

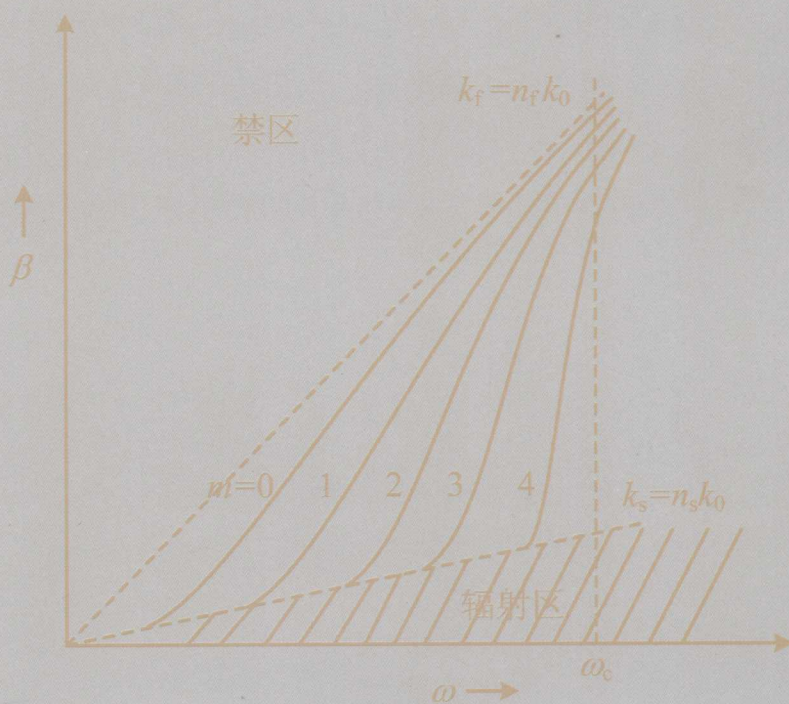
“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材

# 固体光电子学

第2版

傅竹西 编著



中国科学技术大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材

# 固体光电子学

Solid Photoelectronics

第2版

傅竹西 编著

中国科学技术大学出版社



## 内 容 简 介

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、光信息处理、记录和显示等,并注意介绍该领域中的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,对内容深度做了适当考虑,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。

### 图书在版编目(CIP)数据

固体光电子学/傅竹西编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2012.6  
(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-02878-6

I. 固… II. 傅… III. 固体—光电子学 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 154941 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,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:18 插页:2 字数:343 千  
1999 年 1 月第 1 版 2012 年 6 月第 2 版 2012 年 6 月第 3 次印刷  
印数:6001—9000 册  
定价:33.00 元



## 编审委员会

主任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升  
张淑林 朱长飞

委员 (按姓氏笔画排序)

方兆本	史济怀	古继宝	伍小平
刘 斌	刘万东	朱长飞	孙立广
汤书昆	向守平	李曙光	苏 淳
陆夕云	杨金龙	张淑林	陈发来
陈华平	陈初升	陈国良	陈晓非
周学海	胡化凯	胡友秋	俞书勤
侯建国	施蕴渝	郭光灿	郭庆祥
奚宏生	钱逸泰	徐善驾	盛六四
龚兴龙	程福臻	蒋 一	窦贤康
褚家如	滕脉坤	霍剑青	

## 总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养



## 第 2 版前言

本书自 1999 年第 1 版问世以来,已经两次印刷出版,均已告罄。该书供不应求的局面得益于我国光电子产业的飞速发展,目前,各类光电子产品不仅在国防和科研等领域发挥了重要作用,而且已广泛地进入了寻常百姓家,可以说现代生活已离不开光电子产业。在这种情况下,越来越多的人迫切希望学习有关知识,掌握相关技能,该书的出版适应了广大读者对新知识的渴求。本书力图用通俗的语言讲解光电子学的基本理论,同时注重介绍光电子器件的应用,作者意图使该书成为一本理论结合实际实用性读物,为立志从事光电子行业的科技人员进一步深造打下基础。由于该书选材广泛,论述透彻,概念清楚,叙述浅显易懂,自出版以来,作者一直将它用作“光电子学”课程的教材,获得相当好的效果。该书的热销也说明了广大读者对该书的编排和叙述风格的认可。

为了满足市场的需求,中国科学技术大学出版社决定再版《固体光电子学》。借此再版的机会,作者对出版社的支持和广大读者的厚爱表示深深的感谢。

第 2 版基本保留了第 1 版的结构和风格,主要是对第 1 版中叙述不够清楚的地方进行了较大篇幅的修改。修订时主要做了以下改进:(1)对第 1 版的错漏进行了仔细订正;(2)第 3 章中增加了“缺陷对半导体导电类型的影响的分析”;(3)第 4 章几乎全部改写,使叙述更具有条理性,推导过程更严格、更明晰。希望第 2 版《固体光电子学》能进一步得到读者的关爱。

傅竹西

2011 年 3 月 28 日

# 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1986年承担硕士生“光电子学”课程以来,在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,包括固体光发射、光调制、光的传输和耦合、光的探测和接收、光信息处理、记录和显示等,并注意介绍该领域中的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,并对内容的深度做了适当考虑。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

总序 .....	( i )
第 2 版前言 .....	( iii )
前言 .....	( v )
绪论 .....	( 1 )
第 1 章 光在波导中的传输 .....	( 4 )
1.1 光传输简介 .....	( 4 )
1.2 光在平面波导中的传播 .....	( 9 )
1.3 其他形式的平面型介质波导 .....	( 22 )
1.4 阶梯型光纤 .....	( 33 )
1.5 聚焦型光纤 .....	( 44 )
练习题和思考题 .....	( 60 )
第 2 章 光的耦合和调制 .....	( 61 )
2.1 光的耦合理论简述 .....	( 61 )
2.2 光耦合器件 .....	( 66 )
2.3 光调制理论基础 .....	( 74 )
2.4 体电光调制 .....	( 83 )
2.5 体声光调制和体磁光调制 .....	( 99 )
2.6 波导调制器 .....	( 108 )
练习题和思考题 .....	( 113 )
第 3 章 半导体中的光发射 .....	( 115 )
3.1 半导体的能带结构简述 .....	( 116 )
3.2 半导体中的载流子和费米能级 .....	( 124 )

3.3 半导体中的电子跃迁和光辐射 .....	(133)
3.4 PN 结和发光二极管 .....	(145)
3.5 半导体中的受激光辐射 .....	(159)
3.6 半导体激光器及其工作原理 .....	(168)
3.7 半导体激光器的工作特性及半导体激光器间的相互作用 .....	(179)
3.8 半导体激光器的瞬态效应和调制特性 .....	(194)
3.9 超晶格材料及其在光电子学中的应用 .....	(203)
练习题和思考题 .....	(217)
<b>第4章 光的接收和探测</b> .....	(219)
4.1 半导体光电探测基本原理和性能 .....	(219)
4.2 光电导探测器 .....	(231)
4.3 半导体结型光电探测器 .....	(239)
练习题和思考题 .....	(255)
<b>第5章 光信息处理</b> .....	(257)
5.1 二维光信息处理 .....	(257)
5.2 光信息记录 .....	(263)
5.3 光信息的二维显示 .....	(271)
<b>参考文献</b> .....	(278)

## 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,传输的信息量是微波的 100 倍以上,例如每路电话所占频带宽度为 4 000 赫兹,用一系列光波可同时传输 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。这激励着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注目的奋斗目标。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,导致信息无法分辨。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。20 世纪 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千米光损耗小于 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 20 世纪 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 20 世纪 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波长短得多,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 1 章光在波导中的传输,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 2 章光的耦合和调制,研究光是怎样进入波导以及怎样携带信息的;第 3

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做了概括性的叙述;第4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5章光信息处理,对正在兴起的光盘及全息光记录等做了原理性的介绍,并叙述了光信息显示的几种方式。

本书对光电子学做了较为全面的基础性论述,同时也介绍了光电子学中的一些新发展和新技术。因为它不是某一内容的专著,所以,对内容的深度做了适当的考虑。作者力图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 1 章 光在波导中的传输

## 1.1 光传输简介

### 1.1.1 光的各种传播方式

#### 1.1.1.1 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气具有许多吸收峰,仍能引起光在大气中传播时的强烈衰减。大气中水蒸气含量随天气而变,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  $2\sim 3$  千米。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。

#### 1.1.1.2 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  $0.01^\circ\text{C}$  时,气体的折射

率差是0.000 28,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,曾引起了全世界的关注(参见 Nathan M I, Dumke W P, Burns G, Dill Jr F H and Lasher G J. Appl. Phys. Letters, 1962,9: 366)。

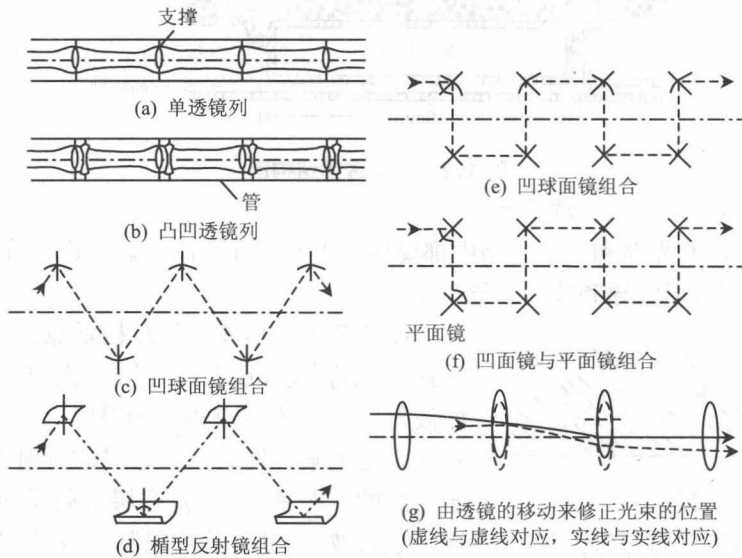


图 1.1 透镜波导和反射镜波导的几种形式

- (a) 单透镜列; (b) 凸凹透镜列; (c) 凹球面镜组合; (d) 桶型反射镜组合;  
(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

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。

### 1.1.1.3 气体透镜波导

气体波导的结构如图 1.2 所示 (Gloge D. 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。

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和麻烦的。

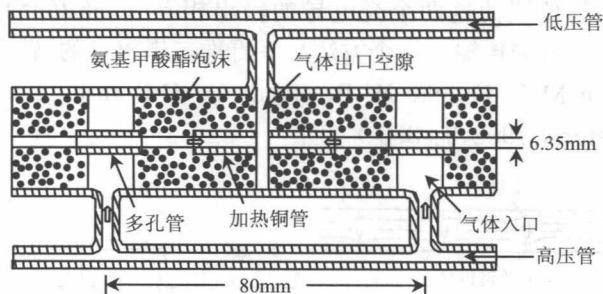


图 1.2 气体透镜结构图

#### 1.1.1.4 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波导、条形波导和箱式波导等多种形式。

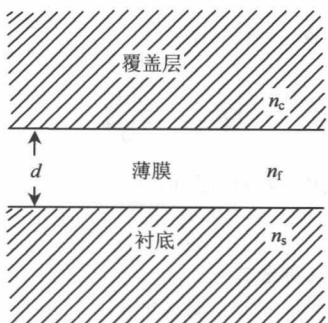


图 1.3 平板波导的横截面示意图

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  $n_f$

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  $z$  方向被认为是无限延展的。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。

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。

#### 1.1.1.5 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。



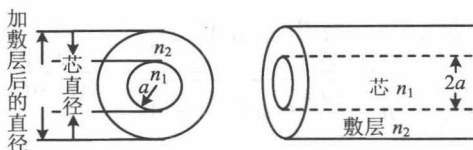


图 1.4 光纤结构示意图

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。这将在后面关于光纤的章节中详细讨论。

### 1.1.2 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  $\theta_i$ ,反射角为  $\theta_i'$ ,折射角为  $\theta_t$ ,由 Snell 定律得出

$$\theta_i = \theta_i', \quad n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

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

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

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。

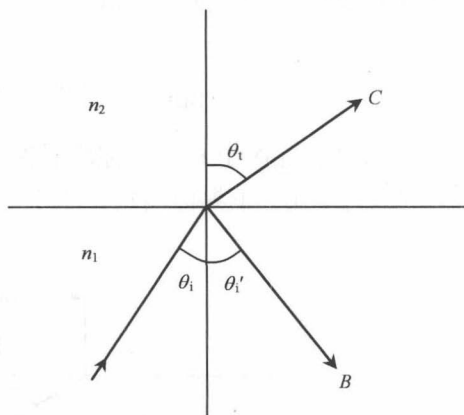


图 1.5 光线在介质界面处的折射和反射

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——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