



教育部高等学校光电信息科学与工程类专业应用类规划教材
普通高等教育“十三五”规划教材

光电子技术及应用

（第2版）

周自刚 胡秀珍 编著

 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>

信息科学与工程专业应用类规划教材
“三五”规划教材

光电子技术及应用 (第2版)

周自刚 胡秀珍 编著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据教育部光电信息科学与工程教学指导分委员会课程基本要求编写,是光电信息科学与工程类专业卓越工程师培育计划教材、国家级特色专业教材、精品资源共享课同步教材。本书以激光的产生、传输、调制、探测、成像和显示为主线,体现光源激光化、传输波导化、手段电子化和处理光学化,较系统地介绍信息光电子技术的基本概念、基本原理、性能指标和技术应用。本书共6章,主要内容包括:辐射度学和光度学、激光产生的物理基础及其工程应用;激光束在大气、电光晶体、声光晶体、光纤等介质中的传播规律和特性,以及相关技术与应用;激光束的电光、声光、磁光调制原理、结构、参数和技术特性;光电探测器件的物理效应、原理、结构和特性,以及技术应用;光电成像的基本概念、原理、结构和综合特性,以及工程应用;光电显示的基本原理、性能参数和显示器技术等。本书提供配套教学大纲、考试大纲、电子课件、章节练习及期末考试模拟试题、光电科技视频、课程设计案例等。

本书可作为普通高等学校理工科光电信息科学与工程类相关课程高年级本科生和研究生的教材,也可供光电工程等领域相关科技工作者学习参考。

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

光电子技术及应用/周自刚,胡秀珍编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2017.9

ISBN 978-7-121-32493-2

I. ①光... II. ①周... ②胡... III. ①光电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第197077号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 特约编辑:曹剑锋

印刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:352千字

版次:2015年1月第1版

2017年9月第2版

印次:2017年9月第1次印刷

定价:38.00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)88254888,88258888。

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

本书咨询联系方式:(010)88254535, wylj@phei.com.cn。

第2版前言

光电子技术作为国家信息产业的基础技术之一，在通信网络、新能源、医疗健康、先进制造、测量、信息存储显示及国防等多个领域应用，体现了当前我国正在实施的“一带一路”、“军民融合”、“中国制造 2025”、“互联网+”和“智慧城市”等发展战略，适应产业结构调整、转换和升级的客观需要，已成为推动国民经济增长的重要部分，并引领着生活方式和社会结构的变化。

光电子器件是光电子技术的必然产物，是现代信息基础设施（整机、系统和网络）和各种新型应用的重要核心之一，其技术水平和产业能力已经成为衡量一个国家综合实力和国际竞争力的重要标志。

光电子科学、技术、工程与产业的发展最关键要素之一的是人才。本书力求全面地介绍光电子技术的基本理论和基础应用，内容上紧扣当前光电产业发展前沿，以激光光源、光的传输、调制、探测、成像和显示为主线，体现光源的激光化、传输的波导化、手段的电子化和处理的光学化特征。

从基础知识点上，较全面地介绍光辐射度学和光度学、激光原理、光的传播、调制、探测、成像和显示等方面的基本概念、原理和性能参数，并列举一些相应的例子和技术案例。

从 O2O 教育上，配套较全面的教学大纲、授课计划、考试大纲、教学教案、课程课件、章节习题、技术案例分析与延伸、模拟试题等相关内容，便于自学、少学时等人群学习和使用，可通过华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）注册下载。

本书由西南科技大学周自刚和内蒙古工业大学胡秀珍编著，其中胡秀珍负责第 1、4 和 6 章的编写工作，周自刚负责第 2、3 和 5 章的编写工作。本书参考了国内外近年出版的专著、文献和教材。在此，一并向前辈和同行们表示衷心的感谢。

因编著者水平有限，误漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 8 月

前 言

随着微电子技术、计算机技术和激光技术的飞速发展，带来了巨大能量和信息容量，具有高速、并行传输与处理的时代已到来，向人们展示着——21世纪是光子与电子交相辉映的全新时代。

光电子技术正是由电子技术和光子技术互相渗透、优势结合而产生的，包括光电子信息技术和光电子能量科学技术。光电子技术在现代科技、经济、军事、文化、生活等领域发挥着极其重要的作用，以此为支撑的光电子产业是世界上争相发展的支柱产业，是竞争激烈、发展最快的高科技产业的主力军。

决定光电子科学、技术、工程与产业发展的最关键要素是人才。本书是国家级特色专业——光电信息科学与工程学士学位课程教材，也是国家级光电卓越工程师培养计划的工程实践配套教材。本书力求全面地介绍光电子技术的理论和应用基础，内容紧扣当前光电产业发展前沿，以激光光源、光的传输、调制、探测、成像和显示等为主线，体现光源的激光化、传输的波导化、手段的电子化和处理的光学化特征。

本书在光信息的调制、光电探测及成像技术、光电显示技术等方面案例丰富，特别列举了相关效应（如电光等效应）的现象、探测技术的特性等。本书在知识体系上，以培养学生实践与创新能力作为重要的内容，注重对学生探索精神、科学思维、实践能力、创新能力的培养。每章提供重点知识的工程技术应用案例，以激发学生主动学习、主动实践的热情。

本书在结构顺序上，主要包括激光、光传输、光调制、光探测、光成像、光显示、光电器件案例等，较系统地介绍光电子基础、常见光电子器件的原理、结构、应用技术和新的发展。本书配套教学大纲、授课计划、考试大纲、教案、课件、章节练习、光电工程技术案例、模拟试题等部分，请通过华信教育资源网www.hxedu.com.cn注册下载，或扫描书上的二维码在线观看案例视频（建议在 Wi-Fi 环境下使用）。

本书由西南科技大学周自刚主编，范宗学负责每章节的基础知识内容的撰写，冯杰负责章节例题分析、工程技术案例和配套练习及答案的编写。本书参考了大量国内外近年来出版的专著、文献和教材，在此特向前辈和同行们一并表示衷心的感谢！

因编著者水平有限，书中难免存在疏漏和错误之处，恳请各位读者指正。

作 者
中国科技城·绵阳

目 录

第 1 章 光辐射与激光器 ····· (1)	
1.1 光辐射····· (1)	
1.1.1 电磁波谱····· (1)	
1.1.2 光辐射····· (2)	
1.1.3 热辐射的基本定律····· (3)	
1.2 辐射度量与光度量····· (5)	
1.2.1 辐射度量····· (6)	
1.2.2 光度量····· (7)	
1.2.3 光度量和辐射度量的 关系····· (10)	
1.3 激光基本原理····· (11)	
1.3.1 光子的基本性质····· (11)	
1.3.2 激光产生的物理基础····· (12)	
1.4 典型激光器及其应用····· (17)	
1.4.1 激光器的种类····· (17)	
1.4.2 固体激光器····· (19)	
1.4.3 气体激光器····· (20)	
1.4.4 半导体激光器····· (21)	
1.4.5 光纤激光器····· (22)	
1.4.6 激光特性····· (23)	
光电科学家与诺贝尔奖····· (24)	
工程与技术案例····· (25)	
练习题····· (27)	
第 2 章 光束的传播 ····· (30)	
2.1 光在大气中的传播····· (30)	
2.1.1 大气传输····· (30)	
2.1.2 湍流效应····· (33)	
2.2 光在电光晶体中的传播····· (35)	
2.2.1 电光效应····· (35)	
2.2.2 相位延迟····· (37)	
2.3 光在声光晶体中的传播····· (43)	
2.3.1 声光效应····· (43)	
2.3.2 声光衍射····· (45)	
2.4 光在磁光介质中的传播····· (48)	
2.4.1 磁光效应····· (48)	
2.4.2 磁光偏振····· (48)	
2.5 光在光纤中的传播····· (51)	
2.5.1 弱导条件····· (51)	
2.5.2 阶跃型光纤中光的 传播····· (52)	
2.5.3 梯度型光纤中子午光线的 传播····· (54)	
2.5.4 光束在光纤波导中的 衰减和色散特性····· (54)	
2.6 光在非线性介质中的传播····· (57)	
2.6.1 介质的非线性电极化····· (57)	
2.6.2 光学变频效应····· (57)	
2.6.3 强光引起介质折射率 变化····· (60)	
光电科学家与诺贝尔奖····· (62)	
工程与技术案例····· (63)	
练习题····· (64)	
第 3 章 光束的调制与扫描技术 ····· (67)	
3.1 调制原理····· (67)	
3.1.1 幅度调制····· (68)	
3.1.2 角度调制····· (68)	
3.1.3 光强调制····· (70)	
3.1.4 脉冲调制····· (70)	
3.1.5 数字调制····· (71)	
3.2 电光调制····· (73)	
3.2.1 强度调制····· (73)	
3.2.2 角度调制····· (77)	
3.3 声光调制····· (78)	
3.3.1 工作原理····· (79)	
3.3.2 调制参量····· (79)	
3.3.3 声光匹配····· (81)	
3.4 磁光调制····· (82)	
3.4.1 工作原理····· (82)	
3.4.2 光强调制····· (82)	
【小故事】····· (83)	
3.5 内调制····· (83)	
3.5.1 LD 调制原理····· (83)	
3.5.2 LED 调制特性····· (84)	
3.5.3 模/数调制····· (85)	

光电科学家与诺贝尔奖	(86)	5.2 光电成像原理	(153)
工程技术案例	(86)	5.2.1 基本结构	(153)
练习题	(87)	5.2.2 技术参数	(154)
第4章 光电探测技术	(90)	5.3 红外成像技术	(155)
4.1 物理效应	(90)	5.3.1 性能参数	(155)
4.1.1 外光电效应	(91)	5.3.2 空间分辨率	(156)
4.1.2 内光电效应	(93)	5.3.3 温度分辨率	(159)
4.1.3 光热效应	(94)	5.4 夜视技术	(160)
4.1.4 光电转换定律	(96)	5.4.1 微光像增强器的工作 原理与性能参数	(160)
4.2 技术参数	(96)	5.4.2 微光摄像 CCD 器件的 工作原理	(165)
4.2.1 灵敏度	(97)	光电科学家与诺贝尔奖	(166)
4.2.2 量子效率	(98)	工程技术案例	(167)
4.2.3 通量阈	(99)	练习题	(169)
4.2.4 噪声等效功率	(100)	第6章 显示技术	(171)
4.2.5 归一化探测度	(100)	6.1 阴极射线管	(171)
4.3 光敏电阻	(101)	6.1.1 黑白显像管	(171)
4.3.1 工作原理	(101)	6.1.2 彩色显像管	(173)
4.3.2 技术特性	(102)	6.2 液晶显示	(177)
4.4 光电池	(107)	6.2.1 液晶光学性质	(177)
4.4.1 工作原理	(107)	6.2.2 扭曲向列型液晶显示	(180)
4.4.2 技术特性	(107)	6.2.3 液晶显示器的技术 参数	(182)
4.4.3 太阳能电池	(110)	6.3 等离子体显示	(183)
4.5 光电二极管	(114)	6.3.1 发光原理	(184)
4.5.1 Si 光电二极管	(114)	6.3.2 单色显示技术	(184)
4.5.2 PIN 硅光电二极管	(119)	6.3.3 彩色显示技术	(186)
4.5.3 雪崩光电二极管	(120)	6.4 电致显示技术	(187)
4.6 光电三极管	(123)	6.4.1 发光二极管显示原理与 技术	(187)
4.6.1 光照特性	(123)	6.4.2 有机发光二极管显示 技术	(187)
4.6.2 光谱特性	(124)	光电科学家与诺贝尔奖	(188)
4.6.3 伏安特性	(124)	工程技术案例	(189)
4.7 光电扫描技术	(125)	练习题	(190)
4.7.1 机械扫描	(125)	模拟练习题 1	(193)
4.7.2 微机扫描	(126)	模拟练习题 2	(196)
4.7.3 电光数字式扫描	(129)	模拟练习题 3	(199)
光电科学家与诺贝尔奖	(130)	综合练习题 4	(201)
工程技术案例	(131)	综合练习题 5	(203)
练习题	(134)	光电子技术专业术语	(206)
第5章 光电成像技术	(138)	参考文献	(214)
5.1 工作原理	(138)		
5.1.1 CCD 结构与原理	(139)		
5.1.2 CCD 技术参数	(144)		
5.1.3 CMOS 结构与原理	(147)		
5.1.4 IRFPA 结构与原理	(149)		

第1章 光辐射与激光器

为了衡量光源和光电探测器的性能，需要对光辐射进行定量描述，因此，本章先介绍热辐射的基本定律，然后介绍辐射度学和光度学的一些基本知识，最后介绍激光的基本原理、典型的激光器及其应用。

1.1 光 辐 射

1.1.1 电磁波谱

光的电磁理论认为，光波是一种电磁波。由麦克斯韦电磁场理论，若在空间某区域有变化电场 E （或变化磁场 H ），在邻近区域将产生变化的磁场 H （或变化电场 E ）。这种变化的电场和变化的磁场不断地交替产生，如图 1.1 所示，由近及远以有限的速度在空间传播，就形成了电磁波。电磁波具有以下性质。

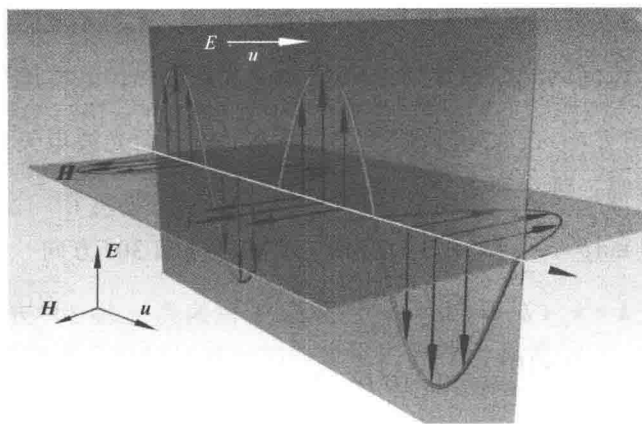


图 1.1 电磁波传播

- (1) 电场 E 、磁场 H 和波的传播方向 k 两两相互垂直，并满足右手螺旋定则。
- (2) 沿给定方向传播的电磁波具有偏振。
- (3) 空间各点电场 E 、磁场 H 都做周期性变化，而且相位相同。
- (4) 空间各点上的电场 E 、磁场 H 在量值上满足关系式 $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$ 。
- (5) 电磁波在介质中的传播速度为 $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ ，真空中传播的速度为 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ 。

从无线电波到光波，从 X 射线到 γ 射线，都属于电磁波的范畴。按照频率或波长的顺序把这些电磁波排列成图表，称为电磁波谱，如图 1.2 所示，光辐射仅占电波谱的一极小波段。图中还给出了各种波长范围（波段）。

第1章 光辐射与激光器

为了衡量光源和光电探测器的性能，需要对光辐射进行定量描述，因此，本章先介绍热辐射的基本定律，然后介绍辐射度学和光度学的一些基本知识，最后介绍激光的基本原理、典型的激光器及其应用。

1.1 光 辐 射

1.1.1 电磁波谱

光的电磁理论认为，光波是一种电磁波。由麦克斯韦电磁场理论，若在空间某区域有变化电场 E （或变化磁场 H ），在邻近区域将产生变化的磁场 H （或变化电场 E ）。这种变化的电场和变化的磁场不断地交替产生，如图 1.1 所示，由近及远以有限的速度在空间传播，就形成了电磁波。电磁波具有以下性质。

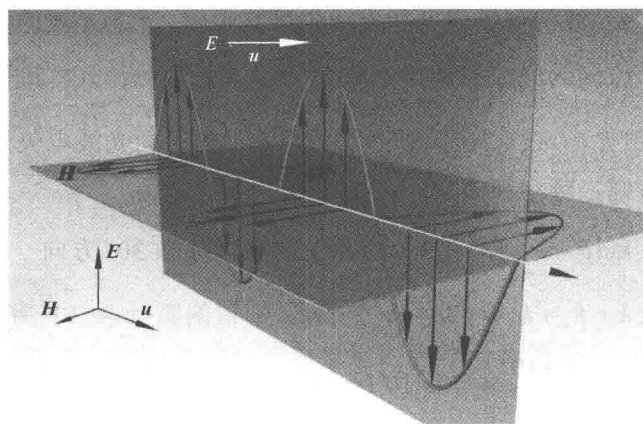


图 1.1 电磁波传播

- (1) 电场 E 、磁场 H 和波的传播方向 k 两两相互垂直，并满足右手螺旋定则。
- (2) 沿给定方向传播的电磁波具有偏振。
- (3) 空间各点电场 E 、磁场 H 都做周期性变化，而且相位相同。
- (4) 空间各点上的电场 E 、磁场 H 在量值上满足关系式 $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$ 。
- (5) 电磁波在介质中的传播速度为 $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ ，真空中传播的速度为 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ 。

从无线电波到光波，从 X 射线到 γ 射线，都属于电磁波的范畴。按照频率或波长的顺序把这些电磁波排列成图表，称为电磁波谱，如图 1.2 所示，光辐射仅占电波谱的一极小波段。图中还给出了各种波长范围（波段）。

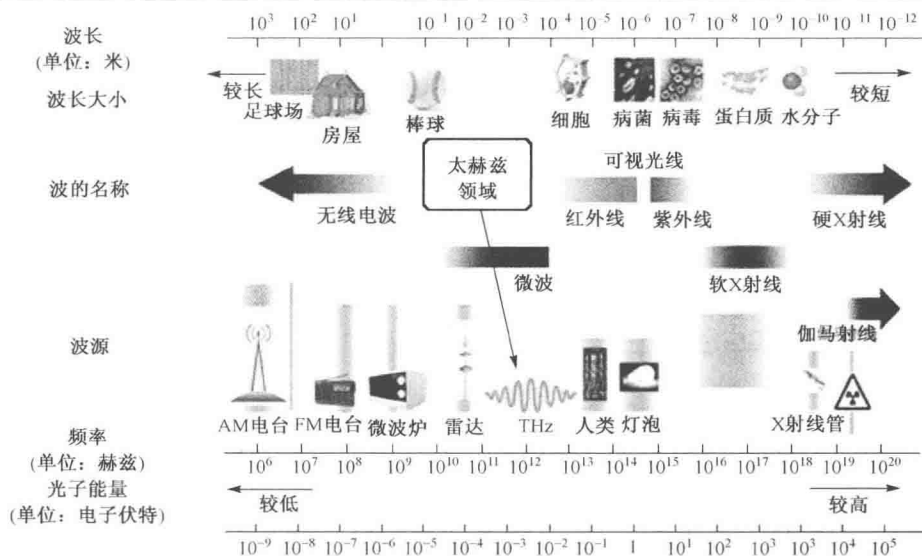


图 1.2 电磁波谱

光具有电磁波的一切特性，一般光波的形式有：平面波、球面波和柱面波。平面波波动的复数表达式为

$$E(r,t) = E_0 e^{-i(\omega t - k \cdot r)}, \quad H(r,t) = H_0 e^{-i(\omega t - k \cdot r)}$$

式中， E_0 和 H_0 分别为光波的电场强度和磁场强度复振幅， k 为光波的波矢量，其大小（成为波数）为 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，方向为光波的传播方向。

【例 1.1】 计算由 $E = (-2i + 2\sqrt{3}j)e^{i(\sqrt{3}x + y + 6 \times 10^8 t)}$ 表示的平面光波电矢量的振动方向、传播方向、相位速度、振幅、频率和波长。

解：振动方向： $\tan \theta = \frac{2\sqrt{3}}{-2} = -\sqrt{3}$ ，故沿 j 轴偏离 $-i$ 轴 30° 方向

传播方向：波矢 $k = k_x + k_y = \sqrt{3}e_x + e_y$ ，故沿 $-y$ 轴偏离 $-x$ 轴 30° 方向

相位速度： $v = \frac{\omega}{k} = \frac{6 \times 10^8}{\sqrt{1 + (\sqrt{3})^2}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$

振幅： $A = \sqrt{(-2)^2 + (2\sqrt{3})^2} = 4$

频率： $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3 \times 10^8}{\pi} \text{ (Hz)}$

波长： $\lambda = \frac{2\pi}{k} = \pi \text{ (m)}$

1.1.2 光辐射

光辐射是以电磁波形式或粒子（光子）形式传播的能量，这种传播的能量可以被光学元件反射、成像或色散。光辐射的波长在 $10\text{nm} \sim 1\text{mm}$ ，或频率在 $3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 范围内。按辐射波长及人眼的生理视觉效应光辐射可分为紫外辐射、可见光和红外辐射。通常在可见光到紫外波段波长用 nm 表示、在红外波段波长用 μm 表示，波数的单位用 cm^{-1} 表示。

紫外辐射波长范围在 $1\sim 380\text{nm}$ ，是人视觉不能感受到的电磁波。紫外辐射又细分为近紫外、远紫外和极远紫外。由于极远紫外在空气中几乎被完全吸收，只能在真空中传播，所以又称为真空紫外辐射。

可见光波长范围在 $380\sim 760\text{nm}$ ，是人视觉能感受到“光亮”的电磁波。在可见光范围内，人眼的主观感觉依波长从长到短表现为红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝色和紫色。

红外辐射波长范围在 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 。通常分为近红外、中红外和远红外。

1.1.3 热辐射的基本定律

任何 0K 以上温度的物体都会发射各种波长的电磁波，这种由于物体中的分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。热辐射具有连续的辐射谱，波长自远红外区到紫外区，并且辐射能按波长的分布主要取决于物体的温度。本节介绍热辐射的一些基本定律。

(1) 单色吸收比和单色反射比

描述物体辐射规律的物理量是辐射出射度和单色辐射出射度，它们之间的关系为：

$$M_{\gamma}(T) = \int_0^{\infty} M_{\gamma\lambda}(T) d\lambda$$

任何物体向周围发射电磁波的同时，也吸收周围物体发射的辐射能。当辐射从外界入射到不透明的物体表面上时，一部分能量被吸收，另一部分能量从表面反射（如果物体是透明的，则还有一部分能量透射）。

被物体吸收的能量与入射的能量之比称为该物体的吸收比。在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围内的吸收比称为单色吸收比，用 $\alpha_{\lambda}(T)$ 表示。

反射的能量与入射的能量之比称为该物体的反射比。在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围内相应的反射比称为单色反射比，用 $\rho_{\lambda}(T)$ 表示。对于不透明的物体，单色吸收比和单色反射比之和等于 1，即

$$\alpha_{\lambda}(T) + \rho_{\lambda}(T) = 1 \quad (1.1)$$

若物体在任何温度下，对任何波长的辐射能的吸收比都等于 1，即 $\alpha_{\lambda}(T) \equiv 1$ ，则称该物体为绝对黑体（简称黑体）。

(2) 基尔霍夫辐射定律

1869 年，基尔霍夫从理论上提出了关于物体辐射出射度与吸收比内在联系的重要定律：在同样的温度下，各种不同物体对相同波长的单色辐射出射度与单色吸收比之比值都相等，并等于该温度下黑体对同一波长的单色辐射出射度。即

$$\frac{M_{\nu\lambda 1}(T)}{\alpha_{\nu\lambda 1}(T)} = \dots = M_{\nu\lambda b}(T) \quad (1.2)$$

式中， $M_{\nu\lambda b}$ 为黑体的单色辐射出射度。

(3) 普朗克公式

黑体处于温度 T 时，在波长 λ 处的单色辐射出射度由普朗克公式给出

$$M_{v\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \quad (1.3)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k_B 为玻耳兹曼常数。

令 $C_1 = 2\pi hc^2$, $C_2 = hc/k_B$, 则写为

$$M_{v\lambda b}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1.4)$$

$$C_1 = (3.741832 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{第一辐射常数})$$

$$C_2 = (1.438786 \pm 0.000045) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (\text{第二辐射常数})$$

图 1.3 所示为不同温度条件下黑体的单色辐射出射度 (辐射亮度) 随波长的变化曲线。

对应任一温度, 单色辐射出射度随波长连续变化, 且只有一个峰值, 对应不同温度的曲线不相交。因而温度能唯一确定单色辐射出射度的光谱分布和辐射出射度 (即曲线下的面积)。色辐射出射度的峰值随温度的升高向短波方向移动。单色辐射出射度和辐射出射度均随温度的升高而增大。

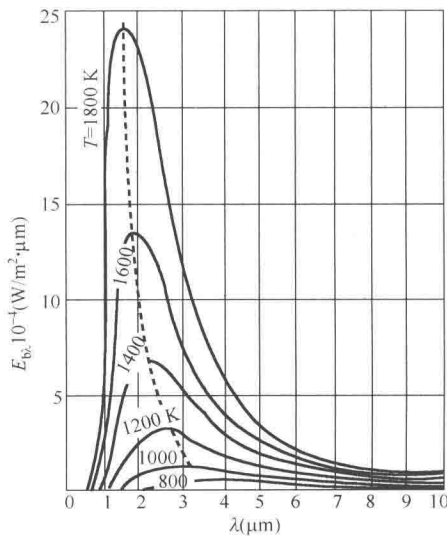


图 1.3 黑体辐射单色辐射出射度的波长分布

(4) 瑞利-琼斯公式

当 λT 很大时, $e^{C_2/\lambda T} \approx 1 + \frac{C_2}{\lambda T}$, 可得到适合于长波长区的瑞利-琼斯公式

$$M_{v\lambda b}(T) = \frac{C_1}{C_2} T \lambda^{-4} \quad (1.5)$$

在 $\lambda T > 7.7 \times 10^5 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时, 瑞利-琼斯公式与普朗克公式的误差小于 1%。

(5) 维恩位移

当 λT 很小时, $e^{C_2/\lambda T} - 1 \approx e^{C_2/\lambda T}$, 可得到适合于短波长区的维恩公式

$$M_{v\lambda b}(T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad (1.6)$$

在 $\lambda T < 2698 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 区域内, 维恩公式与普朗克公式的误差小于 1%。

单色辐射出射度最大值对应的波长 λ_m

$$\lambda_m T = 2897.9(\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

这就是著名的维恩位移定律。

(1.7)

(6) 斯忒藩-玻耳兹曼

$$M_{vb}(T) = \sigma T^4 \quad (1.8)$$

其中 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} (\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)$ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。斯忒藩-玻耳兹曼定律表明黑体的辐射出射度只与黑体的温度有关，而与黑体的其他性质无关。

【例 1.2】 设钨丝灯的灯丝温度为 2800K，试求可见光波段内灯丝辐射能占其总辐射能的百分比（视灯丝为黑体）。

解：可见光波段为 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ，取 $\lambda_1 = 0.38 \mu\text{m}$ ， $\lambda_2 = 0.76 \mu\text{m}$ ，对黑体辐射公式在整个波长范围内积分，便得到该钨丝灯在温度 T 时总的辐射出射度（即斯忒藩-玻耳兹曼定律： $M_{eb} = \int_0^{\infty} M_{e\lambda b}(T) d\lambda = \sigma T^4$ ），同理在可见光范围内积分，便得到可见光的辐射出射度 $M_{e(\lambda_1-\lambda_2)b}$ 。所求百分比：

$$\eta = \frac{M_{e(\lambda_1-\lambda_2)b}}{M_{eb}} = \frac{\sigma T^4}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda b}(T) d\lambda} \times 100\% = 8.81\%$$

在钨丝灯发出的辐射能中，可见光只占 8.81%，其余属于不可见的红外辐射，并转化为热能，散失到周围环境中，钨丝灯作为光源其利用效率是很低的。

1.2 辐射度量与光度量

为了对光辐射进行定量描述，需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量，存在着辐射度单位和光度单位两套不同的体系。

在辐射度单位体系中，辐通量（又称为辐射功率）或者辐射能是基本量，是只与辐射客体有关的量。其基本单位是瓦特（W）或者焦耳（J）。辐射度学适用于整个电磁波段。

在光度单位体系中，是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位，被选作基本量的不是光通量而是发光强度，其基本单位是坎德拉。光度学只适用于可见光波段。在光度学研究中基于两个基本假设：一是光沿光线方向进行的能量流，遵守能量守恒定律，即光束在单位时间内通过任一截面的能量为常数；二是光源既可以是一个实际的发光体，也可以是光源自身的像或者是一个自身并不发光，但被另一光源照明的物体表面。光度量是光辐射能为平均人眼接受所引起的视觉刺激大小的度量。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的，但所用的物理符号是一一对应的。为了区别起见，在对应的物理量符号标角标“e”表示辐射度物理量，角标“v”表示光度物理量。下面重点介绍辐射度单位体系中的物理量。光度单位体系中的物理量可对比理解。

1.2.1 辐射度量

(1) 辐射能 (量)

辐射能是以辐射形式发射或传输的电磁波 (主要指紫外、可见光和红外辐射) 能量。辐射能一般用符号 Q_e 表示, 其单位是焦耳 (J)。

(2) 辐射通量

辐射通量定义为单位时间内流过的辐射能量 Φ_e , 又称为辐射功率, 表示为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.9)$$

单位为瓦特 (W) 或焦耳/秒 (J/s)。

(3) 辐射出射度

辐射出射度定义为辐射体单位面积向半空间发射的辐射通量 M_e , 是用来反映物体辐射能力的物理量, 表示为

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.10)$$

单位为 W/m^2 。

(4) 辐射强度

辐射强度定义为点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量 I_e , 如图 1.4 所示, 即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1.11)$$

单位为瓦特·球面度⁻¹ ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)。

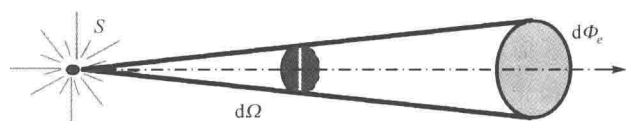


图 1.4 辐射强度示意图

由辐射强度的定义可知, 如果一个置于各向同性均匀介质中的点辐射体向所有方向发射的总辐射通量是 Φ_e , 则该点辐射体在各个方向的辐射强度 I_e 是常量, 有

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1.12)$$

(5) 辐射亮度

辐射亮度定义为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量 L_e , 如图 1.5 所示, 表示为

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (1.13)$$

式中, θ 是给定方向和辐射源面元法线间的夹角, 单位为瓦特/球面度·米² ($\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$)。

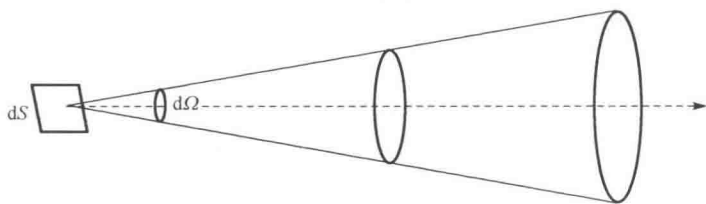


图 1.5 辐射亮度示意图

显然，一般辐射体的辐射强度与空间方向有关。

但是有些辐射体的辐射强度在空间方向上的分布满足

$$dI_e = dI_{e0} \cos \theta \quad (1.14)$$

式中， I_{e0} 是面元 dS 沿其法线方向的辐射强度。符合式 (1.13) 规律的辐射体称为余弦辐射体或朗伯体。式 (1.14) 代入式 (1.13) 得到余弦辐射体的辐射亮度为

$$L_e = \frac{dI_{e0}}{dS} L_{e0} \quad (1.15)$$

可见余弦辐射体的辐射亮度是均匀的，与方向角 θ 无关。余弦辐射体的辐射出射度为

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} = L_{e0} \pi \quad (1.16)$$

(6) 辐射照度

在辐射接收面上的辐照度 E_e 定义为照射在面元 dA 上的辐射通量 $d\Phi_e$ 与该面元的面积 dA 之比。即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1.17)$$

单位为 W/m^2 。

(7) 单色辐射度量

对于单色光辐射，同样采用上述物理量表示，只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量，并且对所有辐射量 X 来说单色辐射度量与辐射度量之间均满足

$$X_e = \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} d\lambda \quad (1.18)$$

1.2.2 光度量

人眼的视觉细胞对不同频率的辐射有不同响应，故用辐射度单位描述的光辐射不能正确反映人的亮暗感觉。光度单位体系是反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位，在光频区域光度学的物理量可以用与辐射度学的基本物理量 Q_e 、 Φ_e 、 I_e 、 M_e 、 L_e 、 E_e 对应 Q_v 、 Φ_v 、 I_v 、 M_v 、 L_v 、 E_v 来表示，其定义为一一对应。

(1) 光视效能

描述了某一波长的单色光辐射通量产生多少相应的单色光通量，即光视效能 K_λ 定义为同一波长下测得的光通量与辐射通量之比，即

$$K_{\lambda} = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1.19)$$

单位是流明/瓦特 (lm/W)。通过对标准光度观察者的实验测定, 在辐射频率 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ (波长 555nm) 处, K_{λ} 有最大值, 其数值为 $K_m = 683 \text{lm/W}$ 。单色光视效率是 K_{λ} 用 K_m 归一化的结果, 其定义为

$$V_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_m} = \frac{1}{K_m} \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1.20)$$

图 1.6 所示为明视觉 V_{λ} (日间视觉) 和暗视觉 V'_{λ} (夜间视觉) 条件下单色视觉效率曲线, 其中在两种视觉下, 人眼分别由两类不同视觉细胞起作用。

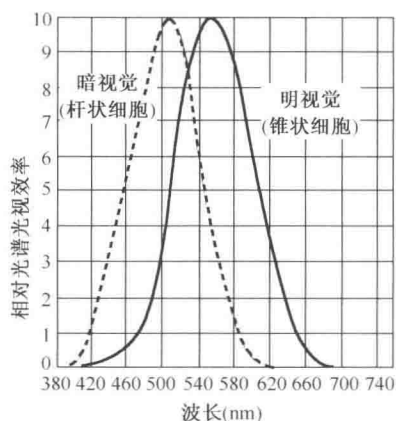


图 1.6 光谱光视效率曲线

(2) 光通量

表示光辐射通量对人眼引起的视觉强度

$$\Phi_v = K_m \int \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1.21)$$

单位为流明 (lm), 也是一个客观量, 光源发出可见光的效率。

(3) 发光强度

在给定方向上的单位立体角内光源发出的光通量

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1.22)$$

单位为坎德拉 (cd), 发光强度描述光源在某一方向发光的强弱程度

考虑了光源发光的方向性。由此式可得光通量的另一积分式

$$\Phi_v = \int I_v d\Omega \quad (1.23)$$

对各向同性光源由式 (1.23) 可得

$$\Phi_v = 4\pi I \quad (1.24)$$

式中, I 为常数。

(4) 光照度

投射到单位面积上的光通量

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (1.25)$$

单位为勒克斯 (lx), $1\text{lx}=1\text{lm}/\text{m}^2$ 。由此可以推出, 照度的距离反比定律。

由

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} = \frac{d\Phi_v}{dS/R^2}$$

可得

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} = \frac{I_v}{R^2} \quad (1.26)$$

这一结果表明, 一个均匀点光源在一点的光照度与该光源的发光强度成正比, 与距离平方成反比。

若被照平面法线与光投射方向成 θ 角, 则式 (1.26) 变为

$$E_v = \frac{I_v}{R^2} \cos\theta \quad (1.27)$$

(5) 光亮度

光源单位面积上的发光强度 (光源在指定方向单位面积上的发光能力)

$$L_v = \frac{dI_v}{dS} \quad (1.28)$$

单位为坎德拉/平方米 (cd/m^2)。如果平面法线与观察方向成 θ 角, 如图 1.7 所示。

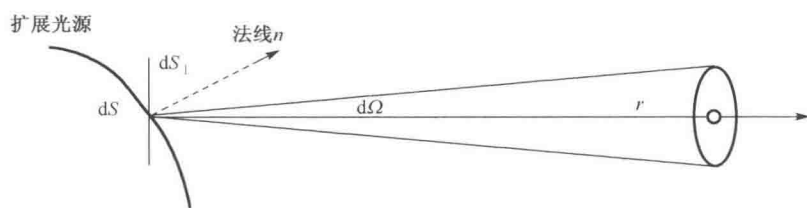


图 1.7 法线与观察方向成 θ 角的关系

式 (1.28) 为

$$L_v = \frac{dI_v}{dS \cos\theta}$$

由

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

进一步得到

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1.29)$$

人眼睛感知的是光源的亮度大小, 不是发光强度的强弱。表 1.1 是常见物体的亮度。