

〔英〕D. A. 罗斯 著
缪家鼎译 宓鼎梁校

光电器件和光学成像技术

浙江科学技术出版社

前 言

近年来，由于半导体工业的迅速发展，研究光电器件的光电子学技术取得了巨大进展。某些光电器件，如发光二极管(LED)在目前的电子仪器中占有相当的地位，从而发生了从钨丝灯到发光二极管的根本变革。钨丝灯效率低，产生的热比光还多，而发光二极管能发出高度着色或单色的光。

当今的时代被称为结晶半导体时代，这在一定程度上反映在多种多样的光电器件上。过去需要高压而昂贵的光电灵敏器件(或光电发射器件)才能完成的各种功能，现用几伏电压的廉价半导体器件即可实现。光电二极管和运算放大器可代替光电倍增管，半导体激光器可代替气体激光器，发光二极管显示器可代替阴极射线示波器，电荷耦合列阵传感器可代替电视摄像机。所有这一切又可由另一光电器件，即太阳能电池供电。

人们用新方法解决老问题的创造性使作者大为感动和惊讶，从而写成这本书。希望读者能受到作者对新技术的热忱的感染，提高对光电子学的兴趣。本书适合于对半导体物理和电子线路有一定理解的大学生阅读。为满足读者进一步提高自己水平的需要，书中也阐述了若干较难的论题。

书中叙述的光电器件没有包括所有的电子器件，但也尽量列入有代表性的对今后发展有重要意义的器件。对于努力解决书中某些课题的工科系和物理系学生来说，本书仅是一本入门书。

D. A. 罗斯

1979年5月于伦敦

译 者 的 话

近二十年来由于半导体工业的迅速发展，光电器件得到了惊人的进展，无论从性能、寿命、成本和品种来说，均给人以深刻的印象。光电器件已和半导体器件一起广泛应用于电子仪器、光学仪器、自动控制仪表、计算机外围设备和光纤通讯等领域。

为了在我国推广应用光电器件和成像器件，译者曾找过许多国外的有关教材和参考书。今从我所能见到的英、美、苏三国近年来出版的有关书刊中选出这一本推荐给读者。本书系统性、逻辑性强，概念明确，内容实用。它重点叙述光电器件，对成像技术只介绍若干最基本的概念和发展的趋向。

由于译者水平有限，错误之处在所难免，恳请老一辈的科学家和读者批评指正。

缪家鼎

1982年5月于杭州

目 录

1. 光子和物质	(1)
1.1 导言	(1)
1.2 光子	(1)
1.3 能级图	(3)
1.4 电荷迁移率	(8)
1.5 吸收	(10)
2. 发光二极管	(12)
2.1 场致发光器件	(12)
2.2 发光二极管	(14)
2.3 发光二极管调制器	(17)
2.4 发光二极管光学耦合隔离器	(18)
2.5 发光二极管指示灯和显示器	(20)
3. 固态光电探测器——光敏电阻	(22)
3.1 导言	(22)
3.2 光敏电阻	(22)
3.3 光电导过程	(24)
3.4 量子效率	(26)
3.5 光敏电阻的响应率	(28)
3.6 光敏电阻的频率响应	(29)
3.7 光敏电阻的等效电路	(32)
4. 固态光电探测器——光电二极管和 光电三极管	(35)
4.1 导言	(35)

4.2	耗尽区光电二极管	(35)
4.3	PIN 光电二极管的电流响应率	(40)
4.4	PIN 光电二极管的频率响应率	(42)
4.5	光电二极管的前置放大器	(44)
4.6	光电二极管的光生伏打工作状态	(46)
4.7	雪崩光电二极管	(48)
4.8	光电三极管	(51)
5.	光电器件的噪声	(54)
5.1	导言	(54)
5.2	定义	(55)
5.3	热噪声	(59)
5.4	热噪声带宽	(62)
5.5	电路中的噪声源	(63)
5.6	散粒噪声	(64)
5.7	光电探测器的信噪比	(68)
5.8	噪声等效功率	(70)
5.9	光电二极管前置放大器的估算	(72)
6.	太阳电池	(76)
6.1	导言	(76)
6.2	硅光生伏打电池	(77)
6.3	电流-电压特性	(79)
6.4	串联电阻损耗	(81)
6.5	硅太阳电池的光谱特性	(83)
6.6	太阳辐射光谱和大气吸收	(85)
6.7	光电流和功率转换效率	(87)
6.8	太阳电池的效率能否进一步提高	(89)
6.9	太阳电池的经济性	(92)
7.	半导体激光器	(95)
7.1	导言	(95)

7.2	受激发射	(96)
7.3	双异质结半导体激光器	(97)
7.4	条状结构双异质结激光器的辐射	(100)
7.5	半导体激光器的光谱特性	(105)
7.6	半导体激光器的相干长度	(109)
7.7	多纵模效应	(111)
7.8	纵模和色散	(112)
8.	光学成像技术	(115)
8.1	引言	(115)
8.2	照相胶片	(115)
8.3	照相胶片的噪声	(117)
8.4	胶片的信噪比	(119)
8.5	照相胶片的信息容量	(121)
8.6	全息照相	(124)
8.7	观看全息图	(128)
8.8	调制传递函数	(132)
8.9	电荷耦合器件面型像感器	(133)
8.10	电荷耦合像感列阵的信息容量	(137)
附录 A	光度的单位	(137)
附录 B	物理常数	(142)
	参考文献	(143)

1. 光子和物质

1.1 引言

光电器件是指把光转换成电能或把电能转换成光能的器件，在某些情况下同一器件能完成以上两种功能。近几年来已研制成功大量新器件供工业应用，例如发光二极管、光电二极管、太阳电池、半导体激光器等。

本书第一章先讨论光子和半导体的基本性能，因为这些性能将在书中经常用到。以后几章逐一探讨发光二极管、光敏电阻（或光导体）、光电二极管和光电三极管、太阳电池和半导体激光器，最后一章讨论光学成像技术。

1.2 光子

几个世纪以来光的本质是物理学中争论的一个主题。争论归结为两种观点：光的波动说和微粒说，这两种观点均有实验依据。一方面光象电磁波，由直边或诸如光栅的周期阵列衍射；另一方面又发现光电倍增管激发的光电流由单个脉冲组成，每个脉冲表示有一光粒子到达。麦克斯韦电磁波理论大大推动了光的波动说，因为该理论证明可见光是一种电磁现象。然而普朗克在解释黑体辐射光谱时又提出了能的量子化概念，不久使光的微粒说重新获得活力。普朗克量子论很快产生出一

门新的物理学分支——量子力学。

物理学界目前的观点是：既接受光的波动说又接受光的粒子说，设想光由分离的能团——光子组成，兼有波和粒子的性状。在很多情况下，由于光子数巨大，致使光的波动性占统治地位。例如1毫瓦的氦氖激光器每秒约发射 10^{15} 个光子，使发射光束的大部分特征可用平面波理论解释。

通过色觉现象，我们可以十分熟悉光子的波长，用棱镜或光栅把白光衍射成各种颜色，光栅刻线间距和波长的比值决定各种颜色光的衍射角。

光子以光速（真空中 $c = 2.998 \times 10^8$ 米/秒）传播，是一个静质量为零的纯能量。把光看作一个波群，能量和频率的关系为 $E_0 = hf$ ，波长 $\lambda = c/f$ 。波群可想象为一个频率 f 的振荡，以速度 c 传播（图1.1），相邻两峰间的振荡距离等于波长 λ 。注意：不同颜色的光子能量不同，绿光光子比红光光子有更多的能量。

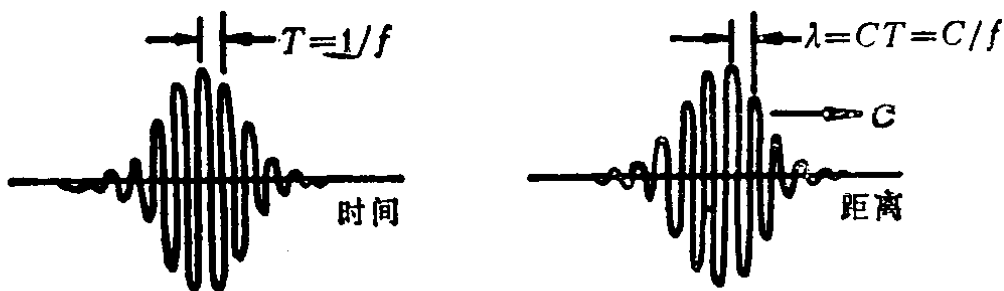


图1.1 一个以速度 c 移动的频率为 f 的光子形象

本书中的内容大部分涉及到光子与物质的相互作用。光子与物质之间的联接体是电子，一个光子被半导体吸收后，半导体内就有一个电子从光子那里获得能量，并马上释放出来参加导电过程。同样一个自由电子被俘获后，失去能量，用发射光子的形式释放出此能量。光子似乎是难以捉摸的概念，但为了

理解光电器件必须承认它的真实性。光电器件均以光子与电子的相互作用为基础，下一节将从氢原子开始讨论物质的某些基本性质。

1.3 能级图

在量子力学中，氢原子的性质得到了广泛的研究，因为氢原子只有一个电子绕质子运转，可以解薛定谔方程。结果表明，氢原子的电子只能占有一个规定的分立能级，其中最低能级为 -13.6 电子伏，它等于电离基态氢，也就是把基态时的电子移到无限远所需的能量。电子伏是电子通过1伏的电位加速所得到的能量，等于 1.602×10^{-19} 焦耳。

原子中的束缚电子，除非有外力作用（提供等于或大于电离能的正能量），否则是无法逸出的，故具有负能量。氢电子可能有的能量示于图1.2。室温下的氢原子不一定处于基态，如室温下的氢气有很多原子在基态上，也有一些原子在 $2s$ 能级上， $2p$ 能级上，……如果原子的电子处于 $3s$ 能级，则往往会放出能量，并回到一个较低的能级。发生这种情况时，电子损失的能量以光子形式释放出来，光子的能量等于能级跃迁的能量。例如从 $3s$ 能级跃迁到 $1s$ 能级时，发射光子的能量为 $hf = -1.51 - (-13.6) = 12.1$ 电子伏。式中 f 是光子的频率（以赫为单位）， $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳，即普朗克常数。把12.1电子伏转换为焦耳，再除以普朗克常数，即可算出光子的频率 $f = 2.92 \times 10^{15}$ 赫。

通过氢气发射光谱的实验研究，可确定氢的能级图。电子的每一种能级跃迁将产生一定能量(或频率)的光子(见表1.1)。光子在真空中以 $c = 2.998 \times 10^8$ 米/秒的速度传播，波长

$\lambda = c/f$ 。电子从 3s 跃迁到 1s, 所发射的光子波长为 102.6 毫微米或 1026 埃。氢气的发射光谱有一系列峰值, 它们代表不同的能级跃迁。

利用氢的能级图可以建立周期表中所有原子的电子组态。多电子元素的核含有多个质子, 电子和核间的静电力一般比氢中的大。如氦的基态, 1s 能级上有两个电子, 电离能为 -24.6 电子伏, 因此电离氦所需的能量比电离氢大, 这说明为什么氦比较稳定。

泡利不相容原理规定, 两个电子不可能占有相同的能级, 氦的两个电子之所以能共享 1s 能级, 是因为它们有着相反的自旋。图 1.2 为简化能级图, 没有把电子自旋造成的次能级分离开来。

表 1.1 氢原子的基本能级跃迁及相应发射光子的频率和波长

跃 迁 发 射 的 光 子			
能级跃迁	ΔE (电子伏)	频率(赫)	波长(毫微米)
5—1	13.1	3.16×10^{15}	94.9
4—1	12.8	3.08×10^{15}	97.2
3—1	12.1	2.92×10^{15}	103.0
2—1	10.2	2.47×10^{15}	122.0
5—2	2.86	6.91×10^{14}	434.0
4—2	2.55	6.17×10^{14}	486.0
3—2	1.89	4.57×10^{14}	656.0
5—3	0.97	2.35×10^{14}	1280.0
4—3	0.66	1.60×10^{14}	1880.0
5—4	0.31	0.75×10^{14}	4000.0

硅是一种最常用的半导体材料，它的原子核包含14个质子。电子分布： $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$ 和 $3p^2$ （ p 的三个角动量能级分别拥有两个电子）。硅的最不稳定束缚电子能量为 -8.1 电子伏，在 $3s$ 和 $3p$ 能级上的四个电子差不多都达到这一能量值，故容易与其他原子共享，因而称硅为四价元素。在硅的半导体晶体中，原子排列呈四面体图形，每个硅原子被四个最靠近的硅原子所包围，距离相等。这也是金刚石、硅、锗等含四个结合较松的电子的原子构成晶体时所特有的图形。

半导体晶体的能级图与组成晶体的原子的能级图有很大差别。假如想象晶体中紧密结合的大量原子既受晶体中起伏热能的作用，又受彼此静电力的扰动，那么后者将引起能级的进一步分裂。由于晶体中原子极多，因而贴近的分立能级便融洽在一起形成能带。

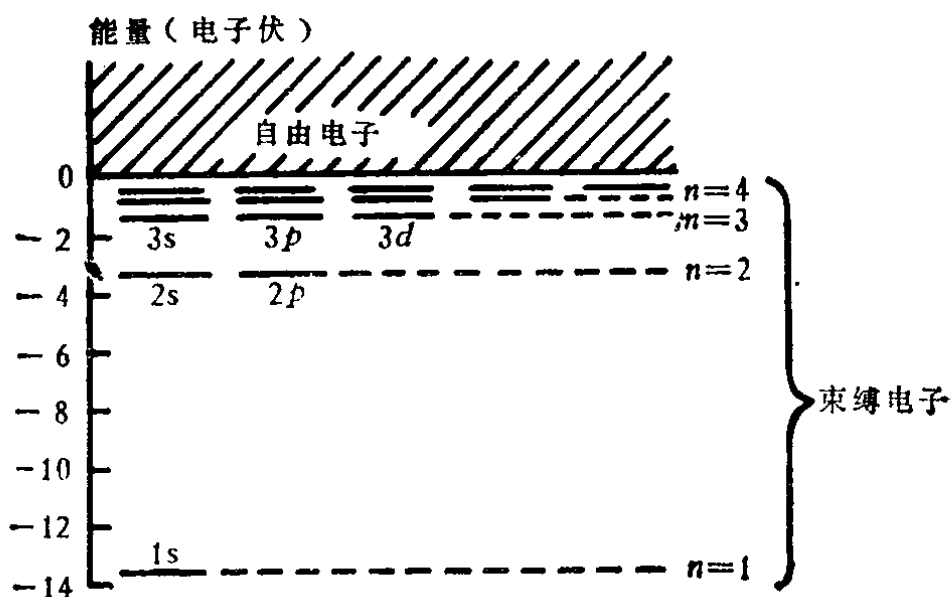


图1.2 氢原子能级图

在晶态硅中存在着价带和导带。价带代表硅原子 $3s$ 和 $3p$ 能级上束缚电子的能量，导带代表硅晶体内自由运动的电子的

能量。室温下晶体硅中价带和导带间的能隙（又称禁带宽度）等于1.12电子伏，相当于硅原子 3s 和 4s 能级间的能量差。

热能在室温下足以使半导体材料中的某些原子电离，由于导带上的电子份额不大，材料的电导率很小，但不能忽视，因而称为半导体。个别电子如果获得足够的能量逃离它的基质原子，那么将在材料内部自由运动，直到与电离原子或空穴相遇而实现复合为止。在复合过程中，电子失去的能量等于价带和导带间的能隙，并以光子的形式释放这些能量。光子的频率 $f = E_g/h$ ，式中 E_g 是材料的能隙。在硅中 $E_g = 1.1$ 电子伏， $f = 2.66 \times 10^{14}$ 赫 ($\lambda = 1127$ 毫微米)。

应该指出，自由电子除能量外还有动量，静止时具有能量 E_0 的电子，以速度 v 运动时总能量为 $E_0 + \frac{1}{2}mv^2$ 。又因为电子的动量 $p = mv$ ，因此运动电子的总能量也可表示为 $E_0 + p^2/2m$ 。这样电子的能级可用总能量与动量的关系曲线表示(图1.3)。如电子总能量为 E ，那么 $\partial E/\partial p = p/m$ 及 $\partial^2 E/\partial p^2 = m^{-1}$ ，电子质量可由拐点的倒数求出，即 $m = (\partial^2 E/\partial p^2)^{-1}$ 。

半导体中的电子虽不是完全自由的，但它们能在半导体内不断运动直到与空穴复合为止。故半导体中电子有一定的迁移率。同样空穴也有迁移率，因为原子的电离位置也能在附近随机迁移。在半导体的能级图上必须同时考虑电子和空穴的动量，图 1.4 所示的硅、锗和砷化镓的能级图说明了这一点。

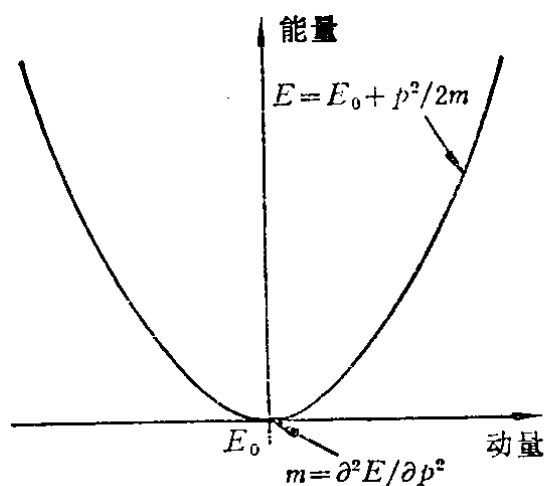


图1.3 自由电子的能级图

根据图1.3，我们可以设想导带上的一个电子(即逃离了基质原子)，其性状如同有效质量为 $m^* = (\partial^2 E / \partial^2 p)^{-1}$ 的自由粒子，同样半导体空穴的有效质量也可按价带曲线的拐点算出。

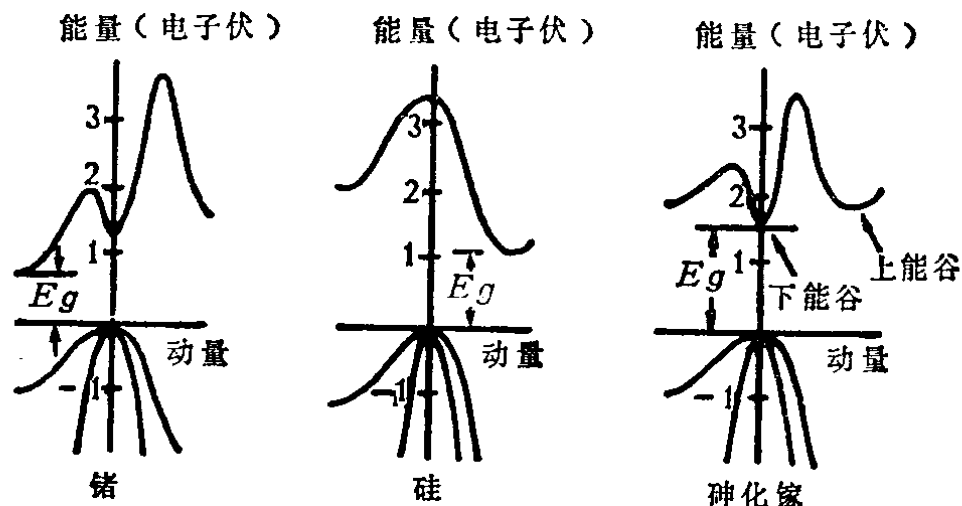


图1.4 硅、锗和砷化镓的能级图

在以后几章的讨论中，我们虽然采用简化能级图1.5，但读者须牢记能级的真实情况。我们还要指出，硅和锗是间接能隙材料(或间接跃迁材料)，也就是导带底与价带顶不在同一垂直线上，有着动量。因而在硅或锗中，一个电子和一个空穴复合，电子除失去能量外，还要失去动量，这种动量损失转变为

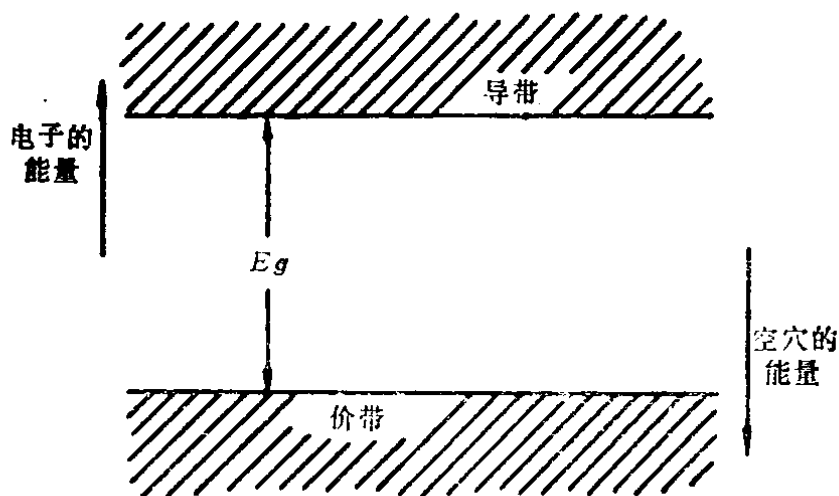


图1.5 简化能级图

材料晶格的振动。因此，硅和锗都不是有效的光子发射体。砷化镓是直接能隙材料，很易发射光子，它是主要的场致发光材料。硅和锗在光电二极管和光敏电阻中起着吸收体的作用。

1.4 电荷迁移率

在半导体的两端加电压，电流将流过半导体，这是电荷迁移率的外观描述。外加的电压在半导体内产生电场，正电荷或空穴沿电场的方向运动，而电子在力 $F = -eE$ 的作用下沿反方向运动。通过材料截面的总电荷与电荷平均速度的乘积等于外电流。如电子和空穴都运动，那么双方都对外电流作出贡献，而且通常电子比空穴运动得快。

实际情况正如下面所述，在正常情况下电荷并没有移动。室温下半导体有足够的热能激发大量自由电子，从而造成大量空穴。空穴就是失去一个电子后的半导体晶体原子。我们设想空穴有一定的迁移率，这意味着晶体的电离部位改变，但原子仍固定在原来的位置上。电子在半导体晶格内自由移动，与空穴碰撞以前任何方向均不可能移动很远。但与空穴的碰撞使电子转向，或使电子和空穴复合，也就是回到价带。电子在半导体中的运动径迹可描述为随机

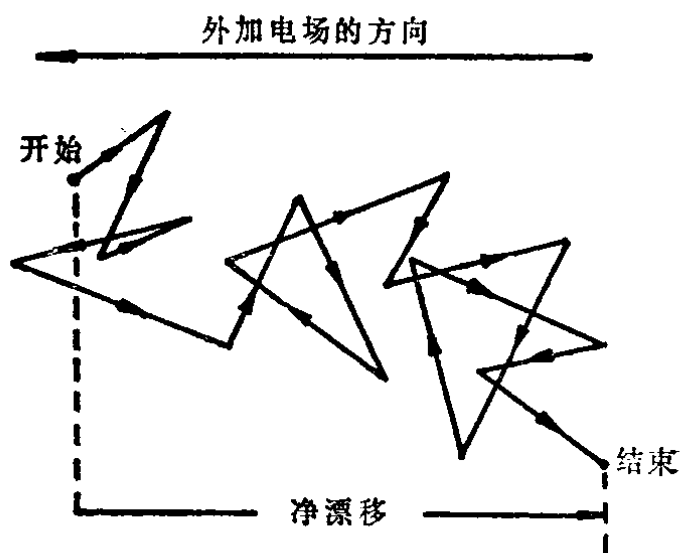


图1.6 半导体晶体内的电子在外加电压作用下随机游动

游动，如果有外电场，那么电子以特定的方向运动(图1.6)。

如果电子没有碰撞而能自由运动，那么在外加电场的加速下，电子的速度会愈来愈大。但每次碰撞总使电子失去部分能量，因此电子的运动决不会达到很高的速度。尽管运动被不断地碰撞打断，最后结果仍是外电场使电子在特定的方向漂移。半导体中电子的迁移率定义为

$$v_n = \mu_n E \quad (\text{电子迁移率}) \quad (1.1)$$

式中 v_n 是电子漂移速度， E 是外加电场， μ_n 是电子迁移率。如果电压加倍 (E 加倍)，根据欧姆定律电流也加倍 (v_n 加倍)。

如果漂移速度的单位为厘米/秒，外加电场的单位为伏/厘米，那么电子迁移率的单位为厘米²/伏秒。硅中电子的迁移率约为1500厘米²/伏秒，这意味着，在1厘米长度上外加1伏电压会引起电子1500厘米/秒的漂移速度。

在半导体中空穴的迁移率定义为

$$v_p = \mu_p E \quad (\text{空穴迁移率}) \quad (1.2)$$

硅中 μ_p 约等于600厘米²/伏秒，为电子迁移率的三分之一左右。

高掺杂半导体，由于杂质原子多，因而有更多的电离部位，电子遭受到更多的碰撞，结果降低了迁移率。例如把杂质浓度增加三个数量级(从每立方厘米 10^{14} 增到 10^{17})，硅的电子迁移率将从1500下降到700厘米²/伏秒。温度提高时电子迁移率也下降，这是因为热能的增加引起更多的原子电离，从而发生更多的碰撞之故。

硅中的一个自由电子被100微米1伏或 $E=100$ 伏/厘米的电场加速，假定其有效质量 $m^*=9.106 \times 10^{-31}$ 公斤，那么得到的加速度为 $eE/m^*=1.76 \times 10^{15}$ 厘米/秒。如果碰撞前电子被加速1毫微秒，得到的速度为 1.76×10^6 厘米/秒，通过的总距离为8.8微米(相当于通过16000个原子)，那么自由电子在两次

碰撞之间存在这么长的间隔是不太可能的。尽管硅的晶格常数只有 0.543 毫微米（它决定晶胞的大小），但仍可以观察到硅中的电子经几次碰撞后漂移速度有所提高，并且会发现自由电子的瞬时速度比它的漂移速度大几个数量级。

1.5 吸收

当光入射到半导体薄层时一部分被吸收，其余的光被透过。吸收的入射光子通过光子-电子的互相作用，转换成自由电子，而透过的入射光子对材料不产生作用。光子被吸收的基本方程式：

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

式中 I_0 为入射光强度， $I(x)$ 是距离半导体表面 x 处的光强度， α 是吸收系数， $\exp(-\alpha x)$ 等于 $e^{-\alpha x}$ 。

我们知道光子的能量只有足够大时才能克服半导体价带和导带之间的能隙而被吸收，因此吸收系数很可能与波长有关。

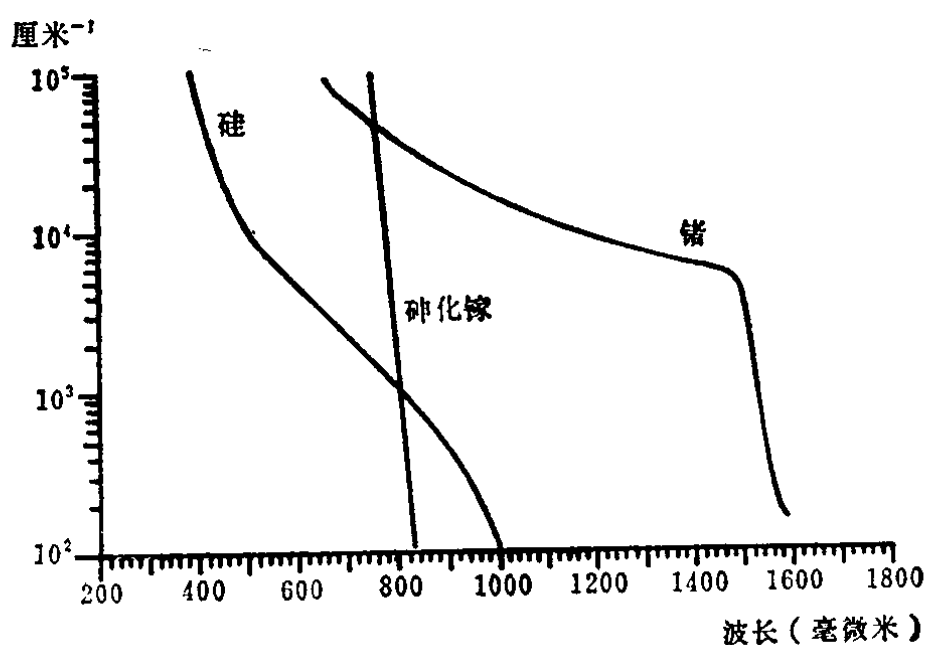


图1.7 硅、锗、砷化镓的吸收系数与波长的关系

图1.7所表示的硅、锗、砷化镓吸收系数与波长的关系,也证明了这一点。

在半导体中,当光强减少到初始值的 $1/e$ 时,光所经过的距离称为光的有效透入深度。有效透入深度等于 α^{-1} ,即吸收系数的倒数。例如 632.8 毫微米波长上硅的吸收系数 $\alpha=4000$ 厘米⁻¹,那么有效透入深度为2.5微米。

锗、硅和砷化镓的性能综合在表1.2中,它们是当前研究最广泛的三种半导体材料。表中数据仅供以后几章讨论时参考,读者为进一步探讨半导体的这些性能应查阅半导体器件的有关物理教科书。

表1.2 室温下($T=300\text{K}$)锗、硅和砷化镓的性质

性 能	锗	硅	砷化镓
原子数/厘米 ³	4.42×10^{22}	5.0×10^{22}	2.21×10^{22}
原子量	72.6	28.08	144.63
击穿电压(伏/厘米)	10^5	3×10^5	4×10^5
晶体结构	金刚石	金刚石	闪锌矿
密度(克/厘米 ³)	5.3267	2.328	5.32
介电常数	$16 \epsilon_0$	$11.8 \epsilon_0$	$10.9 \epsilon_0$
导带中的能级密度	1.04×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}
价带中的能级密度	6.1×10^{18}	1.02×10^{19}	7.0×10^{18}
能隙(禁带宽度)(电子伏)	0.66	1.12	1.43
本征载流子密度(厘米 ⁻³)	2.4×10^{13}	1.6×10^{10}	1.1×10^7
晶格常数(埃)	5.65748	5.43086	5.6534
熔点(°C)	937	1420	1238
少数载流子寿命(秒)	10^{-3}	2.5×10^{-3}	10^{-8}
迁移率(厘米 ² /伏秒)			
μ_n (电子的)	3900	1500	8500
μ_p (空穴的)	1900	600	400