

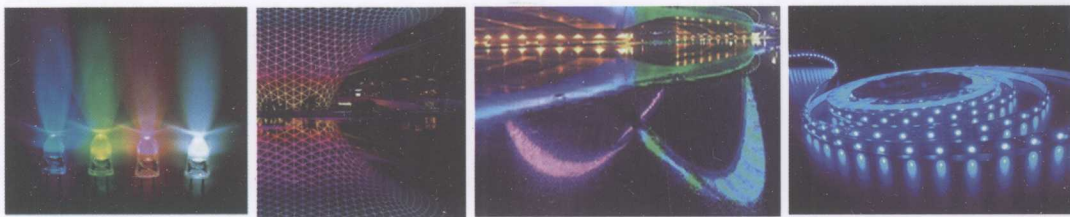


光电信息科学与工程系列教材

半导体照明技术

SEMICONDUCTOR LIGHTING TECHNOLOGY

文尚胜 姚日晖 吴玉香 邵燕宁 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

014035589

TM923.3
03

光电信息科学与工程系列教材

于章、小田林、刘喻春、刘和彦编。前在数高在具。由于LED在照明领域的广泛应用，LED照明技术已成为照明行业的主流。本书在全面介绍LED照明技术的基础上，重点介绍了LED照明技术在实际工程中的应用。本书可作为高等院校光电信息科学与工程专业的教材，也可供从事LED照明技术工作的工程技术人员参考。

半导体照明技术

SEMICONDUCTOR LIGHTING TECHNOLOGY

文尚胜 姚日晖 吴玉香 邵燕宁 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



北航 C1722734

TM 923.3

03

内 容 简 介

在全球性节能减排的低碳经济浪潮中,由于LED具有高效节能、绿色环保、寿命长、体积小、易于集成与智能控制等诸多优点,半导体照明正在引起全球性的照明技术革命。

本书系统地介绍了照明的基础知识和LED的基本原理、基本特性和LED照明的主要技术,内容翔实丰富、简明实用。主要包括光度学、色度学、照明史、LED的基本原理、LED基本特性、LED制备技术、LED照明光学设计技术、LED照明散热设计技术、LED照明电源设计技术、LED照明测量技术、LED照明专利的应用等。

本书可作为高等学校信息显示与光电技术、光电子科学与技术、半导体器件物理、应用物理、微电子物理、材料科学与工程等相关专业本科生的教材,也可供相关专业科技人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体照明技术/文尚胜等编著. —广州:华南理工大学出版社,2013.8

(光电信息科学与工程系列教材)

ISBN 978-7-5623-4077-5

I. ①半… II. ①文… III. ①半导体发光灯-照明技术-高等学校-教材
IV. ①TM923.34

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第263300号

半导体照明技术

文尚胜 姚日晖 吴玉香 邵燕宁 编著

出 版 人: 韩中伟

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学17号楼, 邮编510640)

http://www.scutpress.com.cn E-mail: scute13@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 兰新文

印 刷 者: 广东省农垦总局印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 29 字数: 724千

版 次: 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

印 数: 1~1000册

定 价: 60.00元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

前 言

LED 具有高效节能、寿命长、绿色环保（无紫外光污染和汞污染）、体积小（芯片约 1 mm^2 ）、固体器件、点亮反应快（ $1/1000\text{ s}$ 以内）、白光色温可调（色温 $2800 \sim 10000\text{ K}$ ）、光色质量好（显色指数可高达 95）、低压直流驱动（ $2 \sim 5\text{ V}$ ）、易于集成和智能控制等诸多优点，被认为是 21 世纪最有前景的新光源，将取代白炽灯和荧光灯成为照明市场的主导，使照明技术面临一场新的革命。

目前，世界上的主要发达国家和地区均投入了大量的资金和人力，开展以 LED 为核心的半导体照明技术研究开发，积极抢占半导体照明高端技术制高点，使得整个 LED 产业出现了“井喷效应”，LED 产业现已逐渐发展成为全球性的战略性新兴产业之一。

由于高亮度 LED 技术兴起于 20 世纪末，我国仅有极少数大专院校根据发展的需要，开设了 LED 专业技术课程。但目前市面上关于 LED 技术教材较少，特别是集成 LED 基础理论知识、LED 生产和 LED 检测一体化的教材更是凤毛麟角，因此一本覆盖面广、简洁易懂、具备理论基础但不缺乏实操性和指导意义的 LED 技术教材，是学生学好 LED 课程的基石，也是企业技术人员、管理者和众多的 LED 从业人员的工具书。编者根据自己多年从事 LED 技术研究和教学的经验，以及 LED 产业链构成的实际情况，系统但又有所取舍地精心编辑了 LED 照明的必要的基础知识和关键技术，编写了这本教程。

本书从光度学、色度学基础及 LED 基础知识出发，逐步展开到对 LED 光、电、色技术，测量技术、照明应用和专利分析等论题，行文通俗易懂，并配有大量的理论和实际操作的图表，对涉及 LED 领域的技术进行了多层次多角度的全面探讨，展现给读者的内容不但涵盖了照明基础理论、LED 封装及制造工艺过程、LED 照明技术中的重点和难点问题（如 LED 照明光学设计、LED 寿命、LED 散热、LED 电源驱动、可靠性检验和失效分析等）以及 LED 测量标准、LED 测量仪器、LED 测量的具体细节，甚至包括了目前广东省 LED 标杆检测的相关内容等。出于行文简洁的考虑和教材篇幅的限制，书中未将参考文献详细标注，敬请读者及有关作者原谅。

为了增加本书对有关 LED 产品检测工程师的实用性，特别邀请了广东产品质量监督检验研究院照明室邵燕宁工程师编写第八章“LED 照明测量技

术”；田立新、黄伟明、张剑平、王保争、桂宇畅及赵宝峰等6位硕士生参加了部分章节的编写工作；光电专业2010级和2011级的高斯航、陈月免、陈津桥、陈颖聪、马遥、黄东晨、余志鹏及郑泽科等8位同学参与了书中文字校对工作；华南理工大学出版社对本书的出版给予了大力支持；广东省战略性新兴产业LED专项对本书的出版给予了资助。谨在此一并表示衷心感谢。

限于作者的水平和经验，书中存在的疏漏和错误恳请广大读者批评指正。

编者
2013年5月
于华南理工大学

目 录

1	光度学与色度学基础	(1)
1.1	光度学基础	(1)
1.1.1	光的本质和基本概念	(1)
1.1.2	光的传播特性	(2)
1.1.3	光度量	(6)
1.2	色度学基础	(13)
1.2.1	CIE-RGB 表色系统	(14)
1.2.2	CIE-XYZ 表色系统	(18)
1.2.3	CIE 色度计算	(24)
1.2.4	均匀色空间	(25)
1.2.5	与色彩有关的照明参量	(28)
1.3	人眼的视觉	(32)
1.3.1	人眼的构造	(33)
1.3.2	人眼的视觉特性	(34)
2	照明基础	(40)
2.1	照明历史	(40)
2.2	自然光源	(42)
2.3	人工光源	(43)
2.3.1	白炽灯	(43)
2.3.2	卤钨灯	(44)
2.3.3	荧光灯	(45)
2.3.4	低压钠灯	(50)
2.3.5	高压气体放电灯	(50)
2.3.6	无电极放电灯	(53)
2.3.7	照明的经济核算	(55)
3	LED 基础知识	(57)
3.1	LED 的发展历史	(57)
3.1.1	红光 LED 的诞生	(57)
3.1.2	彩色 LED 的发展	(58)
3.1.3	照明用 LED 的发展	(58)
3.2	LED 的发光原理	(59)
3.2.1	发光原理	(59)

3.2.2	材料体系	(62)
3.2.3	基本电致发光结构	(65)
3.3	LED 的基本特性	(67)
3.3.1	LED 的电学特性	(68)
3.3.2	LED 的光学特性	(71)
3.3.3	LED 的热特性	(73)
3.3.4	LED 的其他特性	(75)
4	LED 制备技术	(77)
4.1	LED 衬底选择	(77)
4.1.1	LED 衬底材料的要求	(77)
4.1.2	LED 衬底材料的种类	(78)
4.2	LED 外延技术	(81)
4.2.1	LED 对外延材料的基本要求	(81)
4.2.2	几种常用的 LED 外延材料	(82)
4.2.3	LED 外延层的制备技术及设备	(91)
4.3	LED 芯片技术	(98)
4.3.1	LED 芯片制造技术	(98)
4.3.2	LED 芯片优化技术	(101)
4.4	LED 封装技术	(112)
4.4.1	小功率 LED 封装(引脚式封装)	(112)
4.4.2	表面贴装封装	(114)
4.4.3	功率型封装	(115)
4.5	LED 分选技术	(119)
4.5.1	LED 分选的必要性	(119)
4.5.2	LED 的分选方法	(120)
4.5.3	LED 分选技术的发展现状与趋势	(121)
4.6	白光 LED 技术	(122)
4.6.1	人造白光	(122)
4.6.2	白光 LED 的实现方法	(126)
5	LED 照明光学设计技术	(136)
5.1	非成像光学简介	(136)
5.1.1	非成像光学的分支之一:照明非成像光学	(136)
5.1.2	非成像光学与成像光学的区别	(137)
5.1.3	非成像光学的主要基本概念——光学扩展量	(138)
5.2	自由曲面光学元件设计	(140)
5.2.1	微分方程法进行自由曲面光学元件设计的基本原理	(140)
5.2.2	自由曲面光学元件的设计方法	(145)
5.2.3	自由曲面反射镜照明系统的设计	(150)

5.2.4	自由曲面透射照明系统的设计	(155)
5.3	LED照明系统光学模拟	(161)
5.3.1	采用TracePro进行LED照明系统光学模拟的基本流程	(161)
5.3.2	采用TracePro进行LED模拟仿真	(172)
6	LED照明散热设计	(181)
6.1	LED散热基础知识	(181)
6.1.1	LED散热设计的必要性	(181)
6.1.2	LED热量传递的三种基本方式	(181)
6.1.3	热设计术语	(184)
6.2	热量对LED的危害分析	(185)
6.2.1	产生LED结温的原因	(185)
6.2.2	LED结温对性能的影响	(186)
6.2.3	降低LED结温的途径	(190)
6.2.4	LED结温计算实例	(191)
6.3	LED的散热途径分析	(192)
6.3.1	LED散热途径	(192)
6.3.2	LED热的传递方式	(193)
6.3.3	封装散热	(194)
6.4	LED散热分析模型	(201)
6.4.1	发光二极管的热阻	(201)
6.4.2	基于统计的常用热阻模型	(206)
6.4.3	基于热传导能量方程的热阻模型的建立	(209)
6.4.4	测量、计算热阻的意义	(213)
6.5	LED散热仿真软件	(214)
6.5.1	基于ANSYS有限元分析软件的LED热模拟	(214)
6.5.2	基于CFD仿真软件的LED热模拟	(221)
6.6	LED散热材料的选择	(223)
6.6.1	散热材料的选择	(223)
6.6.2	散热材料基板类型的选择	(224)
6.6.3	散热片的选择与设计	(227)
6.7	新型散热材料与技术	(236)
6.7.1	新型散热材料	(236)
6.7.2	散热新技术	(242)
6.8	LED散热设计过程	(247)
6.8.1	散热器材料的影响	(249)
6.8.2	有效散热面积的影响	(250)
6.8.3	生热率的影响	(251)
6.8.4	金属基板的影响	(251)

6.8.5	封装填充材料的影响	(253)
6.8.6	对流条件的影响	(253)
6.8.7	辐射	(254)
6.9	结语	(258)
7	LED 驱动设计	(260)
7.1	概述	(260)
7.1.1	驱动电源对 LED 灯具寿命的影响	(260)
7.1.2	LED 驱动电源通用要求	(261)
7.1.3	LED 驱动电源现状	(262)
7.2	LED 驱动电源拓扑选择	(263)
7.2.1	对 LED 驱动电源要求及主要技术参数	(263)
7.2.2	LED 照明的几种驱动方式	(265)
7.2.3	DC/DC 变换器的拓扑结构	(269)
7.2.4	LED 驱动电源最常用的 5 种拓扑结构的比较	(278)
7.3	LED 恒流驱动电源及实例分析	(279)
7.3.1	LED 恒流驱动电源的基本构成	(279)
7.3.2	EMI 滤波器及 AC/DC 电路设计	(280)
7.3.3	功率因数校正电路设计	(286)
7.3.4	常用 DC/DC 恒流驱动原理	(289)
7.3.5	实例分析	(293)
7.4	LED 驱动电源 PCB 板及保护电路设计	(299)
7.4.1	PCB 布局及布线设计	(299)
7.4.2	LED 驱动电源浪涌抑制电路设计	(303)
7.4.3	LED 驱动器温度补偿及保护电路设计	(307)
7.5	LED 驱动芯片及常用元器件的选择	(319)
7.5.1	LED 驱动芯片的选择	(319)
7.5.2	LED 驱动电源开关管的选择	(322)
7.5.3	LED 驱动电源电感的选择	(325)
7.5.4	LED 驱动电源电容器的选择	(325)
7.5.5	LED 驱动电源用续流管的选择	(328)
7.6	LED 驱动电源的发展趋势	(328)
7.6.1	新一代 LED 驱动芯片的推广应用	(329)
7.6.2	无电解电容驱动电源技术	(329)
7.6.3	智能化 LED 驱动电源的发展	(331)
7.6.4	LED 驱动电源的优化设计	(332)
8	LED 照明的测量	(333)
8.1	LED 照明的产业标准	(333)
8.1.1	概况	(333)

8.1.2	国内外主要标准化组织及其在推动标准制订上的贡献	(343)
8.1.3	欧盟和日本标准情况介绍	(346)
8.1.4	广东省标杆的检测标准及主要测量指标介绍	(349)
8.2	LED 灯具的主要种类及其与 GB7000 系列标准的对应关系	(352)
8.3	LED 灯具的主要测量项目与测量参数	(353)
8.3.1	安全标准检测项目	(354)
8.3.2	性能标准检测项目	(354)
8.3.3	能效标准检测项目	(355)
8.4	LED 灯具的测量	(355)
8.4.1	安全试验	(355)
8.4.2	性能试验	(356)
8.4.3	光生物安全试验	(364)
8.4.4	可靠性测试	(367)
8.4.5	寿命测试	(382)
8.4.6	电磁兼容试验	(389)
8.5	LED 照明系统热特性的测量	(401)
9	LED 照明的应用	(404)
9.1	LED 显示屏	(404)
9.1.1	LED 显示屏发展的简要回顾	(404)
9.1.2	LED 显示屏的广泛应用	(405)
9.1.3	LED 显示屏原理	(406)
9.1.4	LED 显示屏的性能指标	(406)
9.1.5	LED 显示屏的分类	(406)
9.1.6	LED 显示屏的驱动	(407)
9.1.7	LED 显示屏存在的问题	(407)
9.1.8	LED 显示屏的发展趋势	(407)
9.2	LED 交通信号灯	(408)
9.3	LED 路灯	(411)
9.4	LED 背光源	(413)
9.4.1	背光源简介	(414)
9.4.2	背光源的技术指标	(414)
9.4.3	LED 背光源技术分类	(415)
9.4.4	LED 背光源发展现状	(415)
9.4.5	LED 背光源发展展望	(416)
9.5	LED 汽车灯	(417)
9.5.1	汽车灯的分类	(417)
9.5.2	LED 汽车灯的发展历史	(418)
9.5.3	LED 汽车灯的优势	(419)

9.5.4	LED 在汽车照明中的应用	(420)
9.5.5	LED 应用于汽车照明系统存在的问题	(422)
9.5.6	LED 车灯在未来汽车产业中的发展	(423)
9.6	LED 景观照明	(424)
9.6.1	景观照明的功能	(424)
9.6.2	LED 作为景观照明光源的优点	(424)
9.6.3	LED 常见景观照明灯具	(425)
9.6.4	LED 景观照明典型工程	(427)
9.7	LED 室内照明	(431)
9.7.1	LED 室内照明市场分析	(431)
9.7.2	LED 室内照明主要产品类型	(431)
9.7.3	LED 室内照明与传统室内照明对比	(434)
9.7.4	LED 室内照明应用	(434)
9.7.5	LED 室内照明未来前景	(435)
9.8	其他应用	(437)
9.8.1	投影仪光源	(437)
9.8.2	医学应用	(438)
9.8.3	光合作用	(439)
9.8.4	光学测量	(440)
9.8.5	小结	(441)
附录 1	专利基础知识概述	(442)
附录 2	专业词汇	(451)
参考文献	(452)

1 光度学与色度学基础

1.1 光度学基础

光是人类本身生存和发展的必备因素。人类早期对太阳、月亮、星星的观察，对火光、烛光、灯光的比较，是光度学的雏形。光度学是一门关于光的计算和测量的学科。本节主要对光度学的基本理论和概念进行介绍，是进一步学习照明技术的基础知识。

1.1.1 光的本质和基本概念

什么是光？光的本质是什么？这是一个难以用简单语句表述的问题。光的传播、干涉、衍射和偏振现象可以用波动学说来解释。早在 1864 年，麦克斯韦就提出了光是一种电磁波的理论。而在考虑光和物质粒子相互作用的场合里，光就又具有粒子的性质了。例如，作为光电管机理的光电效应，当光照射到金属表面时，金属中的电子吸收光的能量而逸出金属表面，一个电子吸收的能量是一定的，这能量值为 $h\nu$ ，其中普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ， ν 称为光的振动频率，单位是 Hz。电子只是每次吸收一个 $h\nu$ 单位能量，电子吸收的能量大于此值，则逸出金属，小于此值则不逸出。这就是说，逸出电子的动能与光的强度无关，而简单地依赖于频率，即随频率线性增加。为了解释这个现象，必须认为光波中的能量，即一份一份的 $h\nu$ 附于一个一个的粒子中，这种粒子就是光子，光线就是流动的光子。这就是光的波粒二重性。

光的波动性，是指光是一种电磁波。图 1-1 所示为各种不同波长的电磁波频谱。从中可以看出，作为可见光，它只占极小的一部分。和其他电磁波一样，它也具有波长、频率、发射、吸收、传播速度等特性。电磁波能量的传播称为辐射，辐射在通过物质时一般不改变频率，速度则随物质而改变。在真空中，光速是一常数 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，光的速度、频率与波长之间的关系为：

$$c = \lambda\nu \quad (1-1)$$

电磁波包括电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线、宇宙射线等。通常所谓的光就是指人眼所能感觉到的辐射，称可见光，波长范围 380 ~ 780 nm。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，波长比紫光短的部分称为紫外线，比红光波长长的叫作红外线。紫外线又分为 3 个区，即远紫外（UV-C，波长 $\lambda = 100 \sim 280 \text{ nm}$ ）、中紫外（UV-B， $\lambda = 280 \sim 315 \text{ nm}$ ）和近紫外（UV-A， $\lambda = 315 \sim 400 \text{ nm}$ ）；红外线也分为 3 个区，即近红外（IR-A， $\lambda = 780 \sim 1400 \text{ nm}$ ）、中红外（IR-B， $\lambda = 1.4 \sim 3 \mu\text{m}$ ）和远红外（IR-C， $\lambda = 3 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ ）。需要说明的是，各个区域的界限不是很严格，只

是给出了大致的范围。

光的微粒性就是指光束是微粒流，发光体不断发射出微粒，微粒的运动速度就是光速，这些粒子就是光子。不同波长的光，具有不同的能量，即由不同能量的光子组成。光子具有的能量 E 正比于光的频率：

$$E = h\nu \quad (1-2)$$

光子所具有的能量 $h\nu$ 是频率为 ν 的光所具有的能量最小单位，不能再分割了，故光子又称光量子。在光和其他物质相互作用时，能量的交换是以 $h\nu$ 的形式一份一份地进行的，也就是说，能量是不连续的。

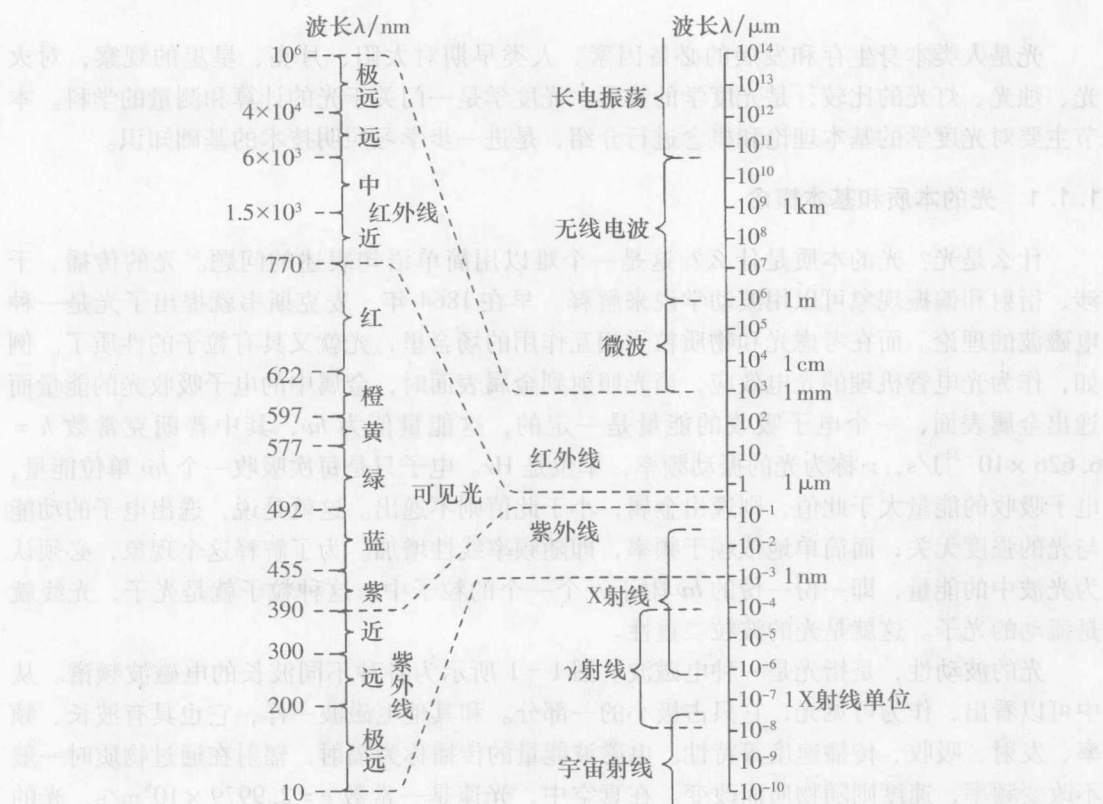


图 1-1 电磁波谱

1.1.2 光的传播特性

当光线在同一媒质中传播时，总是沿直线方向行进。当媒质发生改变时，光线将会在界面上发生反射、透射等现象。

1.1.2.1 光的反射

当光线遇到不透明的物体表面时，大部分光被反射，小部分被吸收。光线在镜面和扩散面上的反射有以下几种类型。

(1) 规则反射。在光滑界面上所产生的光的反射称为规则反射，又称镜面反射，如

图 1-2a 所示。光的入射光线、反射光线和过入射点的界面法线都位于同一个平面上，并且入射角等于反射角，反射光线和入射光线分别位于法线的两侧，这就是光的反射定律。在反射角以外，人眼是看不到反射光的。灯具的反射罩就是利用这一原理制成的，但一般由比较复杂的曲面构成。

(2) 散反射。当光线从某方向入射到经散射处理的铝板、经涂刷处理的金属板或毛面白漆涂层时，反射光向各个不同的方向散开，但其总的方向大致相同，如图 1-2b 所示，其光束的轴线方向仍遵守反射定律，这种光的反射称为散反射。

(3) 漫反射。光线从某方向入射到粗糙表面或涂有无光泽镀层的表层时，光线分散在许多方向，宏观上不存在规则反射，这种光的反射称为漫反射，当遵守朗伯 (Lambert) 余弦定律时，即任意方向的光强 I_θ 与该反射面的法线方向的光强 I_0 所成的角度 θ 的余弦成比例 ($I_\theta = I_0 \cos\theta$)，而与光的入射方向无关，从反射面的各个方向看去，光的亮度均相同，这种光的反射称为各向同性漫反射，如图 1-2c 所示。

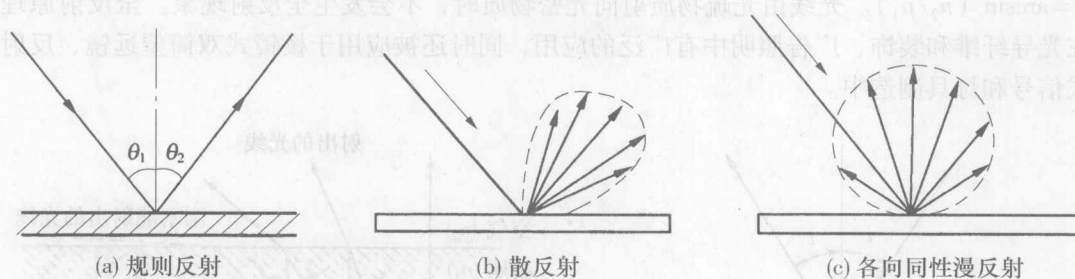


图 1-2 光的反射

(4) 混合反射。光线从某方向入射到瓷釉或带高度光泽的漆层上时，规则反射和漫反射皆存在，这种现象称为混合反射，如图 1-3 所示。在定向反射方向上的发光强度比其他方向上的要大得多，而且有最大亮度。在其他方向上也有一定数量的反射光，而其亮度分布是不均匀的。

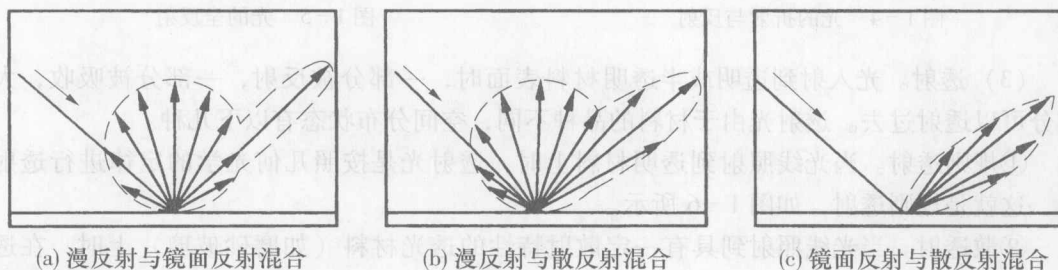


图 1-3 混合反射

1.1.2.2 光的折射、全反射与透射

(1) 折射。当光线从一种介质斜射进入另一种介质时，它的传播方向就会发生改变，这种现象叫作光的折射。例如把一根筷子斜着插入水中，可以看出水平面上下两部分的筷子好像折成两段，这就是折射现象。

光线从一种介质斜射进入另一种介质时，在入射面上有反射光，而进入第二种介质时有折射光，如图 1-4 所示。其中折射现象必须满足如下条件：①折射的光线在入射光线与法线所构成的平面内；②折射光线与入射光线分别在法线的两侧；③对于一定的介质来说，入射角的正弦与折射角的正弦之比等于两种介质绝对折射率的反比，即

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-3)$$

式中， i 为入射角； γ 为反射角； n_1 和 n_2 为两种介质的绝对折射率。

(2) 全反射。如图 1-5 所示，当光线从高折射率 (n_1) 的媒质 (光密物质) 射向低折射率 (n_2) 的媒质 (光疏物质) 时，入射角 (i) 小于折射角 (γ)。当入射角未达到 90° 时，折射角已达 90° 。继续增大入射角，则光线全部返回到光密物质内，不再有折射光，这种现象称为全反射。利用这一特性，可以获得不损失光的反射表面。光不再从光密物质 (如玻璃) 进入光疏物质 (如空气) 时的入射角称为临界入射角 (A)，计算公式为 $A = \arcsin (n_2/n_1)$ 。光线由光疏物质射向光密物质时，不会发生全反射现象。全反射原理在光导纤维和装饰、广告照明中有广泛的应用，同时还被应用于棱镜式双筒望远镜、反射式信号和灯具制造中。

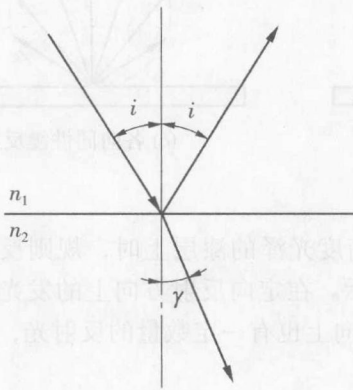


图 1-4 光的折射与反射

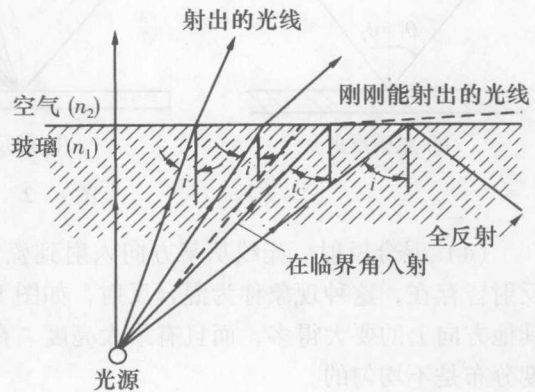


图 1-5 光的全反射

(3) 透射。光入射到透明或半透明材料表面时，一部分被反射，一部分被吸收，大部分可以透射过去。透射光由于材料的品种不同，空间分布状态有以下几种。

①规则透射。当光线照射到透明材料上时，透射光是按照几何光学的定律进行透射的，这就是规则透射，如图 1-6 所示。

②散透射。当光线照射到具有一定散射特性的透光材料 (如磨砂玻璃) 上时，在透射方向上的发光强度较大，在其他方向上的发光强度较小；表面亮度也不均匀，透射方向较亮，其他方向较弱。这种情况称为散透射，也称为定向扩散透射，如图 1-7 所示。

③漫透射。当光线照射到散射性好的透光材料 (如浮白玻璃) 上时，透射光向所有的方向散开并均匀分布在半球空间内，这称为漫透射。当透射光服从朗伯定律，即发光强度按余弦分布，亮度在各个方向上均相同时，则称为均匀漫透射或完全漫透射，如图 1-8 所示。

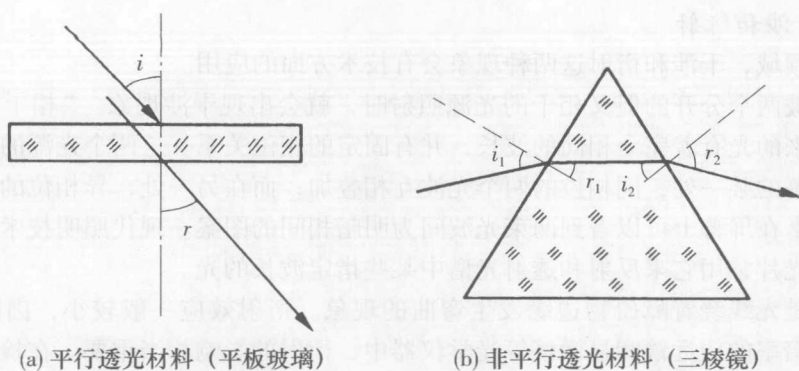


图 1-6 规则透射

④混合透射。当光线照射到透射材料上，其透射特性介于规则透射与漫透射（或散透射）之间的情况称为混合透射。

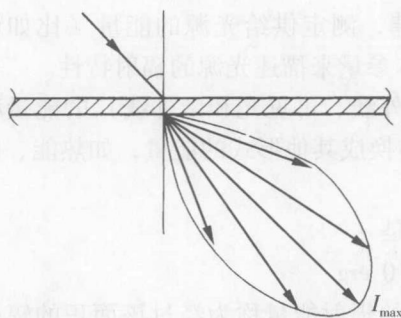


图 1-7 散透射

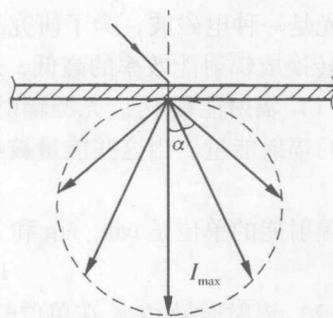


图 1-8 均匀漫透射

1.1.2.3 光的吸收

材料对光的吸收是光能转换为能量的其他形式时引起的。当一定波长的平行光束穿过均匀媒质时，光强的损失随距离（ x ）和与波长有关的线吸收率（ α ）呈指数式衰减（即 $i_{(x)} = i_0 \exp(-\alpha x)$ ，其中 i_0 为光束的初始光强）。有些材料在可见光范围内对不同波长的光有不同的吸收率 α ，当光线通过这些材料时，其光谱分布会有所改变，因此这种材料可用来制造滤色片。

在某些特定条件下，可以使媒质的光吸收率成为负值，即光线通过这种媒质时，光强增加，这就是激光器的原理。激光器能产生光强极高的光束，光强增加所需的额外能量必须由适当的能量源提供给媒质。

1.1.2.4 光的偏振

光是电磁波的一种，它是在沿行进方向做垂直振动的同时前行的，在各个方向进行的振动相同的光被称为自然光或非偏振光。而光波以某种角度射入透明物体时，它的反射光所包含的光波在行进的过程中，仅在一个平面上振动，这种状态被称为偏振光。

1.1.2.5 干涉和衍射

在照明领域,干涉和衍射这两种现象会有技术方面的应用。

当屏幕被两个分开的但又相干的光源照射时,就会出现干涉现象。“相干”是指两个光源辐射出来的光有着完全相同的波长,并有固定的相位关系。这两个光源的光线互相合并后,在屏幕的某一处,同相位的两个光波互相叠加;而在另一处,异相位的两个光波互相抵消,通常在屏幕上可以看到两束光波间为明暗相间的图案。现代照明技术已把干涉应用于分色滤光片,用它来反射和透射光谱中某些指定波长的光。

衍射就是光线绕着障碍物边缘发生弯曲的现象。衍射效应一般较小,肉眼不易觉察到,但在高倍率的望远镜和显微镜等光学仪器中,衍射的影响相当重要。在检测光源光谱的仪器中,所使用的衍射光栅,就同时应用了干涉和衍射两种效应。

1.1.3 光度量

1.1.3.1 辐射度量

光是一种电磁波,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,通常用下面一些基本参量来描述光源的辐射特性。

(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、erg 和 J,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 Φ_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作光源的辐射通量。辐射通量可称为辐射功率,其单位是 W (J/s)、erg/s 和 cal/s 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 Φ_e 与该立体角 Ω 之比,即

$$I_e = \Phi_e / \Omega \quad (1-4)$$

由于光源在各个方向上的辐射强度一般是不均匀的,所以式(1-4)表示的辐射强度是立体角 Ω 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(图 1-9)。在包含该方向的微小立体角 $d\Omega$ 内发射的辐射通量 $d\Phi_e$ 与该微小的立体角 $d\Omega$ 之比就定义为光源在该方向的辐射强度 I_e :

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega \quad (1-5)$$

如果光源近似为点光源,可以以它为球心,以单位长度为半径,作一球面(图 1-10)。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 $d\Phi_e(\phi, \theta)$,在这个方向的辐射强度为:

$$I_e(\phi, \theta) = d\Phi_e(\phi, \theta) / d\Omega \quad (1-6)$$

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

$$d\Phi_e(\phi, \theta) = I_e(\phi, \theta) \sin\theta d\theta d\phi \quad (1-7)$$