

光电子学 及其应用

史锦珊 郑绳植 编著

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书系统地介绍了光源、光探测器、光导纤维和特种光电器件的物理基础和工作原理,以及在光纤通讯、激光测量、光电检测和光纤传感等领域中的应用技术。

本书力求浅显易懂,避免繁杂冗长公式推导,注重物理概念和应用技术的论述,每章后附有习题。

本书可作为高等院校应用物理、检测、测试、计量、仪器仪表和自动控制等专业的教学参考书,也可供从事光电子学及其应用工作的科技人员参考。

光电子学及其应用

史锦珊 郑绳植 编著

*

责任编辑:高金生 版式设计:王颖

封面设计:高金生 责任校对:肖新民

责任印制:王国光

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所登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $18^{3/4}$ · 字数 413 千字

1991年11月北京第一版·1991年11月北京第一次印刷

印数 0,001—1,950 · 定价:15.50元

*

ISBN 7-111-02772-8/TH·283

前 言

光电子学是研究光和电相互转换的一门科学，它的主要研究对象是光转换成电和电转换成光的有关器件原理及其应用系统。

将电转换成光的光辐射器件主要包括：电激励或注入的激光器、半导体发光二极管、真空阴极射线管，以及各种电弧灯、钨丝灯、辉光灯和荧光灯等光源。将光转换成电的光探测器件主要有：光电导器件（如光敏电阻、光电二极管、光电晶体管）、光生伏特器件（如太阳能电池）、光电子发射器件（如光电倍增管、变象管和摄像管），以及光电磁器件（如光电磁探测器）等。

光电子学系统的组成，除了需要光源和光探测器之外，还需要有传输和控制光束的其它器件，如透镜、棱镜、反射镜、滤光器、偏振器、分束器、光栅、液晶、光导纤维和集成光学器件等。有些光电系统还需要双折射晶体和铁电陶瓷等光调制器件。光电子学器件虽然种类繁多，但光源、光探测器和光导纤维是系统器件的核心，因为它们在通讯、测量和控制等领域的应用越来越广泛。

目前，虽然国内外光电子学专著很多，但多是导论性的，论述的重点是光辐射场与介质原子的相互作用和波导理论，需要较深的数学和物理基础。随着光电子学的发展和应用，人们更普遍关注应用技术书籍的问世，以满足工程设计的需要。本书就是以此为宗旨，在力求做到理论与实践相结合的

IV

基础上编写而成的。该书是按大学本科学士程度编写的，并兼顾了电气和机械工程师学习和应用光电子学的需要。

本书共十一章：第一章至第三章是基础部分，包括光的基本知识、固体物理基础和光的调制。第四章至第八章为器件部分，包括显示器、激光器原理和应用、光探测器以及光导纤维。第九章至第十一章是系统应用部分，包括光纤通讯、光电检测和光纤传感技术。每章都附有习题。

本书在编写过程中得到了北京自动测试研究所刘瑞复研究员、浙江大学钱浚霞教授和长春光学精密机械学院张彤教授的指导，燕山大学杜文升教授担任主审。王玉田和王珏参加了第十一章的编写工作，江玉兰和张淑清同志为本书部分图稿的绘制付出了辛勤劳动，在此一并表示深切谢意。

由于光电子学及其应用涉及的知识面广，且发展日新月异，虽然我们竭尽全力认真编写此书，但终因水平有限，贻误和不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 光	1
1.1 光的性质	2
1.2 光的波动特性	4
1.2.1 偏振	9
1.2.2 线性叠加原理	13
1.2.3 干涉	16
1.2.4 衍射	24
1.3 光源——黑体辐射源	26
1.4 辐射度系统与光度系统的参量	30
1.4.1 光源参量	30
1.4.2 接收器参量	32
习题	36
第二章 固体物理基础	38
2.1 量子力学的若干概念	38
2.2 固体能带	44
2.3 电导率	50
2.4 半导体	52
2.4.1 本征半导体	52
2.4.2 掺杂半导体	54
2.4.3 激子	57
2.5 载流子浓度	58
2.6 逸出功	63
2.7 半导体中的剩余载流子	64
2.7.1 载流子的扩散运动	65

V

2.7.2 载流子的扩散与漂移	67
2.8 p-n 结	67
2.8.1 平衡状态下的 P-n 结	68
2.8.2 正偏 P-n 结中的电流	71
2.8.3 反偏 P-n 结中的电流	73
2.8.4 结的结构及耗尽层电容	75
2.8.5 基本理论与实际二极管的差别	78
2.8.6 其它 P-n 结	79
习题	80
第三章 光调制	83
3.1 椭圆偏振	83
3.2 双折射	85
3.3 旋光作用	89
3.4 电-光效应	90
3.5 克尔调制器	100
3.6 扫描和开关	102
3.7 法拉弟效应与磁-光器件	104
3.8 声-光效应	107
3.9 非线性光学	113
习题	119
第四章 显示器件	121
4.1 发光现象	121
4.2 光致发光	123
4.3 阴极发光	126
4.4 阴极射线管	127
4.5 场致发光	131
4.6 注入发光和发光二极管 (LED)	134
4.6.1 辐射复合过程	135
4.6.2 LED材料	140

4.6.3 商品LED材料	141
4.6.4 LED结构	143
4.6.5 LED的响应时间	146
4.6.6 LED的驱动电路	147
4.7 等离子体显示器	149
4.8 显示器的亮度	150
4.9 液晶显示器 (LCD)	151
习题	159
第五章 激光器原理	161
5.1 光的发射和吸收	162
5.2 爱因斯坦关系式	164
5.3 辐射吸收	166
5.4 粒子数反转	169
5.5 光反馈	172
5.6 阈值条件与激光器损失	173
5.7 线型函数	176
5.8 粒子数反转与泵浦阈值条件	180
5.9 激光器的振荡模式	185
5.9.1 纵模	185
5.9.2 横模	187
5.10 激光器的类型	188
5.10.1 掺杂绝缘体激光器	189
5.10.2 半导体激光器	194
5.10.3 气体激光器	209
5.10.4 液体激光器——染料激光器	221
习题	225
第六章 激光器应用	227
6.1 单模工作	227
6.2 频率稳定性和兰姆凹陷	228

VI

6.3 锁模技术	231
6.3.1 主动锁模	234
6.3.2 被动锁模	234
6.4 Q-开关	235
6.4.1 转镜式 Q-开关	236
6.4.2 电-光 Q-开关和声-光 Q-开关	238
6.4.3 被动 Q-开关	239
6.5 激光特性	239
6.5.1 方向性	240
6.5.2 线宽	241
6.5.3 相干性	241
6.5.4 亮度	244
6.5.5 聚焦性能	244
6.5.6 调谐性	246
6.6 激光测距	247
6.6.1 干涉测量法	247
6.6.2 激光脉冲测距	258
6.6.3 光束调制遥测法	262
6.7 激光衍射测量	267
6.8 激光准直	272
6.9 全息术与全息测量	278
6.9.1 全息干涉测量术	280
6.9.2 全息计算机存储器	283
6.10 激光诱导核聚变	285
习题	286
第七章 光探测器	288
7.1 热探测器件	289
7.1.1 热电偶探测器	291
7.1.2 热电阻辐射热探测器	292

7.1.3	气动探测器	293
7.1.4	热晶体探测器	293
7.2	光子探测器件	295
7.2.1	光电发射机理	295
7.2.2	真空光电二极管	298
7.2.3	光电倍增管	298
7.2.4	光电倍增管的噪声	301
7.2.5	光子计数技术	304
7.2.6	图象增强器	305
7.2.7	光电导探测器	306
7.2.8	光电导探测器的噪声	310
7.2.9	几种光电导材料特点	312
7.2.10	结型探测器	313
7.3	光探测器的特性参数	329
	习题	331
第八章	光导纤维	334
8.1	全内反射	335
8.2	平面介质波导	339
8.3	光导纤维	345
8.3.1	折射率突变型光纤	345
8.3.2	内部模散	349
8.3.3	折射率渐变型光纤	351
8.3.4	低模散光纤	353
8.4	光纤中的传输损耗	356
8.4.1	弯曲损耗	356
8.4.2	光纤的固有损耗	357
8.5	光纤材料和生产工艺	359
8.5.1	玻璃光纤	359
8.5.2	塑料光纤	361

8.6 光纤的连接	362
8.7 光缆	365
习题	366
第九章 光纤通讯系统	369
9.1 调制方法	369
9.1.1 模拟调制	371
9.1.2 数字调制	374
9.2 自由空间通讯	378
9.3 光纤通讯系统	380
9.3.1 工作波长	383
9.3.2 发送器设计	384
9.3.3 探测器设计	390
9.3.4 光纤的选择	398
9.3.5 系统设计原则	400
9.3.6 光纤通讯发展前景	402
9.4 集成光学	403
9.4.1 平板和条形集成光波导	404
9.4.2 集成光学元件	406
9.4.3 集成光源和光探测器	409
习题	411
第十章 光电检测技术	413
10.1 光电变换器	414
10.1.1 光电变换器的基本形式	414
10.1.2 典型光电变换器计算	419
10.2 模拟变换	436
10.2.1 简单式变换	436
10.2.2 温度补偿	438
10.2.3 差动式变换	439
10.2.4 光外差式变换	442

10.3 模-数变换	444
10.3.1 位移-条纹变换	444
10.3.2 位移-代码变换	454
10.3.3 光电器件的选择	457
10.4 特种光电器件及其检测应用	460
10.4.1 光敏二极管和三极管阵列	460
10.4.2 电荷耦合器件 (CCD)	468
10.4.3 光敏阵列器件在检测中的应用	475
10.4.4 光电位置敏感器件 (PSD)	481
10.4.5 PSD在检测中的应用	483
习题	487
第十一章 光纤传感技术	488
11.1 概述	488
11.2 光强调制型机械量传感器	489
11.2.1 引言	489
11.2.2 反射式位移光纤传感器	491
11.2.3 透射式位移传感器	498
11.2.4 光纤微弯曲传感器	505
11.2.5 基于全反射原理的光纤传感器	515
11.2.6 其它几种机械量传感器	518
11.3 光强调制型温度传感器	525
11.3.1 引言	525
11.3.2 辐射式光纤温度计	527
11.3.3 热色式光纤温度传感器	537
11.3.4 半导体吸收式光纤测温仪	540
11.3.5 荧光余辉时间式温度传感器	545
11.3.6 采用液芯波导探头的温度传感器	550
11.4 光强调制型液面、浓度、流量传感器	554
11.4.1 光纤液面传感器	554

11.4.2	光纤浓度计	556
11.4.3	光纤流量计	559
11.4.4	远距离漏液检测	562
11.5	化学量光纤传感器	565
11.5.1	引言	565
11.5.2	气体和液体成分传感器	565
11.5.3	放射线光纤传感器	570
11.5.4	生物体用化学量传感器	573
11.6	光功率推动光纤传感器	574
11.6.1	引言	574
11.6.2	光功率推动热电偶传感器	577
11.6.3	光功率推动热敏电阻传感器	579
11.6.4	光功率推动压电传感器	582
	习题	586
	参考文献	587

第一章 光

光电子学，也称光频电子学。自从出现了激光器，有了光频波段的相干电磁振荡源以来，原无线电频率下的几乎所有传统电子学的概念、理论和技术原则上都可以延伸到光频波段。例如放大、振荡、倍频、调制、通讯、雷达、信息处理以及计算机等等，只不过它们的技术形式有所不同罢了。光电子学所涉及的内容除上述电子学和电工工程问题以外，还包括：1) 研究能产生激光的工作物质，即等离子体、气体、液体、固体、半导体等，研究其中的原子、分子能级和能级间的跃迁几率、弛豫规律、能量转移过程以及与电磁波的各种相互作用，探索产生激光的内在可能性和效果；2) 研究产生激光的机理，包括腔模分析，实现粒子数反转的途径，泵浦方式和运转方式等，并探索产生强相干光的新机理；3) 研究强相干光与物质的相互作用；4) 研究激光光场的相干性和统计性；5) 激光及其它光电器件在各个领域内的应用等。

由此可见，光电子学所涉及的内容都紧紧依靠光和物质的基本物理性质以及它们之间的相互作用。所以本章以及下一章将扼要地介绍光学和固体物理学的若干概念，因为这些概念都是光电子学的基础知识。特别是对那些未曾学习过光电子学和固体物理学的读者，这些内容都是很有用的。

本章将叙述光的偏振、衍射、相干和干涉等现象。书中“光”的概念，不仅包含可见光，也包括紫外线和红外线。

1.1 光的性质

17 世纪中期, 光的两种学说, 即胡克 (Hooke)、惠更斯 (Huygens) 的波动说和牛顿 (Newton) 的微粒说都得到了发展。杨 (Young)、马吕斯 (Malus) 和尤拉 (Euler) 及其他学者的进一步观测支持了波动说。1864 年麦克斯韦 (Maxwell) 以普遍的形式联立了电磁方程式并通过方程式证明了横向电磁波的存在。电磁波在自由空间的传播速度为

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1-1)$$

式中, μ_0 和 ϵ_0 分别为自由空间的磁导率和介电常数。把实验测定的 μ_0 和 ϵ_0 代入上式, 所得结果与真空中测出的光速非常符合。因此麦克斯韦提出, 光就是速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、频率约为 $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 、波长约为 500 nm 的电磁波。一个多世纪以来, 科学家用各种方法对光速 c 进行了测量, 但最精确的测量是由埃万森 (K. M. EVanson) 于 1972 年完成, 其值为

$$c = 299\,792\,456.2 \pm 1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

麦克斯韦学说给出了在极宽频率 (或波长) 范围内产生电磁波的前景。1887 年赫兹 (Hertz) 用电感线圈通过火花放电隙放电方法, 成功地发出了波长约为 10 m 的不可见电磁波。可见光和赫兹波都是表 1-1 中列出的电磁波谱的一部分。于是光的波动说在当时就成为普遍承认的学说。然而, 波动说虽然能解释诸如干涉、衍射等光学现象, 但若把它应用在能量交换场合, 例如光的发射和吸收, 光电效应等就完全失效。1905 年, 爱因斯坦 (Einstein) 对光电效应, 即受光照射后固体表面发射电子的现象作出了解释。爱因斯坦指出, 光

表1-1 电磁波谱及其主要产生方式

电磁波谱		真空中的波长	主要产生方式
无线电波	长波	$3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{ m}$	由振荡电路所产生的电磁辐射
	中波	$200 \sim 3 \times 10^3 \text{ m}$	
	短波	$10 \sim 200 \text{ m}$	
	超短波	$1 \sim 10 \text{ m}$	
	微波	$0.1 \text{ cm} \sim 1 \text{ m}$	
红外线		$0.76 \sim 600 \mu\text{m}$	由炽热物体、气体放电或其它光源激发分子或原子等微观客体所产生的电磁辐射
可见光		$0.40 \sim 0.76 \mu\text{m}$	
紫外线		$0.03 \sim 0.40 \mu\text{m}$	
x射线		$0.1 \sim 0.03 \text{ nm}$	用高速电子流轰击原子中的内层电子而产生的电磁辐射
γ射线		$1.0 \text{ pm} \sim 0.1 \text{ nm}$	放射性原子衰变时发出的电磁辐射，或用高能粒子与原子核碰撞所产生的电磁辐射

束的能量不是均匀分布而是集中在某一确定的范围内并以粒子的方式传播，他把这种粒子称为光子。

爱因斯坦的光子概念受到普朗克 (Planck) 关于受热物体产生光发射的启发。普朗克通过观测发现，光以某一最小能量单位的整数倍发射。这种称为量子的最小能量单位与辐射波长 λ 有关，并由下式确定，即

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，称为普朗克常数。光速 c 与普朗克常数 h 为我们提供了两个重要判据。利用光速 c ，我们可以决定什么时候可以“非相对论”地，什么时候必须

“相对论”地研究物理现象。粗略地说，当所有有关的速度比光速低很多时，“非相对论”地讨论就足够了。同样，利用常数 h ，我们可以决定某物理体系的行为必须在量子力学的范畴内，还是在经典物理学的范畴内加以描述。若一个物理体系具有量纲为〔能量 $\times$ 时间〕的变量，且该变量可与普朗克常数相比拟时，该体系的行为必须用量子力学的方法描述；反之，经典力学的方法就足够精确。

上述有关光的两种学说、即波动说和微粒说，不但不矛盾，而且是更加真实地反映了光的双重特性。对于许多实验，特别是那些有能量交换的场合，粒子性是光的主要特性；另一方面，在包括干涉或衍射的实验中，即涉及到光与光相互作用的场合，波动性占主导地位。

1.2 光的波动特性

光，作为一种电磁波，可以用在空间传播且随时间变化的电场 (E) 和磁场 (H) 的联合作用来表征。麦克斯韦证明了电场和磁场满足同一个微分方程式，即

$$\Delta^2(E, H) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(E, H) \quad (1-3)$$

该方程称为波动方程。其意义为变化的电磁场以光速 c 在空间传播。在真空中，电磁场的振荡频率 ν 以及振荡波长 λ_0 通过下式相联系，即

$$c = \lambda_0 \nu \quad (1-4)$$

在介质中，传播速度为

$$v = \frac{c}{n} = \lambda \nu \quad (1-5 a)$$

式中， n 是介质的折射率； λ 是光在介质中的波长。 n 由下

式给出:

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (1-5b)$$

其中, μ_r 和 ϵ_r 分别是介质的相对磁导率和相对介电常数。

电场和磁场的振动方向互相垂直, 且垂直于传播方向,

如图 1-1 所示, 这表明光波是横波。在描述光学现象时, 我们常常忽略磁场矢量, 为的是简化图形和数学表达式。

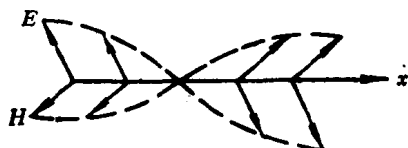


图1-1 E 矢量和 H 矢量互相垂直且都垂直于波的传播方向

但读者应当始终记住,

磁场分量是客观存在的, 它具有类似于电场分量的特性。

最简单的波是正弦波, 其数学表达式为

$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (1-6)$$

式中, E 是 t 时刻在 x 位置上的电场值; E_0 是波的振幅;

$\omega = 2\pi\nu$ 是角频率; k 是波数 ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$); ϕ 是相位常数。

$(\omega t - kx + \phi)$ 是波的相位。

式 (1-6) 是波动方程 (1-3) 的解, 它描述了在 x 轴正方向上无限传播的一种理想平面简谐波。

为进一步理解波动方程的意义, 图 1-2 a、b 分别给出了以 x 为变量和以 t 为变量时, 电场强度 E 的变化曲线。图中, 当 x 和 t 为零时, 取 $E = E_0$, 即令式 (1-6) 中的 $\phi = 0$ 。

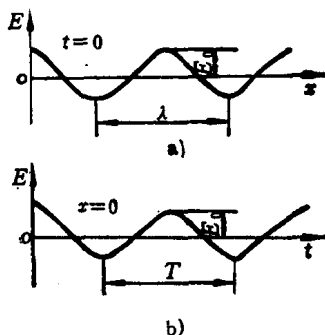


图1-2 电场强度 E 的变化曲线

a) $t = 0$ 时 E 随 x 的变化

b) $x = 0$ 时 E 随 t 的变化