

高等学校试用教材

光电技术

清华大学 孙培懋
长春光机学院 刘正飞 合编

机械工业出版社

530039

高等学校试用教材

光电技术

清华大学 孙培懋
长春光机学院 刘正飞 合编



机械工业出版社

(京)新登字054号

光电技术是研究光电信号的形成、传输、采集、变换及处理方法的技术科学。它以光电子学为基础,综合利用光学、精密机械、电子学和计算机技术解决工程课题,是现代信息技术的重要分支,是光学仪器实现机电一体化的发展方向。

本教材重点介绍光电子系统的连接技术,包括与光电信号变换有关的器件、电路、变换原理和应用。全书共分九章,主要有光电探测器件、光电成像器件、热电探测器和发光及光控器件、光电检测电路的设计、非相干和相干光光电信号的变换方法及光电技术的典型应用等。教材内容体现系统性、实用性和先进性,有助于促进光学机械和电子、计算机技术与系统的结合。

本书为光学仪器专业的光电技术课程教材,也可供自动检测、精密量仪、生产过程自动化和激光光电子学专业的大专院校师生和从事光学与光电技术及电子工程工作的技术人员参考。

光 电 技 术

清 华 大 学 孙培懋 合编
长春光机学院 刘正飞

责任编辑:韩雪清 责任校对:张 佳
封面设计:郭景云 版式设计:王 颖
责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)
机械工业出版社北京印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行,新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆,印张14¹/₂,字数353千字
1992年5月北京第1版,1992年5月北京第1次印刷
印数0,001—3,000,定价:4.20元

ISBN7-111-03087-7/TN·55(课)

前 言

本书是全国高等工业学校仪器仪表专业教材编审委员会光仪专业编审小组确定,按照杭州教材会议确定的光仪专业“光电技术”教材编写大纲,由清华大学精密仪器系和长春光机学院电子工程系在原“光电技术及系统”教材基础上,根据国内一些专家和教材审稿会的评审意见重新修改后编写的。本书既可作为精密仪器、光学仪器专业的教材,也可作为自动检测、精密测量、生产过程自动化和激光技术等专业大专院校师生和从事光电技术工作的工程技术人员参考书。

光电技术是一门以光电子学为基础,综合利用光学、精密机械、电子学和计算机技术解决各种工程应用课题的技术学科。它是光学技术实现机电仪一体化的发展方向。光电技术的内容涉及多种学科领域,根据课程设置要求,本教材的内容限定在光学系统和电子系统的连接点。主要讲述与光电信号变换有关的光电变换器件、光电接口电路、信号变换原理以及典型光电系统的应用。光仪专业工程人员在掌握了工程光学、精密机械和电子学、计算机这几类知识后,借助本课程可以实现光学系统和电子系统的结合,以便于采用电子学方法来解决光学工程的问题。同样,电子专业工程人员也可借助于本课程利用光学方法来解决电子工程的问题。

全书共分九章。第一章到第五章是光电变换和电光变换器件,包括电真空光电器件、光电导器件、半导体结型光电器件、热探测器和光电成像器件以及发光及光控制器件。介绍了这些变换器件的功能、原理、特性和使用要点。第六章光电检测电路的设计介绍了典型光电器件组成接口电路的分析和设计方法。第七章概括介绍了以几何光学为基础的非相干光光电信号变换方法。第八章归纳了以物理光学为基础的相干光光电信号变换方法。第九章介绍了光电技术在检测、通信、传感及信息处理中的典型应用。在绪论中介绍了光电技术的发展、特点、应用领域和前景,使读者对光电技术在现代信息技术中的地位、作用有一个全面的了解。为了促进教学及有助于读者的设计工作,书中还介绍了一些必要的技术数据。每章后选编了相应的思考题与习题。有些章节还列出了计算例题,希望对读者掌握教材内容有所补益。

通过本课程的学习,希望能达到下列教学要求:

- 1) 了解典型光电器件的原理和特点,掌握常用光电器件的性能、使用要点和选用原则。
- 2) 了解光电检测电路的设计和参数估算方法,能设计和调试简单的光电检测电路。
- 3) 了解和掌握常用光电信号变换方法,能对实际工程问题独立提出采用光电方法的技术方案或对已有光电系统进行分析。

在编写这本教材时,我们努力使它能体现出如下的特点:

(1) 系统性 光电技术属于边缘技术学科,涉及到许多技术内容。由于素材广泛而学时有限,在教材组织上我们力求少而精,努力将各技术领域已发展起来的许多行之有效的光电方法,按教学要求合理地精选和编排分类,以求形成一个比较科学的体系。

(2) 实用性 光电技术是应用技术学科,有很强的实践性,要求有丰富的经验和技巧方法的灵活运用。根据工程设计的需要,我们把课程重点放在技术方法和技巧的介绍上,以

求提高读者解决实际工程问题，特别是有关光电系统总体设计的能力。

(3) 先进性 光电技术是活跃发展的学科，处于不断演变的过程。传统的方法不断更新，许多领域中的新技术突破，带动了器件、技巧和技术的新技术。我们力求全面反映这些具有发展前景的新技术，使课程内容具有相对的先进性。

本书由清华大学精仪系孙培懋教授和长春光机学院电子工程系刘正飞副教授合编。刘正飞编写了第一、二、三、四、五章。孙培懋编写了绪论和第六、七、八、九章并校阅了全书。华中理工大学叶家雄教授担任本书主审。

在编写过程中得到了有关院校的专家和前辈们的指导和帮助。参加审稿工作的有：天津大学张以谟教授、北京理工大学周仁宗教授、国防科技大学吕海宝副教授、武汉测绘科技大学雷玉堂副教授、大连理工大学项世法副教授。编者谨向所有对本书出版提供帮助的同志表示衷心感谢。

由于我们的学识有限，一定存在许多不足之处。我们诚恳希望读者能不吝指正以便今后改正。

编者

1991.5

目 录

绪 论	1	§5-2 光控器件	93
第一章 光电器件的物理基础	6	思考题与习题	101
§1-1 光的概念与量度学中的参量	6	第六章 光电检测电路的设计	102
§1-2 半导体的基础知识	11	§6-1 光电检测电路的静态设计	102
§1-3 光电导效应	20	§6-2 光电检测电路的动态设计	115
§1-4 光伏效应	22	§6-3 光电检测电路的噪声估算	125
§1-5 光电发射效应	25	思考题与习题	129
思考题与习题	30	第七章 非相干光光电信号变换方法	133
第二章 光电探测器件	31	§7-1 时变光信号的直接测量	134
§2-1 真空光电管	31	§7-2 时变光信号的调制和解调	141
§2-2 光电倍增管	31	§7-3 简单光学目标的空间定位	147
§2-3 光电导器件	39	§7-4 光学图象的扫描	153
§2-4 光伏器件	45	§7-5 几何参量的光电检测	158
思考题与习题	57	思考题与习题	163
第三章 热电探测器件	59	第八章 相干光光电信号变换方法	165
§3-1 基本原理	59	§8-1 相干光信息及相干探测	165
§3-2 温差电偶与温差电堆	61	§8-2 相干光的相位调制和检测	172
§3-3 测辐射热计	64	§8-3 相干光的频率调制和检测	182
§3-4 高莱元件	65	思考题与习题	194
§3-5 热释电器件	66	第九章 光电技术的典型应用	196
思考题与习题	70	§9-1 弱光信号的检测	196
第四章 光电成像器件	71	§9-2 视频图象测量	204
§4-1 象管	71	§9-3 光纤通信和传感	210
§4-2 摄像管	74	§9-4 光电印刷和存储	215
思考题与习题	87	思考题与习题	223
第五章 发光器件与光控器件	88	参考文献	224
§5-1 发光器件	88		

绪 论

一、光电技术的发展

在我们周围世界中，任何过程和现象都直接或间接地伴随着电磁辐射，其中包括为人眼能直接观察的可见光以及紫外和红外辐射等。这些光辐射可能发自被研究对象本身，也可能借助外部辐射而间接产生。作为实际的载体，这些光辐射“载荷”着多种多样的信息，并且和被研究过程或现象之间有着内在的联系，人们可以根据这些信息来定量地确定物体的外观属性或物质的内部结构。以光辐射为传输载体，随时间变化或按空间分布的信息统称为光学信息。和其他种类的信息相比，光学信息有许多特点，它具有丰富的信息容量，占据宽阔的光频范围以及有多参量、并行、高速的传输处理能力，特别是它显示的直观性，能为人类的视觉所直接感受，因此光学信息是人类观察和认识世界的重要信息来源。

在人类社会发展中，为了有效地采集和处理光学信息，人们创造出了各种类型的光学装置和仪器。借助于它们的帮助，人类不断引伸和扩展自己在空间分辨、时间存储和识别判读等方面的视觉能力。可以说光学技术为推动社会生产的发展曾经并正在发挥巨大的作用。传统光学仪器是在视觉参予下的人机系统，人的操作和观察是整个系统不可缺少的环节。科学技术的发展，对复杂光信息的高速采集和处理提出了更高的要求，这是传统的光学仪器所难以胜任的。新的光学现象的发现以及无线电电子学向着光频方向的扩展，为传统的光学技术提供了进一步发展的动力。

现代技术的进步超越了传统的学科界限，形成了彼此间的渗透和结合。在光学技术的发展中，无线电电子学和控制信息理论发挥了重要影响。这不仅反映在光学的基本理论方面（例如傅里叶光学和统计光学的产生）而且也反映在应用技术方面。许多在电子学中行之有效的技术方法，例如放大、振荡、编码、调制等都已相继移植到光学系统中来。许多电子学的有源、可控器件或单元电路功能也已经或正在采用光学方法实现。随着激光、薄膜和微电子技术的应用、有些光学装置也在向集成化（即光路固体化微型化）的方向发展。在传统的光学仪器中利用光电传感器、电子技术和微处理机技术更是光学仪器实现自动化的常用手段，可以说电子技术促进了现代光学技术的进步。另一方面光学技术对其他学科的发展也起着推动的作用。在电子学，自动控制或人工智能等技术中，凡涉及到高精度远距离测量或与图象有关的应用，常常要求助于光学技术。与集成电路生产至关重要的 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{m}$ 数量级的超精细加工和检测，更是与光学技术密切相关。这样，光学信息以其突出的特点吸引着电子技术并使之向光频波段扩展，开拓出新一代的光电子器件。这样的技术发展促进了光学技术和电子技术的渗透和结合，形成了综合使用光学和电子技术的光电混合系统。这里，以光电子学为基础的各种光电、电光、光控等有源可控器件起着决定性作用，它沟通了光学和电子学系统间的联系，并为它们各自的发展增加了活力。

二、光电信息系统

广义的光电系统包括二个主要的分支，即光电能量系统和光电信息系统。光电能量系统，诸如太阳能发电、激光加工、激光医疗和激光核聚变等，主要是解决有关大功率光辐射能量

的产生、控制、利用以及向其它能量形式的转换。这是一个专门的学科，有着广阔的发展前景。本书因篇幅限制将不涉及这一内容。

所谓光电信息系统指的是以光辐射和电子流为信息载体，通过光电或电光相互变换，综合利用光学或电子学的方法进行信息的传输、采集、处理、存储或显示，以实现确定目标的混合系统，以下简称光电系统。

实现光电或电光等变换的关键环节是各种有源或无源的光电子器件。其中光电转换器件，例如各种光敏元件和摄像及变象器件等，可将各种光学参量或其空间分布转换为电量或相应的时序分布。电光转换和控制器件，例如各种电致发光、显示器件、激光器、空间调制器及可变折射率器件等，可将电量变成光量或用电量控制光波或光束的特性，以调制它们的参数。利用这些器件可以组成各种类型的光电系统。

光电系统的主要类型，基本组成和光电信号的联系表示在图0-1的示意图中。它们大致可分作下列几种类型。

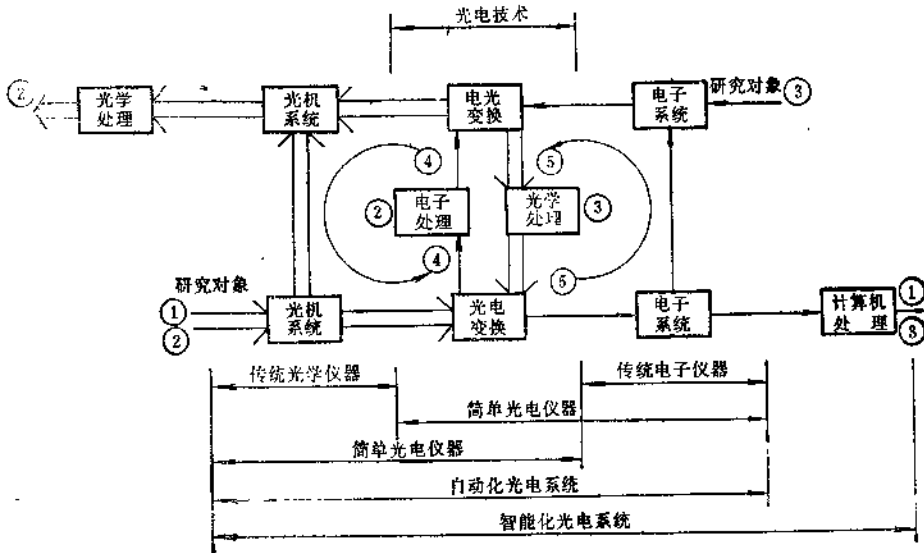


图0-1 光电信息系统的类型、基本组成和光电信号的联系

(1) 光-电型 它们的组成和信号流程表示在图中的①-①分支中。在这种应用最广泛的系统中，载荷有被研究信息的光载波通过光电变换变成电信号，再利用常规的电信号处理来实现检测和控制作用。光学仪器的自动化常采用这种方式。若进一步利用计算机对信息进行判读和评估，可进而组成能部分代替人的视觉和思维活动的机器视觉系统。

(2) 光-电-光型 如图中②-②分支所示。在这种系统中，由光机系统采集到的光信号通过光电变换变成电信号，经电信号处理后再经过电光变换形成光信号输出，电视技术中的摄像、显象以及声象光盘中的录制和再现可看作是这类系统的代表。

(3) 电-光-电型 如图中③-③分支所示。电信号经过电光变换得到可在光路中传输的光信号，再经光电变换转换为电信号后作进一步处理或输出。它的典型应用是光纤通信。

(4) 光电混合型 如图中④-④分支所示。它的主要特点是使传统光路实现光路器件的“有源化”和封闭的光束网络，例如光导纤维、空间调制器等。这将最终组成有源可控的光

学系统和集成光路。和现有的无源光路比较，这无疑光学技术的根本变革，为混合型光学信息处理开拓了美好前景。

(5) 电光混合型 如图中⑤-⑤支路所示。这种系统的目标是将电路系统元器件的功能用光学方法来实现，即所谓的电路元件的“光子化”，例如光学晶体管和光学双稳态器件等，目前许多单元器件已相继问世或正在研制中。后两种光电系统是光电技术未来的发展方向，其中的光电混合式或全光学式的光学计算机是这些系统最有吸引力的发展目标。

三、光电技术和光电检测

光电技术是研究光电系统中光和电信号的形成、传输、采集、变换及处理方法的技术科学。它的处理对象可以是光学的、电学的或其它的非光学量。采用光电方法的共同特点是所有被研究的信息都将通过各种效应（机、热、声、电、磁）调制到光载波上，而对光载波的处理可以是光学的或是电子学的。

从常用的光学技术角度出发，重要的是将光学信息或者可变为光学信息的其它信息转换为电信号，进而组成光、机、电、计算机的综合系统，实现光学仪器的自动化。在这个意义上光电检测作为一种共性技术具有重要的意义。所谓光电检测指的是对光信号的调制变换和接收解调两个主要方面。图0-2是典型的光电检测系统的组成和信息流程图。图中，天然或人工的光辐射源通过光学系统投射到被检测物体上，利用被检测物体对入射辐射的反射、吸收、透射、衍射、干涉、散射、双折射等光学属性，将被测变量调制到光载波的特征参量上。这些参量可以是光载波的变化幅度、频率或相位以及光的偏振状态，甚至可以是光束的传播方向或介质折射率的变化。为了实现调制作用，需要利用光参量调制器，目前广泛应用的有机械的、光学的、声光、电光、磁光效应的等各种方式。调制过程是一方面使光辐射随时间作有规律的变化以形成载波信号，另一方面使载波信号的一个或几个特征参量随被测信息改变。这种被测信息的感知和能量形式变换的过程称作调制变换。载荷着信息的光信号通过不同类型光电接收器转换成电信号，经过滤波放大等预处理后进入到解调器，在此将输入信号和调制器中作为调制基准的参考信号相比较，消除载波信号的影响，得到与被测参量成比例的输出信号。这种光电信号的能量再转换和信号检波过程称作接收解调，解调的电信号可用常规的电子系统作进一步处理和数据输出，得到最终的测量结果。图中的光学机械环节是用来实现被测物的定位、传送和扫描运动的。

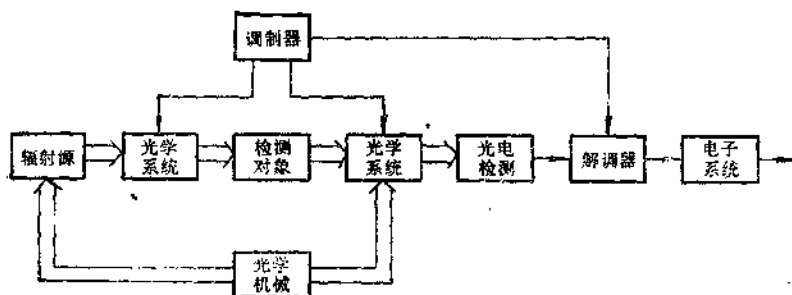


图0-2 典型光电检测系统的组成和信息流程

根据系统实现功能的不同，光电检测系统可以分为以下类型：

(1) 测量检查型 其基本功能是对进行光学或非光学参量的光电检测，可测参量包括几何量（长度、角度、形状、位置、变形、面积、体积、距离等）、运动参量（速度、转动、流量、振动、加速度等）、表面形状参量（工件粗糙度、疵病、伤痕等）、光学参量（吸收、反射、透射、光度、色度、波长和光谱等）、成分分析（物理属性、浓度、浊度等）、机械量（质量、应力、应变、压强等）、电磁量（电流、电场、磁场等）以及温度和放射线的测量等。检测系统要求可靠的重复示值和可信度，并且要有适用的数据处理能力和数据输出方式。

(2) 控制跟踪型 这是一种有光电检测能力的反馈控制系统。光电传感器是信号反馈单元，当它检测到受控目标相对平衡状态的偏差信号时，可通过闭环控制使目标相对基准实现伺服跟踪或恒值调节。它的主要应用包括军事和科学应用（激光制导、热定向、飞行物自动跟踪等）和工业应用（精密工作台的自动定位、工业图形的自动加工、状态参量的极值控制以及有视觉能力的机器人等）。跟踪系统要求有准确的跟踪能力和快速的动态响应。

(3) 图象分析型 它的功能是采集目标的二维或三维的光强空间分布，记录和再现目标的图象并进行判读、识别或图象的运算处理。图形检测是图象分析的分枝，其目的是同时完成图形几何坐标和光密度等级的精确测量，应用在工业图形检测中。图象测量和分析主要依靠扫描或摄像装置采集光信号，同时进行空间-时间和光量-电量的变换。为了将大容量的光学图象变成相应的数字图象，需要大容量的图象存储器。图象数据的处理和分析由计算机完成。

四、光电技术的特点、应用和发展

光学技术处理的是空间光强信息，它具有多维、并行、快速数据处理等能力。电子技术处理的是一维电量随时间的变化，它有较高的运算灵活性和变换精度。光电技术兼备这些优点，表现出以下的特征：

(1) 有广泛的适用范围 能获取和处理各种光学信息以及可以转换为光信息的非光学参量，包括探测机构内部或危险环境下的工作参量。

(2) 有较高的信号检测能力 能进行远距离、非接触、快速、高灵敏度的检测和传输；检测所需的输入能量几乎不影响被测物的能量状态；检测信噪比高，信息容量大，传输能力强。

(3) 有较强的信息运算能力 可进行复杂信息的并行处理和多种形式的数学运算。运算速度快，空间互连效率高，抗干扰能力强，可调制变量多，信号变换灵活。

光电技术特别是光电探测、光通信、光电测量和控制、光电信息处理和光存储等的应用已遍及军事、科学研究、工业、农业、宇宙和环境科学、医疗卫生和民用等各个领域。从星体温度探测和人造卫星监测到生物细胞的显微测量和微循环检查，从视觉工业机器人和光学计算机到民用全自动照相机和简单光电开关，光电技术已经成为现代科学技术和人民生活中不可缺少的环节，特别是在生产领域中生产过程的视觉检查和制品加工自动化、各种性能参数的精密测试以及图形检测和分析判断等方面，光电技术将发挥重要作用。为了实现光学仪器的更新换代，光电技术将在机电仪一体化的光学仪器的研制开发中起主导作用。利用光电技术组成的各类光电装置是计算机控制、管理以及监控系统对外联系的最有前途的外部设备，是一种在技术上最有潜力的信息机器。

回顾生产技术的发展过程，人类经过了以人和工具相结合为特点的手工化阶段，经历了由动力和机械相结合的机械化阶段，在近世纪又踏进了以检测和控制为特点的，广泛应用电气和电子技术的电气化和自动化阶段。在当今的新技术革命中，以信息为标志，以计算机为代表，包括微电子学、生物工程、激光与光导纤维、新材料、新能源和海洋开发等在内的新兴技术正在推广应用，人类的生产技术已开始走向以信息机器和计算机结合为特征的智能化的新时代。作为新一代的信息科学，光电技术正在取得重大的进展，类似于电工技术发展过程中半导体电子学技术的初期阶段。这是光电技术迅速发展的必然性。可以肯定，未来的信息技术不会是单纯的电子的世界，光子和电子相结合将会开辟出前所未有的新局面，创造出可以和过去几十年来电子技术的发展相媲美的更加广阔的新天地。

第一章 光电器件的物理基础

本章着重介绍两个主要内容：一个是辐射量和光度量的定义及它们之间的换算关系；另一个是半导体光电器件的物理基础，如能带理论、PN结理论、半导体光电效应和光电发射过程等。这些是以后各章所述具体光电器件的理论基础，对于正确理解和掌握各种光电器件的原理、性能和用法是十分重要的。

§1-1 光的概念与量度学中的参量

物理学认为光有两种属性，既是电磁波又是光子流。光电技术中也要用到这两种概念。在研究光的传播问题时常把光视为电磁波；在研究光的辐射与吸收问题时常把光视为光子流。这两种概念在现代物理学中可得到圆满解释。

一、电磁波谱与光子能量公式

如图1-1所示，按波长顺序把全部电磁波排列起来称为电磁波谱。整个电磁波谱约覆盖24个数量级的波长范围，而人眼所能感受的电磁波（可见光）只占很小一部分，其余的都看不见。

为了研究方便，电磁波谱分为长波区、光学区和射线区三个大的谱区。光电技术所涉及的只是光学谱区。

光学谱区的波长范围为 $10^{-2}\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 。它又可分为红外辐射、可见光和紫外辐射三个波段。其中可见光的波长范围

为 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 。把这三个波段统称为光学谱区放到一起来研究的原因是，它们有相同的辐射与吸收的机理，许多辐射源的光谱分布和接收器的灵敏阈都同时覆盖着这三个波段。在实验技术上，为了接收这些辐射并聚焦成象都要使用光学透镜。

爱因斯坦理论指出，在研究光辐射或吸收的时候，应把光视为光子流。每个光子的能量 ϵ 与频率 ν 成正比，即

$$\epsilon = h\nu \tag{1-1}$$

式中， h 为普朗克常数， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ； ν 为频率，也可表示为光速与波长之比，即 $\nu = c/\lambda$ ， $c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ 。因此式(1-1)又可表示为

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$$

按上式由可见光的波长范围即可得可见光光子的能量范围为 $3.2\sim 1.6\text{eV}$ 。

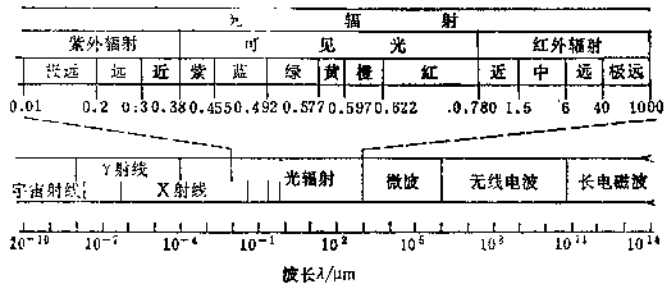


图1-1 电磁波谱

二、辐射量与光度量

可见光在整个电磁波谱中只占很小一部分，可是它却与人们的生活密切相关。为了使光辐射的量度既符合物理学对电磁辐射量度的规定，又符合人的视觉习惯，在光学上对光辐射的量度建立有两套参量和单位。一套参量是与物理学中对电磁辐射量度的规定完全一致的，称为辐射量，适用于整个电磁波谱，当然，也包括可见光。另一套参量是以人的视觉习惯为基础建立起来的，称为光度量，只适用于可见光。这两套参量的名称、符号、定义式彼此对应，基本都相同，只是单位不同。为了区别这两种量，规定用下标 e 和 v 表示。例如某参量符号为 X ，则 X_e 表示该参量的辐射量； X_v 表示该参量的光度量。常用的参量有：

1. 辐射能 Q_e ，光量 Q_v

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐射能，用 Q_e 表示，单位为焦耳（J）。

光通量对时间的积分称为光量 Q_v ，单位为流明秒（ $\text{lm}\cdot\text{s}$ ）。

2. 辐通量 Φ_e ，光通量 Φ_v

以辐射的形式发射、传播或接收的功率称为辐通量，用 Φ_e 表示，单位为瓦（W）。

发光强度为 I_e 的光源，在立体角元 $d\Omega$ 内的辐通量称为光通量， $d\Phi_v = I_e d\Omega$ ，单位为流明（lm）。

3. 辐射出射度 M_e ，光出射度 M_v

离开表面一点处面元的辐通量，除以该面元面积，称为辐射出射度，用 M_e 表示，单位为瓦每平方米（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

离开表面一点处面元的光通量，除以该面元面积，称为光出射度，用 M_v 表示，单位为流明每平方米（ $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

4. 辐射照度 E_e ，光照度 E_v

照射到表面一点处面元上的辐通量，除以该面元的面积，称为辐射照度，用 E_e 表示，单位为瓦每平方米（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

照射到表面一点处面元上的光通量，除以该面元的面积，称为光照度，用 E_v 表示，单位为勒克斯（lx）。

注意： E 和 M 量纲相同，但含义不同， E 表示被照， M 表示出射，lx是光照度的专用单位，尽管 M_v 与 E_v 量纲相同，但 M_v 的单位不能用lx。

5. 辐射强度 I_e ，发光强度 I_v

在给定方向上的立体角元内，离开点辐射源或辐射源面元的辐射功率，除以该立体角元，称为辐射强度 I_e ，单位为瓦每球面度（ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ）。

发光强度 I_v 在光度量中是基本量，单位为坎德拉cd。cd的意义是，频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射在给定方向上的辐射强度 $I_e = 1/683\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ 时，规定为1cd。

6. 辐射亮度 L_e ，光亮度 L_v

表面一点处的面元在给定方向上的辐射强度，除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积，称为辐射亮度 L_e ，单位为瓦每球面度平方米（ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

表面一点处的面元在给定方向上的发光强度，除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积，称为光亮度 L_v ，单位为坎德拉每平方米（ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

7. 曝光量 H

光照度对时间的积分称为曝光量 H ，单位为勒克斯秒（ $\text{lx}\cdot\text{s}$ ）。

表1-1给出了常用辐射量和光度量的名称、符号和单位;表1-2是光照度单位换算表。

表1-1 常用辐射量和光度量的名称、符号与单位

参 量		单 位	
名 称	符 号	名 称	符 号
辐(射)能 光 量	Q_0	焦〔耳〕	J
	Q_v	流〔明〕秒	$\text{lm}\cdot\text{s}$
辐(射)通量 光 通 量	Φ_0	瓦〔特〕	W
	Φ_v	流〔明〕	lm
辐(射)出(射)度 光 出 射 度	M_0	瓦每平方米	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
	M_v	流〔明〕每平方米	$\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$
辐(射)照度 〔光〕照度	E_0	瓦每平方米	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
	E_v	勒〔克斯〕	lx
辐(射)强度 发 光 强 度	I_0	瓦每球面度	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$
	I_v	坎〔德拉〕	cd
辐(射)亮度 〔光〕亮 度	L_0	瓦每球面度平方米	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
	L_v	坎〔德拉〕每平方米	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$
曝 光 量	H	勒〔克斯〕秒	$\text{lx}\cdot\text{s}$

注:〔 〕内的字是在不致混淆的情况下可以省略的字。

表1-2 光照度单位换算表

照 度 单 位	勒〔克斯〕 lx	毫勒〔克斯〕 mlx	辐 透 ph	英尺烛光 fc
1 lx(lm/m^2)	1	10^3	10^{-4}	9.29×10^{-2}
1 mlx	10^{-3}	1	10^{-7}	9.29×10^{-5}
$1\text{ ph}(\text{lm}/\text{cm}^2)$	10^4	10^7	1	929
1 fc(lm/ft^2)	10.764	10.764×10^3	1.0764×10^{-3}	1

三、辐射量与光度量的换算

1. 光谱量与积分量

一个非受激辐射源所发出的辐射往往是按波长连续分布的。以如图1-2所示的辐通量的分布曲线为例,把给定波长 λ_0 处很小波长间隔 $d\lambda$ 内的辐通量 $d\Phi_v$,称为单色辐通量,即图中画斜线的小矩形面积

$$d\Phi_v = \Phi_{v,\lambda} d\lambda \quad (1-2)$$

$$\Phi_{v,\lambda} = \frac{d\Phi_v}{d\lambda} \quad (1-3)$$

$\Phi_{v,\lambda}$ 称为辐通量的光谱密集度,为了简便,也可称 $\Phi_{v,\lambda}$ 为光谱辐通量。词冠光谱二字表示该参量是对于某给定波长而言的,或者是波长的函数。同理,其它参量如也冠以光谱二字时也表示该量是对于某给定波长而言的,或者是波长的函

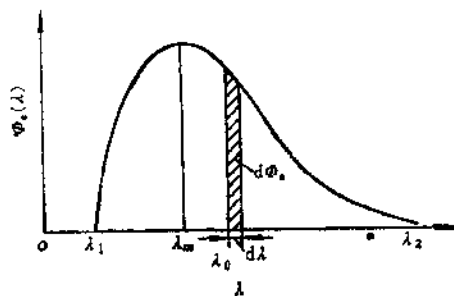


图1-2 辐通量的光谱分布曲线

数，这类参量统称为光谱量。

单色辐通量的积分为

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (1-4)$$

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (1-5)$$

式(1-4)称多色辐通量，式(1-5)称全色辐通量。同理，其它光谱量也有类似的积分，这类参量统称为积分量。

2. 光谱光视效能 $K(\lambda)$ 与光谱光视效率 $V(\lambda)$

光谱光视效能表征在不同波长辐射下人眼的响应能力，借助于这一概念可以讨论辐射量与光度量的转换。

光谱光视效能 $K(\lambda)$ 表示同一波长下光谱光通量与光谱辐通量之比，即

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v,\lambda}}{\Phi_{e,\lambda}} \quad (1-6)$$

由于人眼在频率为 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ ($\lambda_m = 555 \text{nm}$ ，该波长称为峰值波长)的辐射下， $K(\lambda)$ 最大，记以 K_m ， $K_m = 683 \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。所以把某给定波长下的 $K(\lambda)$ 与 K_m 之比，称为光谱光视效率 $V(\lambda)$ 。

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (1-7)$$

其实， $V(\lambda)$ 就是 $K(\lambda)$ 的归一化，是一个无量纲的量， $V(\lambda)$ 曲线如图1-3所示。图中实线为明视觉 $V(\lambda)$ 曲线，虚线为暗视觉 $V(\lambda)$ 曲线，对于暗视觉， $\lambda'_m = 507 \text{nm}$ ， $K'_m = 1700 \text{lm/W}$ 。应指出：所有光度计量均以明视觉的 $K(\lambda)$ 为准。

$V(\lambda)$ 是个重要参量，可从图或表(表1-3)查得，由此即建立起任意波长下光谱光度量与光谱辐射量之间的换算关系。例如

$$\begin{aligned} \Phi_{v,\lambda} &= K(\lambda) \Phi_{e,\lambda} \\ &= K_m V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} \\ &= V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} \times 683 \text{lm/W} \end{aligned} \quad (1-8)$$

由于所有光度量和辐射量都与 Φ 有关，所以 $K(\lambda)$ 也适用于其他光谱量之间的转换，即

$$K(\lambda) = \frac{X_{v,\lambda}}{X_{e,\lambda}} \quad (1-9)$$

例如， $\lambda = 625 \text{nm}$ ， $L_{e,\lambda}$ 与 $L_{v,\lambda}$ 间的转换关系为

$$L_{v,\lambda} = K(\lambda) L_{e,\lambda} = K_m V(\lambda) L_{e,\lambda} = 683 \text{lm/W} \times 0.321 L_{e,\lambda}$$

其中 $V(\lambda) = 0.321$ 由查表1-3得。

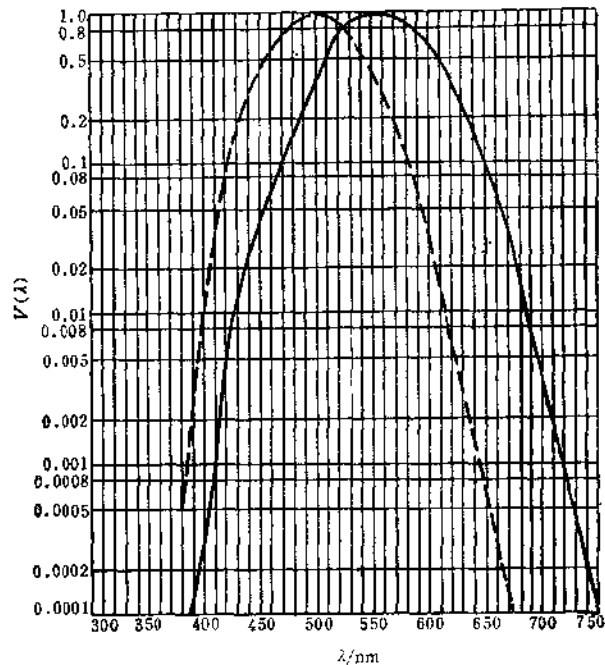


图1-3 光谱光视效率 $V(\lambda)$ 曲线

表1-3 明视觉的光谱光视效率

λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$
385	0.00006	485	0.16930	585	0.81630	685	0.01192
395	0.00022	495	0.25360	595	0.69499	695	0.00572
405	0.00064	505	0.40730	605	0.56680	705	0.00293
415	0.00218	515	0.60820	615	0.44120	715	0.00148
425	0.00730	525	0.79320	625	0.32100	725	0.00074
435	0.01684	535	0.91485	635	0.21700	735	0.00036
445	0.02980	545	0.98030	645	0.13820	745	0.00017
455	0.04800	555	1.00000	655	0.08160	755	0.00009
465	0.07390	565	0.97860	665	0.04458	765	0.00004
475	0.11260	575	0.91540	675	0.02320	775	0.00002

3. 光视效能 K

K 表示辐射源总光通量与总辐通量之比, 即

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} \quad (1-10a)$$

按式 (1-10a) 中 K 的定义可导出

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{v,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} = K_m \alpha = \alpha \times 683 \text{lm/W} \quad (1-10b)$$

式中

$$\alpha = \frac{\int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{v,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} \quad (1-11)$$

称之为探测器 (例如人眼、光电阴极等) 对光源的匹配因数。如果知道 α 即可按式 (1-10b) 算出光视效能, 从而就确定了辐通量与光通量的转换关系。例如, 在全光谱范围, 暗适应时眼对色温为 2854~2870K, 标准灯的光谱匹配因数 α 为 0.0294, 从而按式 (1-10b) 得

$$K = \alpha \times 683 \text{lm/W} = 0.0294 \times 683 \text{lm/W} = 20 \text{lm/W}$$

四、朗伯余弦定律

光源在任意方向上的发光强度正比于该方向与光源表面法线夹角余弦, 这个定律即为朗伯余弦定律。

$$I = I_0 \cos \theta \quad (1-12)$$

式中, I_0 为光源表面法线方向的发光强度 (见图 1-4)。

凡发光强度服从朗伯余弦定律的光源均称朗伯光源或朗伯辐射体。其特点是, 光源在各方向亮度相同 (见图 1-5)。严格地说, 只有绝对黑体才是朗伯光源, 但实际光源中, 如荧光屏、内部照明的毛玻璃、漫反射表面等都很接近朗伯光源。

由光出射度、发光强度和亮度的定义, 对于朗伯光源可推导出以下的重要关系式:

$$M = \int L \cos \theta d\Omega \quad (1-13)$$

因朗伯光源 $L = L_0 = \text{常数}$, 立体角元 $d\Omega$ 在球坐标中的公式为

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$$

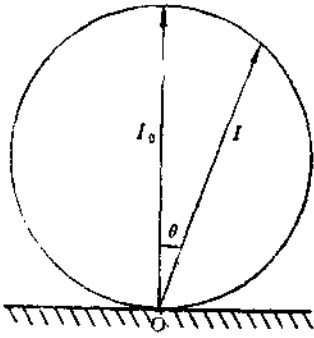


图1-4 朗伯余弦定律

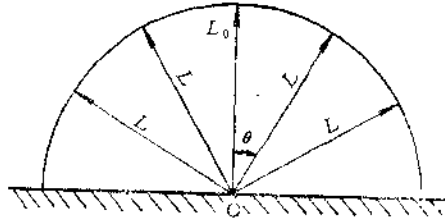


图1-5 朗伯光源

从而得

$$M = L \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L \quad (1-14)$$

式(1-14)表明, 对于朗伯光源 $M = \pi L$, 这个结论在光电技术中常会用到。

§1-2 半导体的基础知识

现代许多光电器件都是由半导体材料制作的, 首先掌握一些半导体的基本知识, 对于正确理解光电器件的原理、特征及其正确选用是十分重要的。本节着重介绍一些与半导体光电器件有关的基本概念和理论。

一、能带理论

1. 原子能级与晶体能带

单个原子中的电子是按壳层分布的, 只能具有某些分立的能量, 这些分立值在能量坐标上称为能级。晶体中由于原子密集, 离原子核较远的壳层常要发生彼此交叠, 与此相对应的能级则扩展为能带(见图1-6)。这时, 价电子已不再属于那个原子了, 它可以在能带内自由运动, 这种现象称为电子共有化。

与价电子能级相对应的能带称为价带, 价带以上能量最低的能带称为导带, 导带底 E_c 与价带顶 E_v 之间的能量间隔称为禁带 E_g 。其实, 一切不允许电子存在的能量区域都可称为禁带, 只是由于晶体的物理、化学性质的变化主要与价电子有关, 所以我们要着重讨论价带至导带这一范围内的问题。

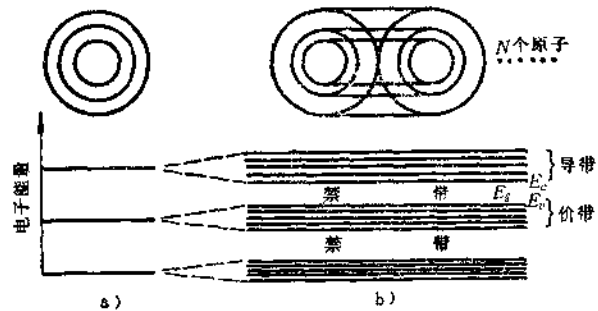


图1-6 电子共有化, 能级扩展为能带示意图
a) 单个原子 b) N个原子

常态下价带基本为电子所填满, 导带基本上空的。对于不同的材料, 禁带宽度不同, 导带中电子的数目也不同, 从而有不同的导电性。例如, 绝缘材料 SiO_2 的 $E_g \approx 5.2\text{eV}$, 导带中电子极少, 所以导电性不好。半导体 Si , $E_g \approx 1.1\text{eV}$ 导带中有一定数目的电子, 从而有一