

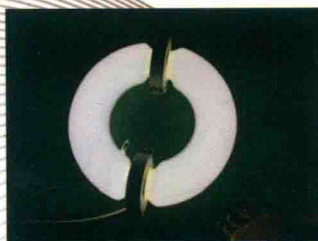
半导体光源 (LED,OLED) 及照明设计丛书

光源原理 与设计 (第三版)

复旦大学电光源研究所 (光源与照明工程系)
国家半导体照明工程研发及产业联盟

编著

郭睿倩 主编 阮军 副主编



上海高校服务国家重大战略出版工程

半导体光源（LED,OLED）及照明设计丛书

光源原理 与设计

（第三版）

复旦大学电光源研究所（光源与照明工程系）
国家半导体照明工程研发及产业联盟

编著

郭睿倩 主编 阮军 副主编

 复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光源原理与设计/郭睿倩主编;复旦大学电光源研究所(光源与照明工程系),国家半导体照明工程研发及产业联盟编著.—3版.—上海:复旦大学出版社,2017.12
ISBN 978-7-309-13239-7

I. 光… II. ①郭…②复…③国… III. 电气照明-光源-基本知识 IV. TM923.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第219568号

光源原理与设计(第三版)

郭睿倩 主编

复旦大学电光源研究所(光源与照明工程系) 编著
国家半导体照明工程研发及产业联盟
责任编辑/范仁梅

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路579号 邮编:200433

网址: fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com

门市零售: 86-21-65642857 团体订购: 86-21-65118853

外埠邮购: 86-21-65109143 出版部电话: 86-21-65642845

上海丽佳制版印刷有限公司

开本 787×1092 1/16 印张 33.5 字数 754 千

2017年12月第3版第1次印刷

ISBN 978-7-309-13239-7/T·610

定价: 158.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司出版部调换
版权所有 侵权必究



内 容 提 要

《光源原理与设计（第三版）》（第一版全部内容为传统光源，荣获“中国轻工业科技进步一等奖”；第二版专门增加了一章，介绍半导体光源，但只占书内容的1/12，其余还是传统光源）在前两版的基础上，保留了部分传统光源的内容，如热辐射光源和气体放电光源；大幅度增加了半导体光源（LED和OLED）的内容，使其约占全书的2/3，以全面反映最近10多年来国内外光源科技发展的最新成果。

本书共7章，论述了从传统光源到半导体光源（LED和OLED）的原理、特性与设计。为便于读者掌握以上内容，还介绍了光辐射、气体放电，以及光度学、色度学基础等知识。

本书可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教材，也可供从事照明行业生产、开发和研究的工程技术人员、高等院校教师及科研人员参考。

编 委 会

顾 问：周太明

主 编：郭睿倩

副主编：阮 军

编著人员(以姓氏笔画为序)：

牛萍娟 田朋飞 区琼荣 阮 军

陈育明 邹念育 张树宇 沈海平

余彬海 周 详 林燕丹 郭睿倩

崔旭高



序 Foreword

很高兴看到《光源原理与设计》(第三版)和读者见面。应新版主编、复旦大学信息学院光源与照明工程系主任郭睿倩教授之邀为本书做序,提笔之时,感慨万千。

中国的经济和科技都在迅速发展。这种发展的直接体现或许是一些统计数据,而每一项统计数据的背后,都有中国在相应经济和产业领域中实实在在的进步。就光源(尤其是照明光源)而言,中国不仅是世界第一大消费(应用)国家,也早就成为第一大生产(制造)国,还在大步向强国迈进。最令国际同行们惊奇的是,中国在 20 世纪 90 年代成为传统光源的第一大生产国之后,又用 10 年左右的时间完成了一次漂亮的“与时俱进”,快速成为本世纪初才刚刚兴起的半导体照明光源第一大生产国,在应用推广普及方面还走在世界前列。今天,半导体照明光源和高铁一样,已是中国在高技术产业领域中的一张亮丽名片。因此,本书在保留传统(热辐射和气体放电)光源相关内容的基础上,大幅度增加了半导体光源(LED 和 OLED)的内容,以全面反映进入新世纪以来国内外光源科技和产业发展的最新成果,也展示了中国业界的能力和水平。

在前两版的基础上,新版由复旦大学电光源研究所(光源与照明工程系)和国家半导体照明工程研发及产业联盟联合编著。复旦大学是新中国传统光源的研发代表和“黄埔军校”,近年来又在半导体光源



的研发和应用方面做了大量工作；在中央政府多部门和全国众多地方政府的大力支持下，国家半导体照明工程研发及产业联盟在协助制定产业政策、组织重大攻关项目、开拓应用市场、促进国际技术交流和推动中国产品走向世界等诸多方面都发挥了不可替代的重要作用，得到了国内业界和国际同行的高度认可，被公认为中国最有影响力、做得最好的产业联盟。由这两家来联合编著，不仅更具权威性和代表性，这种合作本身也是我国科技进步和产学研结合不断深入的一个具体体现。

我是“文革”结束恢复高考后的第一批进大学的学生，当年就读的就是复旦大学光学系电光源专业——今天光源与照明工程系的前身。我当年的不少同学至今还活跃在照明行业，以蔡祖泉先生为代表的一大批复旦老师给我的教诲、指导和帮助永远鲜活地留在我的记忆中。离开母校之后，不论是在中国科学院还是在国家科技部，不论是做研究还是做管理，我都和母校保持着相当密切的联系。在科技部工作的10多年里，作为分管领导，我参加了国家半导体照明工程研发及产业联盟几乎所有的重要活动和国际交流，了解联盟的艰难成长历程，也感受了联盟不断成功的喜悦和自豪。近年来，我还一直在推进复旦大学和联盟加强合作，本书的新版也是众多合作成果中的一个代表。

衷心希望本书的内容对每一位读者的工作、学习和生活能有所帮助。我和本书的编著者将和你们一起继续努力，使中国的光源行业之教育、研发、产业和应用不断前进，尽快全面走到世界前列。

曹健林

2017年9月



前言 *Preface*

《光源原理与设计》自 1993 年出版以来,迄今第三版即将问世。第一版由周太明教授编著。该书作为复旦大学光源与照明工程系本科生的教材和行业内工程技术人员的参考书,一直深受广大学生和科技人员的喜爱。鉴于该书的学术影响力以及其在培养我国光源科技人才方面所起的积极作用,1997 年荣获中国轻工业科技进步一等奖。2006 年,由周详、蔡伟新参与编著的第二版出版,增加了很多内容,尤其是新增了一章“电致发光光源”。该版继续得到学界和业界广大同仁的认可。

在本书第二版问世后的 10 多年里,国内外光源科技又有了迅猛的发展。周太明教授建议应将原书修订再版,以反映由半导体光源引发的照明革命,满足新、老读者的需求。经与梁荣庆教授研究,他赴京与吴玲秘书长和阮军副秘书长商讨,决定强强联合,由复旦大学电光源研究所(光源与照明工程系)和国家半导体照明工程研发及产业联盟联合编著本书。

随着科学技术的日新月异,大学教材内容的同步更新显得特别重要。半导体光源作为第四代光源(包括 LED 和 OLED 等)具有光效高、寿命长、功耗低、启动时间短、结构牢固等特点,更重要的是它可控,能实现亮度和颜色等的变化,是实现智能化照明最理想的光源。《光源原理与设计》(第三版)的编著,是在前两版的基础上保留了部分



传统光源的内容,如热辐射光源和气体放电光源;大幅度增加了半导体光源(LED和OLED)的内容,以全面反映最近10多年来国内外光源科技发展的最新成果。

本书是集体劳动的成果。周大明教授是本书的顾问,一直关心本书的编著工作,并给予指导。阮军作为本书的副主编,对本书的大纲设计和编撰人员组成给予了很多指导意见,并且审阅了书稿的有关章节,提出了宝贵的修改建议。周详撰写了第一章;陈育明撰写了第二、第三章;崔旭高负责第四章,并与田朋飞、郭睿倩、余彬海、邹念育、牛萍娟和林燕丹合作完成了第四章;张树宇撰写了第五章,区琼荣积极参与;第六、第七章由沈海平完成。

在本书即将付梓之际,我特别要感谢所有积极参与编写工作的各位老师,正是大家的共同努力,才使这部合作撰写的《光源原理与设计》(第三版)得以问世。

吴玲秘书长和梁荣庆教授十分支持本书的编著工作,给予了很多指导;在书稿的修订过程中,潘冬梅、朱嘉弢、张潇临、周莉、尹晓鸿、邱婧婧等也给予了帮助。范仁梅老师为审稿和编辑付出了大量辛勤劳动。本书出版,南京前锦排版服务有限公司做了大量工作。在此,表示诚挚的感谢。

衷心感谢国际半导体照明联盟(ISA)主席曹健林教授在百忙中为本书作序。

我们要特别感谢上海市教育委员会、上海市新闻出版局将本书列入“2016年度上海高校服务国家重大战略出版工程”,感谢学校和出版社的倾情推荐。

所有编写人员都认识到这是一项光荣而富有意义的任务。希望我们的努力,能为我国光源照明人才培养事业做出积极的贡献。再次衷心感谢所有对本书给予帮助的同仁,也感谢读者对本书的关注。由于我们水平和时间所限,书中如有不当之处,请不吝指正。

郭睿倩

2017年5月



目录 Contents

序	1
前言	1
第一章 光源的特性参量	1
1.1 光源的辐射特性	1
1.2 人眼的视觉	5
1.3 照明光源的光学特性	12
1.3.1 光通量、光强度、光照度、光亮度和光量	12
1.3.2 光效	17
1.3.3 光源的色温和显色性	18
1.4 光源的电气特性和寿命	19
1.4.1 光源的电气特性	19
1.4.2 灯的寿命	21
参考文献	23
第二章 热辐射光源	24
2.1 热辐射	24
2.1.1 热辐射的基本特性	24
2.1.2 黑体辐射	25
2.1.3 实际辐射体	27
2.2 白炽灯	28
2.2.1 白炽灯的基本原理	29
2.2.2 白炽灯的产品	33
2.2.3 白炽灯的工作特性	33



2.3	卤钨灯	34
2.3.1	卤钨循环	34
2.3.2	卤钨灯的结构与制造	38
2.3.3	卤钨灯的应用	42
	参考文献	47
第三章	气体放电灯	48
3.1	气体放电的基本原理	48
3.1.1	气体放电现象	48
3.1.2	帕邢定律	50
3.1.3	光源放电类型	51
3.2	低气压放电灯	52
3.2.1	低气压放电原理	52
3.2.2	低压钠灯	54
3.2.3	荧光灯	57
3.3	高气压放电灯	64
3.3.1	高气压放电的基本原理	64
3.3.2	高压钠灯	66
3.3.3	高压汞灯	74
3.3.4	金属卤化物灯	80
3.3.5	氙灯	90
3.4	无极放电灯	92
3.4.1	无极放电光源的类型	92
3.4.2	无极荧光灯	93
3.4.3	微波光源	95
	参考文献	95
第四章	发光二极管	97
4.1	LED的发光原理	98
4.1.1	半导体材料的能带结构	98
4.1.2	复合与发光	103
4.1.3	电致发光	109
4.1.4	LED光效	117
4.2	LED材料体系及器件制备	119
4.2.1	发光条件	119
4.2.2	材料体系	122
4.2.3	红、绿、蓝LED性能的比较	142
4.3	LED材料外延及器件设计	147

4.3.1	LED 材料外延	147
4.3.2	LED 器件设计	190
4.3.3	LED 的光引出	207
4.4	白光 LED 技术及 LED 展望	224
4.4.1	白光 LED 制备	224
4.4.2	LED 技术展望	239
4.5	LED 封装技术	260
4.5.1	LED 封装材料	260
4.5.2	常见 LED 器件	269
4.5.3	LED 散热	272
4.5.4	LED 封装的发展	273
4.6	LED 的驱动技术	274
4.6.1	LED 伏-安特性曲线	275
4.6.2	直流 LED 及其驱动电路	277
4.6.3	高压 LED 及其驱动电路	290
4.6.4	AC LED 及其驱动电路	291
4.6.5	交直流 LED 性能的比较分析	294
4.7	LED 光源的特性和设计	295
4.7.1	LED 光源的特性	295
4.7.2	LED 光源的设计	306
4.8	LED 的应用	321
4.8.1	视觉照明	321
4.8.2	非视觉照明	329
	参考文献	336
第五章	有机电致发光器件	347
5.1	OLED 的发展简史	347
5.2	有机材料的电子结构与发光原理	350
5.2.1	有机材料的电子结构	350
5.2.2	有机材料的发光原理	355
5.2.3	激子的相互作用与能量转移	364
5.3	OLED 的器件物理	367
5.3.1	载流子注入与输运	367
5.3.2	OLED 的器件结构	372
5.3.3	OLED 的光取出	376
5.4	OLED 的器件制备	384
5.4.1	基片处理	384
5.4.2	真空镀膜法	385



5.4.3	溶液成膜法	387
5.4.4	微纳光学结构制备	391
5.4.5	器件封装	395
5.5	OLED 的重要参数及表征方法	398
5.5.1	OLED 材料表征	398
5.5.2	OLED 的器件表征	408
5.6	OLED 的显示与照明	412
5.6.1	OLED 显示技术	412
5.6.2	OLED 白光照明	415
	参考文献	416
第六章	光度学基础	423
6.1	光度学基本原理与定律	423
6.1.1	距离平方反比定律	423
6.1.2	朗伯余弦定律	424
6.1.3	阿贝定律	424
6.1.4	叠加原理	425
6.2	照度测试	426
6.2.1	余弦修正	426
6.2.2	光谱失配修正	427
6.2.3	照度计原理	428
6.3	光强测试	428
6.3.1	目视光度法	428
6.3.2	物理光度法	430
6.3.3	光强分布测试方法	430
6.4	亮度测试	431
6.4.1	典型亮度计结构	431
6.4.2	亮度计校准	432
6.5	光通量测试	433
6.5.1	积分球测试方法	433
6.5.2	分布式光度计测试方法	437
6.6	光谱测试	441
6.6.1	光源光谱功率分布的测试	441
6.6.2	扫描式光谱仪	443
6.6.3	多通道光谱仪	443
6.7	LED 光度特性测试	444
6.7.1	光强、光通量及光谱测试方法	444
6.7.2	热阻测试	447

6.7.3 寿命测试	449
参考文献	453
第七章 色度学基础	454
7.1 CIE 标准色度学系统	454
7.1.1 CIE RGB 系统	454
7.1.2 CIE XYZ 系统	459
7.1.3 CIE 均匀颜色空间	475
7.2 色度学标准及基本测试方法	481
7.2.1 标准照明体和标准光源	481
7.2.2 反射率因数标准	489
7.2.3 标准照明条件和观测条件	491
7.3 色品坐标测试	492
7.3.1 光电积分法	492
7.3.2 分光光度法	494
7.4 色温测试	495
7.4.1 普朗克曲线直接计算法	495
7.4.2 罗伯逊法	498
7.4.3 双色法	499
7.5 显色指数测试	501
7.5.1 孟塞尔颜色样品	501
7.5.2 参照照明体	509
7.5.3 CIE 显色指数计算方法	510
7.5.4 CQS 系统	516
7.5.5 IES TM-30 系统	518
7.5.6 CRI 2012 系统	519
参考文献	520



第一章 光源的特性参量

1.1 光源的辐射特性

光是一种电磁波,它的波长区间从几个纳米($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$)到 1 mm 左右。这些光并不是都能看得见的,人眼所能看见的只是其中的一部分,我们把这一部分光称为可见光。在可见光中,波长最短的是紫光,稍长的是蓝光,以后的顺序是青光、绿光、黄光、橙光和红光,其中红光的波长最长。在不可见光中,波长比紫光短的光称为紫外线,比红光长的光叫做红外线。表 1.1.1 列出了紫外线、可见光和红外线区域的大致的波长范围。波长小于 200 nm 的光称为真空紫外,这部分光在空气中很快被吸收,只能在真空中传播。

表 1.1.1 光的各个波长区域

波长区域/mm	区域名称
10~200	VUV(真空紫外)
200~280	UV-C(远紫外)
280~315	UV-B(中紫外)
315~380	UV-A(近紫外)
	} 紫外线
380~435	紫光
435~500	蓝、青光
500~566	绿光
566~600	黄光
600~630	橙光
630~780	红光
	} 可见光
780~1 400	IR-A(近红外)
1 400~3 000	IR-B(中红外)
3 000~1 000 000	IR-C(远红外)
	} 红外线



现在常用的光波波长的单位是 μm 、 nm 和 \AA (埃),它们之间的关系是

$$1 \mu\text{m} = 10^3 \text{ nm} = 10^4 \text{ \AA}.$$

光除具有波动性之外,还具有粒子性。量子论认为,光是由许多光量子组成的,这些光量子具有的能量为 $h\nu$ 。其中, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 是普朗克常数, $\nu = c/\lambda$ 是光的频率,单位是 s^{-1} , $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是真空中光速。量子电动力学较好地反映了光的波粒二象性。

为了研究光源辐射现象的规律,测定供给光源的能量(比如说电能)转换成辐射能效率的高低,通常用下面的一些基本参量来描写光源的辐射特性。

1. 辐射能量 Q_e

光源辐射出来的光(包括红外线、可见光和紫外线)的能量,称为光源的辐射能量。当这些能量被物质吸收时,可以转换成其他形式的能量,如热能、电能等。

辐射能的单位是 cal (卡)、 erg (尔格)和 J (焦耳),它们之间的关系是

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}, 1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}.$$

2. 辐射通量 P_e

在单位时间内通过某一面积的辐射能量,称为经过该面积的辐射通量;而光源在单位时间内辐射出去的总能量,就叫做光源的辐射通量。辐射通量也可称为辐射功率,单位是 W ($= \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$), $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\text{cal} \cdot \text{s}^{-1}$ 等。

3. 辐射强度 I_e

光源在某一方向上的辐射强度 I_e ,是指光源在包含该方向的立体角 Ω 内发射的辐射通量 P_e 与该立体角 Ω 之比,即

$$I_e = P_e / \Omega. \quad (1.1.1)$$

由于光源在各个方向上的辐射强度一般是不均匀的,因此(1.1.1)式表示的辐射强度是在立体角 Ω 内的平均辐射强度。要表明在某一方向的辐射强度,必须将立体角取得很微小(见图 1.1.1)。在包含该方向的微小立体角 $d\Omega$ 内发射的辐射通量 dP_e 与该微小的立体角 $d\Omega$ 之比,定义为光源在该方向的辐射强度 I_e ,即

$$I_e = dP_e / d\Omega. \quad (1.1.2)$$

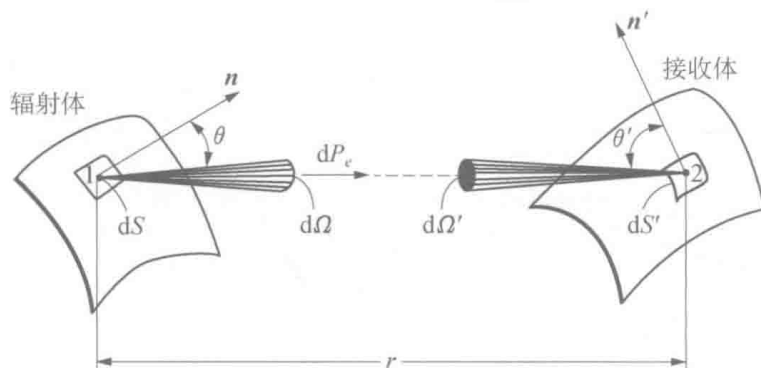


图 1.1.1 辐射和接收

如果光源近似为点光源,可以它为球心、以单位长度为半径,作一球面(见图 1.1.2)。在球面上取一微小面积,它对球心所张的微小立体角为 $d\Omega$,通过它的辐射通量为 $dP_e(\phi, \theta)$,在这个方向的辐射强度为

$$I_e(\phi, \theta) = dP_e(\phi, \theta)/d\Omega. \quad (1.1.2')$$

可以算出 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$,因而

$$dP_e(\phi, \theta) = I_e(\phi, \theta) \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (1.1.3)$$

而光源的辐射通量为

$$P_e = \int dP_e(\phi, \theta) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\phi, \theta) \sin\theta d\theta. \quad (1.1.4)$$

如果光源在各个方向的辐射是均匀的,即辐射强度 $I_e(\phi, \theta)$ 是一个常数($= I_e$),则(1.1.4)式就变成

$$P_e = I_e \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin\theta d\theta = 4\pi I_e. \quad (1.1.5)$$

这就是说,当光源在空间各个方向发出的辐射通量均匀分布时, $I_e = P_e/4\pi$ 是沿任何方向的真正的辐射强度。而在辐射通量分布不均匀时,辐射强度随方向而变, $P_e/4\pi$ 只代表平均的球面辐射强度。对于辐射强度 $I_e(\phi, \theta)$ 随方向而变的各向异性光源,常可用图示的方法来描述。从某一原点起,向各个方向引矢径,取矢径长度之比与相应方向上的辐射强度之比相同。将各矢径的端点连接起来,就得到光源辐射强度的分布曲面。辐射强度的单位是 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

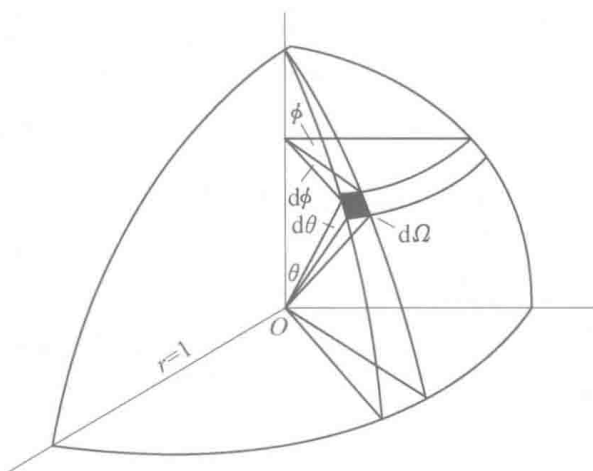


图 1.1.2 微小立体角的表示

4. 辐射出(射)度 M_e 和辐照度 E_e

一个有一定面积的光源,如果它表面上的一个发光面积 S 在各个方向(在半个空间内)的总辐射通量为 P_e ,则该发光面 S 的辐射出(射)度为

$$M_e = P_e/S. \quad (1.1.6)$$

式中, M_e 相当于单位面积的辐射通量,常以 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 表示。

和讨论辐射强度的情况相似,一般光源发光面上各处的辐射出度是不均匀的,所以严格地讲,在发光面某一微小的面积 dS 上的辐射出度应该是该发光面向所有方向(在半个空间内)发出的辐射通量 dP_e 与该面积 dS 之比,即

$$M_e = dP_e/dS. \quad (1.1.7)$$

表示物体被辐射程度的量称为辐照度 E_e ,它是每单位面积上所接收到的辐射通量数,即