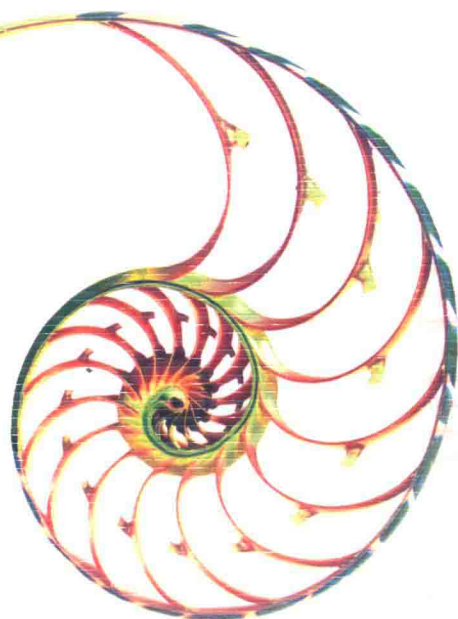


可靠性技术丛书

工业和信息化部电子第五研究所 组编



LED 照明的 质量可靠性研究分析

◎ 主 编 杨 林
◎ 副主编 刘群兴 朱文立



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

可靠性技术丛书

LED 照明的质量可靠性 研究分析

工业和信息化部电子第五研究所 组编

主 编：杨 林

副主编：刘群兴 朱文立

编写组成员：李镇康 徐华伟 刘 菊

王 深 林树坚

主 审：蒋春旭

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了LED照明的发展、应用,以及今后的发展方向,以LED照明产品的质量和可靠性为研究重点,并列举了LED灯具失效案例。全书共5章,包括LED照明概述、产品介绍、产品的质量控制、产品的可靠性、产品的可靠性评价与失效分析等内容。

本书具有较强的系统性、实用性和前瞻性,适合从事LED照明产品的研发设计、生产制造、质量管理的工程技术人员阅读,也可以作为高等院校相关专业师生的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

LED 照明的质量可靠性研究分析/杨林主编;工业和信息化部电子第五研究所组编. —北京:电子工业出版社, 2015.10

(可靠性技术丛书)

ISBN 978-7-121-27168-7

I. ①L… II. ①杨… ②工… III. ①发光二极管—照明—质量管理—可靠性管理—研究 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 224248 号

策划编辑:张 榕

责任编辑:张 榕

印 刷:北京天来印务有限公司

装 订:北京天来印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:14.75 字数:190 千字

版 次:2015 年 10 月第 1 版

印 次:2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

可靠性技术丛书编委会

主 任 谢少锋

副主任 王 勇 陈立辉

委 员 (按姓氏笔画排序)

王晓吟 王蕴辉 刘尚文 纪春阳

张 铮 张增照 张德平 罗道军

赵国祥 胡湘洪 莫郁薇 恩云飞

潘 勇

丛 书 序

以可靠性为中心的质量是推动经济社会发展永恒的主题，关系国计民生，关乎发展大局。把质量发展放在国家和经济发展的战略位置全面推进，是国际社会普遍认同的发展规律。加快实施制造强国建设，必须牢牢把握制造业这一立国之本，突出质量这一关键内核，把“质量强国”作为制造业转型升级、实现跨跃发展的战略选择和必由之路。

质量是建设制造强国的生命线。作为未来10年引领制造强国建设的行动指南和未来30年实现制造强国梦想的纲领性文件，《中国制造2025》将“质量为先”列为重要的基本指导方针之一。在制造强国建设的伟大进程中，必须全面夯实产品质量基础，不断提升质量品牌价值和“中国制造”综合竞争力，坚定不移地走以质取胜的发展道路。

高质量是先进技术和优质管理高度集成的结果。提升制造业产品质量，要坚持从源头抓起，在产品设计、定型、制造的全过程中按照先进的质量管理标准和技术要求去实施。可靠性是产品性能随时间的保持能力。作为衡量产品质量的重要指标，可靠性管理也充分体现了现代质量管理的特点。《中国制造2025》提出要加强可靠性设计、试验与验证技术开发应用，使产品的性能稳定性、质量可靠性、环境适应性、使用寿命等指标达到国际同类产品先进水平，就是要将可靠性技术作为核心应用于质量设计、控制和质量管理的，在产品全寿命周期各阶段，实施可靠性系统工程。

工业和信息化部电子第五研究所是国内最早从事电子产品质量与可靠性研究的权威机构，在我国的质量可靠性领域开创了许多“唯一”和“第一”：唯一一个专业从事质量可靠性研究的技术机构；开

展了国内第一次可靠性培训；研制了国内第一套环境试验设备；第一个将质量“认证”概念引入中国；建立起国内第一个可靠性数据交换网；发布了国内第一个可靠性预计标准；研发出第一个国际先进、国内领先水平的可靠性、维修性、保障性工程软件和综合保障软件……五所始终站在可靠性技术发展的前沿。随着质量强国战略的实施，可靠性工作在我国得到空前的重视，在新时期的作用日益凸显。五所的科研工作者们深深感到，应系统地梳理可靠性技术的要素、方法和途径，全面呈现该领域的最新发展成果，使之广泛应用于工程实践，并在制造强国和质量强国建设中发挥应有作用。鉴于此，五所在建所 60 周年之际，组织专家学者编写出版了“可靠性技术丛书”。这既是历史的责任，又是现实的需要，具有重要意义。

“可靠性技术丛书”内容翔实，涉及面广，实用性强。它涵盖了可靠性的设计、工艺、管理，以及设计生产中的可靠性试验等各个环节，系统地论述了提升或保证产品可靠性的专业知识，可在可靠性基础理论、设计改进、物料优选、生产制造、试验分析等方面为产品设计、开发、生产、试验及质量管理等从业者提供重要的技术参考。

质量发展依赖持续不断的技术创新和管理进步。以高可靠、长寿命为核心的高质量是科技创新、管理能力、劳动者素质等因素的综合集成。在举国上下深入实施制造强国战略之际，希望该丛书的出版能够广泛传播先进的可靠性技术与管理方法，大力推动可靠性技术进步及实践应用，积极推进专业队伍建设。帮助广大的科技工作者和工程技术人员，为我国先进制造业发展，落实好《中国制造 2025》发展战略，在新中国成立 100 周年时建成世界一流制造强国贡献力量！



前言

<<<<< PREFACE

LED 照明作为一种新型的照明技术，不仅具有节能、环保、寿命长、形状多变等特点，而且与白炽灯、卤素灯相比还有便于控制和调光的优势，其应用前景备受瞩目。尤其是随着 21 世纪全球对“低碳”、“环保”理念的推崇，LED 灯势必会逐步取代传统白炽灯、卤素灯和荧光灯，成为第四代照明光源。

近年，在全球环保和能源危机的巨大压力下，LED 照明已被世界公认为一种实现健康、节能、环保的重要照明方式。中国、美国、日本、欧盟等国家和地区纷纷给予 LED 照明企业政策及资金支持，使其实现技术突破，加速 LED 照明的商业化进程。随着政策的推动，相对于 5 年前，LED 灯具的价格降幅不小，性价比提升明显，正引领着 LED 照明从道路照明逐步走进室内公用照明和家居照明。然而，在公众眼中更看重的现实问题是“产品是不是真的节能？”“亮不亮？”“能否像宣传的那样能用 5 年甚至 10 年？”等，这关系 LED 照明产品的质量与可靠性问题，所以进一步推动 LED 照明向传统照明领域渗透，提升产品质量与可靠性对于整个 LED 照明产业来说意义非凡。

本书针对 LED 照明产品普遍存在的质量问题与可靠性问题进行了分析和总结，提出了保障产品质量、提升产品可靠性和产品可靠性评价的技术方法，并结合作者的检测和可靠性研究经验，逐一论证了可靠性评价试验，且对典型失效产品进行了失效分析。

本书在编写过程中参考了国内外一些同仁的文献和资料，在此对他们付出辛勤劳动表示衷心的感谢。

本书的内容具有实用性和前瞻性，以使广大读者能从中受益。但由于编写人员水平有限，本书难免存在欠缺、不当或错误之处，恳请读者批评指正，提出宝贵意见。

编 者

2015 年 9 月

目录

CONTENTS

第 1 章 LED 照明概论	(1)
1.1 LED 的发展	(1)
1.2 LED 基础知识	(3)
1.2.1 LED 工作原理	(3)
1.2.2 LED 的结构	(4)
1.2.3 LED 的主要参数与特性	(5)
1.3 LED 照明产品的特点及存在的问题	(20)
1.3.1 LED 照明产品的特点	(20)
1.3.2 LED 照明产品存在的不足	(23)
1.4 LED 照明产品的应用	(25)
1.5 LED 照明的发展趋势	(27)
1.5.1 智能化	(28)
1.5.2 照明整体解决方案	(29)
1.5.3 新材料尝试	(30)
1.5.4 特殊照明兴起	(32)
第 2 章 LED 照明产品介绍	(35)
2.1 LED 灯具的组成	(35)
2.1.1 LED 驱动电源	(35)
2.1.2 LED 光源模组	(43)
2.1.3 散热器	(44)
2.2 常见 LED 灯具介绍	(46)
2.2.1 LED 路灯	(47)
2.2.2 LED 隧道灯	(47)
2.2.3 LED 景观灯	(49)
2.2.4 LED 筒灯	(50)
2.2.5 LED 灯管	(51)
2.2.6 LED 球泡灯	(53)

2.2.7 LED 射灯	(54)
2.3 知名 LED 企业简介	(56)
第 3 章 LED 照明产品的质量控制	(59)
3.1 LED 照明产品开发的流程	(59)
3.1.1 LED 照明产品开发流程简介	(59)
3.1.2 LED 照明产品方案的制定步骤	(61)
3.2 LED 芯片与封装	(64)
3.2.1 芯片结构	(65)
3.2.2 材料选择	(69)
3.2.3 多颗 LED 常见连接方式	(72)
3.3 LED 驱动电源设计	(76)
3.3.1 LED 驱动要求	(78)
3.3.2 直流驱动	(78)
3.3.3 交流驱动	(82)
3.3.4 电解电容	(84)
3.4 LED 照明产品散热设计	(85)
3.4.1 过热对 LED 照明产品的影响	(85)
3.4.2 LED 芯片的散热	(86)
3.4.3 LED 驱动电源的散热	(90)
3.4.4 LED 散热技术	(98)
第 4 章 LED 照明产品的可靠性	(103)
4.1 LED 照明产品的可靠性问题	(103)
4.1.1 可靠性定义	(103)
4.1.2 可靠性的发展	(104)
4.1.3 LED 灯具可靠性与寿命	(107)
4.1.4 加速寿命试验	(112)
4.2 LED 照明产品寿命预测	(117)
4.2.1 LED 寿命指标的规定	(117)
4.2.2 LED 光输出寿命预测模型	(120)
4.2.3 LED 寿命测试	(122)
4.3 可靠性试验方法	(127)
4.3.1 气候环境试验	(128)
4.3.2 力学环境试验	(130)
4.3.3 化学环境试验	(131)

4.3.4 综合环境试验	(132)
4.4 可靠性试验设备介绍	(133)
4.4.1 知名可靠性设备供应商	(133)
4.4.2 环境试验设备介绍	(135)
第5章 LED照明产品的可靠性评价与失效分析	(142)
5.1 LED照明产品可靠性技术研究现状	(142)
5.2 典型可靠性评价试验	(145)
5.2.1 早期失效筛选试验	(147)
5.2.2 LED室内灯具可靠性定性评价试验	(149)
5.2.3 LED驱动电源的可靠性定性评价试验	(159)
5.2.4 LED器件加速寿命试验与计算分析	(162)
5.3 LED灯具失效的原因及其分析	(173)
5.3.1 LED光源失效	(173)
5.3.2 LED驱动电源失效	(176)
5.4 LED失效案例分析	(179)
5.4.1 案例1——LED灯条	(180)
5.4.2 案例2——LED射灯	(189)
5.4.3 案例3——LED灯管	(198)
5.4.4 案例4——LED筒灯	(204)
5.4.5 案例5——LED球泡灯	(211)
5.5 LED灯具失效的解决方案	(217)
参考文献	(222)

第1章

LED 照明概论

LED (Lighting Emitting Diode) 即发光二极管, 是一种固体半导体发光器件。它是利用固体半导体芯片作为发光材料, 在半导体中通过载流子发生复合放出过剩的能量而引起光子发射, 直接发出红、黄、蓝、绿、青、橙、紫、白色的光。LED 因具有节能、环保、寿命长、色彩丰富等特点, 被称为第四代照明光源或绿色光源, 目前被广泛应用于各种指示、显示、装饰、背光源、普通照明和城市夜景等领域。

本章主要介绍了 LED 基本知识, 着重讨论了 LED 照明产品的特点和存在的问题, 并预测了 LED 照明产品的未来发展趋势。

1.1 LED 的发展

1907 年 Henry Joseph Round 第一次在一块碳化硅里观察到电致发光现象, 但由于其发出的黄光太暗, 不适合实际应用, 并且更难的是碳化硅与电致发光不能很好地相互适应, 所以研究被摒弃了。20 世纪 20 年代晚期 Bernhard Gudden 和 Robert Wichard 使用从锌硫化物与铜中提炼的黄磷发光, 但再一次因发光暗淡而停止。



1936 年, George Destiau 发表了一篇关于硫化锌粉末发射光的报告。随着电流的应用及其被广泛的认识, 最终出现了“电致发光”这个术语。20 世纪 50 年代, 英国科学家在电致发光的实验中使用半导体砷化镓发明了第一个具有现代意义的 LED, 并于 60 年代面世。据说在早期的试验中, LED 需要放置在液化氮里, 要进一步操作与突破才能高效率地在室温下工作。第一个商用 LED 只能发出不可见的红外光, 但被迅速应用于感应与光电领域。60 年代末, 在砷化镓基体上使用磷化物发明了第一个可见的红光 LED。磷化镓的改变使得 LED 更高效, 发出的红光更亮, 甚至产生橙色的光。

到了 70 年代中期, 磷化镓被作为发光光源, 可以发出灰白绿光。采用双层磷化镓芯片(一个是红色, 另一个是绿色)的 LED 能够发出黄色光。就在此时, 苏联科学家利用金刚砂制造出发黄光的 LED。

80 年代早期到中期对砷化镓(GaAs)、磷化铝(AIP)的使用使得第一代高亮度 LED 从此诞生, 发出的光先是红色, 然后是黄色, 最后为绿色。到了 90 年代早期, 采用镓铝磷化镓生产出了能够发出橘红色、橙色、黄色和绿色光的 LED。第一个具有历史意义的蓝光 LED 也出现在 90 年代早期。依当今的技术标准去衡量, 它与苏联以前的黄光 LED 一样光源暗淡。

1993 年日亚化学公司的中村修二人开发出首个明亮蓝色的氮化镓 LED, 凭借此成就, 他获得了 2014 年诺贝尔物理学奖。或许更为重要的是, LED 行业利用这种新技术开始白色 LED 的商业化生产。

1.2 LED 基础知识

1.2.1 LED 工作原理

LED 是一种半导体二极管，由 III-IV 族化合物，如 GaAs（砷化镓）、GaP（磷化镓）、GaAsP（磷砷化镓）等半导体材料制成。LED 在内部结构上有 P 区和 N 区，两区相交而形成 PN 结，P 区带有过量的空穴，N 区带有过量的电子，并朝对方扩散，如图 1-1（a）所示。随着扩散的进行，在 PN 结处会最终形成一个高度为 $e\Delta V$ 的势垒，阻止电子和空穴进一步扩散，达到平衡状态，如图 1-1（b）所示。当 LED 工作时，在正向电压的作用下，即 P 型材料接正极，N 型材料接负极时，PN 结势垒将降低，N 区大量电子向 P 区注入，P 区的空穴也注入到 N 区，从而形成非平衡状态。这些注入的电子和空穴在 PN 结处相并遇发生复合，复合时得到的能量以光能的形式释放出去，从而使得 PN 结能发光，如图 1-1（c）所示。这种发光也称为注入式发光，光子的能量由带间隙决定。此外，一些电子被无辐射中心俘获，能量以热能的形式散发，这个过程被称为无辐射过程。

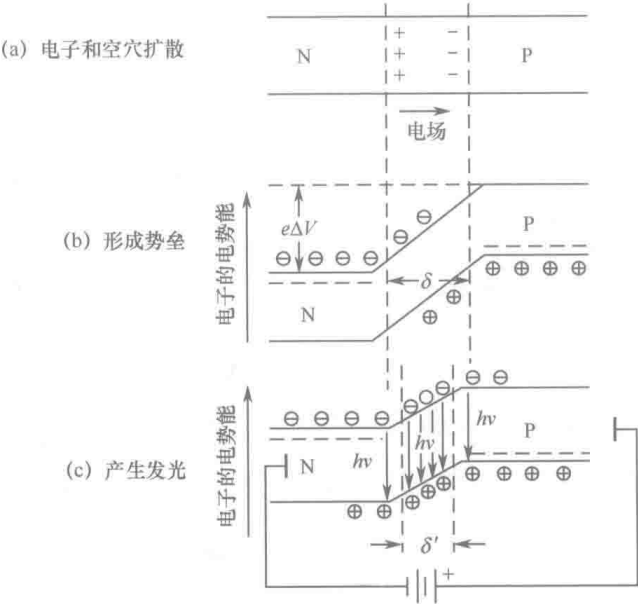


图 1-1 LED 工作原理图

1.2.2 LED 的结构

LED 的基本结构是一块电致发光的半导体材料，置于一个有引线的支架上，四周用环氧树脂密封以保护内部芯线，如图 1-2 所示。LED 的两根引线中较长的一根为正极，应接电源正极。有的 LED 的两根引线一样长，但管壳上有一个凸起的小舌，靠近小舌的引线是正极。另外，LED 芯片是由 P 型层、N 型层、发光层、外延层、衬底、P 型电极、N 型电极、透明导电层等部件构成，具体结构如图 1-3 所示。

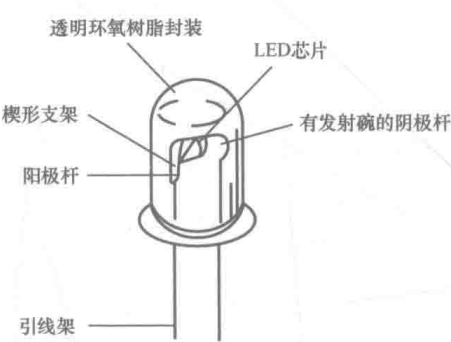


图 1-2 LED 结构图

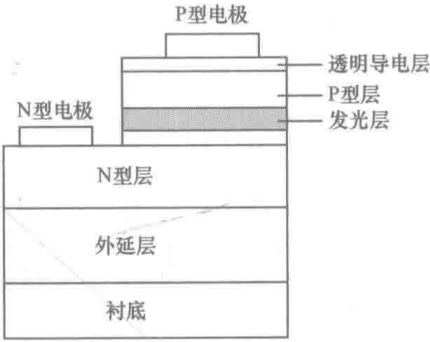


图 1-3 LED 芯片结构图

1.2.3 LED 的主要参数与特性

LED 是一种可发光的二极管,除了具有发光特性之外,还具有普通半导体整流二极管的特性。

1. LED 的电气特性

1) LED 的伏—安 (V - I) 特性

LED 的伏—安特性是流过芯片 PN 结的电流随施加到 PN 结两端的电压变化的特性,它是衡量 PN 结性能的主要参数,也是 PN 结制作优劣的重要标志。完整的 LED 伏—安特性包含正向特性和反向特性两个方面。LED 与普通整流二极管一样,都具有单向导电性和非线性特性。如图 1-4 所示为 LED 的伏—安特性曲线。

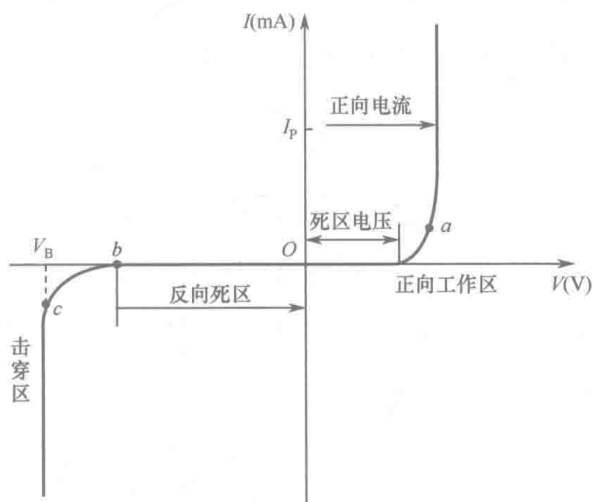


图 1-4 LED 伏—安特性曲线

LED 的伏—安特性曲线可以划分为正向特性区、反向特性区和反向击穿区 3 个区。

a) 正向特性区

在 LED 两端加以正向电压,就产生正向电流。但是,当这个电压



比较小的时候，由于外部电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动所造成的阻力，因此，通过 LED 的电流很小，LED 呈现的电阻较大。当 LED 两端的电压超过一定数值（这个数值通常称为死区电压）以后，内部电场将被大大削弱，LED 的电阻将变得很小，电流也会增长得很快（如图 1-4 中的 a 点）。LED 是 PN 结二极管的一种，其正向伏—安特性可以表示为

$$I_F = I_S (e^{\frac{qV_F}{nkT}} - 1) \quad (1-1)$$

式中， I_S 为反向饱和电流 (A)； q 为电子电荷量， $q=1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ； n 为常数， $n=1 \sim 2$ ； k 为玻耳兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为热力学温度，在温度为 25°C 时， $T=273+25=298\text{K}$ ， $q/kT \approx 39/\text{V}$ ， $KT/q \approx 26\text{mV}$ 。由此可见，LED 的正向电流 I_F 与正向电压 V_F 之间呈指数关系，而且当 V_F 为几百毫伏时，指数幂远大于 1，故上式可简化为

$$I_F = I_S e^{\frac{qV_F}{nkT}} \quad (1-2)$$

LED 的正向电流 I_F 是指 LED 正常发光时的电流值。如果正向电压 V_F 小于其门限电平，那么通过 LED 的电流则太小而使其不能发光。在实际应用中， I_F 通常选择 LED 最大工作电流的 60% 以下。LED 的正向电压则是在给定正向电流 I_F 下的实测电压值。对于普通 LED，这个给定正向电流通常为 20mA；而对于功率级白光 LED， V_F 是在几百毫安（如 350mA）的正向电流下测得的，其值一般为 3~4V，远大于小功率彩色 LED 的 1.5~2.8V 的正向电压值。如图 1-5 所示为 AlInGaP LED 和 InGaN LED 实际的伏—安特性曲线。

LED 的正向伏—安特性用如图 1-6 所示的线性模型来描述更为简便和实用。从图 1-6 可见，伏—安特性曲线的电流较大区域基本上是一个线性区域，取两点做一条直线，这条直线的函数就可以用来描述该区域