



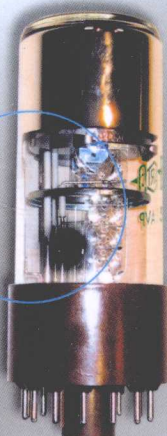
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

光电探测与信号处理

安毓英 曾晓东 冯喆珺 编著



科学出版社
www.sciencep.com



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

光电探测与信号处理

安毓英 曾晓东 冯喆珺 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在光电子信息系统中,光电探测器对光信号的解调过程是功率响应。本书从这一特点出发,结合探测器性能和信噪比的概念,系统地介绍了光电探测系统和信息处理的基本内容和基本技术。第1章介绍光电探测基础,为后面章节提供必需的基础知识;第2章介绍光子、光热两大类点探测器的工作原理与负载电路的设计方法;第3章介绍直接探测和外差探测两种体制的系统性能及最佳信号处理方法;第4章介绍光电成像的特点和CCD等像探测器的功能;第5章介绍光接收机信号检测理论,包括最佳接收机和理想接收机的概念。

本书可作为电子科学与技术、光信息科学与技术等专业“光电检测技术”课程的本科生教材,也可供应用物理、通信工程、电子工程等相关专业的研究生和科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

光电探测与信号处理/安毓英,曾晓东,冯喆珺编著. —北京:科学出版社,2010.5

(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-027262-1

I. ①光… II. ①安…②曾…③冯… III. ①光电探测-高等学校-教材
②信号处理-高等学校-教材 IV. ①TN215②TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第070898号

责任编辑:张 濮 张丽花 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市农林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年5月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—4 000 字数:350 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

编委会

顾问：姚建铨 中国科学院院士 天津大学
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主任：吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任：金亚秋 教授 复旦大学
郝跃 教授 西安电子科技大学
严晓浪 教授 浙江大学
胡华强 编审 科学出版社

委员：(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸旭	教授	长春理工大学	逯贵桢	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢泉	教授	贵州大学
宋梅	教授	北京邮电大学	蔡敏	教授	华南理工大学

材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. **体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。**依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. **按照分类指导原则,满足多层面的需求。**针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

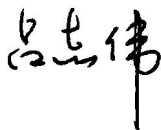
3. **传承精品,吐故纳新。**本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. **拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节。**适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. **注重立体化建设。**本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!



教育部高等学校电子科学与技术专业
教学指导分委员会主任
哈尔滨工业大学教授

本书是为电子科学与技术、光信息科学与技术等电子信息类、电子信息科学类本科专业编写的“光电检测技术”课程教材。

本书是作者在三十余年教学实践积累的基础上编写而成的。在编写过程中,从教学的普适性出发,注重电子信息系统与光电子信息系统的区别与联系。本书具有以下特点:

(1) 强调电子信息系统中电信号解调和光电子信息系统中光信号解调过程的区别,前者是幅度响应,后者是功率响应。

(2) 探测器的性能与系统性能联系密切,全书紧密结合光电探测器的性能来分析光电子信息系统的性能,强调对探测器会选会用,提高学生的实践能力。

(3) 与电子信息系统一样,信噪比同样是光电子信息系统中最重要的因素。本书以光电子信息系统中的信噪比为最重要的指标,分析直接探测和外差探测系统的性能特点。

(4) 全书以最佳接收机和理想接收机的概念来总结前面四章介绍的内容,便于帮助读者建立完整的光电子信息系统的概念。

(5) 清晰明了的物理概念与循序渐进的内容安排,有助于教师组织教学和学生自学。

全书分为5章,每章后附有习题和思考题。第1章介绍光电探测基础,为学习后面章节提供必需的基础知识;第2章介绍点探测器的工作原理与负载电路的设计方法,涵盖了光子、光热两大类几乎所有类型的探测器;第3章介绍直接探测和外差探测原理,包括两种探测体制的系统性能和最佳信号处理方法;第4章介绍光电成像的特点和CCD等像探测器的功能;第5章简要介绍光接收机信号检测理论,包括最佳接收机和理想接收机的概念。

本书的参考学时为46学时。既可作为电子科学与技术、光信息科学与技术等专业“光电检测技术”课程的本科生教材,也可供应用物理、通信工程、电子工程等相关专业的研究生和科技人员使用。

本书第1章由安毓英编写,第2章、第5章由冯喆珺编写,第3章、第4章由曾晓东编写,安毓英统编全稿。西北工业大学赵建林教授、西北大学陆治国教授审阅了全书书稿,并提出许多建设性意见,在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,希望读者指正。

作 者

2009年12月

丛书序

前言

第 1 章 光电探测基础	1
1.1 光电系统描述	1
1.1.1 光电系统的基本模型	2
1.1.2 光源发射增益	3
1.1.3 接收光功率	6
1.2 光接收机视场	7
1.2.1 透镜变换	7
1.2.2 探测功率和视场	11
1.3 光电探测器的物理效应.....	13
1.3.1 光子效应和光热效应	14
1.3.2 光电发射效应	15
1.3.3 光电导效应	16
1.3.4 光伏效应.....	18
1.3.5 温差电效应	20
1.3.6 热释电效应	20
1.4 光电转换定律和光电子计数统计.....	21
1.4.1 光电转换定律	21
1.4.2 光电子计数统计	22
1.5 光电探测器性能参数.....	28
1.6 光电探测器的噪声.....	33
1.6.1 噪声的概念	33
1.6.2 噪声的描述	34
1.6.3 光电探测器的噪声源	36
1.7 辐度学与光度学.....	41
1.7.1 辐射量	42
1.7.2 光度量	44
1.8 背景辐射.....	46
1.9 探测器主要性能参数测试.....	50

1.9.1	探测器光谱响应率函数的测试方法	50
1.9.2	光谱响应率函数的测试	53
	习题与思考题 1	55
第2章	点探测器	57
2.1	光电管	57
2.1.1	光阴极材料及其光谱响应	57
2.1.2	光电特性和伏安特性	64
2.1.3	频率特性及其他特性	70
2.1.4	强流管	71
2.2	光电倍增管	72
2.2.1	倍增极的特性	73
2.2.2	工作电压	74
2.2.3	光电特性和伏安特性	77
2.2.4	噪声特性	79
2.2.5	微通道板光电倍增管	81
2.3	光电导探测器	82
2.3.1	光电转换原理	82
2.3.2	工作特性	84
2.3.3	几种典型的光敏电阻及派生器件	89
2.3.4	使用注意事项	92
2.3.5	光电导探测器的偏置方式	92
2.4	PN结光伏探测器的工作模式	95
2.4.1	光电转换原理	95
2.4.2	光伏探测器的工作模式	97
2.5	光电池	98
2.5.1	短路电流和开路电压	99
2.5.2	输出功率和最佳负载电阻	100
2.5.3	光谱、频率响应及温度特性	102
2.5.4	慢变化光信号探测	103
2.5.5	脉动光信号探测	106
2.6	光电二极管	108
2.6.1	Si 光电二极管	108
2.6.2	PIN 硅光电二极管	115
2.6.3	雪崩光电二极管	116
2.6.4	紫外光电二极管	119

2.6.5 半导体色敏器件	121
2.6.6 光电三极管	123
2.6.7 HgCdTe 光电二极管	125
2.6.8 光子牵引探测器	125
2.7 光电象限探测器和位敏探测器	126
2.7.1 象限探测器	126
2.7.2 光电位敏传感器(PSD)	128
2.8 光热探测器	135
2.8.1 光热探测器的热过程分析	135
2.8.2 热敏电阻	137
2.8.3 热释电探测器	137
习题与思考题 2	140
第 3 章 直接探测和外差探测	143
3.1 直接探测系统的性能分析	144
3.1.1 包络探测	144
3.1.2 信噪比特性	145
3.1.3 等效噪声功率特性	145
3.2 提高输入信噪比的光学方法	147
3.2.1 滤波法	148
3.2.2 场镜法	149
3.3 前置放大器的噪声匹配	150
3.3.1 前放噪声等效电路	151
3.3.2 噪声系数	152
3.3.3 匹配方法	153
3.4 阈值探测的光电探测统计	157
3.5 相关检测	160
3.5.1 相关原理	160
3.5.2 锁定放大器	165
3.5.3 信噪比改善	168
3.6 维纳滤波器	168
3.7 匹配滤波器	170
3.8 BOXCAR	172
3.8.1 取样积分器的工作原理	173
3.8.2 取样积分器的主要参数	176
3.9 光子计数	180

3.9.1 光子计数的原理	181
3.9.2 光子计数系统的测量误差	185
3.10 光频外差探测的基本原理	187
3.10.1 光频外差光路结构	187
3.10.2 双光束干涉	188
3.10.3 外差信号的特点	189
3.11 光频外差探测的信噪比分析	191
3.11.1 不计本振噪声	191
3.11.2 计入本振噪声	192
3.11.3 光电探测器的外差探测极限灵敏度	193
3.12 光频外差探测的空间相位条件	194
3.12.1 两光束不平行	195
3.12.2 两光束平行但不垂直光敏面	196
3.13 光频外差探测系统	197
3.13.1 降低空间相干条件——艾里斑原理法	197
3.13.2 自适应光外差技术	200
习题与思考题 3	203
第4章 像探测器	205
4.1 光电成像概论	205
4.2 真空摄像管	207
4.2.1 真空摄像管结构	208
4.2.2 摄像原理	209
4.2.3 其他真空摄像管	210
4.3 自扫描光电二极管阵列	212
4.3.1 SSPD 线阵列	213
4.3.2 SSPD 面阵列	220
4.4 CCD 摄像器件	223
4.4.1 CCD 结构和存储电荷原理	223
4.4.2 电荷转移工作原理与电极结构	226
4.4.3 电荷注入和读出	233
4.4.4 CCD 图像传感器	235
4.5 电荷注入器件 CID	237
4.6 CMOS 图像传感器	239
4.6.1 CMOS 图像传感器的成像原理及结构	240
4.6.2 CMOS 图像传感器的优势	242

4.6.3 CMOS 图像传感器的发展	243
4.7 固体图像传感器主要特性参数	244
4.7.1 光谱响应特性	244
4.7.2 灵敏度	244
4.7.3 暗信号及动态范围	245
4.7.4 分辨率	246
4.7.5 工作频率	248
4.7.6 CCD 的特性参数	248
习题与思考题 4	250
第 5 章 光接收机信号检测理论概述	251
5.1 信号检测的基本问题	251
5.1.1 接收机的任务	251
5.1.2 统计判决和假设检验	252
5.1.3 代价函数与风险	254
5.2 最佳接收机的概念	254
5.2.1 最大信噪比准则	254
5.2.2 实现最佳接收机的方法	255
5.3 信号参量估值理论简介	256
5.3.1 信号参量估值模型	256
5.3.2 贝叶斯估值	258
5.3.3 最大后验概率估值准则	258
5.3.4 最大似然估值	259
5.4 理想接收机	259
5.4.1 后验概率与信息量	259
5.4.2 通信和雷达的不同	261
习题与思考题 5	262
参考文献	263

1.1 光电系统描述

光电系统是指以光波作为信息和能量载体而实现传感、传输、探测等功能的测量系统。它在各个领域特别是军用领域获得了很大成功,呈现出迅速发展的态势。与电子系统相比,光电系统最大的不同在于信息和能量载体的工作波段发生了变化。可以认为,光电系统是工作于电磁波波谱图上最后一个波段——光频段的电子系统。电磁波波谱图如图 1.1-1 所示。

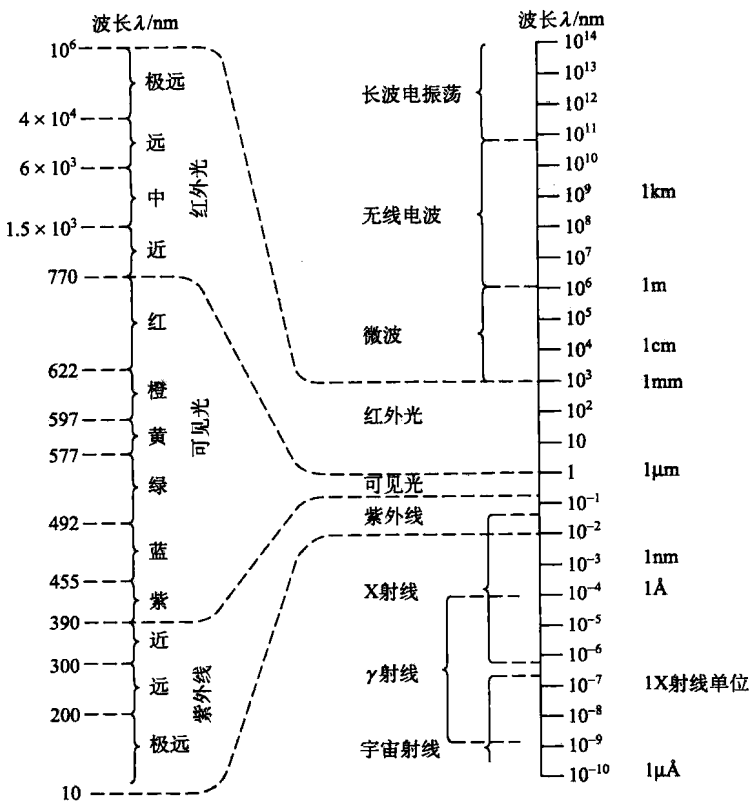


图 1.1-1 电磁波谱图

从图 1.1-1 可见,电磁波波谱的光频段包括红外光、可见光、紫外线和 X 射线部分的电磁辐射,频率范围为 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{16}$ Hz,或波长 $1\text{mm} \sim 10\text{nm}$ 。从光量子的观点看,单光子的能量为 $h\nu$ 。 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{S}$,称为普朗克常数。频率 ν 越高,单光子能量越大。由于 $1\text{J}=0.624 \times 10^{19} \text{eV}$,故单光子能量可用 eV(电子伏特)表示为

$$h\nu = 4.134 \times 10^{-15} \cdot \nu \quad (\text{eV})$$

于是,光波波段的单光子能量变化就如表 1.1-1 所示。以后会知道,单光子能量 $h\nu$ 的大小在光电转换过程中将起作用。

表 1.1-1 光波段单光子能量表

波谱区	波长 λ	频率 ν/Hz	$h\nu/\text{eV}$
微波	$300 \sim 1\text{mm}$	$1 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{12}$	$0.000\ 004 \sim 0.004$
红外光	$1\text{mm} \sim 0.76\mu\text{m}$	$3 \times 10^{12} \sim 4.3 \times 10^{14}$	$0.004 \sim 1.7$
可见光	$0.76 \sim 0.38\mu\text{m}$	$4.3 \times 10^{14} \sim 5.7 \times 10^{14}$	$1.7 \sim 2.3$
紫外线	$0.38 \sim 0.01\mu\text{m}$	$5.7 \times 10^{14} \sim 10^{16}$	$2.3 \sim 40$
X 射线	$10 \sim 0.03\text{nm}$	$10^{16} \sim 10^{19}$	$40 \sim 4\ 000$
γ 射线	$<0.03\text{nm}$	$>10^{19}$	$>4\ 000$

1.1.1 光电系统的基本模型

与电子系统载波相比,光电系统载波的频率提高了几个量级。这种频率量值上的变化使光电系统在实现方法上发生了质变,在功能上也发生了质的飞跃。主要表现在载波容量、角分辨率、距离分辨率和光谱分辨率大为提高,在通信、雷达、精导、导航、观瞄、测量等领域获得广泛应用。应用于这些场合的光电系统的具体构成形式尽管各不相同,但有一个共同的特征,即都具有光发射机、光学信道和光接收机这一基本构型,称为光电系统的基本模型,如图 1.1-2 所示。

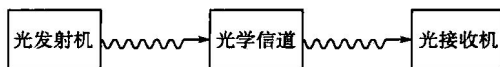


图 1.1-2 光电系统基本模型

光电系统通常分为主动式和被动式两类。在理解模型时应注意到:主动式光电系统中,光发射机主要由光源(如激光器)和调制器构成;被动式光电系统中,光发射机则理解为被探测物体的热辐射发射。光学信道和光接收机对两者是完全相同的。光学信道主要是指大气、空间、水下和光纤。

本课程主要涉及光接收机部分。光接收机用于收集入射的光场并处理、恢复光载波的信息,其基本模型如图 1.1-3 所示,包括三个基本模块。

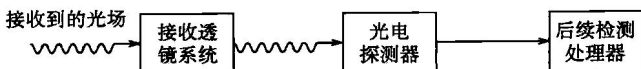


图 1.1-3 光接收机

第一部分是光接收前端(通常包括一些透镜或聚光部件),第二部分是光电探测器,第三部分为后续检测处理器。透镜系统把接收的光场进行滤波和聚焦,使其入射到光电探测器上。光电探测器把光信号变换为电信号。后续处理器完成必要的信号放大、信号处理及过滤处理,以从探测器的输出中恢复所需要的信息。

光接收机可以分为两种基本类型,即功率探测接收机和外差接收机。功率探测接收机也称为直接探测或非相干接收机,它的前端系统如图 1.1-4(a)所示。透镜系统和光电探测器用于检测所收集到的到达光接收机的光场瞬间光功率。这种光接收机的工作方式是最简单的,只要传输的信息体现在接收光场的功率变化之中,就可以采用这种接收机。外差接收机的前端系统如图 1.1-4(b)所示。本地产生的光波场与接收到的光场经前端镜面加以合成,然后由光电探测器检测这一合成的光波。外差式接收机可接收以幅度调制、频率调制、相位调制方式传输的信息。外差接收机实现起来比较困难,它对两个待合成的光场在空间相干性方面有严格的要求。因此,外差式接收机通常也称为空间相干接收机。不论是哪一种接收机,前端透镜系统都能把接收光场或合成后的光场聚焦到光电探测器的表面,这就使得光电探测器的面积可以比接收透镜的面积小很多。

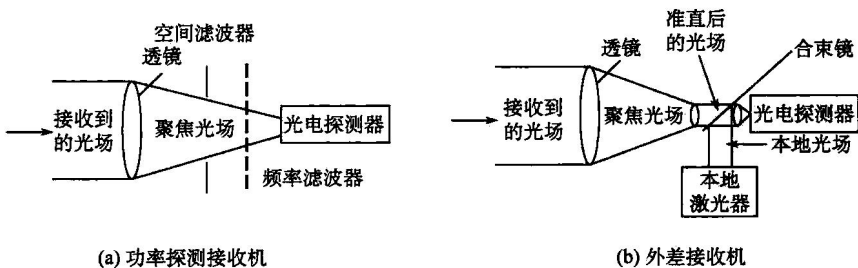


图 1.1-4 光接收机的两种基本类型

1.1.2 光源发射增益

虽然本书不涉及光发射机问题,但在计算光接收机收到的光功率时,与光发射机发射的光功率相关,这也是光波段的基本问题之一。本节介绍一下关于光源发射增益的问题。

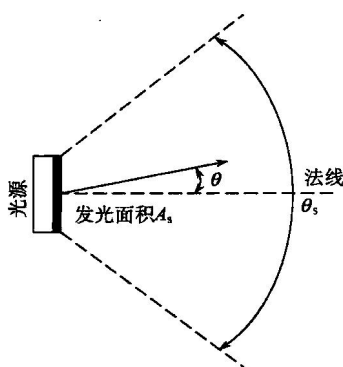


图 1.1-5 光反射角

光源的辐射特性可用图 1.1-5 来说明。光的辐射特性可用一个光源的亮度函数加以描述。亮度函数 $L(\theta)$ 的单位是 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ (瓦特每球面度平方米), 该函数描述了在一个给定的方向角 θ 时, 光源辐射的归一化功率。这一功率通常归一化为单位发光面积在单位立体角的辐射功率。因此, 光源亮度函数描述了光源的辐射功率分布。一个均匀辐射型光源在它的辐射角 Ω_s 内具有相同的亮度分布, 如图 1.1-5 所示。因此, 当均匀光源发光面积为 A_s , 辐射角为 Ω_s 时, 所辐射的总功率为

$$P_s = LA_s \Omega_s \quad (1.1-1)$$

对于辐射对称型光源, 立体角 Ω_s 与平面辐射角 θ_s 的关系为

$$\Omega_s = 2\pi[1 - \cos(\theta_s/2)] \quad (1.1-2)$$

一个朗伯光源就是在 $|\theta| < \pi/2$ 之间均匀辐射的光源。因此, 对朗伯光源 $\Omega_s = 2\pi \text{sr}$, $P_s = 2\pi LA_s$ 。假设发光面为均匀辐射, 对于大部分光源都是适用的。

由光源辐射的光场可以采用光束生成光学系统进行收集和重新聚焦。实现重新聚焦通常是在光源或者调制器的输出端放置一些透镜的组合, 把输出光束集中到一个特定的方向。这里给出一种在长距离空间通信中常用到的简单方式, 如图 1.1-6 所示。在光源后面配置一个聚束和扩束透镜组合是为了产生准直光束。理想情况下, 聚束透镜可以把光源场聚焦为一个点, 然后扩束透镜把它扩展为一个完好的平行光束。实际情况是光源场并不能被聚焦为一个点, 而扩束准直后的光束在传播过程中会扩展, 其平面光束的直径可表示为

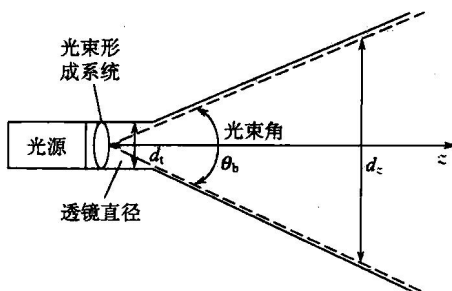


图 1.1-6 光束形成和光汇聚

$$d_z = d_t \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{d_t^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.1-3)$$

式中, λ 为波长, d_t 为输出透镜直径, z 为透镜的距离。在近场时 ($\lambda z/d_t^2 < 1$), 准直后的光束直径与透镜直径相同, 从透镜出来的光束均匀地分布在整個透镜上。在远场时 ($\lambda z/d_t^2 > 1$), 光束的直径将随距离的增加而扩大, 就好像光束是从一个点光源发出, 其扩散的平面角约为

$$\theta_b \approx \frac{\lambda}{d_t} \text{ rad} \quad (1.1-4)$$

式中, 角度 θ_b 为衍射极限发送机光束角。此时远离光源的扩散光场分布在一个二维的立体角 Ω_b 之内, 即

$$\Omega_b = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_b}{2}\right) \right] \approx \frac{\pi}{4} \theta_b^2 \quad (1.1-5)$$

图 1.1-7 给出了根据式(1.1-4)在不同波长时扩散角随透镜直径 d_t 的变化关系。例如, 光波长为 $0.5\mu\text{m}$, 透镜直径为 15cm , 此时的光束角为 $3 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 。这个数量级与微波发射相比具有巨大的优越性。因为微波天线发射的电磁束角是在度的量级, 所以采用很小尺寸的光学器件就可以把光束汇集集中在一个很小角度之内进行传输, 这就是光波段的特性之一。显然, 这在长距离空间传输中是很有用的。

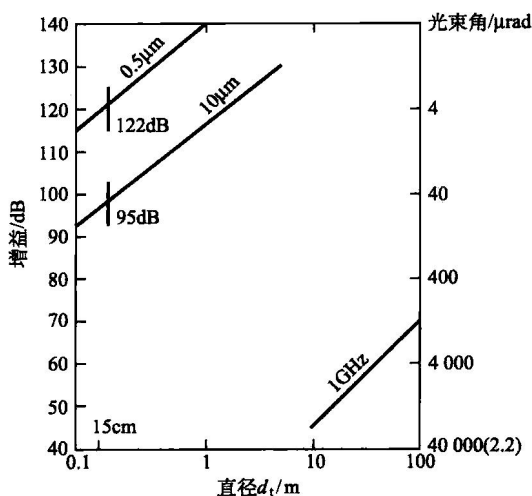


图 1.1-7 天线增益和光束角随天线直径的变化关系

在微波天线发射中, 天线的作用就是汇聚波束, 其会聚度用有效天线增益表征。这个概念同样适用于光波段。根据天线理论, 发射的电磁波束如果满足式(1.1-4), 则有效天线增益为

$$G_t = \frac{4\pi}{\Omega_b} \approx \left(\frac{4d_t}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1-6)$$

图 1.1-7 也给出了这个增益曲线。由图 1.1-7 可见, 15cm 的透镜具有的天线增益为 122dB (对 $0.5\mu\text{m}$ 光) 和 95dB (对 $10.6\mu\text{m}$ 光), 与微波天线相比这是一个巨