



高等学校
电子信息类 规划教材

光子学基础

FUNDAMENTALS OF PHOTONICS

周文 陈秀峰 杨冬晓 编著

浙江大学出版社

高等学校
电子信息类 规划教材

光子学基础

Fundamentals of Photonics

周文 陈秀峰 杨冬晓 编著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光子学基础/周文, 陈秀峰, 杨冬晓编著. —杭州:
浙江大学出版社, 2000. 1
高等学校电子信息类规划教材
ISBN 7-308-02224-2

I. 光... II. ①周...②陈...③杨... III. 光电子
学-高等学校-教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 56404 号

责任编辑 傅百荣
出版 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
排版 浙江大学出版社电脑排版中心
印刷 浙江大学印刷厂
经销 浙江省新华书店
开本 787mm×1092mm 16 开
印张 28
字数 717 千字
版次 2000 年 1 月第 1 版
印次 2002 年 8 月第 2 次印刷
印数 1001—2000
书号 ISBN 7-308-02224-2/TN·045
定价 42.00 元

符号表

a	晶格常数;加速度	E_c	导带准费米能级
\mathbf{a}	基矢;加速度	E_{fv}	价带准费米能级
A	面积;自发射跃迁系数;波的振幅;包络;算符	E_A	受主杂质能级
A^+	伴算符	E_D	施主杂质能级
b	热光系数	E_g	禁带宽度
B	受激跃迁系数;频带宽度;双折射率差	f	频率;分布函数;分布几率
\mathbf{B}	磁感应强度矢量	f_e	光子发射时激光物能级被占几率
\mathcal{B}	磁感强度矢量瞬时值	f_a	光子吸收时激光物能级被占几率
c	光速	F	力
C	电容	\mathbf{F}	力矢量
d	厚度;原子间距;势阱宽度;二阶非线性系数	\mathcal{F}	锐度系数
D_n	电子扩散系数	g	线型函数;简并度;单位体积平面波动量
D_p	空穴扩散系数	G	增益系数;电导;总动量;产生率
D_v	色散系数	G_0	平衡态产生率
D	探测率	h	普朗克常数;密勒指数;二阶电光系数;离化比
D	电位移矢量	\hbar	约化普朗克常数($=h/2\pi$)
\mathcal{D}	电位移矢量瞬时值	H	哈密顿;磁场强度矢量
e	电荷值	\mathcal{H}	磁场强度矢量瞬时值
e	自然对数	i	电流
\mathbf{E}	电场强度矢量	i	虚数符号
\mathcal{E}	电场强度矢量瞬时值	i_s	饱和电流
E	能量;波的振幅	I	光强;电流矢量
E^*	波的共轭振幅	I_{th}	阈值电流
E_0	零点能	j	电流密度
E_c	导带底能级	j	虚数符号
E_v	价带顶能级	\mathbf{J}	电流密度矢量;注入电流密度
E_F	费米能量	J_T	透明电流密度
E_f	费米能级	J_t, J_{th}	阈值注入电流密度
		J_p	极化电流

J_M	磁化分子电流	N_A	受主杂质浓度
J_m	脉冲调制电流密度	N_T	总集居数密度
J_0	预置电流密度	N_F	菲涅尔系数
k	波矢; Kerr 系数	N_G	基态原子密度
k	波矢的分量; 相位常数; 条对比度; 密勒指数	ρ	空穴浓度; 几率; 动量; 衰减系数
k_B	玻耳兹曼常数	ρ_0	热平衡空穴浓度
K_F	费米波矢	ρ_{n0}	n 型半导体的空穴浓度
l	长度; 平均自由程; 密勒指数, 横模序	ρ_{sp}	自发辐射几率
L	长度; 互连长度; 腔长	ρ_{st}	受激辐射几率
L_e	电子扩散长度	ρ_k	光纤模的强度分布
L_h	空穴扩散长度	p	极化强度; 弹光系数张量; 动量矢
\mathcal{L}	程函	p_L	线性极化强度
m	粒子质量; 量子数; 横模序	p_{NL}	非线性极化强度
m^*	有效质量	p_{th}	最小可测光功率; 通量阈
m_e	电子有效质量	\mathcal{D}	极化率; 极化强度; 电偶极矩
m_H	空穴有效质量	\mathcal{D}_L	线性极化强度振幅
m_{HH}	重空穴有效质量	\mathcal{D}_{NL}	非线性极化强度振幅
m_{LH}	轻空穴有效质量	q	电子电荷; 衍射谐数; 包层中横向衰减系数; 量子数; 纵模序
m_0	自由电子质量	q	广义位矢
m_r	约化质量	Q	电荷量; 品质因子
M	倍增因子; 单色波数; 模密度	r	矢径; 位矢
n	粒子浓度; 折射率; 量子数	r	半径; 复合速率; 振幅反射率
n_E	能流折射率	r_r	辐射复合速率
n_{p0}	p 型半导体中的电子浓度	r_{nr}	非辐射复合速率
n_i	本征载流子浓度	r_G	高斯半径
n_{th}	阈值载流子浓度	R	功率反射率; 腔镜曲率半径; 电阻; 复合率; 泵浦速率
n_0	热平衡态电子浓度	R_t	阈值泵浦速率
N	原子密度; 群折射率; 互连数	R_d	探测器等效电阻
NA	数值孔径	\mathcal{R}	响应率
N_1	下能级的原子集居数密度	\mathcal{R}_v	电压响应率
N_2	上能级的原子集居数密度	\mathcal{R}_i	电流响应率
N_c	导带底等效态密度	s	色散参数; 射线长度; 跃迁强度
N_v	价带顶等效态密度	s	射线单位矢; 曲面积
N_t	阈集居数差	S	坡印亭矢; 自旋矢
N_0	起始集居数差	S_λ	单色灵敏度
N_D	施主杂质浓度	t	透射率; 时间
N_a	系统原子密度	t_r	辐射复合时间

t_{nr}	非辐射复合时间	γ	增益系数;偶极子阻尼系数;吸收系数
t_d	延迟时间	γ_{sp}	自发发射速率
t_{sp}	自发发射时间	γ_{st}	受激发射速率
T	温度;透射系数;周期;时宽	γ_{ab}	吸收速率
T_F	费米温度;频差 f_F 的倒数;傅里叶频率	γ_p	峰值增益系数
u	波的场分量;波函数	γ_m	最大增益系数
u_k	布洛赫波的周期性调制函数	Γ	相位延迟量;pockels 系数;光的约束因子;普线宽度
U	位函数;位能;复波函数	δ	相位差
v	速度	Δ	光程差;相对折射率差
\bar{v}	平均速度	ϵ	介电率(介电系数)
v_d	漂移速度	ϵ_0	真空介电率
v_E	能流速度	ϵ	介电(率)张量
v_p	相速度	η	量子效率
v_g	群速度	η_i	内量子效率
V	体积;电压;光纤归一化频率;范尔德常数	φ	光子通量;波函数;旋转角
V	电压矢量	ϕ	逸出功
V_s	信号电压	Φ	波函数;总光通量
V_n	噪声均方根电压	ι	复合率的比例系数
v	速度矢量	λ	波长
V_D	接触电位差	λ_g	波导波长;能源波长
w	宽度	Λ	声波波长;光栅常数
W	电磁能量密度	μ	迁移率;磁导率
W_e	电场能量密度	μ_0	真空磁导率
W_i	跃迁几率	μ_e	电子迁移率
x, y, z	空间坐标	μ_h	空穴迁移率
x_n	耗尽层 n 侧宽度	μ	磁偶极矩
x_p	耗尽层 p 侧宽度	ν	频率
Y	表面导纳	ρ	电阻率;空间电荷密度;旋光率
Z	配位数;表面阻抗	ρ_c	导带有效态密度
α	光吸收系数;电离率;损耗系数;波的衰减系数	ρ_v	价带有效态密度
α_e	电子离化系数	ρ_p	极化电荷密度
α_h	空穴离化系数	σ	电导率;跃迁截面;俘获截面;频宽
α_m	腔镜损耗系数	σ_e	电子俘获截面
α_r	总损耗系数	σ_h	空穴俘获截面
α_s	其它损耗系数		
β	量子产额;波的传播常数		

σ_0 峰值跃迁截面
 θ 旋转角
 θ_i 入射角
 θ_r 反射角
 θ_c 临界角
 θ_q q 谐衍射角
 θ_F 法拉第旋转角
 τ 寿命; 弛豫时间
 τ_e 电子寿命
 τ_h 空穴寿命
 τ_g 群延时
 τ_p 峰值时间

τ_{sp} 自发射寿命
 τ_s 饱和时间
 τ_{pulse} 脉宽
 Ψ 复波函数
 ω 角频率
 ω_g 能隙对应角频率
 Ω 立体角; 偶极子谐振频率; 声波频率
 χ 电子亲和势; 介质线性极化率
 $\chi^{(3)}$ 三阶非线性系数
 χ_e 电极化率

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

1997 年 4 月

前 言

本书系按原电子工业部《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版计划》，由全国高校物理电子技术专业教学指导委员会征稿、评选、审定、推荐。经全国高等学校工科电子类专业教学委员会领导小组批准，作为部级重点教材出版。主审为南京邮电大学杨祥林教授，责任编辑为清华大学张克潜教授。

本书主要内容为四部分：第一部分为绪论，扼要介绍光子学的特点，发展历史与发展前景及本书特点与主要内容。第二部分为光子学的理论基础，共四章，包括光的电磁理论、波动光学、光的量子理论及光子与原子的相互作用。第三部分为技术光学基础，共五章，包括半导体激光器工作原理、光在介质波导中的传播、晶体光学、非线性光学及半导体光探测器原理。第四部分为光子学在信息技术中的应用，共两章，重点介绍光子开关与光计算技术及光纤通信技术与系统。

本书采用SI国际单位制。每章后附有适当习题，供练习选用。书后附录介绍一些有关基本资料，列出一些基本参考书目。

本书试图对科学与工程技术人员提供适应目前科学水平的有关光子学最基础的理论中最基本的知识。本书可作为大学高年级本科生或硕士研究生的专业基础课教材，也可作为科技工程人员的参考书。使用本书作教材时应根据不同专业和不同前修课程学习情况，选择部分内容讲授。有些内容可进行自学。书中打*部分建议研究生选用。

本书着重介绍一些基本的物理概念，尽可能避免繁冗的数学推导，使读者能掌握最基本的理论与方法，打下一个基础，以使今后能顺利阅读有关现代文献，从事有关新技术的研究。

本书由周文主编，执笔编写绪论，第一、二章，并统编全稿。陈秀峰编写第三、四、五、八、九、十各章，杨冬晓编写第六、七、十一章。

本书由南京邮电大学杨祥林教授担任主审，他认真审阅了书稿，提出许多有价值的意见与建议。专业教学指导委员会主任张克潜教授及全体委员对本书提出许多有益建议。浙江大学教材研究科在本书出版工作中给予热情支持与帮助。在此，谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编著者

1999年4月于浙江大学

目 录

绪 论	1
第一章 光的电磁理论	5
1.1 麦克斯韦方程	5
1.2 介电媒质	9
1.3 边界条件	13
1.4 波动方程	15
1.5 电磁波基础	20
1.6 波的模式场	28
习题一	30
第二章 波动光学	33
2.1 波动光学的基本公式	33
2.2 波动光学与几何光学的关系	35
2.3 光的反射与折射、透射与衍射	37
2.4 光的干涉	40
2.5 多色光	44
2.6 光的相干性	47
2.7 高斯束	51
2.8 波动光学中的数学方法	57
2.9 光的衍射	60
2.10 光脉冲在色散介质中的传输	62
习题二	64
第三章 光的量子理论	66
3.1 电磁场量子化	66
3.2 光子特性	73
3.3 光子流	84
3.4 光的量子态*	95
习题三	99
第四章 光子与原子的相互作用	102
4.1 原子能级和固体能带	102

4.2	光子与原子的相互作用	114
4.3	半导体中的光子	122
	习题四	144
第五章	激光器工作原理	146
5.1	激光放大器	146
5.2	半导体激光器	157
5.3	光纤激光器	171
5.4	激光器的输出激光特性	173
5.5	激光的脉冲技术	185
	习题五	196
第六章	光在介质波导中的传输	198
6.1	平面介质光波导	198
6.2	介质圆波导	205
6.3	光纤传输特性	213
6.4	单模光纤中的双折射及偏振态演变	219
6.5	通信光纤与特种光纤*	222
	习题六	237
第七章	晶体光学	238
7.1	晶体的基本特性	238
7.2	光在晶体中的传播	241
7.3	晶体的电光效应	246
7.4	晶体的弹(声)光效应	255
7.5	晶体的其他光学效应	259
7.6	液晶	264
	习题七	268
第八章	非线性光学*	269
8.1	非线性光学的物理基础	269
8.2	二阶非线性光学	274
8.3	三阶非线性光学	279
8.4	半导体非线性光学效应	286
8.5	色散非线性光学物质	296
	习题八	299
第九章	半导体光探测器	301
9.1	光探测器性质参量	302
9.2	光电导探测器	308

9.3 光伏探测器	312
9.4 光电二极管	315
9.5 雪崩光电二极管	321
9.6 光电探测器的噪声	326
习题九	338
第十章 光子开关与光计算*	340
10.1 光计算结构	340
10.2 光子开关	350
10.3 全光开关器	355
10.4 双稳态光学元件	358
10.5 光互连	366
习题十	372
第十一章 光纤通信技术与系统	374
11.1 光纤传输设备与系统	374
11.2 光纤通信中的复用技术	387
11.3 光孤子通信*	401
11.4 相干光纤通信技术*	408
11.5 光纤通信网	414
习题十一	429
参考文献	432
附表	434

绪 论

光子学(photonics)是近年出现的,与电子学(Electronics)并列的一门学科。电子学研究电子的特性与行为及其在真空或物质中的运动与控制;而光子学论述光子的特性及其与物质的相互作用并研究光子在自由空间或物质中的运动与控制。这两门学科关系十分密切,互有交叉。通常可以用电来控制光子也可以用光来控制电子。由于常常既涉及电子又涉及光子,所以在学术界又有光电子学(Photoelectronics)的学科名称。

在人类进步的历史进程中,在 20 世纪,电子科学起了很大作用,电子学已广为人知,形成了一门系统的科学。在人类开始进入信息时代,进入 21 世纪时,光子学的重要性日益显得突出,应用愈来愈广泛,作用愈来愈显著,开始逐步成为一门新兴的有自己特色的独立学科。

光子学形成的背景是光子具有独特的优点和重大的应用价值。光波具有极宽的带宽,可以传送巨大的信息量,光纤可利用的带宽约为 50THz,与电子技术中微波的带宽相比要高出 3~4 个数量级。理论上,一对单模光纤可以传输 2.5 亿个话路。此外,光子响应时间极短,具有极快的响应速度,可以进行超高速控制。常规稳态半导体工作速率限于 1GHz,这是因为载流子的弛豫与再复合的时间在 10^{-9} 秒数量级。新的基于量子阱结构的电子器件可以工作得更快,但要超过 1THz(10^{12} Hz)仍很困难。由于光子的响应速度远快于电子,在没有光电、电光变换情况下进行全光信息处理,反应速率可高于 10THz(10^{13} Hz),是超高速系统发展的方向。

用光作为信息载体,一方面使用具有巨大带宽的光纤作为信息的传输媒质,能以极高的运行速率、极大的信息容量将信息传输几千公里或更远的距离,所获得的信息比特率与传输距离之积将非常可观,是电子技术绝对望尘莫及的,光通信使通信技术实现了革命性的变革。另一方面,光子具有极大的储存能力,超高速、超大容量的光计算机具有十分诱人的前景。正是这些技术背景使光子学愈来愈受到人们的重视。

光学本是一门历史悠久的古老学科,由于近年来技术上的重大突破,开辟了许多新的重要的应用领域,使它以崭新的面貌出现在现代社会。而现代社会的发展又对它提出更多更高的要求,推动现代光学进一步发展,不断出现新的研究成果,形成一门极富生命力的新兴学科。古老的光学演变成现代的光子学,最为重要的标志是 1960 年发明了第一台红宝石激光器,同年秋氩氟气体激光器问世。由于激光相干性好,能量集中,颜色纯,带宽大且易于进行调制,使光的性能产生质的飞跃,奠定了现代光学的基础。更有意义的是 1962 年半导体激光器研制成功且于 1971 年实现了在室温下连续工作,工作寿命日益提高,现在工作寿命已可达几十万小时。此外,由于半导体激光器体积小、重量轻、功率转换效率高且可以直接调制,是理想的光源,因而使激光技术获得了普遍的推广应用。

在光子学发展历史上另一项重大的突破为光纤的发明问世。1966 年高锟博士等人发表了一篇论文,提出用带有包层材料的石英玻璃光导纤维作通信媒质,其损耗可能低于 20dB/km,从而可以取代传统的电缆。1970 年美国康宁玻璃公司的一个小组果然拉制出损耗为 20dB/km 的光导纤维(工作波长为 0.8 μ m),随后几年又将损耗降至 1dB/km 以下。而现在石英光导纤维

的损耗已可降至 0.13dB/km 的极低水平(单模,工作波长 $1.55\mu\text{m}$)。光纤不仅具有优良的传输性能而且具有良好的机械性能,抗电磁干扰,耐腐蚀;此外石英原材料丰富,成本低,所以石英光纤是理想的传输媒质,在现代光学中起着十分重要的作用。通信系统采用光纤传输光信号,加上掺铒光纤放大器的应用以及光孤子技术的发展,可以很方便地解决数千公里的远距离通信,而密集波分复用技术的应用可解决超大容量的信息传输,所以光子技术已成为信息科学的基础技术。

在光通信中,除光源及光信号传输外尚需对信号进行检测与处理。由于光波导尺寸非常小,可以在很小的空间范围内将多种功能的光学器件集成在一起。在 60 年代末就提出“集成光学”概念,与电子集成电路有所区别的是集成光学器件强调多种功能的集成而不像电子集成电路那样强调集成度。

现代光学已渗透到许多领域,得到了极其广泛的应用。除光通信已成为现代技术的重要支柱外,相干傅里叶光学的二维信息处理技术的图像处理,模式识别,机器人视觉等领域也得到广泛的应用。70 年代后期,继光纤通信和光信息处理之后,光纤传感技术受到人们的关注,发展极为迅速。光纤传感器具有体积小,电绝缘,高灵敏,抗干扰以及能使感传合一等优点。现在已制成应力/应变、速度、加速度、流量、温度、电压、电流、电场、磁场、 γ 射线以及化学成分等数十种光纤传感装置,在工业、军事、医学方面具有广泛而重要的应用。此外,光的存贮技术已经实用化,存储信息容量很大,现在在技术上已经可以在光盘上做到每平方厘米存贮 $50\sim 60$ 亿位(比特),而正在研制的密度更高的光盘,计划目标为每平方厘米 1 万亿位。光盘不仅存贮量大而且存取信息时间很短,无机械磨损,使用寿命长,发展极快。

光子还有一个突出的优点是具有极强的互连能力与并行能力。电子由于有电荷,电子之间存在库仑作用力,它们彼此间无法交连。而电导线如果交连,就会形成短路,所以在电路中为了实现互连,就只能像搭“立交桥”那样,将线路隔离起来,显然这就使得互连受限。此外,在电子技术中,电子信号只能串行提取、传输和处理。这都是限制电子信息速率和容量提高的重要因素。对于光子来讲,光子无电荷,彼此间不存在排斥和吸引力,具有良好的空间相容性,且可以并行处理。在开发新一代的神经网络计算机时,由于具有很大的网络规模,互连数很大,需要大规模的群并行性处理,这使光计算机和光神经网络成为最有发展前途的方向。

现代的光子学正如 20 世纪初期的电子学一样是许多领域研究与发展的前沿,当前正处于蓬勃发展阶段,涉及光子产生、传输、探测、变换、控制、存储、显示等方面的各种光子器件不断涌现,新的应用领域也在不断扩展,光子学与光子技术已广泛应用或渗透到生物学和医学的许多方面,并且逐渐成为其重要的研究工具,为之带来革命性的变化,正在逐步形成的生物医学光子学包含生物光子学或生命光子学与医学光子学,其中激光医学的发展最为迅速,已在外科、眼科、牙科等许多方面广泛应用。

在光学的理论研究方面,早在 17 世纪牛顿(Newton)、惠更斯(Huygens)等人就对光现象进行了系统的理论研究。当时牛顿认为光是一种微粒子流,而惠更斯认为光是一种波动的传播。到了 19 世纪 40 年代,法拉第(Faraday)发现磁场对光的偏振面产生偏转的影响,表明光与电磁现象有内在的联系。1864 年麦克斯韦(Maxwell)提出了一套完整的电磁场方程,即麦克斯韦方程,从理论上证明了时变的电磁现象是以波动形式存在并以光速传播,并预言“光就是电磁波”。这个论断于 24 年后即在 1888 年由赫兹(Hertz)的著名实验所证实。在 1888 年同时发现了光电效应,用光的波动学说无法解释。1900 年普朗克(Plank)提出辐射的量子学说,提出能量具有微粒性,能量微粒称为量子。1905 年爱因斯坦(Einstein)推广了量子论,提出光量子

学说,为光电效应找到了理论根据。1921年康普顿(Kompton)直接观察到光子与电子撞击后产生的散射现象,证实了光的本质既有波动性又有量子微粒性,为近代光学奠定了基础。

在应用技术研究方面,1947年伽柏(Gabor)提出了全息技术。1955年为象质评价建立了光学传递函数概念。到本世纪60~70年代,随着激光的出现,人们对光与物质相互作用过程各种效应的研究空前活跃,导致了激光物理学、非线性光学、量子光学、半导体光电子学、导波光学和傅里叶光学等一系列分支新学科的出现。

技术进步与学科发展是互为推动的。70年代以来由于半导体激光器和光纤技术的重大突破,导致了以光纤通信、光信息存储与显示及光信息处理为代表的信息光子学蓬勃发展,进而促进光子学与数学、物理、材料等基础学科相互渗透,交叉形成了许多新的边缘学科。例如从异质结半导体激光器的研究中发展了超晶格量子阱(Quantum Well)结构材料,促进了激光物理学、半导体光电子学的研究,进而到80年代研制出超大功率量子阱阵列激光器。又如光导纤维原来仅作为光传输介质用于光通信系统,随着光纤物理特性的深入研究,在80年代研制出了利用光纤偏振与相位敏感特性以及拉曼(Raman)散射效应的各种光纤传感器。再如由于对光纤非线性效应与色散效应形成光孤子特性的研究,进一步推动了光孤子通信技术的发展。

光子学的蓬勃发展,使得教育部门面对更多未来的与在在职的科学研究者与工程技术人员学习光子学的要求。本书就是为了满足这一要求而编写。

光具有波动性与粒子性双重属性。在理论上则有以描述波动性为主的电磁理论与以描述粒子性为主的量子理论两大理论体系,以往的专业书籍大都是分别进行论述的。在实际应用技术光学中,对于光传输系统多以电磁理论进行描述,而对于激光器等器件多以量子理论进行描述,大都也是分别编成专门书籍进行介绍。为了使读者对光子学有一全面完整的了解,本书将两者结合起来,作为统一的光子学进行论述。在本书前面四章光子学的理论基础部分中,既包含了电磁理论又包含了量子理论,而以电磁场的量子化将二者联系起来。在后面五章技术光学基础部分中,既有激光器的原理又有光在介质波导中传输的原理。这是本书的一个特点。

本书除绪论外,共有十一章。

第一章为光的电磁理论。以麦克斯韦方程为基础,导出波动方程,全面阐述电磁波的特性,介绍波的模式场作为后续内容导波光学的基礎。

第二章为波动光学。在麦克斯韦方程基础上,在特定条件下允许以标量波来描述光的特性,形成称为波动光学的一套方法。本章以波动光学方法分析讨论光的一些基本特性。

第三章为光的量子理论。主要内容为电磁场的量子化,并介绍光子与光子流的性质、光子的量子态。

第四章为光子与原子的相互作用。主要讨论光子与激光物质的作用,重点是光子与半导体中原子及电子的相互作用。

第五章为激光器工作原理。从基本物理概念出发,结合半导体激光器讨论激光产生的机制与原理及输出激光特性。

第六章为光在介质波导中的传输,主要内容为平面介质波导,介质圆波导,光纤传输特性,单模光纤中的双折射及偏振态演变。

第七章为晶体光学。主要内容为晶体的基本特性、光在晶体中的传播、晶体的电光效应、弹(声)光效应及其他光学效应、液晶的基本特性与电光效应。

第八章为非线性光学。主要介绍非线性光学的物理基础、二阶及三阶非线性光学效应、半导体中的非线性光学效应。

第九章为半导体光探测器原理。主要介绍涉及内光电效应的一些半导体光探测器并讨论光探测器的噪声等特性。

第十章为光子开关与光计算技术。主要内容为光计算概念、光子开关、双稳态光学元件及光互连等。

第十一章为光纤通信技术与系统。主要内容为光纤传输设备与系统、光纤通信中的复用技术、光孤子通信、相干光通信技术及光纤通信网。

第一章 光的电磁理论

光是电磁波,可见光的波长范围大约在 $\lambda=0.4$ 微米(紫色极端)与 $\lambda=0.7$ 微米(红色极端)之间。红外光的波长始于 0.7 微米直到亚毫米,波长超过此长度之后为微波,更长一些是无线电波。紫外光所对应的波长比 0.4 微米更短,再继续朝短波长方向去有X射线, γ 射线与宇宙射线。所以,要了解光的特性,必须掌握电磁理论。

电磁波由两个互相耦合的矢量波组成,一是电场波,另一是磁场波。在某些条件下,如在一定条件下的旁轴波,可用仅与位置及时间有关的标量波动方程来描述。用这一方法来研究光波的特性,称为波动光学。如果与作用物体相比,波的波长非常的短,接近于零,这时可用经典的射线光学或称几何光学来研究光的特性。光的电磁理论是基础,理论严密,原则上可严格求解。

本章对电磁理论作一简要介绍,本章内容为:

真空与媒质中的麦克斯韦方程;

介电媒质;

边界条件;

波动方程;

电磁波基础;

波的模式场。

1.1 麦克斯韦方程

麦克斯韦(J. C. Maxwell)在总结前人关于电磁现象的研究基础上,发展了法拉第(M. Faraday)首倡的“场”的概念,而且创造性地提出不仅磁场随时间变化会感应产生电场,电场随时间变化同样也会感应产生磁场,进而提出“位移电流”的概念,于1864年给出一套完整的宏观电磁场基本方程,这就是麦克斯韦方程。根据这组方程即可导出电磁场的波动方程,证明电磁现象是以波动形式存在,电磁波以光速传播。麦克斯韦提出了光的电磁理论,预言电磁波的存在,指出“光就是电磁波”。麦克斯韦这一预言在他提出这一学说以后24年,即1888年,由赫兹(H. R. Hertz)的著名实验所证实。

1.1.1 自由空间的麦克斯韦方程

在自由空间中,电场矢量 $\mathcal{E}(\mathbf{r}, t)$ 与磁量矢量 $\mathcal{B}(\mathbf{r}, t)$ 是位置 \mathbf{r} 与时间 t 的函数,它们满足麦克斯韦方程。

在自由空间中,麦克斯韦方程的积分形式是: