

固体

光电子学

傅竹西 编著

中国科学技术大学出版社

固体光电子学

傅竹西 编著

中国科学技术大学出版社

1999·合肥

图书在版编目(CIP)数据

固体光电子学/傅竹西编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1999.1

ISBN 7-312-01038-5

I. 固… II. 傅… III. 光电子学 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 00445 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168/32 印张:11.75 字数:303千

1999年1月第1版 1999年1月第1次印刷

印数:1—3000册

ISBN 7-312-01038-5/TN·37 定价:13.00元

内 容 提 要

本书主要针对光通信、集成光学和光计算机等方面的应用,较全面地讲述与光信息传输有关的基本原理、规律和方法,包括固体中光发射、光调制、光的传输和耦合、光的探测和接收及光信息处理、记录和显示等,并注意介绍该领域中一些新发展和新技术,尤其突出了半导体光电子器件的工作原理和功能,故名“固体光电子学”。

该书着重基础知识的阐述,对内容深度作了适当考虑,可供从事光电子学工作的人员参考,也可作为高等院校相关专业教材。

73.77
6

前 言

光电子学是研究利用光子传输信息的应用科学,它是在光学、电磁学、激光物理、固体物理和电子学等基础上建立起来的一门交叉学科,涉及到与光信息有关的各个领域。光电子学是在信息产业高速发展的形势下建立和发展起来的,随着信息高速公路的发展和人民生活的现代化,光电子学显示了越来越重要的作用和广阔的发展前景。

本书是作者自 86 年承担硕士生“光电子学”课程以来,逐年对讲稿进行修改的基础上编写而成的。书中内容主要针对光通信、集成光学和计算机等方面的应用,较全面地讲述与光信息传输有关的基本原理、规律和方法,包括固体光发射、光调制、光的传输和耦合、光的探测和接收及光信息处理、记录和显示等,并注意介绍该领域中一些新发展和新技术,尤其突出了半导体光电子器件的工作原理和功能,故名“固体光电子学”。

作者的意图是将该书作为光电子学的基础教材,因此着重基础知识的阐述,注重内容的广泛性和新颖性,并对内容的深度作了适应考虑。该书可作为高等院校相关专业教材,也可供从事光电子学工作的人员参考。

本书编写仓促,作者水平有限,书中错误在所难免,希望读者斧正。

傅竹西

1996 年 10 月

目 次

前 言	(1)
绪 论	(1)
第一章 光在波导中的传输	(4)
第一节 光传输简介	(4)
第二节 光在平面波导中的传播	(11)
第三节 其他形式的平面型介质波导	(26)
第四节 阶梯型光纤	(42)
第五节 聚焦型光纤	(55)
第二章 光的耦合和调制	(75)
第一节 光的耦合理论简述	(75)
第二节 光耦合器件	(81)
第三节 光调制理论基础	(92)
第四节 体电光调制	(103)
第五节 体声光调制和体磁光调制	(124)
第六节 波导调制器	(136)
第三章 半导体中的光发射	(144)
第一节 半导体的能带结构简述	(145)
第二节 半导体中的载流子,费米能级	(156)
第三节 半导体中的电子跃迁和光辐射	(167)
第四节 PN 结和发光二极管	(185)
第五节 半导体中的受激光辐射	(205)
第六节 半导体激光器及工作原理	(217)
第七节 半导体激光器的工作特性及半导体 激光器间的相互作用	(232)

第八节	半导体激光器的瞬态效应和调制特性·····	(253)
第九节	超晶格材料及其在光电子学中的应用·····	(265)
第四章	光的接收和探测 ·····	(287)
第一节	光的接收方式和性能·····	(287)
第二节	光电导探测器·····	(301)
第三节	半导体结型光电探测器·····	(309)
第五章	光信息处理 ·····	(330)
第一节	二维光信息处理·····	(330)
第二节	光信息记录·····	(338)
第三节	光信息的二维显示·····	(349)
练习题和思考题 ·····		(359)

绪 论

光电子学是研究利用光子代替电子来传播信息的一门应用科学。它是伴随着光通信及信息科学的发展而发展起来的。

现代社会信息量的极大丰富导致人们寻找除无线电外更好的信息传输和信息存储方式,对无线电波的研究不断向微波理论及微波的应用方向发展,大大增加了通信的信息量。光波比微波波长更短,通信频带更宽,容许承载的信息量更大,例如每路电话所占频带宽度为 4000 赫兹,用一束光波可同时传输 100 亿路电话;电视频道带宽为 10 兆赫,光波可同时传输 100 万套电视节目,传输的信息量是微波的 100 倍以上。这就启发了人们寻找用光子代替电子来传播信息的途径。光通信还具有抗干扰能力强,保密性好,记录密度大,可传输二维图像等优点,所以在现代信息量猛增的情况下,光通信越来越成为人们关注的课题。目前,光通信已成为现实,并正在突飞猛进地发展;薄膜和光纤光学以及集成光学也获得可喜的进展;光计算机和光信息处理技术成为越来越引人瞩目的奋斗目标。在这种情况下,光电子学开始成为一门系统的科学。

光电子学的概念最早是在 1959 年由 Loebner 提出的。当时,他把电光学(electro-optical)和光电学(optoelectronics)严格地进行了区分。根据这种划分,如果输入电信号产生光,再通过光电耦合变为电信号输出,这一方式称为电光学;如果输入、输出信号是光信号,中间经过电光耦合,称为光电学。现在已不对上述两种情况加以区分,凡是涉及到光能和电能相互耦合和相互转换的现象,以及光作为承载和传输信息的载体所涉及的现象和规律,统称为光电子学(optoelectronics)。现在它所研究的范围包括:光的发射、光的调制、光的传输和耦合、光的探测和接收以及光信息的处理

——记录和显示等涉及光通信和光信息科学的所有有关问题。

早期的光通信可以追溯到两千多年前我国西周时期的烽火台,它和近代使用的旗语和灯光信号都是利用光传达信息的例子。但是,这种光通信方式遇到的第一个问题是通信距离有限。由于光在空气中的直线传播使它不能穿越障碍物,而且大气对光的吸收又使光的衰减非常厉害,同时气候等因素对这种通信方式的影响极为严重,因此难以实现长距离的光通信;光通信遇到的第二个问题是高速调制问题。不经过调制的光是不能承载信息的,调制频率越高,承载的信息量越大。普通光源是不相干光源,它所发出的光中包含许多频率和相位各不相同的光波。在对某个特定频率或相位的光进行调制时,其他频率和相位的光形成强烈的噪声,使得无法分辨出信息。因此,古老的光通信方式只能在低频调制下工作,无法满足大信息量通信的要求。60年代出现的光纤,克服了光在大气中传播所出现的问题,现代的光纤已达到每公里光损耗小于0.5分贝。这就使得光在光纤中实现了不受气候干扰的长距离通信;同样在60年代产生的激光器,第一次用人工方法制备出了相干的单色光源,解决了光通信的光源问题。特别是70年代出现的室温下工作的半导体激光器,由于它具有体积小、能量密度大、频率高、激励方式简单、容易和光纤或平面波导耦合等优点,使光通信更趋实用化,也使集成光学和光计算机等设想更加现实。可以说光纤和半导体激光器是光电子学的两大支柱,正是光纤和半导体激光器的出现和发展促进了光电子学的形成和发展。

由于光波比无线电波长长短得多,因而在研究光信号传输以及光电转换的过程中,会遇到许多新的物理现象,特别在与物质的相互作用方面,光波表现出的性质与无线电波完全不同,光和物质的相互作用更多地涉及到光的量子性。综上所述,光电子学是研究物质中光子和电子的相互作用以及光能和电能相互转换的有关现象及其应用的科学。作为一种量子现象,光和物质的相互作用可以在几个分子的范围内表现出来,所产生的效应涉及到量子力学、固

体物理、激光物理、介质光学以及电子学等各个领域的知识,所以光电子学又是一门综合性的交叉学科。

此外,在光通信和光信息领域内,半导体器件的应用越来越广泛,出现了许多具有优异特性的半导体光电器件,对光电子学的发展起到举足轻重的作用。而且,随着半导体工艺的改进和新材料的开发,半导体器件将在光电子学领域内起到越来越重要的作用。可以说,光电子学的发展离不开新型光电子功能器件的发展,离不开尖端技术的发展,它是与技术密切相关的应用学科。正因为如此,本书围绕着各种固体尤其是半导体光电子器件的功能和特性来讲述光电子学的基本原理和应用,这就是本书取名为《固体光电子学》的原因。

本书针对光通信、集成光学和光信息处理等应用领域,重点讲述光电子学的基本原理,规律和主要应用,尤其突出了半导体光电子器件的工作原理和功能,故书中的取材就以此为依据。讲述的内容包括:第一章光在波导中的传输。这是以射线光学及光的电磁理论为基础,讲述波导的结构和光在平面型介质波导和光纤中的传输特性;第二章光的调制和耦合。研究光是怎样进入波导以及怎样携带信息的。第三章半导体中的光发射。着重介绍了发光二极管和半导体激光器的工作原理和工作特性,对最新发展起来的量子阱激光器等也作了概括的叙述。第四章光的接收和探测。主要讲述半导体光电探测器的工作特性和光信号的调制和接收技术;第五章光的记录和显示。对正在兴起的光盘及全息光纪录等作了原理性的介绍,并叙述了光信息显示的几种方式。

本书对光电子学作了较为全面的基础性论述,同时也介绍了光电子学中一些新的发展和新的技术。因为它不是某一内容的专著,所以,对内容的深度作了适当的考虑。作者的意图是把它作为一本光电子学的基础教材,读完此书的读者,如对某一部分内容感到兴趣,或立志从事某一方面的工作,应在此基础上,阅读一些专门性的论著。

第一章 光在波导中的传输

第一节 光传输简介

一、光的各种传播方式

(一) 光在大气中的直接传输

光波是波长很短的电磁波,具有定向、直线传播的性质。光在大气中传播时,空气分子对光波的吸收随波长不同而不同,对某些特定波长的光,空气分子的吸收很小,形成了所谓“大气窗口”。大气窗口一般为 $1.38\mu\text{m}$,因此,若要通过大气直接传输光信息,必须选择具有适合“大气窗口”的波长的光源。即使如此,由于大气中存在的水蒸汽具有许多吸收峰,仍能引起光在大气中传播时的强烈衰减。大气中水蒸汽含量随天气而变,而温度的变化又会影响空气中折射率分布的变化,从而改变光在大气中的传播路径,这就使得光在大气中的传播受天气的影响极为严重。一般说来,利用光在大气中直接传输的通信距离只有 $2\sim 3$ 公里。所以,利用大气直接传输进行光通信不能符合现代光通信的要求。然而,在没有大气的宇宙空间,光的直接定向传输仍是可行的通信方法。

(二) 介质透镜和反射镜波导

在一圆管内安装一系列透镜和反射镜,使光束限制在一定范围内并沿确定路线传播,这就构成了一种波导。如图 1-1 所示。

在透镜波导中,当圆管内不是真空时,管内气体受重力作用在其上部和下部形成密度差,光线在传播过程中向密度大的方向弯曲。若环境温度有变化,则在其上部和下部还会形成温度差。当管

内上部和下部的温度差为 0.01°C 时, 气体的折射率差是 0.00028 ,

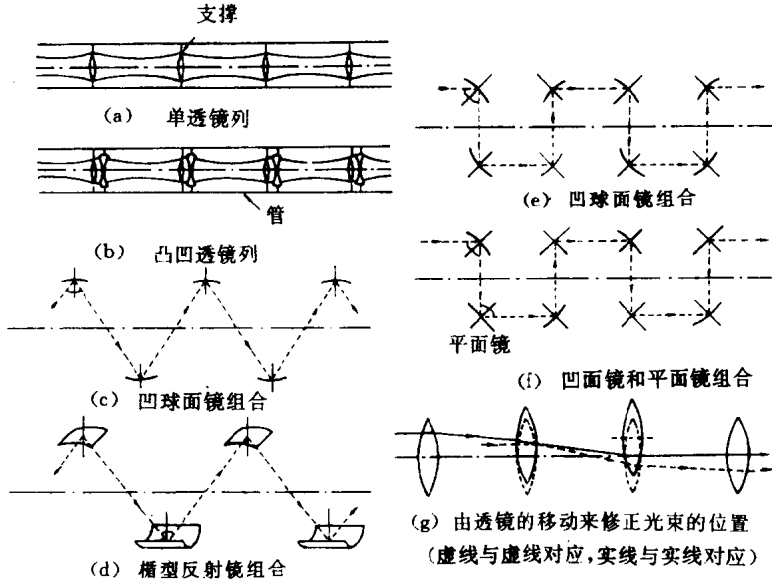


图 1-1 透镜波导和反射镜波导的几种形式

(a) 单透镜列; (b) 凸凹透镜列; (c) 凹球面镜组合; (d) 橢型反射镜组合; (e) 凹球面镜组合; (f) 凹面镜和平面镜组合; (g) 由透镜移动来修正光束位置

这个数字非常小, 因而这种变化的影响非常小, 但是, 即使小到这样的程度, 光束也会发生弯曲。为此, 在圆管中心处的透镜的上下边缘放置两个光电导, 当挪动透镜的位置使这两个光电导的输出相等时, 光束恰好通过透镜的中心, 这就能正常地进行光传输。这个方法是平野准三提出来的, 曾引起了世界上的关注。参见 (M I Nathan, W P Dumke, G Burns, F H Dill. Jr and G J Lasher Appl Phys Letter, 1962, 9: 366)。

透镜波导形成的光束称为高斯光束。用透镜波导的优点是光能集中在有限的范围内, 同时, 位于圆管中心部位沿直线前进的光

通过透镜中心较厚的部位，而偏离中心的光虽然传播路径较长，但由于通过透镜较薄的部位，其光程和中心部位通过的的光的光程相同，这样就消除了由于光程差而形成的光脉冲时间之差。

(三) 气体透镜波导

气体波导的结构如图 1-2 所示 (D Gloge. Proc IEEE, 1970, 58:1513)。用泵把气体打入圆管之内，同时用电炉丝缠绕圆管从周围给它加热，在稳定的情况下，气体的流动保持层流不是紊流。圆管中流过的气体呈中心凉而周围热的状态，因而中心的折射率大，周围的折射率小。一旦其中有光线通过，不论在什么情况下光束都向中心折射，这相当于有透镜的情形。

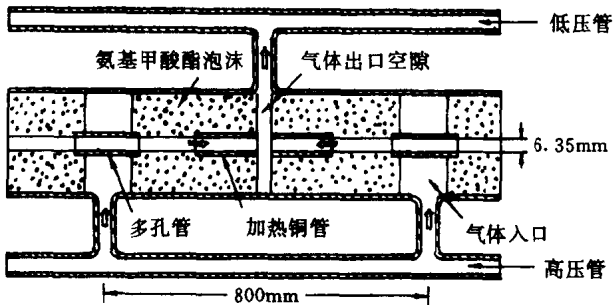


图 1-2 气体透镜结构图

气体透镜波导与介质透镜波导相比，可以消除介质透镜的介质吸收损耗及透镜表面的反射损耗。但是，保持气体流动的稳定性，是相当困难的、也是相当麻烦的。

(四) 平面型介质波导

在半导体激光器和集成光路中都要用到平面型介质波导。平面型介质波导分为平板介质波导、条形波导和箱式波导等多种形式。

图 1-3 为平板波导的结构示意图，它是由介质衬底、薄膜波导层及覆盖层组成的。平板波导的波导层在 x 方向有很薄的厚度，在 y 和 z 方向认为是无限延展的。波导层的折射率 n_f 要大于衬底

的折射率 n_s 和覆盖层折射率 n_c 。所以,当光进入波导层后,就被限制在波导层中并沿平行于波导层的方向传播。对于平板波导,若 $n_s = n_c$,就称为对称波导;如果 $n_s \neq n_c$,则构成非对称波导。如果波导层在 y 方向的几何尺寸缩小到和 x 方向的尺寸相近,就变成了条形波导。平板波导和条形波导是集成光学中常用的波导形式。

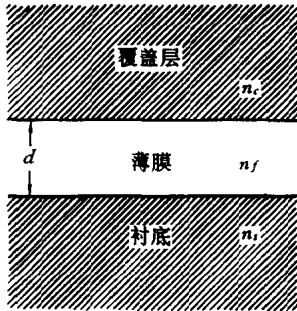


图 1-3 平板波导的横截面示意图

衬底折射率为 n_s ,覆盖层折射率为 n_c ,中间薄层为波导层,它的厚度为 d ,折射率为 n_f

如果在条形波导 z 方向的两个端面设置反射镜,将光限制在一个三维的结构中,就构成箱式波导。其典型实例是半导体激光器中的谐振腔。

(五) 圆形波导——光纤

光纤是由芯线(折射率为 n_1)和包敷层(折射率为 n_2)组成,光纤的外面被大气包围(折射率为 n_0)。折射率满足 $n_1 > n_2 > n_0$ 。其典型结构如图 1-4 所示。

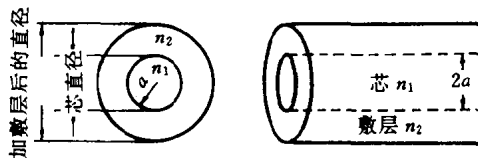


图 1-4 光纤结构示意图

光在光纤中的传播主要集中在芯线中,包敷层在一定程度上也起到传输光能的作用。这在后面讲到光纤的章节中再详细讨论。

二、介质波导中的光束传输

根据几何光学原理,当一束光线入射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的两介质的界面时,将发生反射和折射,如图 1-5 所示。设光束入射角为 θ_i ,反射角为 θ_i' ,折射角为 θ_t ,由 Snell 定律得出

$$\begin{aligned}\theta_i &= \theta_i' \\ n_1 \sin \theta_i &= n_2 \sin \theta_t\end{aligned}$$

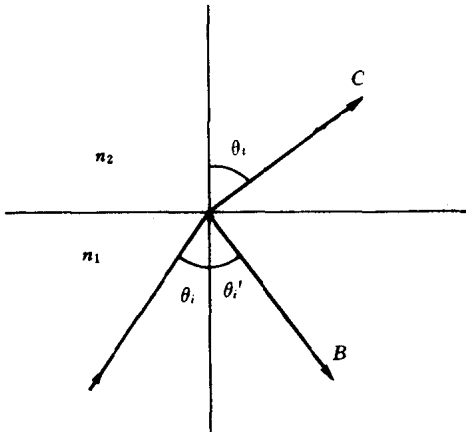


图 1-5 光线在介质界面处的折射和反射

若 $n_1 > n_2$, 当入射角 θ_i 等于临界角 θ_c 时, $\theta_t = 90^\circ$, 此时

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1$$

所以,当 $\theta_i \geq \theta_c$ 时,在折射率为 n_1 的介质中传播的波,到达两种介质的界面时,将发生全反射。

根据 Fresnel 原理,入射光可以分解为电场振动方向垂直于入射面(入射线和界面法线所在的平面)的波,称为 TE 波;和磁场振动方向垂直于入射面的波—TM 波。TE 波的反射系数 r_{TE} 可表示为

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

全反射时 $\sin \theta_i \geq \sin \theta_c = n_2/n_1$, 则有

$$\begin{aligned} \cos \theta_t &= \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} \\ &= -i \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2 - 1}, \end{aligned}$$

式中的负号表示折射波离开界面后很快衰减。将其代入反射系数表达式得

$$\begin{aligned} r_{TE} &= \frac{n_1 \cos \theta_i + i n_2 \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2 - 1}}{n_1 \cos \theta_i - i n_2 \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2 - 1}} \\ &= \frac{A \exp(i\varphi)}{A \exp(-i\varphi)} = e^{i2\varphi} \end{aligned}$$

说明 TE 波全反射后振幅不变, 但位相改变 2φ , φ 角满足

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_i} \quad (1-1)$$

同理, TM 波的反射系数可表示为

$$r_{TM} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

TE 波全反射后, 位相改变 2φ , 其中

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_i} \quad (1-1')$$

如果光波在如图 1-6 所示的对称平板波导中传播, AB 表示入射光束, 若入射角 $\theta_i > \theta_c$, 光线在上下界面间均产生全反射, 因而将在波导层中沿“之”字形路径传播。

从图中可以看出, 波导层中沿“之”字形传播的光, 可分为向右

上方向传播的光和向右下方向传播的光。图中虚线表示向右上方向传播的光的等相面。等相面 BB' 上一点 B'' 传播到波导层表面 C' 时, 光束 AB 直接走过 $B''C'$ 距离, 产生位相差

$$\Delta\varphi_1 = -k_1(B''C')$$

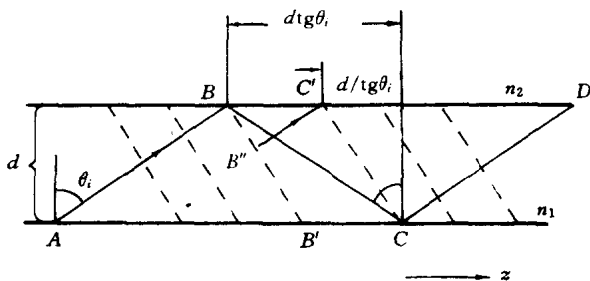


图 1-6 平板波导中谐振的产生

而 C 点向右上传播的光相当于光束 AB 经 B 点反射, 走过距离 BC 后又经 C 点反射所形成的, 所以, C 点对等相面 BB' 的位相差 $\Delta\varphi_2$ 等于光束线 AB 走过距离 BC 产生的位相差, 再加上上、下表面全反射的位相差 $2\varphi_L$ 和 $2\varphi_F$, 即为

$$\Delta\varphi_2 = -k_1(BC) + 2\varphi_L + 2\varphi_F$$

因为 C 和 C' 是同一等相面上的两点, 这两点间的位相差只可能是 2π 的整数倍。我们得出关系式

$$k_1(BC) - k_1(B''C') - 2\varphi_L - 2\varphi_F = 2m\pi$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

从图 1-6 的几何关系可知

$$BC = d/\cos\theta_i$$

$$B''C' = (dtg\theta_i - d/tg\theta_i)\sin\theta_i$$

其中, d 为波导层厚度。最终得出

$$k_1 d \cos\theta_i = \varphi_L + \varphi_F + m\pi \quad (1-2)$$

这说明, 并不是所有满足 $\theta_i \geq \theta_c$ 的光都可以在波导中传播, 而只有入射角满足上式的一些分立值 $\theta_i(m)$ 时, 光才能在波导中传播。