镓砷(AlGaAs/GaAs)材料,发明了第一只红色可见光LED,开启了LED的历史,发光效率接近0.1lm/W。1969年Nuese在GaAs衬底上生长了具有一定厚度的n型AlGaAs缓冲层,大幅减少

了有源层的缺陷,有效地提高了红光LED的发光效率。由于LED的寿命长、抗震性能好,开始用作指示灯。

1968年,人们将掺杂工艺应用于GaP、AlGaAs材料,研制出了光效更高的LED,发光颜色也从单一的红光覆盖至绿光、橙光和黄光。

20世纪80年代是LED发展的黄金年代,新的化合物材料、双异质结和金属氧化物化学气相外延(MOCVD)等技术的引入使LED技术获得高速的发展。80年代初,日本名古屋大学的赤崎勇和天野浩选择氮化镓(GaN)材料研制蓝色LED。1988年开始,日本日亚化学工业株式会社(Nichia Corporation)的中村修二(Shuji Nakamura)也开始使用氮化镓材料研发蓝光LED,但在技术路线上并不相同。1993年,中村修二开发出了首个可商用的高亮度蓝光LED。与之前发明的红、绿光LED混光合成出白光。1997年,Schlotter研究小组、Nakamura研究小组分别使用蓝光LED加黄光荧光粉封装成功白光LED。为此,赤崎勇、天野浩和中村修二获得2014年度诺贝尔物理学奖,诺奖评选委员会认为,他们研发蓝色发光二极管,并用全新方式创造的白色光源已经让所有人受益,他们革命性的发明将点亮21世纪,掀起新一代照明的革命。

2001年,Kafmann等人用紫外LED激发三基色荧光粉的方法得到了空间色参数均匀的白光LED。

2007年,日亚化学工业株式会社发布了一种1W级白光LED,该LED芯片的尺寸为 1mm^2 ,在电流为350mA时的光效约为 134lm/W ,与之对应的光电转换效率为39.5%,色温为4988K,接近一般照明设备的5000K。

2014年商用功率型白光LED的发光效率超过 160lm/W ,实验室样品发光效率已经超过 300lm/W 。

20世纪90年代中期以来,LED技术迅速发展。类似微处理器产业中的“摩尔定律”,LED产业发展存在“Haitz定律”,这一定律以安捷伦的前任技术科学家Roland Haitz的名字命名,它指出:LED的价格每10年降为原来的 $1/10$,性能每10年提高20倍。图1-1为LED照明与其他电光源技术发展的参数对比示意图,由图可见传统电光源的光效很难超过 120lm/W ,半导体照明的光效可以超过 200lm/W ,而达到这一光效仅仅用了不到25年。

芯片技术的发展为LED产业的发展打下了坚实的基础,封装技术的不断革新也促进了LED不断拓展至新的应用领域。

LED封装是实现LED照明的关键环节,用于保护芯片不受外界环境的影响,提高可靠性并完成与外电路的电气连接。此外,LED封装还要保证光学性能,提高出光效率并实现特定的光场分布。

LED封装技术的发展大致可分为四个阶段:

(1) 1962—1989年,LED封装形式上一般采用直插式封装,直径多为 $\phi 3$ 和 $\phi 5$ 。驱动电流一般不大于20mA,主要用作信号指示和显示;

(2) 1990—1999年出现了大光通量的食人鱼型封装LED,相比直插式两引脚LED,4引脚食人鱼型LED发光角度大于 120° ,发光强度更高,而且能承受更大的功率,同时

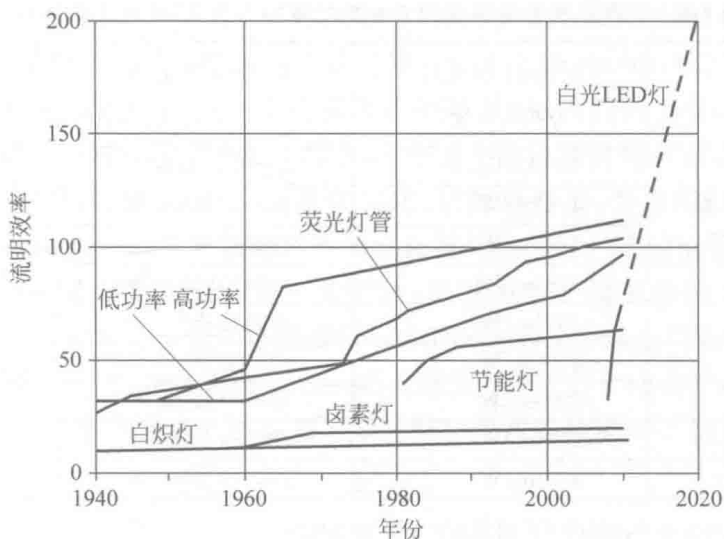


图 1-1 LED 照明与其他电光源技术发展的参数对比示意图

散热更好,其驱动电流在 $50\sim 150\text{mA}$,主要用作大型信号指示,如汽车信号灯、景观照明灯等;

(3) 2000 年开始的第三阶段,开发出各种大功率 LED,包括单颗封装和多颗集成封装,单颗的驱动电流大于 350mA ;

(4) 2010 年后随着倒装(flip chip)LED 芯片的逐步实用化,在封装技术上也出现了芯片级封装 LED 器件,将荧光粉保型涂覆在芯片外后直接使用,典型的包括 PFC、POD 等,但是,在光效指标上还未达到相同功率的正装器件的水平。

目前,蓝光 LED+黄色荧光粉是合成白光光源最流行、成本最低的方式,其发光效率已经超过 300lm/W (2014 年实验室水平),显色指数达到 90 以上,半导体照明已经开始广泛进入通用照明市场。

LED 的技术特点使之特别适合于照明应用,例如:

(1) LED 是芯片尺寸 mm^2 量级、驱动电压仅 $2.0\sim 3.5\text{V}$ 的全固态光源,易实现防震、防水设计,无触电危险,容易达到安全标准;

(2) 色彩丰富、色域宽、易调光、易调色、响应速度快、易实现智能化与网络化的控制,满足各种需求;

(3) 光效高,节能省电;

(4) 无毒、无害、可回收利用,绿色环保。

半导体照明技术正处于快速发展时期,就 LED 的发光效率来看,2014 年商用的功率型白光 LED 发光效率已经超过 160lm/W ,每年的光效提升量约为 $10\sim 20\text{lm/W}$,预计 2018 年商用功率型白光 LED 的发光效率将达到 260lm/W 左右。同时,器件价格不断下降。目前,每千流明 LED 的价格约为 $50\sim 60$ 元,2018 年将下降到现在的 $1/3$ 。世界主要半导体照明企业的功率型白光 LED 技术发展水平见表 1-1。半导体照明技术及其产品正向更高光效、更低成本、更可靠、更多元化的方向发展。此外,半导体照明的应用领域也将不断拓展,未来超越照明的应用将具有巨大的发展前景。

表 1-1 世界主要半导体照明企业的功率型白光 LED 技术发展水平

| 企业名称 | 350mA 下光效 (研发水平) | 350mA 下光效 (产品水平) | 时 间 |
|--------------|---------------------|---------------------|---------|
| 中国大陆地区企业 | 40~50lm/W | 30~40lm/W | “十五”末 |
| | 120lm/W | 100~110lm/W | “十一五”末 |
| | 150lm/W | 130lm/W | 2013.04 |
| 美国 Cree | 276lm/W | 130~160lm/W | 2013.04 |
| 美国 Lumileds | 250lm/W | 130lm/W | 2013.04 |
| 德国 Osram | 250lm/W | 130lm/W | 2013.04 |
| 日本 Nichia | 250lm/W | 130~150lm/W | 2013.04 |
| 韩国首尔半导体 | 250lm/W | 120~140lm/W | 2013.04 |
| 中国台湾 Epistar | 230lm/W | 120~140lm/W | 2013.04 |

注：数据来源于国家半导体照明工程研发及产业联盟(2013)。

1.2 LED 的失效

如同集成电路一样,LED 器件的故障也是主要由热引起的。这里的热包括两种含义:其一为工作在高温下的热环境;其二为即使工作环境为正常的温度,但是由于芯片、封装、应用系统的“热阻”使得芯片 pn 结处的温度(简称为结温)很高。研究表明结温与环境温度存在对应的关系,由系统的热阻进行关联。由于半导体器件的效率总是低于 100%、芯片材料电阻率不为零等因素,使得一部分输入电功率转换为热,造成在正常机械条件、正常工作电流下的失效。

LED 应用产品得以快速发展,并以超出人们想象的速度渗透到工业、农业、国防及人们的日常生活中,其中一个重要的原因是可靠性高。所谓“可靠性”是指:在规定的条件及规定的时间内产品完成规定功能的能力。衡量可靠性的指标包括:可靠度、故障率、失效率、平均寿命和平均修复时间。研究发现无论是(光)电子器件还是(光)电子系统,其可靠性均遵循“浴盆曲线”规律,即产品的早期有一个高失效的时间段,之后维持一段相当长时间的低故障率、低失效期,再往后又出现了一个高故障率的时间段,直至寿命终止。研究发现造成早期失效的主要原因是(光)电子元器件、PCB 板等原材料存在缺陷,以及生产工艺组装不良,这些缺陷产品可以通过出厂前的老化过程剔除。过了早期失效的阶段后,电子产品进入了浴盆曲线的盆底区域,造成该阶段产品失效的主要原因是产品中个别元器件、部件的随机失效,通常把该段维持的时间叫做产品的使用寿命。最后阶段的高故障率主要是因为构成产品的元器件及材料过了使用寿命开始加速老化,并逐渐失去原有的功能。

电子产品可靠性已经成为一门专门的学科,不再局限于对已经完成的产品进行的各种老化筛选、生产过程中各个环节的检验和试验,已经深入到了产品设计与规划阶段。研究发现由于产品设计缺陷造成的产品失效率约占总失效率的 40%以上,零部件缺陷引起的失效占比约为 30%,制作工艺缺陷引起的失效占比约为 20%,产品运输、使用、维护失误引起的失效占比约为 10%。产品设计阶段与可靠性相关的设计包括:电子系统热