

目 录

第一章 光电效应	(1)
第1节 外光电效应	(1)
• 单光子光电效应	(2)
• 多光子光电效应	(7)
第2节 光电导效应	(8)
第3节 光生伏特效应	(18)
• 丹倍效应	(18)
• 光磁电效应	(21)
• PN 结光生伏特效应	(23)
• 反常光生伏特效应	(31)
• 贝克勒效应	(33)
• 光子牵引效应	(34)
第4节 俄歇效应	(34)
第5节 光电流效应	(41)
• 低气压气体放电	(41)
• 空间电荷效应与辉光放电	(42)
• 光电流效应机理	(45)
• 光电流光谱技术	(46)
• 焦希效应	(47)
• 马尔特效应	(47)
第6节 康普顿效应与逆康普顿效应	(47)
第二章 电光效应	(51)
第1节 斯塔克效应	(51)

• 氢原子的线性斯塔克效应	(52)
• 二级斯塔克效应	(53)
• 里德堡原子和斯塔克效应	(54)
第2节 泡克尔斯效应	(55)
第3节 电光克尔效应	(61)
第4节 液晶的电光效应	(64)
• 电控双折射效应	(66)
• 扭曲向列液晶的场效应	(67)
• 宾主彩色效应	(68)
• 液晶磁光和电光克尔效应	(68)
第5节 场致发光效应	(70)
• 载流子注入式场致发光效应	(70)
• 德斯特里奥效应	(74)
• 格登-颇尔效应	(77)
第6节 弗朗兹—凯尔迪什效应	(79)
第三章 磁光效应	(85)
第1节 塞曼效应	(85)
• 正常塞曼效应	(85)
• 反常塞曼效应	(89)
• 帕邢—巴克效应	(90)
第2节 法拉第磁致旋光效应	(91)
第3节 磁光克尔效应	(96)
第4节 磁致双折射效应	(99)
• 科顿—穆顿效应	(99)
• 佛克脱效应	(100)
第四章 磁电效应	(101)
第1节 霍耳效应	(101)
• 普通金属的霍耳效应	(101)
• 半导体的霍耳效应	(104)
• 铁磁金属的霍耳效应	(105)
• 离子晶体的霍耳效应	(106)

• 广泛应用	(106)
第2节 磁电阻效应	(108)
• 物理磁电阻效应	(109)
• 几何磁电阻效应	(110)
第3节 苏里效应	(113)
第4节 磁感生电效应	(115)
第5节 趋肤效应	(125)
第五章 热电效应	(127)
第1节 塞贝克效应	(127)
第2节 珀耳帖效应	(133)
第3节 汤姆孙效应	(135)
第4节 热释电效应	(137)
第5节 电热效应	(143)
第6节 热电子效应	(145)
第7节 电阻温度效应	(151)
第六章 热磁效应	(155)
第1节 爱廷豪森效应	(155)
第2节 能斯特效应	(158)
第3节 里纪-勒杜克效应	(159)
第4节 声子曳引效应	(160)
第七章 力(声)电(磁)效应	(164)
第1节 压电效应及逆效应	(164)
第2节 电致伸缩效应	(178)
第3节 压阻效应	(182)
第4节 磁致伸缩效应与压磁效应	(188)
第5节 威德曼效应及逆效应	(196)
第6节 巴克好森效应	(196)
第7节 回磁效应	(203)
第8节 声电效应与超声放大	(205)

第9节 电(磁)-机械效应	(207)
第八章 光(声)的参照系效应和光声效应	(210)
第1节 多普勒效应	(210)
• 声多普勒效应	(210)
• 光多普勒效应	(213)
第2节 萨甘纳克效应	(219)
第3节 声光效应	(223)
第4节 光声效应	(231)
第5节 光热偏转效应	(235)
第九章 载流子的行为	(240)
第1节 接触电效应	(240)
• 金属-金属接触	(241)
• 金属-半导体接触	(244)
• P型-N型半导体接触	(253)
• 金属-氧化物-半导体接触	(260)
• 金属-电解液接触	(268)
第2节 肖脱基效应	(273)
第3节 普尔-夫伦克尔效应	(276)
第4节 隧道效应	(280)
第5节 齐纳效应	(289)
第6节 耿氏效应	(293)
第7节 布尔斯坦-莫斯效应	(299)
第8节 激子效应	(300)
第9节 陷阱效应	(308)
第十章 光散射与光学非线性效应	(316)
第1节 丁达尔散射与瑞利散射	(316)
第2节 喇曼散射效应	(319)
第3节 共振喇曼散射	(326)
第4节 电子喇曼效应	(328)

第 5 节	受激喇曼效应	(329)
第 6 节	相干反斯托克斯喇曼效应	(331)
第 7 节	喇曼诱导克尔效应	(334)
第 8 节	超喇曼散射效应	(336)
第 9 节	布里渊散射效应	(337)
第 10 节	自聚焦、自感透明效应	(343)
第 11 节	倍频效应	(351)
第 12 节	双光子吸收效应	(356)
第十一章	穆斯堡尔效应	(360)
第 1 节	γ 射线的共振吸收	(360)
第 2 节	穆斯堡尔效应的发现	(365)
第 3 节	穆斯堡尔谱的产生	(368)
第 4 节	穆斯堡尔效应的应用	(370)
第十二章	获取低温的效应及低温下的量子效应	(374)
第 1 节	绝热膨胀致冷效应	(374)
第 2 节	焦-汤效应	(377)
第 3 节	绝热去磁致冷效应	(383)
	• 顺磁盐绝热去磁	(385)
	• 核磁绝热去磁	(387)
第 4 节	超导现象	(387)
	• 超导电性的发现	(387)
	• 同位素效应	(390)
	• 能隙	(390)
	• 库珀对与 BCS 理论	(392)
第 5 节	迈斯纳效应	(394)
	• 超导体的完全抗磁性	(394)
	• 第二类超导体	(396)
	• 超导电性的应用	(399)
第 6 节	单电子隧道效应	(399)
第 7 节	约瑟夫逊效应	(402)

• 直流约瑟夫逊效应	(402)
• 超导量子衍射效应	(404)
• 交流约瑟夫逊效应	(406)
• 超导量子干涉效应	(408)
• 应用	(409)
第 8 节 库仑阻塞效应与单一电子隧穿振荡	(412)
第 9 节 阿哈罗诺夫-玻姆效应及其对偶效应	(416)
• A-B 效应	(416)
• 介观体系中的 A-B 效应	(420)
• A-C 效应	(421)
第 10 节 德哈斯-范阿芬效应	(422)
第 11 节 量子霍尔效应	(427)
• 二维电子系统的实现	(427)
• 舒布尼柯夫-德哈斯效应	(427)
• 二维电子系统在磁场中的输运特性	(429)
• 整数量子霍尔效应	(432)
• 分数量子霍尔效应	(435)
第 12 节 近藤(kondo)效应	(436)
第 13 节 超流	(439)
• 超流动性	(439)
• 昂内斯效应	(440)
• 超导热性	(441)
• 二流体模型	(441)
• 喷泉效应	(442)
第十三章 其它物理效应	(444)
第 1 节 光隧道效应	(444)
第 2 节 弹光效应	(449)
第 3 节 激光致冷和“光镊”效应	(450)
第 4 节 光折变效应	(452)
第 5 节 麦克斯韦-瓦格纳效应	(456)
第 6 节 卡斯米尔效应	(457)

第 7 节	同位素效应与激光同位素分离	(459)
第 8 节	正、负电子湮灭效应	(462)
第 9 节	同步辐射效应	(465)
第 10 节	磁共振效应与核磁共振成像	(467)
第 11 节	光子回波效应	(472)
第 12 节	生命系统的超微弱光子辐射效应	(475)
参考文献		(478)

第一章 光电效应

光照射到某些物质上,引起物质的电性质发生变化。这类光致电变的现象统称为光电效应。

近代物理学已确认光具有波粒二象性,在与物质相互作用时,会更明显地表露它的粒子(光子)特征。从微观看来,不管什么光电效应,归根结蒂,乃是光子与电子相互作用带来的结果。二者相互作用,各有所变:对于光子,它或被吸收,或改变频率和方向;对于电子,必发生能量和状态的变化,从束缚于局域的状态转变到比较自由的状态,因而招致物质电特性的变化。

光电效应一般分为外光电效应、内光电效应,但本章所述已经越出这一界线,将光与电子相互作用的若干很有应用价值的效应集于一体。

第 1 节 外光电效应

1887 年,德国物理学家赫兹正致力于证实麦克斯韦所预言的电磁波的存在,在实验中偶然发现了一个奇妙的现象:当用紫外光照射他的装置时,电极之间发生电

火花要容易一些。赫兹改变实验条件,进一步研究了6个月而停顿下来。一年后,霍耳瓦克斯(W. Hallwachs)证明,这是由于出现了带电粒子的缘故。后来,人们知道这种粒子就是电子,不仅紫外线可以从金属“照出”电子,x射线、可见光等也有这种本事。至今,人们把由于光照射固体而从表面逐出电子称为**外光电效应**,或光电发射效应,被光逐出的电子称为**光电子**。

(一)单光子光电效应

外光电效应可以用图 1-1 所示的装置来观察。把两个金属电

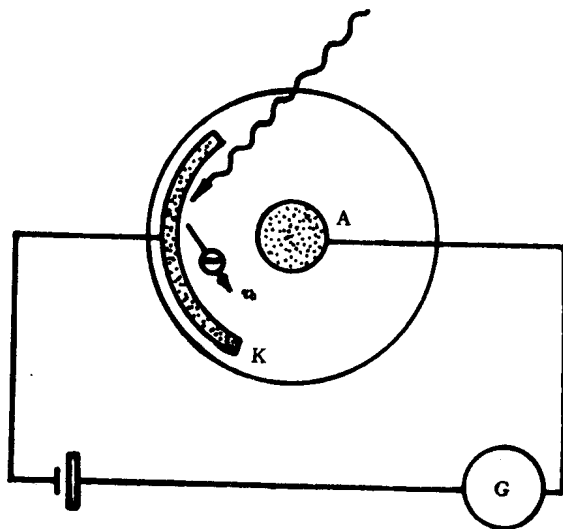


图 1-1 外光电效应观察装置

极安装在抽成真空的玻璃泡中,两极之间串联上直流电源和灵敏电流计 G。当光不照射时,玻璃泡内阴极 K 和阳极 A 之间的空间无载流子(即自由正、负电荷),如果不顾及暗电流的话电阻为无穷大,没有电流流过 G。当有光照射阴极 K 时,便有光电子从阴极飞出,在电压作用下,飞向阳极 A, G 中便有稳定的光电流流过。

1899~1902 年,赫兹的助手勒纳德利用各种频率和强度的光,对光电效应进行了系统的实验研究,发现了三条实验规律。

1. 当一定频率的光照射金属阴极 K 时,只要阴极与阳极之间有足够的加速电压,光电流正比于光强。

2. 每种金属各自存在一个足以发生外光电效应的**最低频率** ν_0 (红限频率),当照射光的频率 $\nu < \nu_0$ 时,不会逸出光电子;当入射光的频率 $\nu > \nu_0$ 时,不管光多么弱,都会**立刻**发射光电子,不存在时间滞后。

3. 光电子从金属表面刚逸出时的最大初动能 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 与光的**频率有线性关系,与人射光的强度无关**。

上述三条实验规律,除了第一条能利用波动说解释以外,其它两条实验规律与光的波动学说发生了剧烈冲突。这使物理学家们大为惊讶。爱因斯坦从普朗克解释黑体辐射时提出的辐射能量量子化的假设得到启示,意识到光电效应是光的粒子性的表现,于 1905 年春提出了光量子(光子)假说。他在论文中写道:

“在我看来,如果假定光的能量不连续地分布于空间的话,那么,我们就可以更好地理解黑体辐射、光致发光、紫外线产生阴极射线以及其它涉及光的发射与转换的现象的各种观测结果。根据这种假设,从一点发出的光线传播时,在不断扩大的空间范围内能量不是连续分布的,而是一个数目有限地局限于空间中的能量量子所组成,它们在运动中并不瓦解,并且只能整个地被吸收或发射。”

这样,在爱因斯坦的观念中,一束频率为 ν 的光便是一束单个粒子能量为 $h\nu$ 的光子流, h 为普朗克常数。在光与物质相互作用时,就是这些光子与物质微粒之间的事情了。

利用光子概念和能量守恒定律,对于外光电效应可以写出下列方程式,

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + \varphi \quad (1-1)$$

式中 φ 为金属**逸出功**或功函数。这个方程被称为爱因斯坦方程。就

是这个方程,成功地解释了外光电效应的实验规律,使外光电效应的机理变得简单而清晰。

金属中的自由电子在金属内部可以自由游荡,但它们并不能随意地越过金属表面,因为表面附近的金属正离子要拽住它们,不让它们外逃,好似有一堵墙阻挡着。我们可以用图 1-2(a)所示的能“势阱”来表示金属表面对电子的这种约束作用。设电子在金属

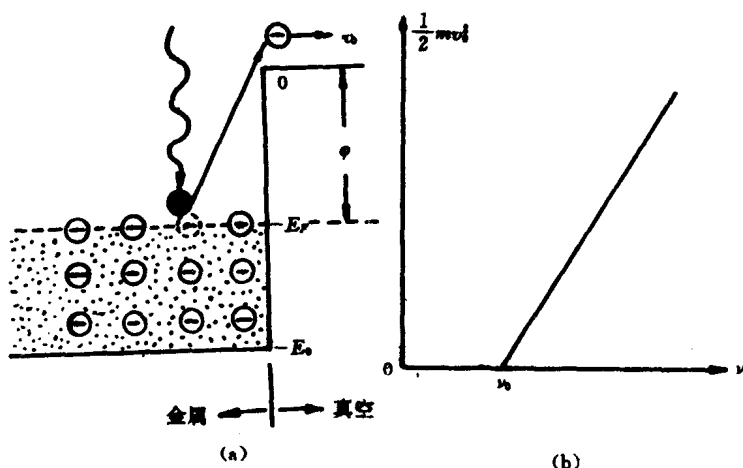


图 1-2 (a)能“势阱”和(b)光电子初动能与光频率关系

之外的真空中势能为零,在金属中势能为 $-E_0$,加上电子在金属中具有的动能,它的总能量只能处于 $-E_0$ 和 $-E_F$ 之间。因此,金属中的电子如果不能从外界获得等于大于 φ 的能量,它是绝对无法克服势垒 E_0 外逃的。自由电子逃逸出金属表面所需要的这个最小能量,或需要对电子所作的最小的功称为逸出功。这也就是外光电效应存在红限频率 ν_0 的道理所在,不同金属的逸出功不同,红限频率也就不同。飞来的光子是一个个能量为 $h\nu$ 的小能包,当它与电子碰撞并为电子所吸收时,电子获得了光子的能量,一部分用于克服金属的束缚,开销于逸出功,余下的便成了外逸光电子的初动

能 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 了。既然光子是一颗一颗的,电子吸收光子也就只好“一口吃下一个了”,光电子瞬息即发也就顺理成章了。

图 1-2(b)是式(1-1)的图示,它直观地表示光电子的初动能与光的频率成直线关系,直线与频率轴的交点对应红限频率,直线的斜率是普朗克常数 h 。密立根花了 10 年时间,克服了不少困难,验证了爱因斯坦方程,并准确地测出了普朗克常数,宣告光子的存在是无可置疑的。

上面只提及金属的外光电效应,实际上,半导体和其它固体也一样发生外光电效应,式(1-1)同样成立。

某种物理效应的发现,最终总是导致技术上的应用。1930 年,利用外光电效应做的光电转换器件——光电管开始实用化。经过不断的改进,制造出了适于不同光频段的光电管;一个关键问题是研究出适宜的光电阴极材料;另一个重要问题是提高光电转换灵敏度,除了从阴极材料上想办法以外,就是将光电管充以电离电位低的气体,利用光电子与气体发生碰撞电离的雪崩过程来放大光电流。充气光电管较真空光电管的光电流可增大 10 倍。但对于弱光探测,光电管的电流仍然太微弱,于是出现了光电倍增管。

如图 1-3 所示,在光电管原来的阴极和阳极之间安装上一系

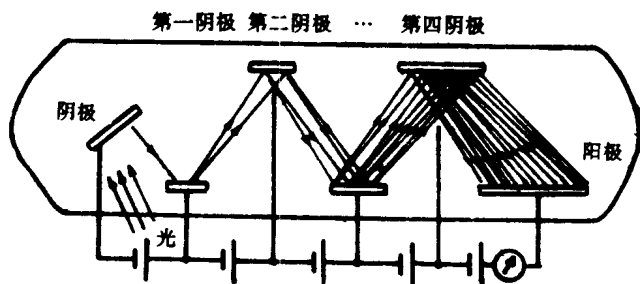


图 1-3 光电倍增管

列次阴极(又称打拿级或倍增级),分别称为第一阴极、第二阴极

……等,可达 10 多个。各电极之间保持上百伏的电位差。当光照射在光电阴极上时,发射的光电子,在电场作用下经加速后轰击第一阴极,一个入射电子将从次阴极轰击出多个次级电子,这称为二次电子发射效应。次级电子又经电场加速,轰击下一个阴极,产生更多次级电子。如此继续下去,最终可使电流放大 10^6 倍以上而达阳极。这就是说,阴极上发射一个光电子,阳极上可以得 10^6 个电子。显然,要使电流增益大,应选择二次电子发射率高的材料做次阴极,如选铯—铯合金等材料。另一条途径是增加次阴极的数目。

加大电流增益的第二条途径,推动人们将光电倍增管的“分立”次阴极改成连续次阴极而发展出通道式光电倍增管和微通道板式光电倍增管。

通道式光电倍增管的次阴极是一个管子,如图 1-4(a)所示。

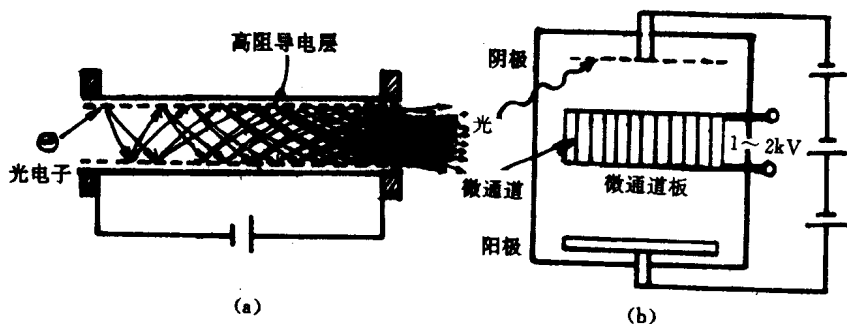


图 1-4 通道式和微通道式光电倍增管

管的内壁表面是具有二次电子发射本领且电阻约为 $10^9\Omega$ 的导电层(如高铅玻璃、陶瓷半导体等)。管两端加高压(约 3kV),在管内建立起加速电场。光电子从管的低电位端入射,被电场加速与管壁碰撞产生二次电子发射。这种电子倍增过程重复多次,最后在高电位端输出增益达 10^6 的电子束。图 1-4(a)是直管型通道式光电倍增管次阴极的示意图。次阴极也可做成波纹型、螺旋型、C 字型。

如将上述通道微型化,在面积仅几平方厘米的平板上做 10^6

量级长 $1\sim 10\text{mm}$ 的通道,将它们并联起来成为一个微通道板。用微通道板作次阴极,实现电子倍增的微通道式光电倍增管,如图 1-4(b)所示。微通道板的两端加有 $1\sim 2\text{kV}$ 的电压。

利用外光电效应制做的真空光电管和充气光电管曾在自动控制和检测中显露辉煌。不过现代大多为小巧的半导体光敏二极管和三极管所取代。但由真空光电管衍生出来的光电倍增管(PMT)却始终是将弱光信号转变成电信号的不可缺少的传感器,广泛使用在众多的高新探测技术中,如各种光谱仪、光子计数仪、表面分析仪等场合。通道式电子倍增管(CEM)由于增益高、功耗低、结构简单小巧、响应快、多功能等优点更受科技工作者欢迎。它可直接探测光、电子、离子、中性粒子、软 x 射线及 α 、 β 、 γ 等带能粒子,已将其载于人造卫星或航天器中来进行这类探测和分析。微通道板与其它部件组合可制做像亮度增强器;用微通道板制做的超高速变象管相机较好地解决了高速响应和高灵敏度的矛盾,成了捕捉高速瞬变现象的利器。

(二)多光子光电效应

爱因斯坦的光子假设和爱因斯坦方程成功地解释了外光电效应。几十年来,人们没有看到什么事情偏离爱因斯坦方程。但是,“长江后浪推前浪”,随着强度大、单色性好的激光器的问世,新的情况出现了。

1963 年 Ready 等人用激光作光电发射实验时,发现了与爱因斯坦方程偏离的奇异光电发射。1968 年 Teich 和 Wolga 用 GaAs 激光器发射的 $h\nu=1.48\text{eV}$ 的光子照射逸出功 $\varphi=2.3\text{eV}$ 的钠时,发现光电流与光强的平方成正比。按爱因斯坦方程,光子的频率处于钠的红限频率以下,不会有光电子发射,然而新现象却发生了,不但有光电子发射,而且光电流不是与光强成正比,而是与光强的平方成正比。于是,人们设想光子间进行了“合作”,两个光子同时被电子吸收得以跃过表面能垒,称为双光子光电发射。后来,进一步的实验表明,可以三个、多个、甚至 40 个光子同时被电子吸收而

发射光电子,称为**多光子光电发射**。人们推断, n 光子的光电发射过程的光电流似乎应与光强的 n 次方成正比。

关于多光子光电效应的研究涉及到光的本质、光与物质、光子与光子相互作用的过程、材料内部的原子结构和电子结构等基本问题。在红外探测、光化反应的探测、受控热核反应等领域都有重要意义。

第 2 节 光电导效应

前一节介绍了受光物体向真空发射电子的现象,称为外光电效应。另有些物质,被光照射时无电子发射,但电导率发生变化或产生电动势。这类现象称为**内光电效应**。内光电效应又可分为光电导效应和光生伏特效应两种。

绝大多数低电导率的半导体吸收光辐射时,电导率增加,变得易于导电。这种现象称为**光电导效应**。

1. 机理

在孤立原子中的电子,允许处于一系列量子态中或一系列分立能级中,如图 1-5(a)所示。当把大量原子拿到一起组成晶体时,近邻原子的量子态发生重叠,原来属于一个原子的电子,一方面要围绕着原子核运动,同时又要在相邻原子或整个晶体中做公有化运动。由于晶体中原子之间的相互作用,按电子公有化运动的不同,原子的能级扩展成一系列能带,每个能带中有许多靠得很近的能级,如图 1-5(b)所示。各原子内层电子之间的相互影响比外层电子间的相互影响要小,所以形成晶体后,内层能带比外层能带窄。

对于低电导率的半导体,当未受光照射时,只有少数热激发的自由载流子,绝大多数电子被束缚在如图 1-6(a)所示的局域价键上,不能参与导电。按照固体量子理论,确认这些价电子处在如图 1-6(b)所示的满的价带中,而在材料中可以参与导电的自由电子

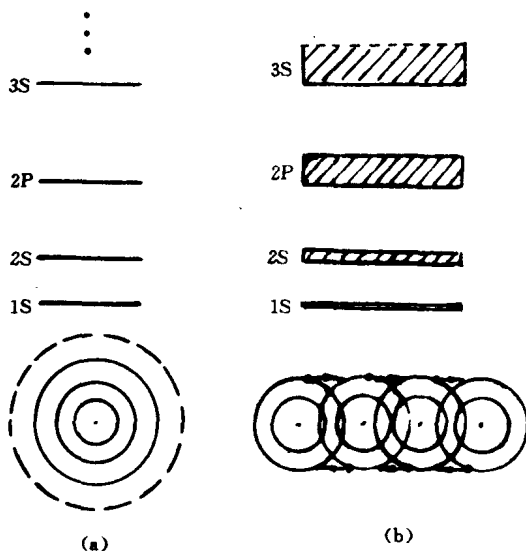


图 1-5 从原子到晶体,从能级到能带

被认为处在导带中,在导带与价带之间有宽度为 E_g 的禁带,电子不能具有这个范围内的能值。如果电子都束缚在图 1-6(b)的满的价带中,导带中无电子,那材料就成了绝缘体,电导率为零。要打破电子在价带和导带中的这种分布格局,必须输入能量,以破裂原子间的价键,将电子从价带提升到导带。光电导效应是利用光子能量来实现这一目的。

图 1-6(c)表明能量大于禁带宽度的光子 $h\nu$ 与价电子碰撞,价电子获得光子能量成为自由电子,并留下一个空位。这个空位带正电,称为**空穴**。也就是说,光子被价电子吸收,形成了自由电子-空穴对。从能量图上来看(图 1-6(d)),这一过程导致电子从价带跃迁到了导带,原来满的价带不满了,出现了空穴,而导带中增加了自由电子。导带中的电子、价带中的空穴都是可以参与导电的载流子。这一光电过程增加了材料的载流子浓度,从而改变了材料的电

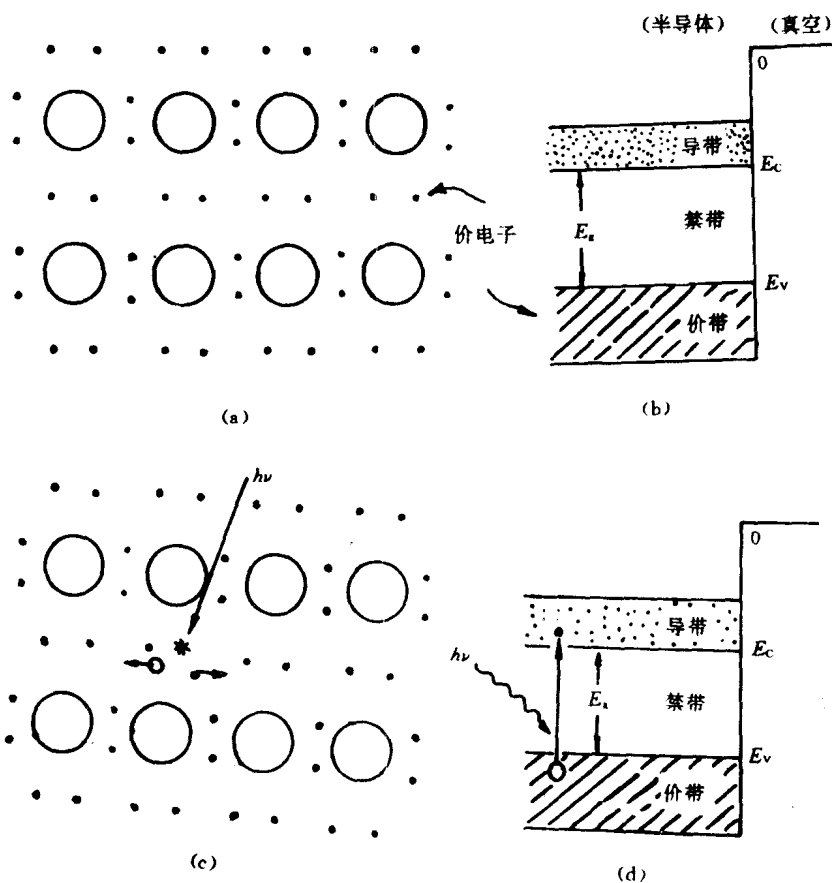


图 1-6 本征半导体光电导效应

导率。

当没有外电场时,材料中的载流子向各个方向运动的几率相等,平均说来,无定向运动,不显示电流。当施加外电场 E 时,载流子沿外场(或与外场相反)方向产生定向运动速度 V ,称为载流子的漂移速度。漂移速度与电场强度成比例。

对自由电子,