

Technology
实用技术

LED 照明设计 与应用

(修订版)

〔日〕LED照明推进协会 编 / 李农 杨燕 译



科学出版社

LED 照明设计与应用

(修订版)

〔日〕LED 照明推进协会 编

李 农 杨 燕 译

科学出版社

北 京

图字：01-2012-1903 号

内 容 简 介

本书是一部关于 LED 照明的系统读物,主要由五部分组成,即基础篇、测试方法篇、设计指南篇、应用篇与资料篇。通过阅读本书可帮助读者全方位了解 LED 的工作原理、测试方法、设计原理与应用等方面的知识,此外本书的资料篇,相信读者在实际应用时也会有一定的参考价值。本书通过大量的插图与表格对内容进行深入浅出的论述,使之达到了通俗易懂、简明扼要的效果,非常适合读者学习。

本书可作为照明相关领域的专业参考书,而且对希望系统全面了解 LED 照明知识的人士而言,也将是一部不可多得的专业读物。

图书在版编目(CIP)数据

LED 照明设计与应用(修订版)/(日)LED 照明推进协会编;李农,
杨燕译;—北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-033884-6

I. L… II. ①L…②李…③杨… III. ①发光二极管-照明-设计
②发光二极管-照明-应用 IV. TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 048664 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张: 14 插页 2

印数: 1—4 000 字数: 178 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

执笔者一览

太田 光一	LED 照明推进协会 理事长
大谷 义彦	LED 照明推进协会 会长 (日本大学生工学部)
田中 收	SANYU REC 株式会社
宫胁 善照	SANYU REC 株式会社
加藤 正明	夏普株式会社
小西 胜之	夏普株式会社
清水 惠一	东芝照明株式会社
田牧 真人	丰田合成株式会社
石川 克彦	松下电工株式会社
鱼住 拓司	岩崎电气株式会社
上田 信一	牛尾照明株式会社
高桥 博之	NEC 照明株式会社
铃木 量	日本欧司朗株式会社
木本 徳胤	京瓷株式会社
安藤 正道	小丝工业株式会社
细野 慎介	小丝工业株式会社
金森 正芳	西铁城电子株式会社
安田 刚规	昭和电工株式会社
堀尾 直史	斯坦雷电气株式会社
金森 章雄	星和电机株式会社
林 坚太郎	星和电机株式会社
上野 幸治	大光电机株式会社
江桥 克巳	三菱化学株式会社
木岛 直人	三菱化学株式会社
石井 慎二	三菱电机照明株式会社

小山 博司	株式会社 因幡电机制作所
高桥 弘三	株式会社 远藤照明
大嶋 浩正	大塚电子株式会社
十龟 寿水	ORDERIC 株式会社
中村 幸夫	株式会社 Oki 数字成像
山口 隆夫	株式会社 OPTO 系统
齐藤 武彦	株式会社 共进电机制作所
蓑毛 卓	株式会社 共进电机制作所
铃木 伸幸	三肯电气株式会社
本池 达也	三洋电机株式会社
小西 淳	CCS 株式会社
增村 茂树	CCS 株式会社
冈田 透	株式会社 芝崎
秋永 良典	信号电材株式会社
泉 圣志	住友金属矿山株式会社
中村 孝夫	住友电气工业株式会社
仁义 健	株式会社 大关
小山 真吾	TECDIA 株式会社
野口 纪仁	TECDIA 株式会社
河本 康太郎	株式会社 TEKNOLOGUE
高原 武	根本特殊化学株式会社
堺 正二	株式会社 MARUWA SHOMEI
沟田 丰彦	吉川化成株式会社
小紫 正树	LED 照明推进协会
松本 稔	LED 照明推进协会
上村 拓男	LED 照明推进协会
井出 修二	山田尖端科技株式会社

译者序

近年来随着中国政府大力推进实施节能减排政策,节能的意识在不断加强,人们已认识到节能的重要性与迫切性。而作为占总用电量近三分之一的各类照明,更是一个需要节能的“大户”。

LED 半导体光源除具有寿命长、发热量少、维护量少、光色可变等众多优点外,更重要的是具有巨大的节能潜力。LED 虽走向市场的时间不长,但已显露出众多不同于传统光源的优势,因此不论从发光机理、理论光效极限,还是从发展与应用速度来看,都堪称作为一种崭新的光源,因此称其为“第四代光源”或“第三代电光源”是名副其实的。而且从实际应用的角度来看,由于其体积小、抗震性强、耐候性好、响应时间短等优点,可以说具有无限的应用领域与范围。

对于这样一个“好东西”理应尽早让各应用领域的相关人员有所了解与认识,并尽早地加以利用,这既是作者编著此书的目的,也是译者翻译此书的心愿。

本书是《LED 照明设计与应用》¹⁾的修订版,仍由原先的五个部分组成,即基础篇、测试方法篇、设计指南篇、应用篇与资料篇。相对于第一版而言,整体上改动较大,其中修订最多的三大部分是基础篇中白光 LED 的工作原理与制作工艺部分,设计指南篇中 LED 照明的安全性评价部分,以及应用篇中 LED 照明的各种实例部分。本书采用了大量的插图与表格,达到了对内容深入浅出的论述效果,使之更加通俗易懂,简明扼要,因此非常适合初学者学习。

本书翻译的指导思想是忠实原文,除对原文个别国体上不符合国情的地方进行修改外,其余均按原书译出。由于译者日常教学与科研工作非常繁重,故本书的翻译大多是利用业余时间进行的,显然本书所涉及的领域如此宽广,时常令译者深感能力的不足,因此书中多少还会存在一些不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

1) 《LED 照明设计与应用》于 2009 年由科学出版社出版。

最后,借此机会向我的爱妻杨燕女士表示深深的谢意,没有她无怨无悔的帮助与支持,我就不可能在如此繁忙的工作中完成本书的翻译。

北京工业大学城市照明规划设计研究所 所长

国家高级照明设计师

李农 博士(教授)

2011年12月

修订版序

LED 照明设计与应用》第一版发行已过去近 3 年了。当时是以将要从事 LED 的人们为对象,以 LED 相关厂家技术人员易于理解的技术书为目标而编写的。而本书,无论是书籍还是电子版,现在不仅仅是 LED 的技术人员,已被照明设计师、建筑家、学生等广泛使用。

现在,LED 的发展速度远比我们想象快得多。首先是作为“第四代光源”备受关注,实际上,当时仅仅是一种辅助照明在仪表盘上使用。但最近,开发和制造了很多几乎具有主要照明功能的 LED 照明灯具。其用途也不仅限于室内照明,还有户外照明、汽车灯等非常广泛,有的住宅、商店全部使用 LED。可以想象今后 LED 会继续得到发展,在照明领域起到重要作用。

现在,当重新修改这个资料时,无论作为初学者的入门书,还是从技术发展水平来看,很多地方都存在很大差距。半导体技术虽也发生着日新月异的变化,但 LED 的开发速度更快,比想象得还快。为了多少能够追上技术的进步,今后能够得到广泛的应用,本次将内容做了很大的调整,以最新的信息为基础进行了改编。

近来,LED 作为能够为节能减排作出贡献的照明技术受到世界的瞩目。作为这一备受瞩目技术的相关人员,愿向更多的人宣传 LED,并努力为 LED 技术的发展作出贡献。

LED 照明推进协会 理事长 太田 光一

前言

本书是由 LED 照明推进协会首次推出的照明手册。

目前,虽然已出版了许多有关 LED 的书籍,可以说大部分不是研究机构的研究者就是 LED 制造业的技术人员所著,即写的都是有关开发者眼中的 LED 使用方法。因此,对于想在照明或其他领域使用 LED 的照明设计者、建筑家、学生等来说,有些内容则可能难以理解。

本书是 LED 照明推进协会的会员单位与照明、电子器件、设备、材料、装配等厂家和使用者,以及与其完全不同领域的 LED 相关技术人员在相互沟通的同时,设想读者为上述人群而编写的。

半导体技术正在发生着日新月异的变化,特别是 LED,如今作为“第四代光源”之一,是一颗会发生反复变异、非常活跃的种子。为了适应这种时代的变化,不至于落伍,我们不但编写了可以随时更新、与时俱进、适应变化的本书,而且还将其登载在互联网上。

那些从未接触过 LED 的人们,或第一次注意到 LED 发光的人们,若看了本书后,能够对“第四代光源”产生兴趣,并使半导体光源得到推广,那将是我们非常高兴的一件事。

作为 LED 同伴的半导体激光所发出的单色光在自然界中是不存在的,其很多用途迄今尚未被人类知晓,目前仅用于 CD 和 DVD 的数据读取与写入,以及作为传感器光源在使用。“第一代光源”是篝火,不仅明亮,还可以用于做饭、制作陶瓷、杀菌、科学分析等方面;同样“第二代光源”的白炽灯,以及“第三代光源”的荧光灯等光源的许多功能与用途也早已被充分利用。LED 半导体发光被称作“第四代光源”。因此,作为“第四代光源”之一的 LED,其用途可以说是无限的。这种蕴藏无限可能的光,必将在未来大显身手,这将是我们对本书寄予的厚望。

LED 照明推进协会 会长 大谷义彦
(日本大学生产工学部 教授)

目 录

第 1 章 基础篇

1.1 LED 的历史	2
1.1.1 砷(As)类的化合物半导体 LED——GaAs 类的 红外 LED 及 AlGaAs 类的红光 LED	4
1.1.2 砷(As)、磷(P)类化合物半导体 LED——GaAsP 类 红光 LED	4
1.1.3 磷(P)类化合物半导体 LED——GaP 类绿光 LED ...	4
1.1.4 磷(P)类的四元混晶化合物半导体 LED—— AlGaInP 类黄绿光~红光 LED	5
1.1.5 氮(N)类化合物半导体 LED——GaN 类蓝光 LED 与绿光 LED	5
1.1.6 氮(N)类化合物半导体 LED——GaN 类白光 LED	6
1.2 LED 的发光原理(半导体发光原理与性质)	7
1.2.1 何谓 LED(发光二极管)	7
1.2.2 发光二极管与白炽灯的差异	7
1.2.3 发光原理	8
1.2.4 发光波长的分布	10
1.3 白光的原理	11
1.3.1 何为白光	11
1.3.2 白光 LED 的实现方法	13
1.4 LED 光源的特点	16

1.4.1 LED 与传统光源的比较	16
1.4.2 光学特性	19
1.4.3 电气特性	24
1.4.4 可靠性	26
1.4.5 其 他	27
1.5 白光 LED 器件	28
1.5.1 白光 LED 器件的构造与性能	30
1.5.2 构成材料——封装树脂	33
1.5.3 构成材料——荧光粉	37
1.5.4 构成材料——LED 芯片	40
1.5.5 构成材料——外罩	42
1.6 白光 LED 器件的制造	46
1.6.1 晶锭生成(单晶制造)	46
1.6.2 单晶晶片制造	51
1.6.3 外延层生长	55
1.6.4 LED 芯片制造	58
1.6.5 白光 LED 器件制造	64
1.7 热点话题(新技术介绍)	67
1.7.1 LED 用荧光粉	67
1.7.2 GaN 衬底 LED	73

第 2 章 测试方法篇

2.1 电气特性的标准和测试方法	80
2.2 光特性的标准与测试方法	81
2.3 温度特性的标准与测试方法	85
2.4 热特性的标准与测试方法	86
2.5 寿命的标准与测试方法	87
2.6 可靠性的标准与测试方法	87

2.7 安全性的标准与测试方法	91
附 录 相关标准与组织一览表	93

第 3 章 设计指南篇

3.1 照明灯具的设计流程	96
3.1.1 照明灯具的要求	96
3.1.2 综合效率	97
3.1.3 LED 芯片的选择与工作点设定	97
3.1.4 配光控制方式的选择	98
3.1.5 电路方式的选择	99
3.1.6 散热设计	99
3.2 光学设计	100
3.2.1 概 述	100
3.2.2 使用需求的确定	100
3.2.3 LED 芯片的选定	100
3.2.4 光学设计	101
3.3 电路设计	103
3.3.1 概 述	103
3.3.2 LED 基本特性	104
3.3.3 LED 驱动方式	105
3.3.4 亮度控制	108
3.3.5 LED 的集成电路	109
3.3.6 电源电路	111
3.3.7 电源系统	114
3.4 可靠性设计	116
3.4.1 散热设计	116
3.4.2 静电防护	120
3.5 安全设计	124

3.5.1 概 述	124
3.5.2 安全设计与法规	125
3.5.3 具体的安全设计	125
3.5.4 法律法规	128
3.5.5 对人体的影响和生物安全性	133
3.5.6 对环境的影响	145
3.5.7 小 结	146

第4章 应用篇

4.1 照明领域	148
4.1.1 住宅领域	148
4.1.2 设施领域	155
4.1.3 店铺领域	157
4.1.4 室外领域	160
4.1.5 效果表现领域	164
4.2 背光领域	167
4.3 道路交通领域	169
4.3.1 LED 信号灯	169
4.3.2 隧道标识灯	169
4.3.3 路 灯	170
4.3.4 步道灯	171
4.3.5 防犯灯	171
4.3.6 庭院灯	172
4.4 移动物体领域	172
4.4.1 汽 车	172
4.4.2 火车车厢	173
4.5 标识与显示屏领域	174
4.5.1 标识领域	174

4.5.2 彩色显示屏领域	177
4.6 其他领域	180

第5章 资 料 篇

5.1 用语解释	186
5.2 LED照明推进协会的活动	192
5.3 主要企业的技术与产品信息	196



第 1 章

基 础 篇

20世纪末开始批量生产蓝光LED（light emitting diodes）后，其与红、绿光LED所构成的光的三原色就都聚集在了LED的世界里，就像做梦一样，白色和全色LED都已变成了现实。随着亮度的不断提高，LED开始广泛地应用于彩色广告牌、交通信号灯、各种照明电器、手机显示屏背光等领域，如果LED更亮，替代白炽灯和荧光灯作为通用照明光源的时代则马上就会到来。

第1章在回顾LED发展史的同时，将针对LED为什么能发光，与荧光灯等光源有何区别，具有什么样的特点与性能，以及如何构成，怎样制造等方面的内容进行讲解，并尽量以白光LED为重点加以阐述。

1.1 LED 的历史

1907 年,首次发现作为研磨剂的碳化硅晶体(SiC)通电后可以发光的现象^[1,2]。该发光现象与火光、放电光、黑体辐射不同,是一种固体物质通电后发光的新形态。这种现象被发现之后,人们就对 SiC 和 II-IV 族化合物半导体的矿物质发光现象展开研究。

20 世纪 50 年代后,随着半导体知识的不断积累,以及人工制作发光结构技术的不断提高,人们开始尝试利用半导体晶体的发光现象。1952 年人工合成的 Ge、Si 晶体的 pn 结发光,促成了 1954 年人工合成 GaP 晶体发光的诞生^[1,2]。

如本节所述,近年来,提高 LED 性能的技术革命令人瞩目,并得到了飞跃式发展,如图 1.1 和表 1.1 所示。

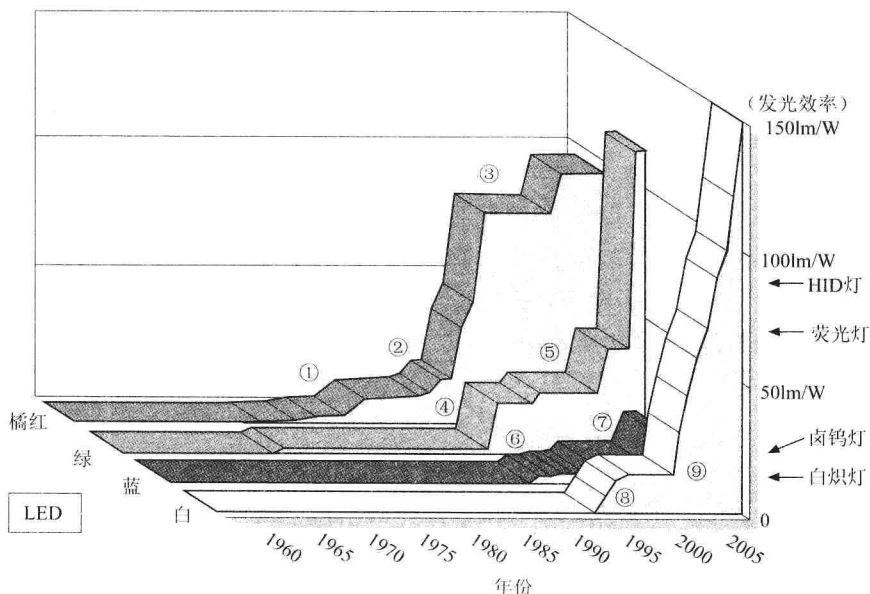


图 1.1 LED 的性能提高^[1~6]

表 1.1 LED 的发展历史

年		关键技术的突破
1954		开始制作、研究 GaP 单晶的性能
1954		开始制作、研究 GaAs 单晶的性能
1955		观测到 GaP 发光现象
1962		观测到 GaAs 的 pn 结发光现象
1962		开发出 GaAs 类红外(870~980nm)LED,LD
1962		开发出 GaAsP 类红光 LED
1963		开发出 GaP 类红光 LED
1963		观测到 α -SiC 二极管的蓝光强波峰
1965		在 GaP 中引入了 N 等电子发光中心
1966		GaAs 类红外 LED,外部量子效率达 6%
1967		GaP;Zn-O 类红光 LED,外部量子效率达 2%
1969		SiC 类蓝光 LED,电光转换效率达 0.005%
1969		GaP 类红光 LED,外部量子效率达 7.2%
1969		GaP 类绿光 LED,外部量子效率达 0.6%
1971		观测到 GaN 的 MIS 构造二极管发蓝光与绿光现象
1972		开发出 GaAsP 类黄光 LED,外部量子效率达 0.2%
1972	④	GaP;Zn-O 类红光 LED,外部量子效率达 15%
1977	①	GaAsP 类红光 LED,外部量子效率达 0.1%
1981	⑥	确认 GaN 类的蓝色发光
1985	②	开发出 AlGaInP 类橙色 LED
1986		开发出 GaN 类 AlN 低温堆积缓冲层技术
1992		GaN 类的蓝色 pn 同质结二极管,外部量子效率达 1%
1994		pn 结型 GaInN/AlGaIn 异质结高亮度蓝光 LED(1cd 级)
1995	⑦	GaInN 双异质结蓝光 LED,外部量子效率达 10%
1995	⑤	开发出 GaInN 类绿光 LED
1997	⑧	开发出使用荧光粉的白光 LED,光效达 5lm/W
2001	③	AlGaInP 类:附着在透明衬底及衬底加工
2002	⑨	蓝光激发黄色荧光粉产生的白光 LED 的性能提高,光效达 62lm/W
2004		蓝光激发黄色荧光粉产生的白光 LED 的性能提高,光效达 80lm/W

注:编号与“图 1.1 LED 的性能提高”的标注相对应。

1.1.1 砷(As)类的化合物半导体 LED——GaAs 类的红外 LED 及 AlGaAs 类的红光 LED^[1,2]

1954 年从研究 GaAs 晶体生长开始,针对 GaAs 衬底的气相外延生长法(vapor-phase epitaxy, VPE)和液相外延生长法(liquid-phase epitaxy, LPE)进行了大量的研究。1962 年发表了有关 GaAs 红外 LED 和红外激光二极管(laser diode, LD)的研究报告,并在世界上首次销售 GaAs 类红外 LED(发光波长 870nm,价格 130 美元)。随后在 GaAs 中掺入微量的 Si 后,发现仅改变生长温度就可以生长出优良的 pn 结晶体,由此生产出了外部量子效率高达 6%、质量很高的 GaAs 类红外 LED。

有关 GaAs 中加入 Al 的三元混晶类的 AlGaAs 类 LED,当初把与 Al 亲和力较高的氧气混合到结晶中后,虽发生过不发光的问题,但自 1968 年 AlGaAs 外延膜生长法成功后,便实现了 AlGaAs/GaAs 类的高效率红外 LED。该类别的 LED 作为遥控器、LAN(local area network)的光源正在被广泛地应用。

1.1.2 砷(As)、磷(P)类化合物半导体 LED——GaAsP 类红光 LED^[1,2]

1962 年首次实现了可见光 LED,它是通过 GaAs 衬底上生成 GaAsP 外延膜而实现的。1968~1970 年由于各公司竞相采用 LED 作为计算器、手表显示器的光源,因此每隔数月销售量便翻倍,创下了惊人的销售记录。

1.1.3 磷(P)类化合物半导体 LED——GaP 类绿光 LED^[1,2]

1963 年初次实现了 GaP 的 pn 结红光 LED。不同于直接迁移型的 GaAs, GaP 是间接型半导体,发出的光亮度比预想的要高,这在当时还是个谜。1965 年,提出由于在 GaP 中添加杂质后,在杂质离子的附近电子和空穴易聚集的构造。

1968 年,首次发表了在 GaP 中添加 N 后可生成绿光 LED 的报