



高等学校信息工程类规划教材  
浙江省“十一五”重点教材

# 现代通信光电子技术 基础及应用

◎主编 黄 静 王友钊

XIANDAI TONGXINGGUANGDIAN  
ZHISHU JICHU JI YINGYONG



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校信息工程类规划教材  
浙江省“十一五”重点教材

# 现代通信光电子技术基础及应用

主 编 黄 静 王友钊  
副主编 童基均 李雄伟

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共 10 章,可分为两部分:光电子学基础、光电子技术在通信领域中的应用。

光电子学基础部分的内容在书的第 1~7 章中讲述,主要包括光辐射的基础知识,激光的作用原理及激光技术,光辐射在不同介质中的传播特性,光辐射的调制,光辐射的解调和光电转换器等内容。

光电子技术在光通信中的应用在书的第 8~10 章中讲述,主要包括光电子技术在网络接入方面的应用,光纤通信原理、系统及应用,波分复用技术和光交换网络等内容。

本书可作为本科通信专业学生的教材,也可作为相关科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代通信光电子技术基础及应用/黄静,王友钊主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.11  
高等学校信息工程类规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3103 - 5

I. ① 现… II. ① 黄… \* ② 王… ③ 王… III. ① 通信技术—光电子技术 IV. ① TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 247630 号

策 划 张 媛

责任编辑 王 飞 刘玉芳 张 媛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20

字 数 475 千字

印 数 1~3000 册

定 价 34.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3103 - 5/TN

**XDUP 3395001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

编者所授课程为“现代通信光电子学基础”，市场上该类教材不少，要么是太过于专业，不适合本科生学习，要么是内容有些过时，落后于现代技术的发展，还有的则是偏重理论分析，缺少读者所关注的应用部分的内容。

本书针对以上问题，对理论部分进行简化，对一些难理解且重要的知识点进行了更详细的讲解，使读者不仅能够看懂，更能够深入理解和运用。本书的内容比较新颖，能够让读者对光电子学的最新进展有比较清楚的了解，而且书中有不少应用内容，既使读者学有所用，又便于他们加深对理论部分的理解。

本书在参考国内相关经典教材的基础上，集众家之长，引入了前沿技术和相关理论的最新进展。另外，根据非“211”学校通信类专业的特点，将重点放在对基础理论的了解、技术的掌握和应用的熟悉三个层面上。

本书作为通信专业本科学生的教材，主要有以下两个特点：

(1) 本书在讲解完光电子学的基础知识后加入了应用部分——光网络方面的知识。这方面知识的应用比较多，但一些同类书籍中所涉及比较少，这是本书的一大特点。

(2) 本书中附有大量例题，在基础理论难以理解和公式难以记忆的地方，都有相关例题，极大地方便了读者的学习和理解，提高了学习效率。这是本书相比于其他同类书籍的又一大特点。

本书由黄静、王友钊担任主编，由童基均、李雄伟担任副主编。黄静编写了第1~4章，王友钊编写了第5~7章，童基均编写了第9章，李雄伟编写了第8、10章。在本书的编写过程中，汤先福研究生完成了书中习题的解答和总结，潘芬兰、夏雷研究生完成了书中图片的绘制，张江研究生对全书内容做了大量的校对和修改工作，在此一并表示感谢！此外，感谢浙江大学生物医学工程与仪器科学学院308实验室和浙江理工大学信息学院305实验室的全体研究生对于本书编写工作的支持，感谢浙江省教育厅对本书的资助。

编 者

2013年6月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	习题 .....	30
1.1 现代通信光电子技术 .....	1		
1.1.1 光电子技术 .....	1		
1.1.2 现代通信技术 .....	1		
1.1.3 光电子技术在现代通信领域的 应用 .....	1		
1.2 光电子技术的沿革 .....	2		
1.3 光电子技术的应用及发展方向 .....	3		
1.3.1 光电子技术的应用 .....	3		
1.3.2 光电子技术的发展方向 .....	3		
第 2 章 光学基础 .....	5		
2.1 几何光学基础 .....	5		
2.1.1 几何光学的基本概念 .....	5		
2.1.2 几何光学的基本定律 .....	7		
2.1.3 几何光学的基本原理 .....	9		
2.1.4 成像问题 .....	10		
2.1.5 透镜 .....	12		
2.2 光学系统 .....	14		
2.3 光度学与辐射度学基础知识 .....	17		
2.3.1 辐射量 .....	17		
2.3.2 光度量 .....	20		
2.4 光的电磁理论 .....	22		
2.4.1 麦克斯韦方程组 .....	23		
2.4.2 电磁场的波动性 .....	23		
2.4.3 平面电磁波 .....	24		
2.4.4 光波的辐射、辐射能 .....	26		
2.5 热辐射现象及研究规律 .....	27		
2.5.1 单色吸收比和单色反射比 .....	27		
2.5.2 基尔霍夫辐射定律 .....	28		
2.5.3 普朗克公式 .....	28		
2.5.4 瑞利-琼斯公式 .....	29		
2.5.5 维恩公式 .....	29		
2.5.6 维恩位移定律 .....	29		
2.5.7 斯忒藩-玻尔兹曼定律 .....	30		
2.5.8 色温 .....	30		
第 3 章 激光原理 .....	31		
3.1 激光的物理基础 .....	31		
3.1.1 光子的基本性质 .....	31		
3.1.2 光波模式和光子状态相格 .....	32		
3.1.3 光子的相干性 .....	34		
3.1.4 光子简并度 .....	36		
3.2 激光的特性 .....	36		
3.3 激光产生的原理及方法 .....	38		
3.3.1 黑体辐射的普朗克公式 .....	38		
3.3.2 受激辐射和自发辐射概念 .....	39		
3.3.3 $A_{12}$ 、 $B_{21}$ 、 $B_{12}$ 的相互关系 .....	41		
3.3.4 受激辐射的相干性 .....	41		
3.4 激光器的组成结构及原理 .....	42		
3.4.1 光放大概念的产生 .....	42		
3.4.2 实现光放大的条件——集居数 反转 .....	44		
3.4.3 光放大物质的增益系数与增益 曲线 .....	44		
3.4.4 光的自激振荡 .....	45		
3.4.5 光腔模式问题 .....	46		
3.4.6 共轴球面腔的稳定性条件 .....	50		
3.5 典型激光器 .....	55		
3.5.1 固体激光器 .....	55		
3.5.2 气体激光器 .....	63		
3.5.3 半导体二极管激光器 .....	68		
3.5.4 光纤激光器 .....	71		
习题 .....	74		
第 4 章 激光技术 .....	75		
4.1 调 Q 技术 .....	75		
4.1.1 调 Q 的基本理论 .....	75		
4.1.2 调 Q 的速率方程 .....	79		
4.1.3 电光调 Q .....	83		
4.1.4 声光调 Q .....	89		

4.1.5 被动式可饱和吸收调 Q .....	93	6.2.1 电光强度调制 .....	154
4.2 锁模技术 .....	98	6.2.2 电光相位调制 .....	157
4.2.1 锁模的概念 .....	98	6.2.3 电光调制器的电学性能 .....	157
4.2.2 锁模的基本原理 .....	98	6.2.4 电光波导调制器 .....	160
4.2.3 锁模方法 .....	99	6.2.5 电光扫描 .....	164
4.3 模式选择技术 .....	105	6.2.6 设计电光调制应考虑的问题 .....	167
4.3.1 横模选择 .....	105	6.3 声光晶体调制及声光膜调制 .....	168
4.3.2 纵模选择 .....	109	6.3.1 声光调制器的组成 .....	168
4.4 稳频技术 .....	114	6.3.2 声光调制器的工作原理 .....	169
4.4.1 影响激光频率稳定的因素 .....	115	6.3.3 调制带宽 .....	170
4.4.2 稳频的方法 .....	116	6.3.4 声光调制器的衍射效率 .....	171
<b>第 5 章 光辐射的传播 .....</b>	<b>127</b>	6.3.5 声束和光束的匹配 .....	171
5.1 光辐射在大气中的传播 .....	127	6.3.6 声光波导调制器 .....	172
5.1.1 大气衰减 .....	127	6.3.7 声光扫描 .....	172
5.1.2 大气湍流效应 .....	130	6.3.8 声光调制器设计应考虑的问题 .....	175
5.2 光辐射在电光晶体中的传播 .....	131	6.4 磁光晶体调制及磁光膜调制 .....	177
5.2.1 电致折射率变化 .....	132	6.4.1 磁光体调制器 .....	177
5.2.2 电光相位延迟 .....	133	6.4.2 磁光波导调制器 .....	178
5.3 光辐射在声光晶体中的传播 .....	136	6.5 直接调制 .....	179
5.3.1 相位栅类型 .....	136	6.5.1 半导体激光器(LD)直接调制	
5.3.2 声光衍射 .....	137	的原理 .....	179
5.4 光辐射在磁光介质中的传播 .....	141	6.5.2 半导体发光二极管(LED)的	
5.4.1 法拉第旋转效应 .....	141	调制特性 .....	180
5.4.2 磁光相互作用的耦合波分析 .....	142	6.5.3 半导体光源的模拟调制 .....	181
5.5 光辐射在水中的传播 .....	143	6.5.4 半导体光源的 PCM 数字调制 .....	182
5.5.1 传播光束的衰减特性 .....	143	6.6 空间光调制器 .....	183
5.5.2 前向散射 .....	144	6.6.1 空间光调制器的基本功能 .....	183
5.5.3 后向散射 .....	145	6.6.2 泡克耳斯读出光调制器	
5.6 光辐射在非线性介质中的传播 .....	145	(PROM) .....	184
5.6.1 非线性电极化率 .....	146	6.6.3 液晶空间光调制器 .....	186
5.6.2 光波在非线性介质中的传播 .....	146	6.6.4 其他类型的空间光调制器 .....	187
5.6.3 光混频及光倍频技术 .....	147	习题 .....	189
习题 .....	149	<b>第 7 章 光辐射的解调与光电转换器 ...</b>	<b>190</b>
<b>第 6 章 光辐射的调制 .....</b>	<b>150</b>	7.1 光电探测器原理 .....	190
6.1 光束调制原理 .....	150	7.1.1 光子效应和光热效应 .....	190
6.1.1 振幅调制 .....	150	7.1.2 光电发射效应 .....	190
6.1.2 频率调制和相位调制 .....	151	7.1.3 光电导效应 .....	191
6.1.3 强度调制 .....	152	7.1.4 光伏效应 .....	192
6.1.4 脉冲调制 .....	152	7.1.5 温差电效应 .....	193
6.1.5 脉冲编码调制 .....	153	7.1.6 热释电效应 .....	194
6.2 电光晶体调制及电光膜调制 .....	154	7.1.7 光电转换定律 .....	194
		7.2 光电探测器的性能参数 .....	195

7.2.1	积分灵敏度 $R$ .....	195	<b>第 9 章 光纤通信</b> .....	246
7.2.2	光谱灵敏度 $R_\lambda$ .....	196	9.1 光纤通信概论 .....	246
7.2.3	频率灵敏度 $R_f$ (响应频率 $f_c$ 和响应时间 $\tau$ ) .....	197	9.1.1 光纤通信概念 .....	246
7.2.4	量子效率 $\eta$ .....	197	9.1.2 光纤通信的发展历史 .....	246
7.2.5	通量阈 $P_{th}$ 和噪声等效功率 NEP .....	198	9.1.3 光纤通信的特点 .....	249
7.2.6	归一化探测度 $D^*$ .....	198	9.1.4 光纤通信的应用 .....	251
7.2.7	噪声 .....	199	9.2 光纤和光缆 .....	251
7.3	光电效应器件及光电池 .....	200	9.2.1 光纤的构造 .....	251
7.3.1	短路电流和开路电压 .....	200	9.2.2 光纤的分类 .....	252
7.3.2	交变光信号探测 .....	201	9.2.3 光束在光纤波导中的传播 .....	255
7.4	光电导效应器件 .....	203	9.2.4 光纤的特性与参数 .....	260
7.4.1	光电导器件的工作原理 .....	203	9.2.5 光缆 .....	264
7.4.2	光电导器件的种类 .....	204	9.3 光纤通信系统 .....	266
7.4.3	光敏电阻 .....	204	9.3.1 光纤通信系统的基本组成 .....	266
7.5	光生伏特效应器件 .....	210	9.3.2 光发送机 .....	267
7.5.1	光电二极管概述 .....	210	9.3.3 光中继器 .....	269
7.5.2	光电二极管的工作原理 .....	210	9.3.4 光检测器 .....	270
7.6	光电摄像器件 .....	213	9.3.5 光接收机 .....	273
7.6.1	电荷耦合摄像器件 .....	213	9.3.6 模拟光纤通信系统 .....	276
7.6.2	电荷耦合摄像器件的特性参数 .....	219	9.3.7 数字光纤通信系统 .....	280
7.6.3	CMOS 摄像器件 .....	222	<b>第 10 章 波分复用技术和光交换 网络</b> .....	286
7.7	光辐射的解调 .....	224	10.1 光波分复用技术 .....	286
习题	.....	228	10.1.1 WDM 技术的基本原理 .....	286
			10.1.2 WDM 系统中的光电器件 .....	291
			10.1.3 WDM 系统技术规范 .....	295
<b>第 8 章 光电子技术在网络接入方面 的应用</b> .....		229	10.2 光交换网络原理及分类 .....	301
8.1 光接入网简介 .....		229	10.2.1 光通信技术的应用与发展 .....	301
8.1.1 接入网 .....		229	10.2.2 光通信系统中网络层技术 .....	302
8.1.2 光接入网 .....		231	10.2.3 点到点的通信方式 .....	302
8.1.3 无源光网络 .....		232	10.2.4 环形结构 .....	302
8.2 以太网无源光网络 (EPON) .....		237	10.2.5 广播—波长选择网结构 .....	303
8.2.1 主要特点 .....		237	10.2.6 光通信的网络形式 .....	303
8.2.2 工作原理 .....		238	10.3 突发交换光网络 .....	308
8.2.3 关键技术 .....		240	10.3.1 光突发交换的网络结构 .....	308
8.3 吉比特无源光网络 (GPON) .....		241	10.3.2 OBS 突发串封装与协议 .....	310
8.3.1 主要特点 .....		241	<b>参考文献</b> .....	312
8.3.2 体系结构 .....		243		
习题 .....		245		

# 第1章

## 绪 论

\*\*\*\*\*

### 1.1 现代通信光电子技术

光电子技术是由光子技术和电子技术结合而成的新技术,主要研究内容包括激光原理与应用技术、光显示技术、光存储技术等,是现代信息产业的核心技术。现代通信光电子学包括光电子技术、现代通信技术以及光电子技术在现代通信领域的应用。

#### 1.1.1 光电子技术

光电子技术(optoelectronic technology)确切地称为信息光电子技术。

光电子技术是一个非常宽泛的概念,它围绕着光信号的产生、传输、处理和接收,涵盖了新材料(新型发光感光材料、非线性光学材料、衬底材料、传输材料和人工材料等)、微加工和微机电、器件和系统集成等一系列从基础到应用的各个领域。

光电子技术科学是光电信息产业的支柱与基础,涉及光电子学、光学、电子学、计算机技术等前沿学科理论,是多学科相互渗透、相互交叉而形成的高新技术学科。

光子学也可称光电子学,它是研究以光子作为信息载体和能量载体的科学,主要研究光子是如何产生的及其运动和转化的规律。所谓光子技术,就是主要研究光子的产生、传输、控制和探测的科学技术。现在,光子学和光子技术已在信息、能源、材料、航空航天、生命科学和环境科学技术中得到了广泛应用,这必将促进光子产业的迅猛发展。

#### 1.1.2 现代通信技术

所谓通信,最简单的理解,也是最基本的理解,就是人与人沟通的方法。无论是现在的电话,还是网络,解决的最基本的问题,实际上还是人与人的沟通问题。现代通信技术研究的就是随着科技的不断发展,如何采用最新的技术来不断优化通信的各种方式,让人与人的沟通变得更为便捷、有效。这是一门系统的学科,目前炙手可热的3G就是其中的重要课题。

#### 1.1.3 光电子技术在现代通信领域的应用

光电子技术在通信领域的应用表现在光纤通信和激光通信两种形式上。前者用于陆上和海底光缆通信,后者用于空间通信。

光电子技术在光纤通信方面的应用始于20世纪70年代。光纤通信是利用光导纤维做传输介质的一种现代通信技术,与传统铜线(铜缆)通信相比具有以下优点:通信容量大;



传输损耗小,传输距离远,中继间隔长且在载波频率附近带内损耗近似相等,无需采取均衡措施;制造光纤的原料极为丰富;光信号不受外界电磁干扰,也不产生纤间干扰;光波能量不向外辐射,故不易被窃听,保密性好;光纤轻,可任意弯曲,便于运输、施工和维护等。光纤通信技术已从早期的第一代短波长多模光纤通信系统发展到第五代的超长波光通信系统。20世纪90年代诞生的密集波分复用(DWDM)技术能在一根光纤中传输多个载波,实现超大容量传输手段,而且DWDM技术与信号速率及调制方式无关,这将有利于宽带多媒体业务的开展,为全球信息高速公路提供理想的基础设施。同时,DWDM技术可使不同类、不同速率的信号不经接口变换就能在同一根光纤中传输,节省了传输成本。全光网技术也是新近开发的一项新技术。它实现了端到端之间的全光路,即中间不需要光电转换器。这就从根本上消除了光电转换器对信号传输速率的提高所造成的障碍,解决了超高速传输网络中的所谓“瓶颈”,而且大幅度地降低了成本。据估计,采用全光网技术可使网络运行费用节省70%,建设费用节省90%。另外,全光网的优点还表现在能开发目前难以实现的视频点播、电视会议及其他业务,其服务质量也高于电交换网络。专家认为,在光通信领域中,随着掺铒光纤放大器(EDFA)、DWDM技术的突破性进展,光电子技术将得到越来越广泛的应用,在未来的通信设备中,光电子技术所占比重将从20世纪的10%提高到90%。

激光通信是用激光束作载波来传输信息的一种通信方式。它与无线电通信相比多了电/光(发送端)和光/电(接收端)的转换过程,其他都相似,大致过程如下:语音、文字、图像、数据等信息通过信号变换器(如话筒、电视摄像机等)变换成电信号,然后用这些信号经光调制器去调制一个由半导体激光器产生的激光(载波),控制这个激光载波的某个参数(幅度、频率等),使它按电信号的规律变化。于是载波激光就运载着这些电信号通过发射天线发射出去。在接收端,通过接收天线接收该信号并送到光检测器,将被调制的电信号检出,最后由信号变换器(扬声器、显示器等)还原成原始信号。

激光通信具有信号容量大、传递路数多、通信距离远、保密性好、不受电磁干扰、稳定可靠、结构轻便、设备简单、成本较低等优点。但其也存在一些缺点:对恶劣环境条件的适应能力差,大气中衰减严重,尤其是碰到雨雪等天气甚至无法接通,因此影响了通信距离;瞄准困难;不能越过障碍等。这些缺点使激光通信的实际应用受到了限制。目前激光通信在空间(宇宙)通信方面起着关键作用。这是因为宇宙间没有空气,因而不存在对激光产生的散射、阻挡和吸收现象,而与卫星通信相比它具有更大的通信容量,所以在军事上容易实现全球侦察。另外,目前有少数国家将其用作水下通信,实现了从十几千米的高空对水下100米处的潜艇进行激光通信。

概括来说,在现代通信领域中应用的光电子技术包括光源、光信号的调制、光信号的传播以及光信号的接收和解调等技术。

## 1.2 光电子技术的沿革

激光自20世纪60年代问世以来,最初只应用于激光测距等少数领域。20世纪70年代,由于有了室温下连续工作的半导体激光器和传输损耗很低的光纤,光电子技术才迅速发展起来。现在全世界敷设的通信光纤总长超过1000万千米,主要用于建设宽带综合业务

数字通信网。以光盘为代表的信息存储技术和以发光二极管大屏幕显示为代表的信息显示技术被称为市场最大的电子技术。现在,人们对光电神经网络计算机技术抱有很大希望,希望通过进一步的研究掌握功耗低、响应带宽很大、噪音低的光电子技术。

从20世纪70年代中期开始,美国在加利福尼亚州圣何塞地区建立采用半导体材料硅制造微电子产品的产业基地——“硅谷”。“硅谷”的建设和成功发展,促使美国和北美洲地区的电子计算机硬件和软件迅速发展,并很快在全世界掀起了微电子技术和微电子产业发展的巨大冲击波,把人类带入了电子时代。美国在“硅谷”取得了惊人的成功之后,又开始建设“光谷”。北美洲、欧洲、日本、俄罗斯和以色列的信息光电子技术及产业继续蓬勃发展。中国的“国家863计划”推动了国内信息光电子技术的发展和6个转化基地的建设,催生了“武汉·中国光谷”。为了满足最广泛的民用和军用需求,“中国光谷”的当务之急是,大力发展光纤光缆、各种通信器件、激光器、视频成像设备、夜视器材和激光加工设备等。近年来,随着半导体光电子器件和硅基光导纤维两大基础元件在原理和制造工艺上的突破,光子技术与电子技术开始结合,并形成了具有强大生命力的信息光电子产业。信息光电子技术的迅猛发展出现了一种被称为“新摩尔定律”的光纤通信发展趋势,那就是每隔9个月,光缆的传输能力就会增加一倍,而数据传输的成本却在直线下降。

## 1.3 光电子技术的应用及发展方向

### 1.3.1 光电子技术的应用

目前,国内外正掀起一股光子学和光子产业的热潮。一些国家把大量资金投入光子学和光子技术的研究和开发,许多以光子学命名的研究中心、实验室和公司如雨后春笋般地建立起来。可以毫不夸张地说,一个国家对光子学的投资以及在这一领域从事研究工作的人数直接反映着这个国家科学技术发展的水平。国际知名的科学家已经预言:光子时代已经到来,光子技术将引起一场超过电子技术的产业革命,将给工业和社会带来比电子技术更大的冲击。

目前通过激光输出的脉冲能量已达到13 PW,差不多是一个天文数字,再把激光用光学系统聚集,在焦点位置上的强度可达到 $10^5$  PW,温度非常高,可把最难熔的金属熔化,把所有硬壳物质气化。同样,用光子技术也可取得最高的压强,得到最短的光脉冲。

现在,在国际上已经能做到几十千米内的安全通信,我们国内也在做这方面的研究。另外,用光子学的方法还可以得到最低的温度,可以把原子冷却到接近绝对零度。以上这些,都是用光电技术可以达到的最高记录。

在科学研究方面,利用光子学技术也创造了很多新的成果。光电子技术还具有精密、准确、快速、高效等特点,有助于全面地提高工业产品的高、精、尖加工水平,大幅度提高产品的附加值和竞争能力。同时,光电子技术派生出了许多新兴的科学技术和新兴的高技术产业,极大地推动了高新技术的发展和产业结构的调整优化。

### 1.3.2 光电子技术的发展方向

我国光电子技术的发展,从“六五”开始起步,1986年国家“863计划”将光电子器件及

其集成技术列为一个主题给予支持,同时国家自然科学基金委员会也布局了光电子学和相关学科的研究工作。近年来,在国家“863 计划”的支持下,培养了一批高水平的学术带头人和骨干人才,形成了一支实力雄厚的,在国内外得到认可的光电子学科领域中的高素质研究开发队伍。国家“863 计划”是启动和发展我国信息光电子技术的动力,也促使了我国信息光电子技术取得长足的进步。目前,我国已基本掌握本领域中主要的关键技术,包括先进的量子阱光电子材料和器件技术,量子阱 DFB-LD 制造技术,量子阱 DFB-LD+EA 调制器 PIC 技术,适应于 DWDM 系统和增益平坦、具有功率锁定的 EDFA 制造技术,含光源(LD)、光探测器(PD)在内的光发送/接收模块单片集成(DEIC)技术,以及与偏振无关的半导体光放大器(SOA)为代表的能带工程应用技术和以蓝光发光器件(LED)为代表的第三代半导体(GaN)材料和器件技术等。国家“863 计划”的实施,使我国在信息光电子技术方面与国际先进水平的差距缩小,使国内光电子技术科研发展与国际基本同步,有些距国际先进水平落后 2~3 年,有些成果达到了世界先进水平。在“863 计划”支持下,正在建设北京、武汉、深圳、上海、长春、石家庄 6 个信息光电子技术研究成果的转化产业基地。这 6 个信息光电子产业基地中,在国际竞争中不断成长壮大的公司已经形成我国信息光电子产业的群体,目前能够批量生产十几种量子阱激光器、半导体泵浦激光器和掺铒光纤放大器等多种光纤通信器件、部件和子系统,占据国内市场约 30% 的份额。国内移动通信的光纤直放站所用的光发射接收器件的 90% 为国内制造,有些半导体激光器如 650 nm 红光 LD 激光器、808 nm 大功率 LD 激光器、1310 nm 无制冷 LD 激光器和 1550 nm DFB-LD 激光器等,已进入了国际市场。

美国于 1998 年宣布,以亚利桑那大学为龙头,在图森市建立“光谷”。与此同时,德国推行“激光 2000”计划,英国推行“阿维尔计划”,日本实施“激光研究五年计划”。发达国家普遍高度重视光电子技术和产业的发展,以此促进科技、经济和国防建设。就在这样的大气候下,2000 年夏季,广州市宣布“广东光谷”的预期目标,是在 10 年内达到 3000~5000 亿元人民币的产值,就业达到 40~60 万人。武汉市宣布“武汉·中国光谷”(Optics Valley of China)的目标是,用 5 年左右的时间,初步建成 50 平方公里的光电子信息产业带,形成 1000 亿元人民币左右产出规模的光电子信息产业。湖北省省委书记郑重表示:举全省之力支持“武汉·中国光谷”建设。在此期间,长春市和重庆市也都相继宣布建设本地区的“光谷”。一时间,来自祖国各地的“光谷”春风吹暖了大江南北,竞争也随之开始。

## 第2章

# 光学基础

\*\*\*\*\*

## 2.1 几何光学基础

### 2.1.1 几何光学的基本概念

人类对光的研究,可以分为两个方面:一方面是研究光的本性,并根据光的性质来研究各种光学现象,称为物理光学;另一方面是研究光的传播定律和传播现象,称为几何光学。

#### 1. 光的性质

对于光的性质研究,虽然很早就已开始,但进展缓慢。对于光的性质的科学假说,最初是牛顿在1666年提出来的,他认为光是一种弹性粒子,称为微粒说。1678年,惠更斯认为光是在“以太”中传播的弹性波,提出波动说。1873年,麦克斯韦根据电磁波的性质证明,光实际上是电磁波。1905年爱因斯坦为了解释光电效应,提出光子假说。现代物理认为,光是一种具有波粒二象性的物质,即光波既有波动性又有粒子性,只是在一定的条件下,某一种性质显得更为突出。一般说来,除了在研究光与物质的相互作用情况下必须考虑光的粒子性外,还可以把光作为电磁波看待,称为光波。

#### 2. 电磁波谱

光波和无线电波的不同之处在于光波波长比无线电波短,图2.1为电磁波谱,表示了电磁波按波长分类的情况。波长在400~760 nm的电磁波能够为人眼所感觉,称为可见光。不同波长的光产生不同颜色感觉。同一波长的光,具有相同的颜色,称为单色光。不同波长的光波混合而成的光称为复色光,不同颜色的光波长范围如图2.2所示。白光是由各种波长的光混合而成的一种复色光。

不同波长的电磁波,在真空中具有完全相同的传播速度: $c \approx 3 \times 10^8$  m/s。光波的频率、光速和波长之间存在以下关系:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2-1)$$

因此,不同波长的电磁波频率不同。在不同的介质中,如水、玻璃等,光波的波速和波长同时改变,但频率不变。

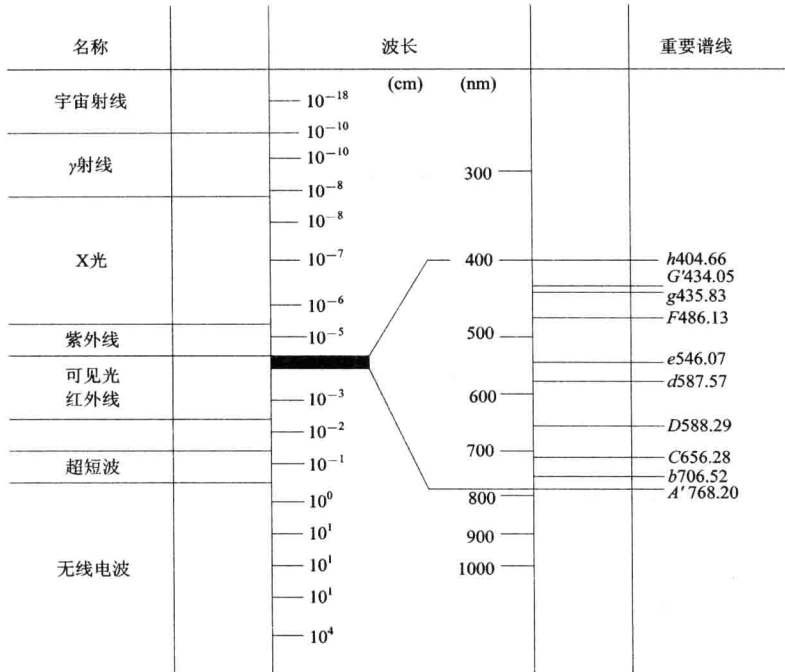


图 2.1 电磁波谱

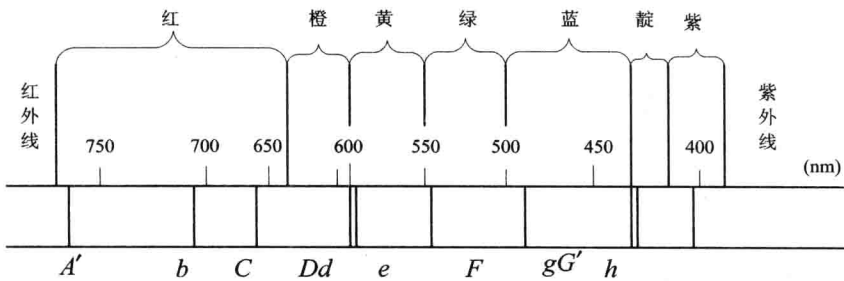


图 2.2 可见光

### 3. 波面、光线和光束

#### 1) 波面

光是一种电磁波，任何一个发光体都是一个波源。光的传播过程也正是电磁波的传播过程。光波是横波，在各向同性介质中，其电场的振动方向与传播方向垂直，振动相位相同的各点在某时刻所形成的曲面称为波面。波面可以是平面、球面或其他曲面。

当发光体(光源)的大小和其辐射能的作用距离相比可略去不计时，该发光体称为发光点或光源。在几何光学中，发光点被抽象为一个既无体积又无大小的几何点，任何被成像的物体都是由无数个这样的发光点所组成的。几何光学中的发光点只是一种假设，在自然界中是不存在的。

#### 2) 光线

几何光学中研究光的传播，并不是把光看做电磁波，而是把光看做是能够传输能量的几何线，这样的几何线叫做光线。其方向代表光线的传播方向，即光能的传播方向。光线

实际上是不存在的,但是,利用它可以把光学中复杂的能量和光学成像问题归结为简单的几何运算问题,从而使所要处理的问题大为简化。

### 3) 光束

在各向同性介质中,光沿着波面的法线方向传播,可以认为光波波面法线就是几何光学中的光线,与波面对应的法线束称为光束。相交于同一点或由同一点发出的一束光线称为同心光束,对应的波面形状为球面,称为球面波,如图 2.3(a)所示。不会聚于一点的光束称为像散光束,对应的波面为非球面,如图 2.3(b)所示。平行光束对应的波面为平面,称为平面波,如图 2.3(c)所示。

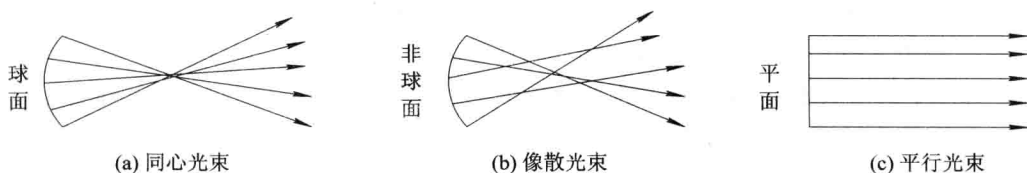


图 2.3 光束的分类

## 2.1.2 几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质传播的问题归结为以下三个基本定律,它们是我们研究各种光的传播现象以及物体经过光学系统成像过程的基础。

### 1. 光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光沿着直线传播,这就是光的直线传播定律。这一规律忽略了光作为电磁波的衍射特性。光的直线传播定律可以很好地解释影子的形成和日食、月食等自然现象。

### 2. 光的独立传播定律

光的直线传播与光的独立传播定律概括了光在同一介质中传播的规律,而光的折射定律和反射定律是研究光传播到两种均匀介质分界面时的规律。

#### 1) 反射定律(如图 2.4 所示)

反射定律的内容为:反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;反射光线和入射光线位于法线的两侧,且反射角与入射角的大小相等,即

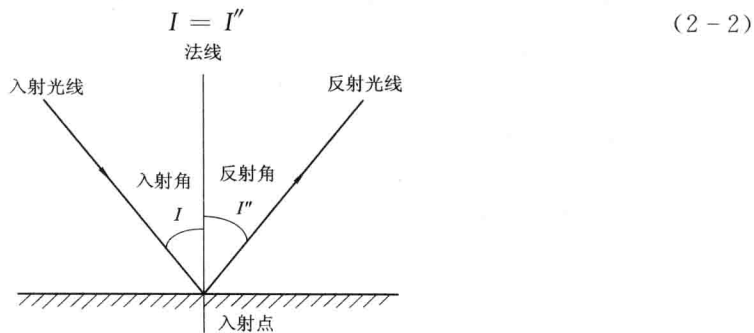


图 2.4 光的反射定律

2) 折射定律(如图 2.5 所示)

光线到达两种介质的分界面时,一部分光线在界面上反射,另一部分光线改变传播方向,进入到另一种介质里继续传播,这种现象称为光的折射。

光的折射是普遍存在的物理现象,如插入水中的筷子浸入水中的部分与空气中的部分有弯折现象,观察位于池底的物体有变浅现象等。

(1) 折射定律的内容。折射光线位于入射光线和法线所决定的平面内;折射角的正弦与入射角正弦之比与入射角大小无关,仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言,在一定温度和压力下,该比值为—常数,等于入射光所在介质的折射率  $n$  与折射光所在的介质的折射率  $n'$  之比,即

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} \quad (2-3)$$

通常写为

$$n \cdot \sin I = n' \cdot \sin I' \quad (2-4)$$

(2) 折射率。折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。各种波长的光在真空中的传播速度均为  $c$ ,而在不同介质中的传播速度  $v$  各不相同,都比在真空中的速度慢。介质的折射率正是用来描述介质中光速减慢程度的物理量,即

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-5)$$

真空中折射率为 1。在式(2.4)中,若令  $n' = n$ ,则有  $I' = I$ ,即折射定律转化为反射定律。这一结论是很有意义的,后面我们将看到,许多由折射定律得出的结论,只要令  $n' = n$ ,就可以得出相应的反射定律结论。

3) 全反射现象

(1) 定义。光线入射到两种介质的分界面时,通常都会发生折射与反射。但在一定条件下,入射到介质上的光会全部反射回原来的介质中,而没有折射光产生。

(2) 产生条件。通常,我们把分界面两边折射率较高的介质称为光密介质,而把折射率较低的介质称为光疏介质。当光从光密介质向光疏介质传播时,因为  $n' < n$ ,根据折射率公式  $n \cdot \sin I = n' \cdot \sin I'$ ,则  $I' > I$ ,折射光线相对于入射光线而言,更偏离法线方向,如图 2.6 所示。当入射角增大到某一程度时,折射角  $I'$  达到  $90^\circ$ ,折射光线沿界面掠射出,这时候的入射角称为临界角,记为  $I_c$ 。

由折射定律式(2-4)得

$$\sin I_c = \frac{n' \sin I'}{n} = \frac{n' \sin 90^\circ}{n} = \frac{n'}{n} \quad (2-6)$$

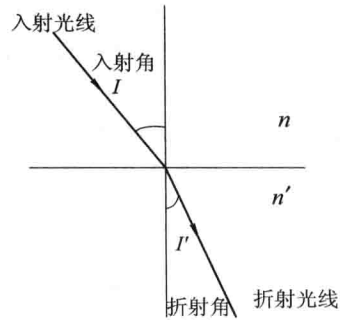


图 2.5 光的折射定律

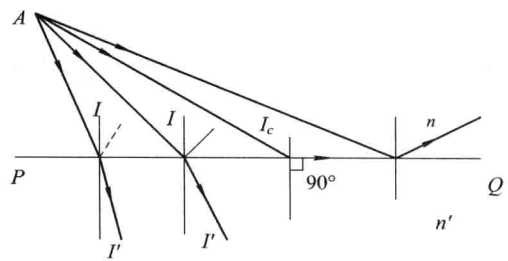


图 2.6 光的全反射现象

若入射角继续增大,使  $I > I_c$ , 即  $\sin I > n'/n$ , 由式(2-6)可知,  $\sin I' > 1$ , 显然这是不可能的。这表明入射角大于临界角的那些光线不能进入第二种介质, 而全部反射回第一种介质, 即发生了全反射现象。

发生全反射的条件可归结为: 光线从光密介质进入光疏介质; 入射角大于临界角。

### 2.1.3 几何光学的基本原理

#### 1. 光路可逆原理

根据几何光学的基本定律, 可知光线的传播具有可逆性, 如图 2.7 所示。光线遵循几何光学的基本定律从 A 点沿一定路径(图中实线)传播到 A', 若此时从 A' 点沿到达光线的反方向射出一条光线(图中虚线), 按照光的直线传播定律和折射定律, 很容易判断得出, 光线将沿同一路径的反方向到达 A 点, 光线的这种传播特性称为光路的可逆性。利用这一特性, 我们不但可以确定物体经过光学系统所成的像, 也可以反过来由像确定物体的位置。

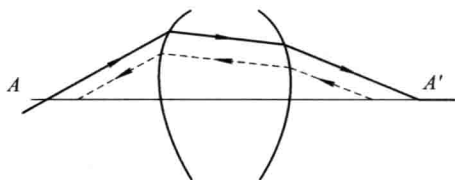


图 2.7 光路的可逆性

#### 2. 费马原理

费马原理用光程的概念对光的传播规律作了更简明的概括。

##### 1) 光程

光程是光在介质中传播的几何路程  $l$  与该介质的折射率  $n$  的乘积  $s$ , 即

$$s = nl \quad (2-7)$$

将  $n = \frac{c}{v}$  及  $l = vt$  代入上式, 有

$$s = ct \quad (2-8)$$

由此可见, 光在某种介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程。

在图 2.8 中, 如果光线从 A 点传播到 A' 点, 经过了  $k$  个介质, 走过的路径各为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $\dots$ 、 $l_k$ , 则光线经历的光程为

$$s = \sum_{i=1}^k n_i l_i$$

若光线经历的介质变化是连续的, 如图 2.9 所示, 则光程可用积分表示为

$$s = \int_A^B n \, dl$$

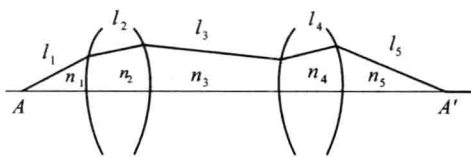


图 2.8 光线路径与光程

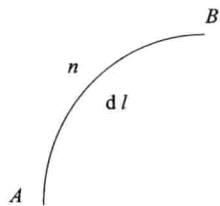


图 2.9 光在非均匀介质中的光线与光程



2) 费马原理

(1) 内容。光从一点传播到另一点，其间无论经过多少次折射或反射，其光程为极值，也就是说，光沿光程为极值(极大值、极小值或常量值)的路径传播。

(2) 数学表达式。

$$\delta s = \delta \int_A^B n \, dl = 0 \quad (2-9)$$

即光程的一阶变分为零。

费马原理是描述光线传播的基本规律，无论是光的直线传播定律，还是光的反射定律与折射定律，均可由费马原理直接导出。

2.1.4 成像问题

1. 平面镜成像

太阳或者灯的光照射到人的身上，被反射到镜面上(这里是漫反射，属于平面镜成像)。平面镜又将光反射到人的眼睛里，因此我们看到了自己在平面镜中的虚像。(这才是平面镜对光的反射)。

照镜子就是这样的原理。可以说，只要利用到平面镜，就一定是反射。

平面镜中的像是由光的反射光线的延长线的交点形成的，所以平面镜中的像是虚像。虚像与物体等大，距离相等。像和物体的大小相等，所以像和物体对镜面来说是对称的，如图 2.10 所示。

根据平面镜成像的特点，像和物体的大小，总是相等的。无论物体与平面镜的距离如何变化，它在平面镜中所成的像的大小始终不变，与物体的大小总一样。但由于人在观察物体时都有“近大远小”的感觉，当人走向平面镜时，视觉确实觉得像在“变大”，这是由于人眼观察到的物体的大小，不仅仅与物体的真实大小相关，而且还与“视角”密切相关。从人眼向被观察的物体的两端各引一条直线，这两条直线的夹角即为“视角”，如果视角大，人就会认为物体大，若视角小，人就会认为物体小。当人向平面镜走近时，像与人的距离小了，人观察物体的视角也就增大了，因此所看到的像也就感觉变大了，但实际上像与人的大小始终是相等的，这就是人眼看物体“近大远小”的原因。正如你看到前方远处向你走来一个人一样，一开始看到的是一个小黑影，慢慢变得越来越大，走到你面前时更大，其实那一个小黑影和走到你面前的人是一样大的，只是因为视角的关系，平面镜成像的像和物关于镜面对称，因此人逐渐靠近镜面，像也一定逐渐靠近镜面，人的感觉是“近大远小”，这是一种视觉效果。

像的性质为虚像、正立、等大。

根据等大的性质，可以证明图 2.11 中  $AO=A'O$ 。

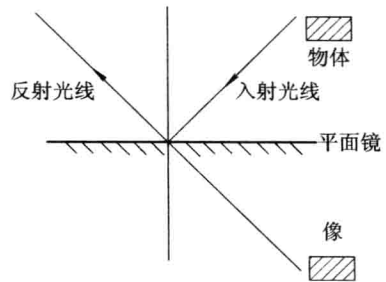


图 2.10 平面镜成像原理

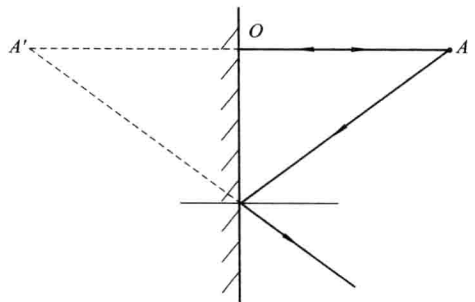


图 2.11 平面镜成像的作图方法