

2 微电子学讲座

(日) 末松安晴 编  
片冈照荣

# 微电子学器件 II

光、存储器件和传感器

科学出版社

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书为微电子学讲座的第二卷。本卷介绍了用于计算机系统和信息传输中的一系列器件(不包括逻辑器件)的基本知识。全书共六章。第一章介绍了作为光器件物理基础的各种效应。第二至第六章顺序介绍了半导体激光器、发光二极管、各种光部件、光导纤维、半导体传感器件、存储器件及显示器件的原理、功能及应用。

本书可作为大专院校无线电电子学、电子器件、计算技术、微电子学、电子工程等专业的教学参考书,也可供从事计算机系统、信息系统设计的工程技术人员参考。

末松安晴 片岡照榮  
岩波講座 マイクロエレクトロニクス 2  
マイクロエレクトロニクス素子 II  
光・記憶素子とセンサ  
岩波書店, 1985

微电子学讲座 2  
微 电 子 学 器 件 II  
光、存储器件和传感器  
[日] 末松安晴 片岡照榮 编  
黄得星 王 滨 译  
卢乃洪 校  
责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1992 年 3 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1992 年 3 月第一次印刷 印张: 7 5/8

印数: 1—2 500

字数: 197 000

ISBN 7-03-002704-3/TN·119

定价: 8.00 元

## 原 编 者 的 话

随着大规模集成 (LSI) 电路技术的不断发展,迎来了超大规模集成 (VLSI) 电路的时代。现在一个大规模的系统已经能够集成在一个 VLSI 芯片内,因而,面向 VLSI 的系统设计技术以及把这些 VLSI 组合起来构成巨大系统的技术,在目前均被看作是微电子学的一部分。

本讲座中所介绍的微电子学就是这种广义的微电子学。VLSI 的发展将给今后的社会带来巨大的影响,因而,本讲座的目的就是要集中介绍设计、制作 VLSI 及由 VLSI 构成的计算机、通信、机械电子学等信息系统所必需的理论和技术。

然而,微电子学是 LSI 技术诞生不久后出现的、发展十分迅速的领域,至于它将以何种形态向前发展,其可能性是很多的,所以若想把它汇总成一个完整的学科系统还有许多困难。因此,本讲座的目的是:

(1) 向关心微电子学的初学者和准备应用微电子技术的人们介绍有关微电子学的基础知识。

(2) 作为在计算机、通信、机械电子学领域工作的技术人员、研究人员的实践指南。

(3) 把掌握微电子学所必需的基础知识和技术明确化、系统化。

(4) 把微电子学作为一门新的学科进行系统介绍,并使其成为向理想教学用书迈进的里程碑。

希望本讲座能成为学生、技术人员、研究人员的良师益友。

元冈 达 菅野卓雄 渡边 诚  
渊 一博 石井威望

## 前 言

本书介绍了用于计算机系统和信息传输中的除逻辑器件以外的一系列器件，即光传输、传感器、存储器件以及显示器件等。作者尽最大努力使本书论述得通俗易懂而又不失完整性，以便读者易于掌握有关器件方面的知识。

第一章论述了作为光器件物理基础的各种效应。该章首先以用于光源器件和光检测器件的半导体为中心，论述了物质的光吸收和发光现象。接着，论述了光器件和光导纤维的理论基础——介质的折射率，以及光检测器和光传感器的理论基础——光电导效应和光伏效应。最后，论述了光部件和光非线性效应的基础——电光效应和磁光效应。章末给出了有关物质常数的大量附表。

第二章从光器件的工作原理到光器件的应用特性均作了简明叙述。这类光器件包括光通信器件、光记录器件以及打印机和光传感器等，还包括得到广泛应用的光源和光检测器等。该章首先论述了半导体激光器的结构、工作原理和特性，以及在应用中颇为重要的调制特性。接着简要论述了发光二极管的特性。最后给出了光检测器的特性，特别是频率特性和影响检测灵敏度的噪声特性。

第三章介绍了各种光部件和光导纤维。该章首先论述了作为光部件基础的聚光和光波导，接着论述了光导纤维的种类、传输特性及连接方法，特别是纤维光学及其应用，以及光导纤维同光器件的连接方法。在光部件中论述了滤光器、分光器、隔离器和光调制器的现状。最后论述了光导纤维传输系统的结构。

第四章主要概括了由物理量转换成电信号或者由电信号转换成物理量的半导体传感器或换能器的要点。这里阐述了传感器的功能及其作用、多维化、小型化、集成化、高灵敏度化和多功能化等

问题。

第五章简要地概括了构成电子计算机主要组成部分的存储器件。该章首先简单地介绍了存储器件的形态、种类和功能，然后系统地讨论了存储器件的存储容量和响应速度等问题。接着论述了各种 RAM 和 ROM，尤其是磁泡和 CCD 及各种磁记录装置，最后简单地介绍了最近进展迅速的光存储器。

第六章系统地讨论了显示器件。由显示器件输出的视觉信息占人类感觉信息中的 70% 以上，它在人-机对话中是不可缺少的。该章首先简要给出显示器件的几个必要条件，接着论述了各种 CRT 显示器、等离子显示器、液晶显示器、EL 显示器以及感热记录器等。

本书对除了逻辑器件以外的各种微电子器件、光导纤维传输及其系统，从基本考虑方法到应用特征都作了讨论。本书内容广泛，涉及面宽，仅靠少数几位作者是难以胜任繁重的编写任务的。因此，邀请了下列专家分别执笔编写。本人借此机会向按编著宗旨的要求及时完稿的各位著者表示诚挚的敬意。

第一章	光器件的基础	末松安晴
第二章	光器件	岸野克己
第三章	光部件和光导纤维	国分泰雄
第四章	传感器(换能器)	片冈照荣 铃木忠二
第五章	存储器件	石井 治
第六章	显示器件	米泽 进

编者

1985年7月

# 目 录

第一章	光器件的基础	1
1.1	光的吸收与发光	1
1.2	折射率	4
1.3	光电导效应及光伏效应	12
1.4	电光效应及磁光效应	13
1.5	附图与附表	16
第二章	光器件	35
2.1	光器件的种类和原理	35
2.2	半导体激光器	39
2.3	光传输用发光二极管	59
2.4	显示用发光二极管和大功率红外发光二极管	67
2.5	光检测器	70
第三章	光部件与光导纤维	81
3.1	聚光和波导基础	81
3.2	光导纤维(光纤)	92
3.3	聚光部件	103
3.4	各种光部件	109
3.5	光纤传输和应用系统	119
第四章	传感器(换能器)	127
4.1	传感器的功能与作用	128
4.2	传感器的小型化与微型化	134
4.3	传感器的高灵敏度化	137
4.4	传感器的集成化	139
第五章	存储器件	147
5.1	存储器件概要	147
5.2	RAM	153
5.3	ROM	163

5.4	磁泡与 CCD .....	169
5.5	磁记录型外部存储器 .....	173
5.6	光存储器 .....	184
第六章	显示器件 .....	188
6.1	显示器件与微电子技术 .....	188
6.2	CRT 显示器件 .....	196
6.3	等离子显示器件 .....	204
6.4	液晶显示器件 .....	208
6.5	EL 显示器件 .....	219
6.6	感热记录 .....	223
参考书	.....	227
索引	.....	230

# 第一章 光器件的基础

本章将论述与光器件和光导纤维等的工作原理有关的各种基础效应。为了便于读者分析物理现象和各种材料的性能，在章末给出了许多有用的附图和附表。

## 1.1 光的吸收与发光

### 1.1.1 光的吸收、散射与电子跃迁

光射进物质就会被吸收，被吸收的光能量使电子能量增大，引起电子状态的变化；在金属中光能量主要是使自由电子的动能增加，但在半导体和绝缘体中则多数是使电子跃迁到不同的能态。半导体原子的最外层电子的能态是由导带和价带组成的，如图 1.1 所示。如果光子能量大于导带和价带之间的禁带宽度，则半导体将激烈地吸收射进来的光子。设导带和价带之间的禁带宽度为  $E_g(\text{eV})$ 、光的波长为  $\lambda(\mu\text{m})$ ，则强烈地吸收光子的波段为

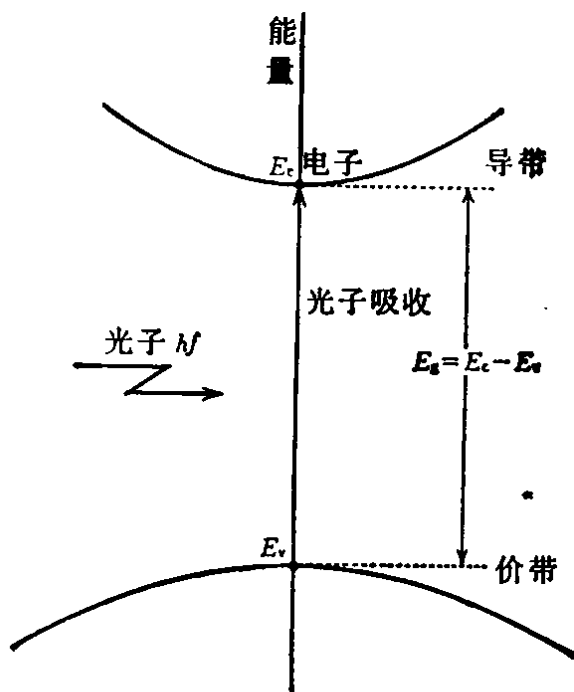


图 1.1 半导体的光吸收

$$\lambda \leq hc/E_g = 1.2398/E_g \quad (1.1)$$

式中  $h$  为普朗克常量， $c$  为光速。电子因吸收光能量而从价带跃迁到导带。在上式中使等号成立的波长，也就是与禁带宽度相对应的波长，称为禁带宽度波长。在上式中，其能量小于禁带宽度的



光子,即波长大于禁带宽度波长的光不能引起电子的跃迁,它或被半导体导带中的自由电子散射,或被价带中的空穴散射。因此,这种光吸收得很少,其吸收量多少与施主杂质或受主杂质的浓度有关(附图 1.1)。

某种玻璃由于吸收紫外线电子被激发,而被激发的电子又能吸收能量低的可见光,这种现象称为光致变色现象。因而,通过改变紫外线的强度可以控制可见光的透射率。

### 1.1.2 复合与发光

注入到半导体导带的电子经过所谓的寿命时间后,由于它同价带的空穴相复合而从导带跃迁到价带,同时伴随着发射一个由剩余能量转变成的光子,如图 1.2 所示。这种过程称为自发辐射或者载流子复合。发射光子所需的时间称为载流子复合时间或者自发辐射寿命。

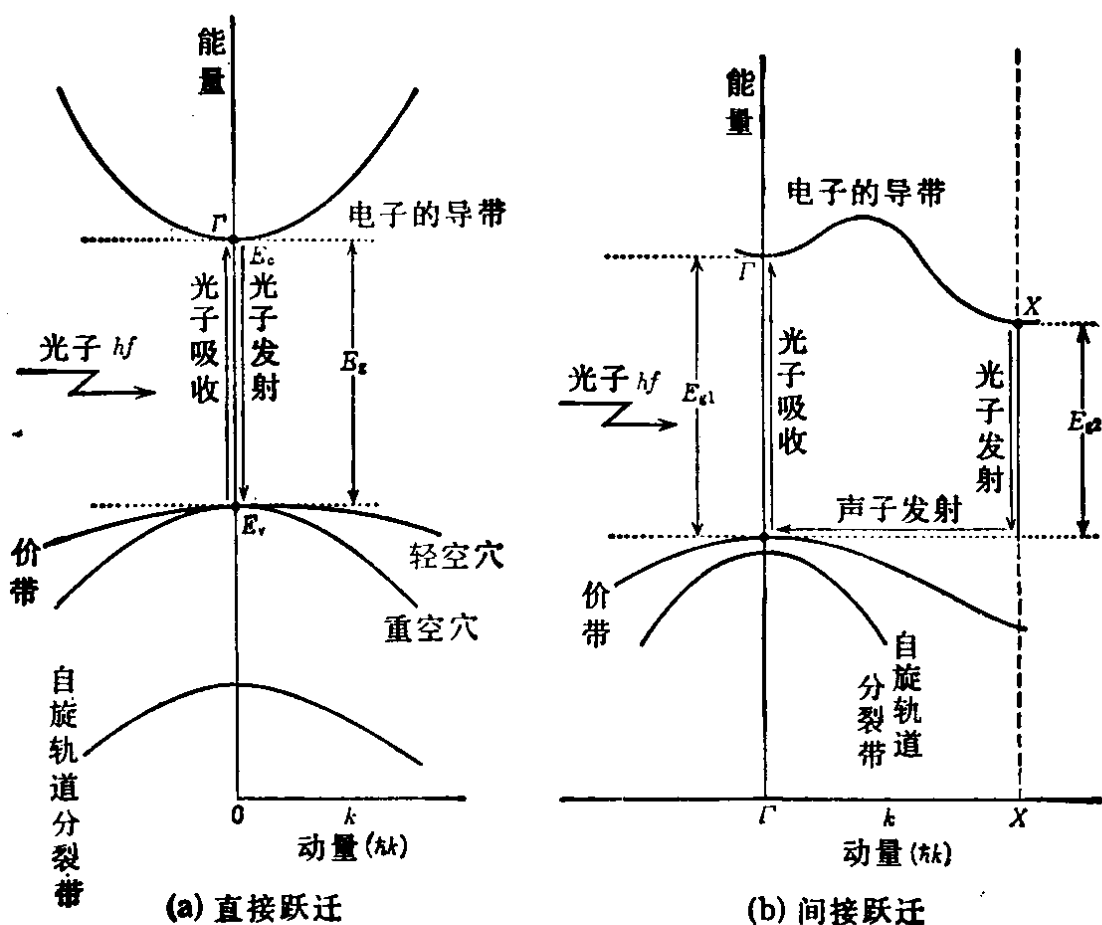


图 1.2 半导体的光发射

自发辐射是电子与光子碰撞的过程,所以,电子跃迁时应服从电子和光子系统的能量和动量守恒定律。由能量守恒定律可知,发射光子的能量  $hf$  ( $f$  为光的频率) 等于电子跃迁的能量差  $E_g$ 。由于光子的动量比电子的动量小得多,所以,从动量守恒定律可知电子的动量基本保持不变,也即波函数的波数  $k$  值可看成是保持不变。

半导体价带结构与动量 ( $hk$  或波数  $k$ ) 有关,在价带顶也就是波数为零的状态中存在着热激发的空穴,所以,导带底的电子对着价带顶发生跃迁,如图 1.2(a) 所示。半导体分为两种类型,价带顶与导带底相处在同一位置的称为直接跃迁型 [如图 1.2(a) 所示],不在同一位置的称为间接跃迁型 [如图 1.2(b) 所示]。制作晶体管的硅单晶是间接跃迁型半导体,而制作发光器件的砷化镓单晶是直接跃迁型半导体。

在直接跃迁型半导体中容易发生电子跃迁,因此它的自发辐射寿命很短,约为几纳秒。直接跃迁型半导体容易发光,所以用来制作发光二极管和半导体激光器。更重要的是,由于它的自发辐射寿命短,易于快速调制发光强度,所以可用作光通信的光源。

在间接跃迁型半导体中,电子须经两个阶段才能发生跃迁。开始时电子经过一个假想的能级发生跃迁,保持动量放出光子。紧接着放射一个动量等于电子动量差的声子后跃迁到价带顶。因此,电子跃迁不易发生,它的自发辐射寿命比较长,从几十微秒到几百微秒。光强随时间的变化速度与载流子寿命成反比。因此,载流子寿命长的间接跃迁型半导体对光的响应时间比较长,它只能适用于制作响应速度要求不高的显示用发光二极管。

### 1.1.3 发光波长、吸收波长与能带

如上所述,电子注入到禁带宽度为  $E_g$  的半导体后,在从导带跃迁到价带的同时发射光子。从图 1.2 可以看到,在间接跃迁型半导体中,发光的波长有时与起始吸收波长多少有些不同(附表 1.1 给出了各种半导体的禁带宽度)。

## 1.2 折 射 率

在外加电场的感应下，构成物质的电子、离子、分子等带电粒子发生偏移形成了电偶极子，电偶极子被极化，使外加电场减弱，由此引起的效应用物质的介电常数表示。对于光，在高速振动的电场的感应作用下主要是使电子发生偏移形成电偶极子，结果将影响光程，用折射率表示。

设折射率为  $n$ ，则介电常数可表示为

$$\epsilon = \epsilon_0 n^2$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数。

### 1.2.1 物质的折射率及其波长特性

物质的介电常数随着频率的增加而减小，如图 1.3 所示。一般的物质都有若干个分界频率。在低频段，界面极化以及由离子、原子等带电重粒子所形成的电偶极子的极化都会影响介电常数。但是，在高频段，重粒子电偶极子的影响将消失，所以在光波段，只有轻的电偶极子才对介电常数有影响。因此，在光波段，主要是外层电子影响折射率。

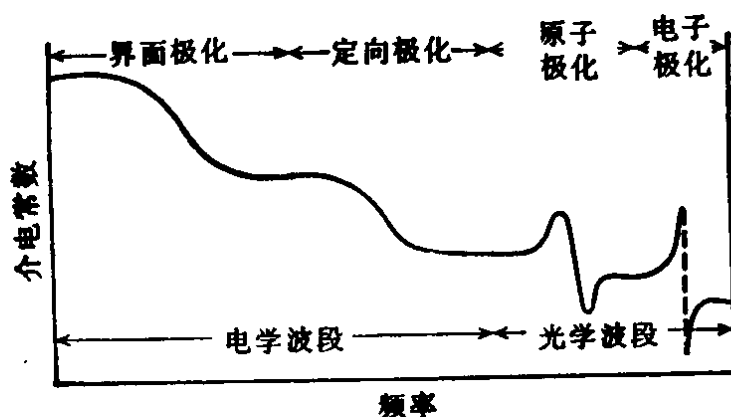


图 1.3 介电常数随频率变化

上述各种极化作用都对介电常数有影响，其中某些特定类型极化的作用，随着频率的增加，对介电常数的影响变弱，在出现如

• 4 •

图 1.4 所示的似谐振现象后趋于消失。与此同时发生损耗现象。因此，介电常数或折射率都是复数量。极化率的实数部与虚数部的频率特性之间存在着一定的关系，称为 Kramers-Kronig 关系。复数极化率  $\chi$  可表示为

$$\chi = \text{Re } \chi + j \text{Im } \chi$$

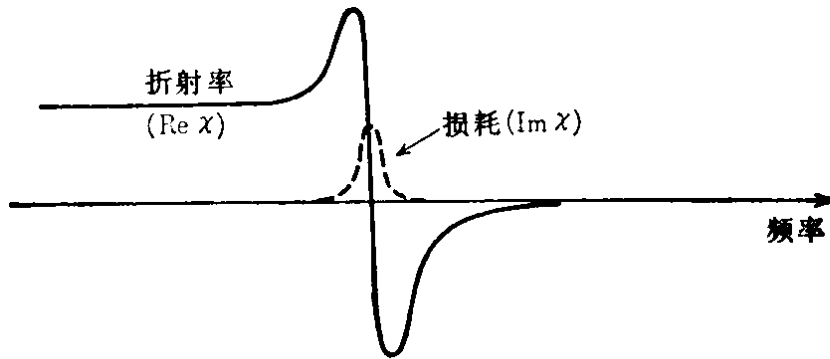


图 1.4 似谐振现象

设  $\omega$  为外加电场的角频率，则

$$\begin{aligned} \text{Re } \chi(\omega) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega' \text{Im } \chi(\omega')}{(\omega'^2 - \omega^2)} d\omega' \\ \text{Im } \chi(\omega) &= \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re } \chi(\omega')}{(\omega'^2 - \omega^2)} d\omega' \end{aligned} \quad (1.2)$$

这样，在折射率急剧变化的情况下，可以观察到似谐振现象，在这个频率下必然出现损耗。

在一定波段下折射率随波长变化的特性，根据单振动理论，可用 Drude-Voigt 经验公式(多项式)来表示。

根据单振动理论，折射率  $n$  可表示为

$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{E_0} + \frac{E_d}{E_0^3} E^2 + \frac{\eta}{\pi} E^4 \ln \frac{2E_d^2 - E_d^2 - E^2}{E_d^2 - E^2} \quad (1.3)$$

式中  $\eta$ ,  $E_d$ ,  $E_g$  是决定于物质的常数(参阅 1.2.3 节)。

若用 Drude-Voigt 经验公式表示，则折射率  $n$  为

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{2\pi m} \sum_i \frac{A_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (1.4)$$

式中  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ),  $A_i$  为实验常数;  $N$  为单位体积的离子数;  $e$ ,  $m$  分别为电子电荷量和质量，玻璃的折射率随波长变化

的特性如图 1.5 所示。

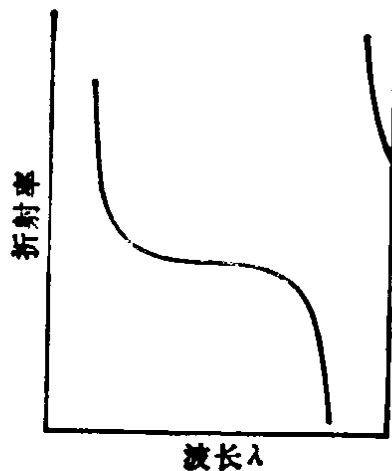


图 1.5 玻璃折射率的波长特性

### 1.2.2 电介质的折射率、复折射率

决定玻璃等电介质折射率的原子极化往往取决于原子最外层电子的运动。原子的大小大体上与原子序数成正比,因此,原子序数大的材料的折射率大于原子序数小的材料的折射率。同理,玻璃的折射率也随原子序数的增加而变大(附表 1.2)。附图 1.2 给出了各种电介质的折射率。另外,为了便于参考,附图 1.3 给出了各种电介质的透射特性。

对于原子排列为各向同性的立方晶体而言,不存在折射率的方向性问题(附表 1.3)。但是,对于某种晶体而言,由于晶体结构的原因,对不同方向的外加电场,其极化的难易程度亦不同,因此,不同的偏振面对光的折射率大小不同。这种晶体称为复折射晶体。复折射晶体分为在两个方向上折射率不相等的单轴晶体和在三个方向上折射率不相等的双轴晶体(附表 1.4),在单轴晶体中有光的偏振面垂直于光轴和光线所在的主截面的寻常光线和偏振面就在主截面的非常光线,由于它们的折射率不相等,在光程上略微分开,故将出现双重象。用复折射晶体可以制成具有偏振特性的稜镜。

有些材料虽然不存在折射率各向异性,但光通过果糖或酒石酸等的溶液时,光的偏振面将会发生旋转,称这种物质为旋光物

质。附表 1.5 给出了旋光物质的实例。

### 1.2.3 半导体的折射率

图 1.6(a), (b) 给出了半导体折射率与入射光的能量或波长的关系。不难看出, 在禁带宽度波长  $\lambda_g$  的近傍, 折射率对波长的弥散率  $dn/d\lambda$  比较大, 随着波长  $\lambda$  的增长, 它们的折射率将减小 10% 左右。波长大体上为 III-V 族混晶的禁带宽度波长时, 它们的折射率值相近, 约为  $n = 3.5$ 。波长小于禁带宽度波长时, 因光的吸收增强, 要用复折射率来表示。

波长大于禁带宽度波长时, 对于四族混晶  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$  (符号“/”后面的 InP 为衬底晶体, “/”前面表示衬底上生长的晶体) 来说, 如果用式 (1.3) 表示它的折射率, 则该式各常数分别为

$$\begin{aligned} \eta &= \pi E_d / [2E_d^3(E_d^3 - E_0^3)] \\ E_d &= 3.391 - 1.652y + 0.863y^2 - 0.123y^3 \\ E_0 &= 28.91 - 9.278y + 5.626y^2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

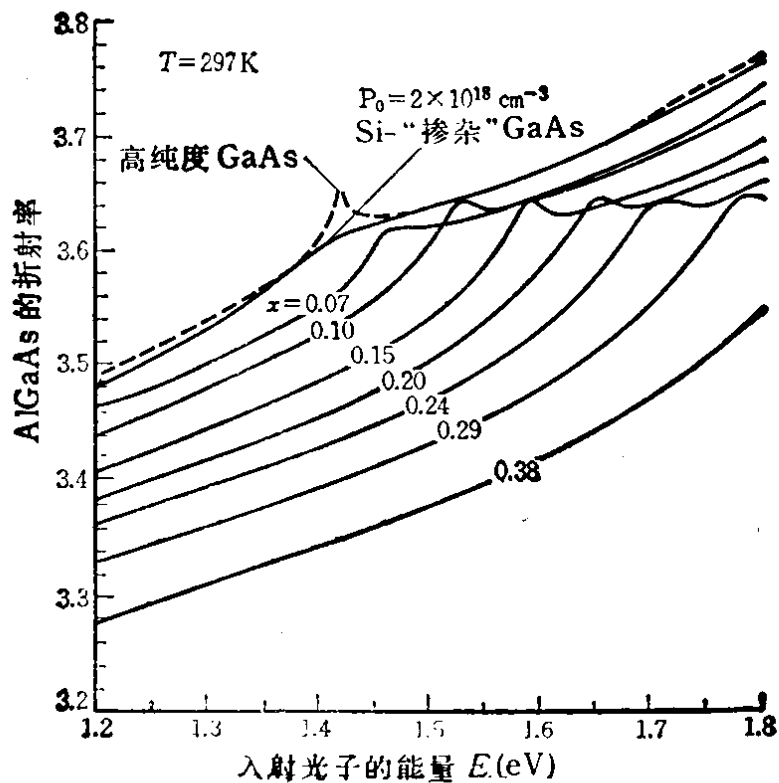


图 1.6(a)  $Al_xGa_{1-x}As$  的折射率随入射光子能量而变化。小峰位置相当于禁带宽度波长  $\lambda_g$  (Casey, H. C., Panish, M. B.; *Heterostructure Lasers*, Academic Press, 1978)

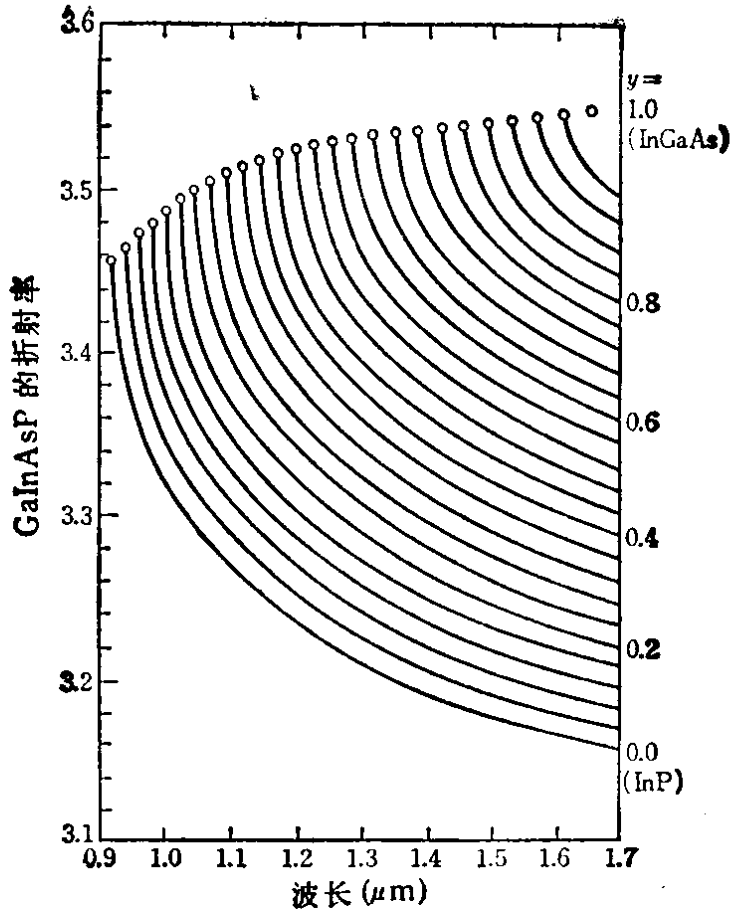


图 1.6(b) 与 InP 晶格匹配的  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ , ( $y = 2.197x$ ) 的折射率随波长而变化。“o”位置相当于  $\lambda_g$ 。实际上, 该点值比  $E_g$  小  $1-2meV$  (宇高勝之: 东京工業大学博士論文, 1981)

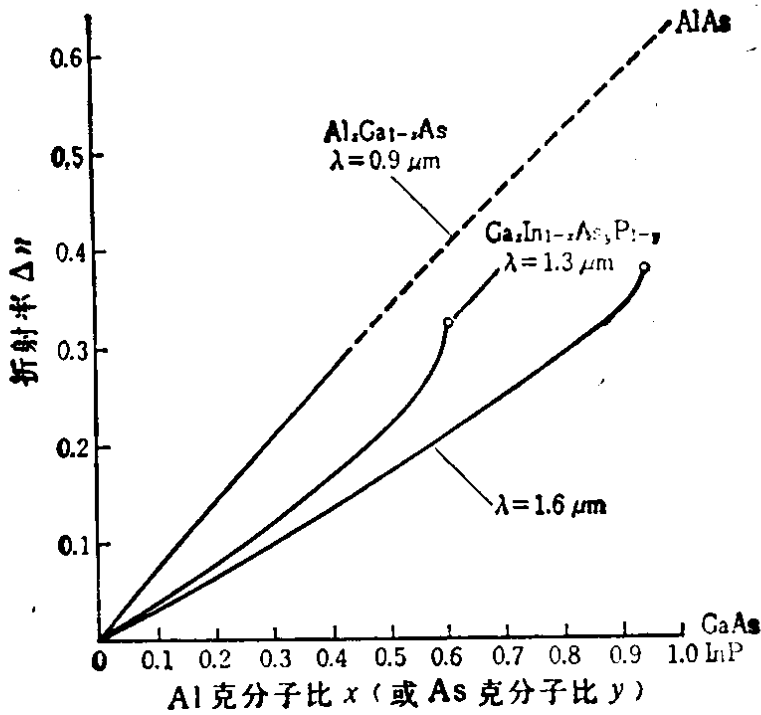


图 1.7(a) GaAs 与 AlGaAs, GaInAsP 与 InP 的折射率差。对于 AlGaAs, 实线表示直接跃迁区域, 虚线表示间接跃迁区域。“o”位置相当于  $\lambda_g$ , 它比  $E_g$  值小  $1meV$

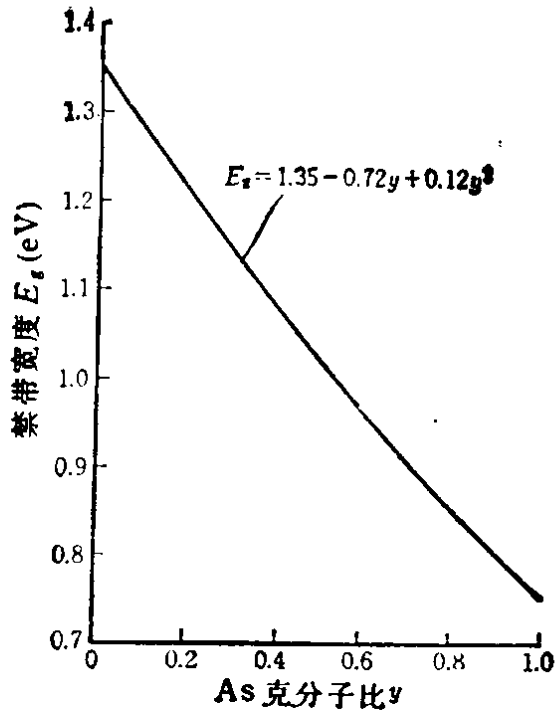


图 1.7(b) 禁带宽度随与 InP 晶格匹配的  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  的组分的变化.  $x \approx 0.467y$  (Nahory, R. E. et al: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 33, p.659, 1978.).

图 1.6(b) 给出了上式折射率随波长变化的关系。图 1.7(a) 给出衬底晶体与在其上面生长的晶体之间的折射率差。图 1.7(b) 给出  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$  在与衬底的晶格匹配的情况下, As 的克分子比  $y$  与四族混晶  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  的禁带宽度的关系。

### 1.2.4 磁性物质的折射率

在光谱频带, 物质的磁性效应很小, 一般把它的相对磁导率视为 1。然而, 由于磁性效应而产生的偏振面旋转的法拉第效应等, 是以所谓法拉第常量等特殊关系表现出来的(参阅 1.4.3 节)。

### 1.2.5 金属的折射率

金属自由电子的等离子频率处在远红外波段。在比等离子频率所对应的红外波长还要长的波段内, 金属显示出通常的介电常数和折射率特性。但是, 可见光波段处于比等离子频率还要高的波段, 所以, 由于自由电子的等离子效应, 以及在多数情况下, 由于



吸收,透射的介电常数 ( $n^2 - k^2$ ) 出现负值。

### 1.2.6 反射系数

光从折射率为  $n_1$  的媒质向折射率为  $n_2$  的媒质垂直入射时 (图 1.8), 入射光的反射率(即反射系数)  $R$  为

$$R = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2 \quad (1.6)$$

这样,在不同折射率的界面上,光的反射可以看作是在界面上由两种媒质的特性阻抗 ( $\sqrt{\mu}/\varepsilon = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}/\sqrt{n}$ ) 之差所造成的。这种在不同折射率界面上光的反射称为菲涅耳反射。

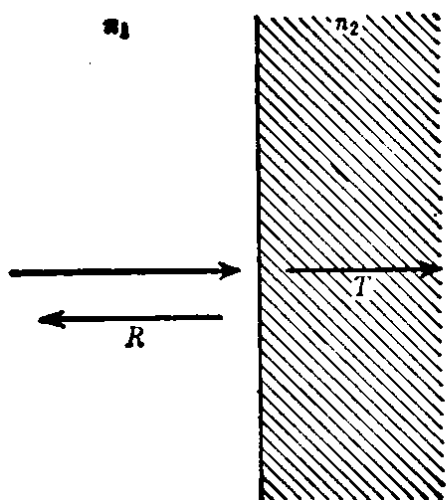


图 1.8 反射率和透射率

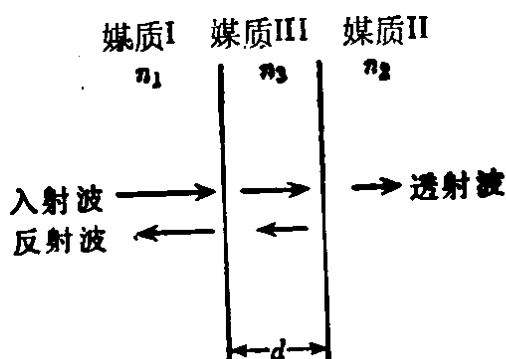


图 1.9 光的多重反射

设吸收系数为  $\alpha$ 、厚度为  $d$  的材料的透射率为  $T$ , 若忽略表面的干涉效应,则

$$T = (1 - R)\exp(-\alpha d) \quad (1.7)$$

光在多次反射的场合,由于光的干涉效应使反射率比上式更为复杂。如图 1.9 所示,如果厚度为  $d$ 、折射率为  $n_3$  的媒质 III 插入  $n_2$  和  $n_1$  之间,那么从  $n_2$  一侧看到的反射率  $R$  为

$$R = \frac{\{n_3(n_2 - n_1) + (n_3^2 - n_2n_1)\tan(\beta_3d)\}^2}{\{n_3(n_2 + n_1) + (n_3^2 + n_2n_1)\tan(\beta_3d)\}^2} \quad (1.8)$$

式中  $\beta_3 = 2\pi n_3/\lambda$  为媒质 III 的传播常数。当媒质 III 的厚度为  $1/4$  波长,即  $d = \lambda/4n_3$  时,媒质 III 的折射率为

$$n_3 = \sqrt{n_1n_2} \quad (1.9)$$