

光电技术

刘振玉 编

● 北京理工大学出版社

光 电 技 术

刘振玉 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

“光电技术”是从了解和熟悉光电系统的角度出发，讨论光电系统中的主要技术问题。全书共九章，主要内容是：光电系统中的光源；光电探测器原理与特性；光电开关；光学调制器；光电探测的各种方法；微弱光探测方法简述以及一些典型系统简介。

本书可作为光学仪器、光电技术专业本科生教材，也可供有关工程技术人员参考。

光 电 技 术

刘振玉 编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 15.75印张 352千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-358-6/TB·9

印数：1—3500册

定价：3.25元

前 言

近年来光电系统的类型日益增多，其应用方面也愈来愈广泛。这种系统是光学、微电子学、电子学、信息理论等多学科成果的综合应用。本书力图从认识和熟悉光电系统的角度出发，讨论光电系统中的主要技术问题。

本书是在北京理工大学多年使用的“光电技术”讲义的基础上而成稿的。全书共九章，主要内容包括：光电系统中的光源简述；各种实用的光电探测器的基本工作原理、性能和使用方法；光电开关原理与应用；光学调制器工作原理与特性；一些典型的和新型的光电检测方法；直接探测方法和相干探测方法的分析比较；弱光探测基本原理以及典型系统应用举例。

本书可作为光学仪器和光电子技术专业本科生教材，也可供有关专业学生和工程技术人员参考。

本书由吉林工业大学申铨国教授进行了精心审阅。在编写过程中亦得到北京理工大学工程光学系许多同志的热诚关怀，在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限，书中缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1989年于北京

出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从用过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由申铨国主审，经机械电子工业部光电技术教学指导委员会复查，兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之

处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室
1989年 8月

《普通物理学》是工科院校的一门基础课，也是工科院校的一门必修课。本书是根据《普通物理学》课程的教学大纲编写的。本书共分五章，第一章为力学，第二章为热学，第三章为电磁学，第四章为光学，第五章为近代物理。本书可作为工科院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事物理工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，参考了国内外许多优秀的教材和有关文献。本书在编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是北京理工大学物理系、清华大学物理系、国防科技大学物理系等单位的同志，在本书的编写过程中，给予了热情的帮助和支持。本书在编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是北京理工大学物理系、清华大学物理系、国防科技大学物理系等单位的同志，在本书的编写过程中，给予了热情的帮助和支持。

本书在编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是北京理工大学物理系、清华大学物理系、国防科技大学物理系等单位的同志，在本书的编写过程中，给予了热情的帮助和支持。本书在编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是北京理工大学物理系、清华大学物理系、国防科技大学物理系等单位的同志，在本书的编写过程中，给予了热情的帮助和支持。

本书在编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是北京理工大学物理系、清华大学物理系、国防科技大学物理系等单位的同志，在本书的编写过程中，给予了热情的帮助和支持。

目 录

绪言	(1)
第一章 光源及光辐射中的起伏	(5)
第一节 光源	(5)
第二节 光辐射中的起伏	(18)
第二章 光电探测器的理论基础	(27)
第一节 半导体的基础知识	(27)
第二节 光电导效应	(50)
第三节 光生伏特效应	(58)
第四节 光电子发射效应	(64)
第五节 光电探测器中的噪声	(73)
第三章 光电探测器	(90)
第一节 光电探测器的性能参数	(91)
第二节 光电管与光电倍增管	(96)
第三节 光敏电阻	(112)
第四节 光伏探测器	(125)
第五节 热探测器	(143)
第六节 电荷耦合器	(152)
第七节 电子束摄像管	(170)
第四章 光电开关	(177)
第一节 $p-n$ 结发光管	(177)
第二节 光电三极管和光电达林顿管	(183)
第三节 光电开关	(187)
第五章 光学调制器	(194)
第一节 调制的基本原理	(194)

第二节	调制盘	(213)
第三节	莫尔条纹	(239)
第四节	哈达玛变换调制	(257)
第五节	其它光学调制器	(273)
第六章	多元探测与扫描探测	(291)
第一节	双元探测方式	(291)
第二节	四象限探测方式	(295)
第三节	光机扫描探测方式	(306)
第四节	线阵器件的探测方式	(310)
第五节	视觉传感器	(319)
第七章	直接探测和相干探测	(327)
第一节	光电探测系统的类型和指标	(327)
第二节	直接探测系统的作用距离	(332)
第三节	直接探测系统的视场	(345)
第四节	直接探测系统的信号处理	(354)
第五节	直接探测系统的探测极限及趋近方法	(363)
第六节	相干探测原理	(367)
第七节	相干探测的特点	(372)
第八节	影响相干探测的因素	(376)
第九节	相干探测系统举例	(382)
第八章	微弱光信号的探测方法	(389)
第一节	随机过程的统计特性	(391)
第二节	相关接收	(405)
第三节	同步积累与取样平均法	(412)
第四节	锁相放大器	(418)
第五节	光子计数器	(423)
第九章	典型光电系统举例	(432)
第一节	光学传递函数测试仪	(433)
第二节	红外跟踪系统中的位标器	(440)
第三节	莫尔条纹测长仪	(447)

第四节	激光精密测长仪.....	(454)
第五节	脉冲激光测距仪.....	(461)
第六节	光电相位测距仪.....	(467)
第七节	激光多卜勒测速.....	(472)
第八节	傅里叶变换红外光谱仪.....	(482)

绪 言

由光学、微电子学、电子学、计算机和精密机械等综合而成的光电系统在近年来得到了引人注目的发展。光电系统已经在信息传感、信息存贮、信息传递、非接触精密计量和测量等许多应用方面得到了广泛应用。它已经深入到军事装备、遥感和空间系统、通讯装置、工业控制、精密测量、医学和生物仪器以及办公室自动化设备和生活用具等许多领域中去了。

光电系统实质上是广义的“光通讯”系统，各种信息可以由辐射源发出的光束携带，并由光传送到接收端。在接收端用光电探测器把光信号转变为电信号，再用电子系统处理电信号，最后检测出所需的信息。其特点是精密、快速、信息容量大、体积小。

光电系统在20世纪初已开始应用，而在近30多年来发展速度才显著加快了，其原因大致有：

一、光电探测器的品种增多、性能提高。目前，已有光谱范围从紫外到红外的各种光电探测器，并且均已达到很高的性能指标。14~40 μ m的长波红外光探测器性能也在不断提高。可实用的器件品种也在日益增多。器件响应速度最高的已小于1ns，可接收到几百兆赫调制频率的光信号。在探测能力上，有的器件可探测到单光子能量。在规模上，许多器件不仅可做单元器件还可做多元器件。新型的固体摄像器件已做成2048 \times 2048象元组成的列阵，可探测的信息量在不断

增加。

有了光电探测器就能把光学系统和电子系统有效地联系在一起形成品质优良的光电系统。

二、人造光源的发展。在人造光源中最主要的是各种新型激光器的出现。优质光源为光电系统提供了好的携带信息的工具。高功率激光器的出现使人们实现了对月球的光电测距。高相干性激光器的使用在表面测量中高度分辨率已达 0.1nm 。

三、新型集成电路和计算机技术的发展使光电系统的自动化、智能化程度迅速提高。在军事上,导弹制导系统、定向系统和警戒系统中的光电系统都有重要地位。在工业生产中,产品自动分选、自动生产线上产品自动在线检验以及机器人视觉系统等方面光电系统是很好的传感器,使用范围日益扩大。

四、新的光学材料和零件的出现。

五、近代信息理论的应用,使光学系统、光电探测器、电子系统(或加微机)等各个不同学科的环节,能够连在一起构成最佳的信息系统。

以上这些方面在技术上取得的新进展和新成就都将推动光电系统的发展,促使光电系统性能提高、类型增多。

目前,光电系统已有许多类型,形式和用途也多种多样。但是我们可以把它们归纳为两类。一类称为被动光电系统,另一类称为主动光电系统。他们可以由以下两个方块图来表示:

图(a)是被动光电系统方块图。在被动的光电系统中信息源是自然辐射源。例如所需探测的飞机、舰船、地形、星体、火焰、人体等物体他们都自身有红外或可见光辐射。由

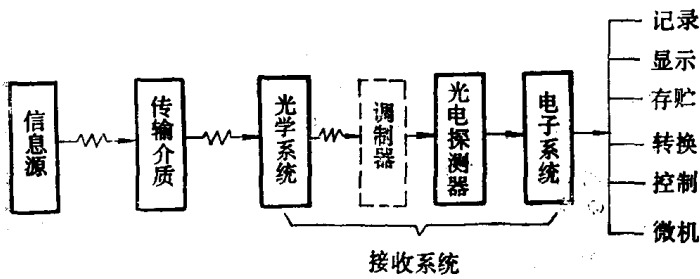


图 (a) 被动光电系统方块图

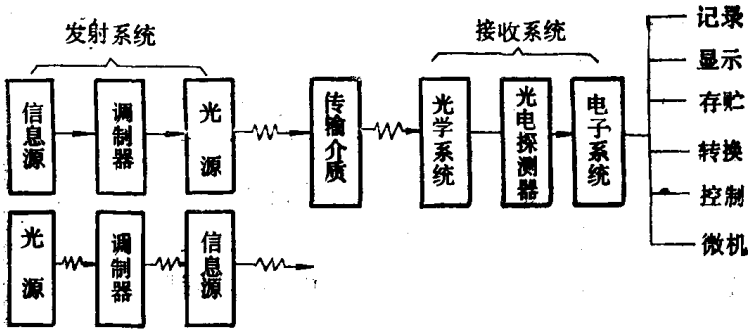


图 (b) 主动光电系统方块图

于它们的辐射性质与周围环境有差别，光电系统就能获取它们的有关信息。系统由图示几个环节组成。信息源的辐射经过传输介质——大气，然后到达接收光学系统。被接收光学系统获得的部分辐射被会聚到光电探测器上。光电探测器能把光信号转变为电信号。通常为了尽可能使检出信息的质量较高，系统中加入调制环节，使光电探测器输出信号是调制信号。调制信号经电子系统放大、处理后，就能检出所需信息。某些系统还加微机进行处理。由于检出的信息是由电信号表示的，所以可以跟后面各种环节连接，根据不同系统的

具体需要，后面可以接显示、记录、存贮环节或者接控制环节形成自动控制系统，或者接计算机完成智能性任务，还可以接转换环节把电信号变成非电量等。

图(b)为主动光电系统的方块图。在主动系统中信息源不同时兼作辐射源。系统不利用信息源自身辐射，或者信息源为非光学量。系统采用人造光源的辐射去照射被测物体，使所需信息能载到反射、透射或散射光波上去，然后由光电系统去进行检测。某些非光学的物理量先设法变成电信号，例如语言、图像等，然后通过调制器把信息载到光波上去进行传输。在接收端，主动光电系统与被动光电系统有同样的方块图。同样接收辐射后转换为电信号经过电路处理检出信息，并能和显示、记录、控制、转换等环节相连。主动系统中传输介质大多是大气，少数采用光纤。

本教材就是按照这两大类光电系统去组织内容的。从系统角度出发去讲述光电系统中的主要技术问题。

第一章 光源及光辐射中的起伏

第一节 光源

在光电系统中光是信息的携带者。产生光辐射的光源在系统中是必不可少的。光的光谱辐射能量(或强度)、频率、振幅均可携带、传输各种信息。光电系统中的辐射源其辐射光谱范围是紫外光波段、可见光波段和红外光波段。紫外光波段为 $0.01\mu\text{m}\sim 0.32\mu\text{m}$,可见光波段为 $0.32\mu\text{m}\sim 0.78\mu\text{m}$,红外光波段为 $0.78\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 。而目前光源和光电探测器所能覆盖的主要波段小于 $40\mu\text{m}$ 。光电系统广泛使用的波段小于 $14\mu\text{m}$ 。实际上没有一个光源能发出如此范围所有波长的辐射。实用光源只是其中某一波长或某一段光谱范围的辐射。所以,实用光源的种类是很多的。

光电系统中所用的光源可简单地划分为自然光源和人造光源两类。自然光源组成被动光电系统。人造光源可组成主动光电系统。但是按照光源的工作机理去分类更能突出其辐射性质和特点。这样光源可分为热辐射源、受激辐射源(激光器)、复合辐射源(电致辐射),光致辐射、化学发光和生物发光等。而前三种得到了更为广泛应用。

一、热辐射源

热辐射源的特性是它的辐射能量直接与它的温度有关。它基本上可分为两类,即黑体辐射和线状、带状辐射源。一

些不透明物体或炽热稠密气体接近黑体，辐射为连续光谱。而一些被激励的气体发光则为线状或带状光谱。

黑体辐射源可用黑体辐射的几个基本定律得到完善描述。

1. 基尔霍夫定律 如图 1-1 所示，在各处温度均为 T_0 。

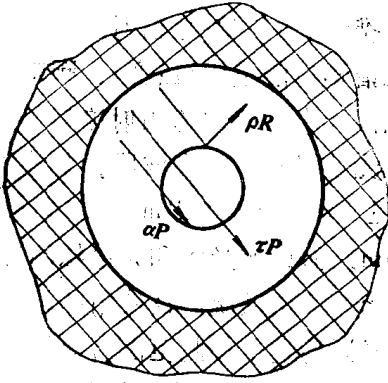


图 1-1 空腔内的物体

的真空腔内放置一个小实心物体 S ，无论 S 由什么材料构成，无论它的初始温度如何，它将最终达到并保持在温度 T_0 。因为只要空腔壁和 S 之间存在温度差，就有净辐射能量流向温度较低的那个地方，最后无论构成它们的材料如何，在各个方向辐射流都相同。

在热平衡时， S 所辐射的功率应等于它所吸收的功率

$$R = \alpha P \quad (1-1)$$

式中 R 为辐射发射量，即物体 S 的单位面积所发射的功率； α 为物体 S 的吸收率； P 为投射到物体 S 单位面积上的功率。 α 不可能大于 1，对于理想的黑体是完全的吸收体，辐射功率也最大。对于这种理想的辐射体 $\alpha = \varepsilon = 1$ ， ε 为比辐射率，表示辐射的本领。黑体的比辐射率为 1。其它物体表面辐射本领与黑体辐射本领的比值就是比辐射率。对于一般自然界的物体吸收效率都比理想黑体要低，于是比辐射率也相应小于 1，但在任何情况下都有

$$\varepsilon = \alpha \quad (1-2)$$

对于辐射的每一光谱分量 $e = \sigma$ 都成立。式(1-1)是基尔霍夫表达式，它是符合能量守恒定律的。

2. 斯忒藩-玻耳兹曼定律 它表达了绝对黑体全波长积分辐射发射量 R_B ，即绝对黑体单位面积内总的辐射功率与绝对温度的四次方成正比

$$R_B = \sigma T^4 \quad (1-3)$$

式中 R_B 的单位是瓦·厘米⁻²； $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ，称为斯忒藩-玻耳兹曼常数； T 为绝对温度(K)。

3. 维恩位移定律 当物体温度升高时，辐射光谱就向短波方向移动，这是一种普遍现象。如金属丝随着温度增加它总是先辐射红外光，然后就显深红、红、橙到蓝光，最后表现为白色。

维恩位移定律为：绝对黑体最大光谱辐射发射量 R_{B_m} 的波长 λ_m 与绝对温度 T 成反比，即

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad (1-4)$$

式中 λ_m 的单位是微米； T 为绝对温度，单位为度(K)； b 为常数，其值为 $2897.95 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

且维恩又指出：绝对黑体的最大光谱发射量 R_{B_m} 与绝对温度 T 的五次方成正比

$$R_{B_m} = bT^5 \quad (1-5)$$

R_{B_m} 的单位是瓦·米⁻²·微米⁻¹。

4. 普朗克公式 它给出了绝对黑体辐射的光谱分布函数，见图1-2所示。即绝对黑体的光谱辐射量，也就是单位面积辐射体在单位频率间隔内的辐射功率，是光频率 ν (或波长 λ)和温度 T 的函数，可表示为

$$R_{B\lambda} d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (1-6)$$

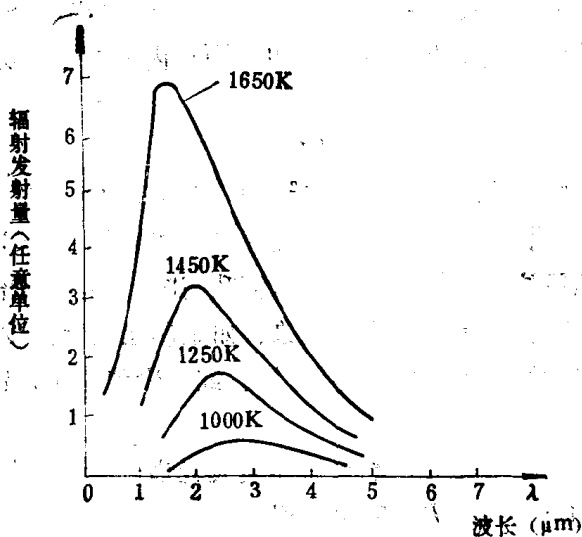


图1-2 黑体辐射功率的光谱分布

或
$$R_{B\nu} d\nu = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/KT} - 1} d\nu \quad (1-7)$$

式中 c 为光速； h 为普朗克常数，等于 $6.626176 \times 10^{-34} \text{ J}$ ； K 为 $1.380662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； ν 为光频率。

普朗克辐射公式是更为普遍的形式。如果一个理想辐射体的温度已知，就可用它来计算在任意波段中的光谱辐射发射量。将它积分就可得到斯忒藩-玻耳兹曼定律，将它微分就得到维恩定律。

5. 表面的发射和吸收特性的角分布 对于平面黑体，光谱辐射率与方位角的关系为

$$R_{B\omega\lambda} = R_{B\omega\lambda} \cos\theta \quad (1-8)$$