

半导体家族 (一)

韩郑生

(中国科学院微电子研究所 100029)

1. 引言

古代中国将泥土经过烧制制造了精美的瓷器，为帝国赢得了当时 GDP 的世界第一，名副其实地成了国家代名词 - 中国 (China)。

当今的美国将沙土经过烧制加工制成了各种电子产品，如现代人离不开的手机等，不仅为国家赢得了巨额的财富，而且通过网络信息手段给人类交流沟通带来巨大方便，同时也监控着我们生活活动的每个角落。

齐天大圣孙悟空经历了太上老君的八卦炉，练就了一双火眼金睛。沙土经过烧制加工，练就出比火眼金睛更神通广大的本领。

1956 年 8 月，周恩来总理主持制定“十二年科学技术发展规划”把半导体技术列为国家四大新技术发展重点之一。

围绕半导体科技，中美两国经过多年的太极推手，近期更是进入了争斗的白热化。

2000 年国务院 18 号文《鼓励软件产业和集成电路产业发展若干政策》，2011 年国务院 4 号文《关于印发进一步鼓励软件产业和集成电路产业发展若干政策的通知》和 2014 年 6 月 24 日国务院在北京正式发布《国家集成电路产业发展推进纲要》。中国一系列推进以半导体科技为核心的政策和发展计划，特别是今年以来的大基金资助计划，引得山姆大叔很不自在。有以下几个案例为证：

“据路透社 2016 年 11 月 3 日报道，美国商务部长普里茨克 (P. Pritzker)(2 日) 在华盛顿智库 Center for Strategic Studies 演讲时警告称，中国政府对半导体行业的大规模投资有可能会扭曲全球集成电路市场，导致破坏性的产能过剩并扼杀创新。同一天，美国 12 名参议员还以国家安全为由，要求对一桩中资收购案叫停。普里茨克在演讲中尖锐批评中国政府一项规模 1500 亿美元的计划，即到 2025 年前使中国制造的集

成电路在国内市场的份额从当前的 9% 扩大至 70%。据报道，普里茨克还表示，美国政府将抓住一切机会，不会接受中国旨在推动半导体行业发展而补贴 1500 亿美元的政策。”

“据美国《华尔街日报》网站 2016 年 8 月 13 日报道，中国准备涉足美国先进的半导体的努力惹恼美国国会，美国的一位重要参议员呼吁美国官员阻止一家中国国企收购一家美国芯片制造商。

来自纽约州的民主党参议员舒默 (C. Schumer) 呼吁评估海外公司收购美国企业的委员会阻止紫光集团有限公司 (Tsinghua Unigroup Ltd.) 收购美光科技公司 (Micron Technology Inc.)。若该收购交易完成，将成为有史以来规模最大的中国企业收购美国公司案例。

舒默在一封致领导该委员会的美国财长卢 (J. Lew) 的信中写道，对于允许中国获得与美国现代防务系统有关的零配件生产市场控制权给美国国家安全带来的影响，他深表关切，这些零配件中可能包括美光科技生产的芯片。

鉴于该交易可能会招致美国出于安全考虑的反对方，以及紫光集团提出的高达 230 亿美元的收购价，外界普遍认为该收购交易达成的可能性不大。”

“据路透社报道，中资支持的基金收购美国芯片制造商莱迪思半导体 (Lattice Semiconductor) 一事今日遭到超过 20 位美国国会议员的联合阻挠。他们联名在周一致函美国财长卢，并以安全担忧为由要求阻止中资支持的基金收购美国芯片制造商莱迪思半导体。据悉，上周路透就曾披露，已经同意以 13 亿美元收购莱迪思半导体的并购基金 Canyon Bridge Capital Partners 有部分资金来自中国政府，并且基金与中国的航天计划有间接联系。22 名议员在信函中写道，这项交易可能扰乱美国军方供应链，并可能导致美国国防部许多重要计划要依赖源自外国的技术。”

“OFweek 电子工程网讯 随着中国政府对半导体的支持力度加大，韩国也成立了半导体希望基金支持本土半导体发展。面对着众多海外挑战者的咄咄逼人，美国政府集合了十几个行内资深人士组成了一个专家小组——那就是‘总统的科学技术参谋委员会 (President’s Council of Advisors on Science and Technology, 简称 PCAST)’，希望通过他们找出几种方法，确保美国将在未来数年内依然能成为半导体行业的领导者。

2016 年全球半导体总产值是 3247 亿美元，据调研机构 Gartner 预估，2017 年全球半导体产值将成长至 3400 亿美元，年增 4.7%。

综上所述，半导体科技在国民安全和国民经济中的重要战略地位是显而易见。

我来问您“什么是半导体？”，您会怎样回答？可能会答：是收音机吧？

为什么会这样？可能源于 20 世纪 60~70 年代，半导体晶体管取代真空电子管成为收音机的核心器件。由于电子管本身体积限制，所以电子管收音机最小也只能做成台式，如图 1 所示。而半导体晶体管收音机可以做成小巧的便携式，如图 2 所示。有些收音机的外壳上甚至印上了“半导体晶体管收音机”，大家简称就成了“半导体”，而他们脑子中的概念还是

“收音机”。若照此逻辑扩展一下，现在可叫“半导体”的东西太多了。例如，半导体计算机、半导体手机、半导体电视机、半导体冰箱、半导体空调、半导体灯，等等。半导体芯片作为核心器件的各种电子产品如图 3 所示。

“半导体”究竟是什么？请您听我慢慢道来。

那么什么是半导体呢？就其本身字面意思可以是半导体材料。通俗地讲，导电性能介于导体和绝缘体之间的那类固体材料。广义地讲，半导体除半导体材料外，还包含半导体理论、半导体技术、半导体器件，其架构如图 4 所示。

2. 半导体材料家族

让我们先来看看半导体材料

通俗些说，把电阻率 $\rho \leq 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料归为导体， $\rho \approx 10^{12} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料归为绝缘体，介于其中的 $\rho \approx 10^3 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 归为半导体^①。这只是从宏观上的一个笼统的划分。而从其微观本质上，还要从半导体物理学的能带结构上区分。

半导体材料的种类繁多，其族谱如图 5 所示，从单质到化合物，从无机物到有机物，从单晶体到非晶体，都可以作为半导体材料。根据材料的化学组成和结构，可以将半导体划分为：元素半导体，



图 1 电子管收音机



图 2 半导体晶体管收音机



图3 半导体芯片作为核心器件的电子产品

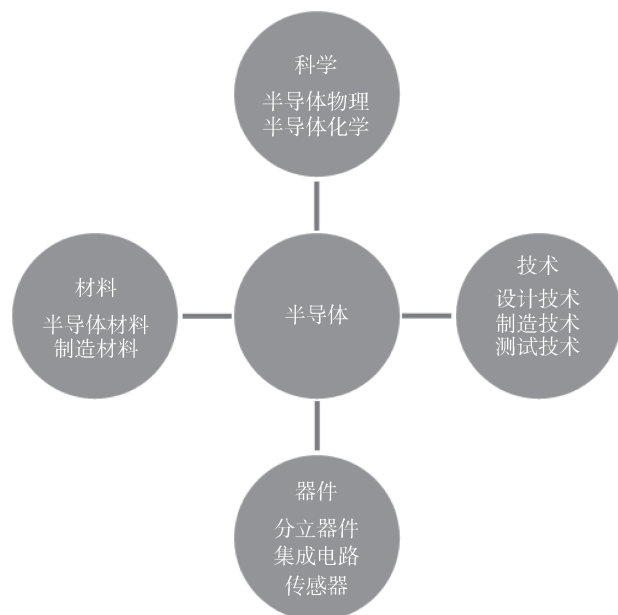


图4 半导体家族组成

如硅 (Si)、锗 (Ge); 二元化合物半导体, 如砷化镓 (GaAs)、铋化锑 (InSb); 三元化合物半导体, 如 GaAsAl、GaAsP; 固溶体半导体, 如 Ge-Si、GaAs-GaP; 玻璃半导体 (又称非晶态半导体), 如非晶硅、玻璃态氧化物半导体; 有机半导体, 如酞菁、酞菁铜、聚丙烯腈等。

还有一种分法如下: 第一代元素半导体材料 Si、Ge; 第二代化合物半导体材料 GaAs、GaP、InP; 第三代宽禁带 (BWS) 半导体材料 SiC 立方氮化硼 (C-

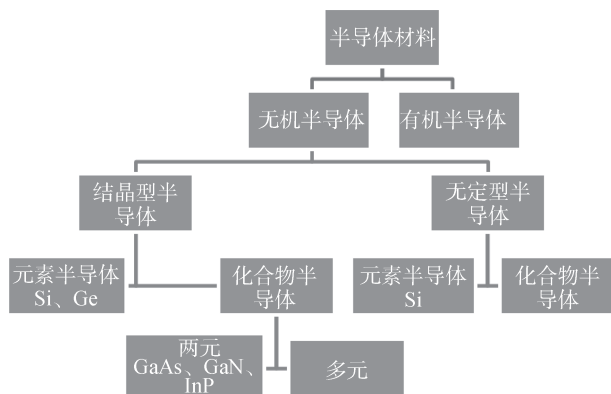


图5 半导体材料族谱^②

BN)、氮化镓 (GaN)、氮化铝 (AlN)、氧化锌 (ZnO)、硒化锌 (ZnSe)、金刚石薄膜等。

半导体材料的发展经过了由丑小鸭变成白天鹅的华丽蜕变的过程。

试想一下, 在人类发现电和使用电的早期, 为了有效地传输电力, 需要筛选优化各种导体材料, 与之相对应的防止传输和使用过程中电力泄漏、伤及人类, 又要寻找、筛选、优化各种绝缘材料。半导体尴尬地介于两类热门材料之间。1945 年物理学诺贝尔奖得主泡利 (W. Pauli) 在 1932 年写给他同事的一段文字: “半导体上不应该做任何工作, 这是一个烂摊子, 谁知道是否有半导体?” 早期只有一些甘于寂寞的科学家慢慢地研究这类材料的各种性质。

第一个半导体晶体管诞生开始改变半导体尴尬的社会地位。这种晶体管是用锗制造的。锗的化学符号是 Ge, 原子序数是 32, 原子量 72.64, 属于 IVA 族元素。熔点 937.4℃, 沸点 2830℃, 密度 5.35g/cm³, 硬度 6~6.5。锗是一种灰白色类金属, 有光泽, 质硬, 属于碳族, 有明显的非金属性质。锗化学性质稳定, 常温下不与空气或水蒸汽作用, 但在 600~700℃ 时, 能很快生成二氧化锗。

但是半导体材料家族中的顶梁柱是硅, 正是它改变了我们人类的生活方式, 缔造了半导体的辉煌。硅的化学符号是 Si, 原子序数是 14, 原子量 28.09, 属于 IVA 族元素。熔点 1420℃, 沸点 2900℃, 密度 2.328g/cm³, 硬度~6.5。硅已经成为电子信息时代的代名词, 人们将现在称为“硅时代”。“硅谷”也成为高科技开发区的代名词。

III - V族化合物半导体如砷化镓、磷化镓、铟化镓等也越来越受到人们的重视，特别是砷化镓具有能在高温高频下工作的优良特性，它还有更大的禁带宽度和电子迁移率，适合于制造微波体效应器件、高效红外发光二极管和半导体激光器。

随着半导体器件的发明、制造和广泛地使用，这只“丑小鸭”也得以华丽变身为美丽的“白天鹅”，半导体产业已成为国民经济的支柱产业。

3. 半导体科学

围绕着半导体材料的研究、器件的研发，伴随而来的是半导体科学的诞生，它包含半导体物理学、半导体化学等。

3.1 半导体物理学

半导体物理学脱胎于物理学中的热力学、统计物理、固体物理、量子力学等学科。

其主要内容有：半导体的晶格结构和电子状态，杂质和缺陷能级，载流子的统计分布，载流子的散射及电导问题，非平衡载流子的产生、复合及其运动规律，半导体的表面和界面，半导体异质结，半导体的光、热、磁、压阻等物理现象和非晶半导体等^③。

3.1.1 能带

固体能够导电是固体中的电子在外电场作用下做定向运动的结果。由于电场力对电子的加速作用，使电子的运动速度和能量都发生了变化。从能带论来看，电子的能量变化，就是电子从一个能级跃迁到另一个能级上去。对于满带，其中的能级已为电子所占满，在外电场作用下，满带中的电子并不形成电流，对导电没有贡献，通常原子中的内层电子都是占据满带中的能级，因而电子对电导没有贡献。对于被电子部分占满的能带，在外电场作用下，电子可以从外电场中吸收能量跃迁到未被电子占据的能级上，形成了电流，其导电作用，常称这种能带为导带。金属中，由于组成金属的原子中的价电子占据的能带是部分占满的，所以金属是良导体。绝缘体和半导体的能带类似，即下面是已被价电子占满的满带，亦称价带，中间为禁带，上面是空带。绝缘体、半导体和导体的能带如图

6所示。在热力学温度为零时，在外电场作用下，半导体和绝缘体都不导电。随着温度升高或光照作用，满带中有少量电子可能被激发到上面的空带中，使能带底部附近有了少量的电子，在外电场作用下，这些电子将参与导电；同时，满带中由于少了一些电子，在满带顶部附近出现了一些空的量子状态，满带变成了部分占满的能带，在外电场的作用下，仍留在满带中的电子也能够起导电作用，满带电子的这种导电作用等效于把这些空的量子状态看做带正电荷的准粒子的导电作用，常称这些空的量子状态为空穴。所以在半导体中，导带的电子和价带的空穴均参与导电，这是与金属导体的最大区别。绝缘体的禁带宽度很大，激发电子需要很大能量，在通常温度下，能激发到导带上的电子很少，所以导电性很差。电子和空穴合称为载流子，空穴概念的引入可以方便半导体中导电机理的研究。

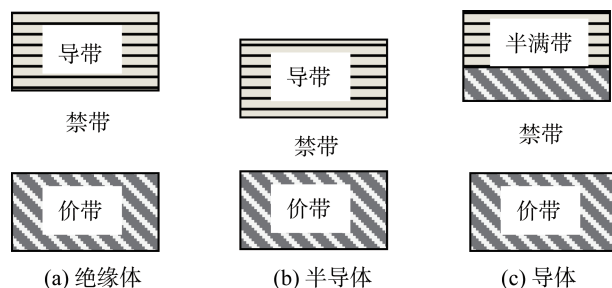


图6 绝缘体、半导体和导体的能带示意图

3.1.2 pn结

pn结是构造半导体器件的基本单元，二极管器件就是由一个pn结构成的。

在n型半导体中，电子很多而空穴很少；在p型中空穴很多而电子很少。但是，在n型中的电离施主与空穴的正电荷严格平衡电子电荷；而p型中的电离受主与少量电子的负电荷严格平衡空穴电荷。因此，单独的n型和p型半导体是电中性的。当这两种半导体结合形成pn结时，由于它们之间存在着载流子浓度梯度，导致了空穴从p区到n区、电子从n区到p区的扩散运动。对于p区，空穴离开后，留下了不可动的带负电荷电离受主，这些电离受主没有正电荷与之保持电中性。因此，在pn结附近p区一侧出现了一个负电荷区。同理，在pn结附近n区一侧出现了

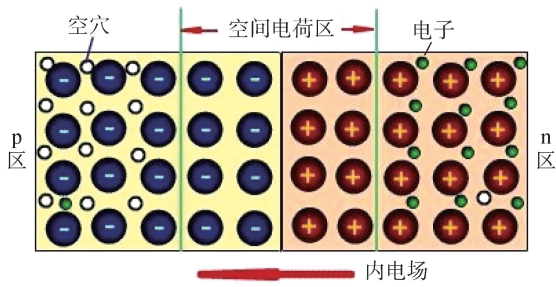


图7 平衡状态下的pn结

由电离施主构成的一个正电荷区，在pn结附近的这些电离施主和电离受主所带电荷称为空间电荷。它们所存在的区域称为空间电荷区，如图7所示。空间电荷区中的这些电荷产生了从n区指向p区的电场，称为内建电场。在内建电场作用下，载流子作漂移运动。电子和空穴的漂移运动方向和它们各自的扩散运动方向相反。随着扩散运动的进行，空间电荷逐渐增多，空间电荷区也逐渐扩展；同时，内建电场逐渐增强，载流子的漂移运动也逐渐加强。在无外加电压的情况下，载流子的扩散和漂移运动最终达到动态平衡。载流子的扩散电流和漂移电流的大小相等、方向相反而相互抵消。流过pn结的静电流为零。空间电荷区保持一定的宽度，其中存在一定的内建电场。称为热平衡状态下的pn结。空间电荷区两端的电势差称为接触电势差 V_D 。

$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (1)$$

其中， k_0 是玻尔兹曼常数， T 是温度， q 是电子电量， N_D 是施主杂质浓度， N_A 是受主杂质浓度， n_i 本质载流子浓度。

pn结具有单向导电型，又称为整流特性，其电流-电压特性曲线如图8所示。当p端接高电位，n端接低电位时，称为正向偏压，pn结导通；反之，称为负向偏压，pn结截止；当负向偏压大到一定值时，会出现负向电流突然增大的现象，称为pn结击穿，对应的电压称为击穿电压 V_{BR} 。

按机理划分共有三种pn结击穿：雪崩击穿、齐纳击穿和热电击穿。

雪崩击穿：当反向电压很大时，空间电荷区的电场很强，电子和空穴受强电场的漂移作用，具有很大的动能，它们与空间电荷区内的晶格原子发生碰撞时，

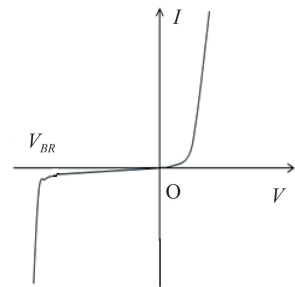


图8 pn结的特性曲线

能把价键上的电子碰撞出来，成为导电电子，同时产生一个空穴。产生的电子和空穴，又能碰撞产生电子和空穴，这种繁殖载流子的方式称为载流子的倍增效应。由于倍增效应，使空间电荷区单位时间内产生大量的载流子，迅速增大了反向电流，从而发生pn结的击穿。

齐纳击穿：也称为隧道击穿，在强电场作用下，由隧道效应，使大量电子从价带穿过禁带而进入导带所引起的一种击穿。

pn结具有电容特性，pn结电容包括势垒电容和扩散电容两部分，如图9所示。

势垒电容 C_B ：是由空间电荷区的离子薄层形成

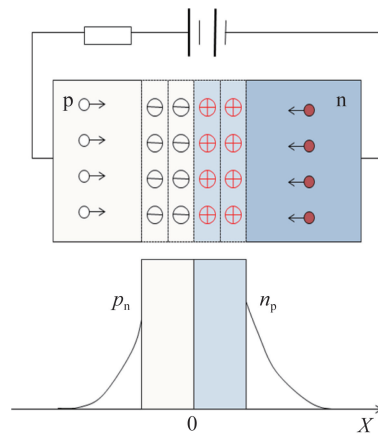


图9 pn结电容示意图

的。当外加电压使pn结上压降发生变化时，离子薄层的厚度也相应地随之改变，这相当于pn结中存储的电荷量也随之变化，犹如电容的充放电。

扩散电容 C_D ：是由多子扩散后，在pn结的另一侧面积累而形成的。当外加正向电压不同时，扩散电流的大小也就不同。所以pn结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不同，这就相当电容的充放电过程。

势垒电容和扩散电容均是非线性电容。pn结在反

偏时主要考虑势垒电容。pn 结在正偏时主要考虑扩散电容。

3.1.3 金属和半导体接触

金属和半导体接触，主要有两种形式：整流接触和欧姆接触。

金属和半导体整流接触，其电流 - 电压特性类似于 pn 结的单向导电性，但是二者又有区别。利用该特性制成的二极管称为肖特基二极管。

欧姆接触是指不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子发生显著的改变。半导体器件大多是利用这种接触作为输入和输出电极的连接。

3.1.4 金属 - 绝缘体 - 半导体结构

理想的金属 - 绝缘体 - 半导体 (MIS) 结构：金属于半导体的功函数差为零；绝缘层中无电荷且绝缘层完全不导电；绝缘层与半导体界面处不存在任何界面态。

MIS 结构电容：在金属与半导体间加电压后，金属和半导体相对的两个面上被充电，符号相反；在金属与半导体间加电压后，金属和半导体相对的两个面上被充电，符号相反；半导体中，电荷分布在一定厚度的表面层内（空间电荷区）。

MIS 结构电容 C 相当于绝缘层电容 C_0 和半导体空间电荷层电容 C_s 的串联，即

$$C = \frac{C_0 C_s}{C_0 + C_s} \quad (2)$$

其等效电路如图 10 所示。对于 p 型衬底的 MIS 结构的 C-V 特性曲线如图 11 所示。可以看出对于不同的偏置和测试频率， C_s 是一个可变的电容。

p 型半导体表面空间电荷层的四种基本状态：

- ①多子堆积 ($V_G < 0$ $V_s < 0$ 对应 AB 端)；
- ②平带 ($V_G = 0$ 对应 C 点)；
- ③多子耗尽 ($V_G > 0$ 对应 CD 端)；
- ④反型

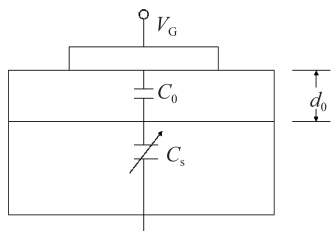


图 10 MIS 结构的等效电路

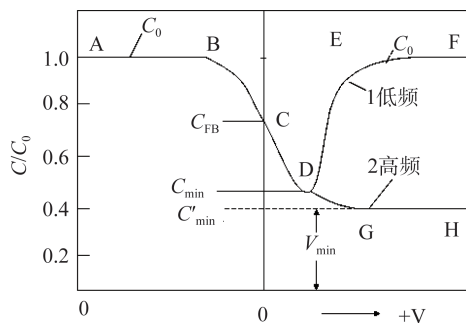


图 11 MIS 结构的电容 - 电压曲线 (p 型衬底)

少子堆积 ($V_G \gg 0$, 对应 EF 端)。

DG 端是由于信号频率较高时反型层中电子的产生与复合跟不上高频信号的变化，即反型层中电子的数量不能随着高频信号而变，反型层中的电子对电容没有贡献，这时空间电荷区的电容仍由耗尽层的电荷变化决定。由于强反型时耗尽层宽度达到最大值 x_{dm} ，不随偏压 V_G 变化，耗尽区贡献的电容将达到极小值并保持不变， C/C_0 也将保持最小值， C_{min}/C_0 并不随 V_G 而变，对应图 11 中的 GH 端。

同样可得出 n 型半导体表面空间电荷层对应的状态，其 MIS 结构的电容 - 电压曲线如图 12 所示。

实际的 MIS 结构的 C-V 特性：①功函数差的影响；②表面态的影响；③绝缘层中离子的影响。

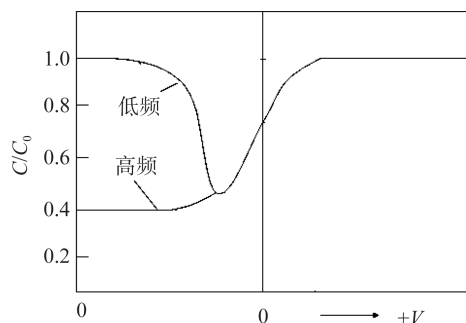


图 12 n 型半导体 MIS 结构的电容 - 电压特性

MIS 结构的一个特例是 MOS 结构，即其绝缘材料是二氧化硅。几十年来，MOS 结构在集成电路领域起着重要的作用。集成电路的基石 CMOS 器件就是基于此。硅 - 二氧化硅 (SiO_2) 存在多种形式的电荷或能量状态：一般可归纳为① SiO_2 中的可动离子；② SiO_2 中的固定电荷；③位于 Si-SiO_2 中界面处禁带中的界面态；④由 X 射线、 γ 射线、电子射线等在 SiO_2 中的电离陷阱电荷。

3.1.5 半导体的各种性质

半导体的光、热、磁、力等各种特性使其在光敏电阻、激光、照明、图像显示、图像传感、制冷、热敏、存储、压力传感等各个方面，犹如孙悟空的 72 变，可以在各个领域大显身手。

3.1.5.1 半导体的光学性质

光子可与半导体晶体中的电子、原子相互作用，能被吸收、产生光电导和发光。光在导电媒质中传播时具有衰减现象，即产生光的吸收。半导体材料能强烈地吸收光能，具有数量级为 10^5cm^{-1} 的吸收系数。材料吸收辐射能导致电子从低能级跃迁到较高的能级。价电子跃迁是最重要的吸收过程。

(1) 光吸收

理想半导体在绝对零度时，价带完全被电子占满，只有吸收足够能量的光子使电子激发，越过禁带跃迁入空的导带，而在价带中留下一个空穴，形成电子-空穴对。这种由于电子由带带之间的跃迁所吸收的过程为本征吸收。要发生本征吸收，光子能量必须等于或大于禁带宽度 E_g ，即

$$h\nu \geq h\nu_0 = E_g \quad (3)$$

$h\nu_0$ 是能够引起本征吸收的最低限度光子能量。

在光照下，电子吸收光子的跃迁过程，除了能量必须守恒外，还必须满足动量守恒，即满足选择定则。设电子原来的波矢量是 k ，要跃迁到波矢量是 k' 的状态。对于能带中的电子，具有类似动量的性质，因此在跃迁过程中， k 和 k' 必须满足如下条件：

$$hk' - hk = \text{光子动量} \quad (4)$$

电子在跃迁过程中， $hk' = hk$ ，为直接跃迁；

非直接跃迁过程是电子、光子和声子同时参与的过程，能量关系是：

$$h\nu_0 \pm E_p = \Delta E \quad (5)$$

其中 ΔE 是电子能量差， E_p 是声子能量，“+”表示吸收声子，“-”表示发射声子。在非直接跃迁过程中，伴随着发射或吸收适当声子，电子的波矢量 k 可以改变，这种除了吸收光子外还与晶格交换能量的非直接跃迁，也称为间接跃迁。

(2) 光电导

光吸收可以使半导体中形成非平衡载流子，而载流子增大必须使电导率增大，这种由光照引起的半导

体电导率增加的现象称为光电导。本征吸收的光电导称为本征光电导。

半导体的电导率为：

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (6)$$

其中 q 是电子电量， n 、 p 是平衡载流子浓度， μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率。无光照时，

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (7)$$

其中 n_0 、 p_0 是平衡载流子浓度。

在光照时， $n = n_0 + \Delta n$ ， $p = p_0 + \Delta p$

附加光电导率，简称光电导为：

$$\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (8)$$

(3) 半导体发光

半导体中的电子可以吸收一定的能量的光子而被激发，处于激发态的电子也可以向较低的能级跃迁，以光辐射的形式释放出能量，这就是半导体的发光现象。产生光子发射的主要条件是系统必须处于非平衡状态，即在半导体中需要有某种激发过程存在，通过非平衡载流子的复合，才能形成发光。激发方式不同，可以有电子发光、光致发光和阴极发光等。

半导体发光理论和技术已广泛应用于半导体激光器、半导体照明、图像显示等领域。使我们生活更加便利、更加绚丽多彩。

3.1.5.2 半导体的热电性质

图 13 所示，一块细长的 p 型半导体，两端与金属以欧姆接触相接，一端温度为 T_0 ，另一端温度为 $T_0 + \Delta T$ ，在半导体内部形成均匀的温度梯度，低温端附近载流子浓度比高温端附近低，空穴便从高温端向低温端扩散，在低温端就积累了空穴，样品两端形成空间电荷，半导体内部形成电场，方向自低温端指向高温端。在电场作用下使空穴沿电场方向漂移，当空穴的漂移与扩散运动相对平衡时达到稳定状态，这时在半导体内部具有一定的电场，两端形成一定的电势差。这一电势差就是由于温度梯度引起的温差电动势 Θ_s 。当电流流过有温度梯度的半导体时，半导体中除了产生焦耳热以外，还要吸收或放出热量。

当两种不同的半导体或者半导体与金属相接触通一电流时，接触处除产生焦耳热以外，还要吸热或放热，称为珀耳帖效应，而且这个效应是可逆的。图 14 是珀耳帖效应示意图。

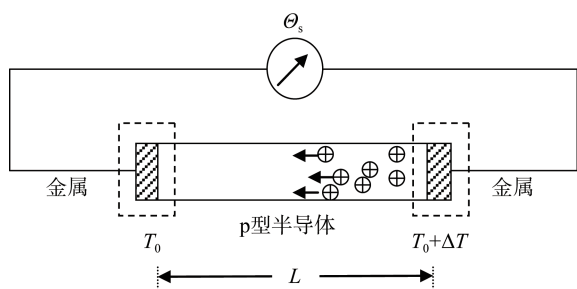


图 13 半导体温差电动势示意图

利用温差电现象，除了能将热能转变为电能外，还可以用外电源产生电流，通过珀耳帖效应制造制冷器，使得一个接头不断吸热而产生低温。

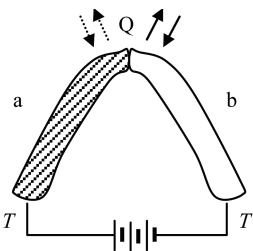


图 14 珀耳帖效应

3.1.5.3 半导体的磁和压阻性质

半导体在磁场中发生的效应包括：半导体在电场和磁场中表现出来的霍尔效应、磁阻效应、以及光照或存在温度梯度时所表现出来的磁光效应、光磁效应、热磁效应等。由于篇幅所限，这里仅介绍最常用到的霍尔效应和磁阻效应。

把通有电流的半导体放在均匀磁场中，设电场沿 x 方向，电场强度为 E_x ；磁场方向和电场垂直，沿 z 方向，磁感应强度为 B_z ，则在垂直于电场和磁场的 $+y$ 或 $-y$ 方向将产生一个横向电场 E_y ，这个现象称为霍尔效应。霍尔电场 E_y 与电流密度 J_x 和磁感应强度成 B_z 成正比，即

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (9)$$

其中比例系数 R_H 称为霍尔系数。

在与电流垂直方向加磁场后，沿外加电场方向的电流密度有所降低，即由于磁场存在，半导体的电阻增大，这个现象称为磁阻效应。磁阻效应分为物理磁阻效应和几何磁阻效应两种。

利用磁阻效应制作的半导体磁敏电阻，已得到广泛应用。

对半导体施加应力时，半导体的电阻率要发生改变，这种现象称为压阻效应。利用半导体压阻效应已

经制成半导体应变计、压敏二极管、压敏晶体管等各种器件，并得到了广泛的应用。

3.2 半导体化学^④

半导体化学是研究半导体材料的制备、分析以及半导体器件和集成电路生产工艺中的特殊化学问题的化学分支学科。

半导体化学是在 1948 年发明晶体管之后逐渐形成的，是一门交叉学科，涉及到无机化学、有机化学、分析化学、物理化学、高分子化学、晶体化学、配位化学和放射化学等许多领域的理论和内容。半导体化学的研究对象主要是高纯物质，在半导体技术中，随着半导体朝高频、大功率、高集成化方向发展，对半导体材料以及在制作半导体器件、集成电路过程中所用的各种试剂的纯度，提出了越来越高的要求，有害杂质含量不超过 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ ，有的甚至要求杂质含量 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 。

半导体化学的内容可以概括为：①硅、锗、砷化镓等半导体材料的物理化学性质及其提纯精制的化学原理，完整单晶体的制取、完整单晶层的生长以及微量杂质有控制地掺入方法；②半导体器件和集成电路制造技术如清洗、氧化、外延、制版、光刻、腐蚀、扩散等主要工艺过程及化学反应原理；③半导体器件及集成电路制造工艺中所用掺杂材料、化学试剂、高纯气体、高纯水的化学性质、制备原理及纯度标准；④超纯物质分析及结构鉴定方法，如质谱分析、放射化分析、红外光谱分析等。

20 世纪 50 年代，半导体器件的生产主要采用锗单晶材料，到了 60 年代，由于硅单晶材料的性能远远超过锗，因而半导体硅得到了广泛的应用，在半导体材料中硅已经占据主导地位。大规模集成电路的制造都是以硅单晶材料为主的。随着大规模集成电路制造工艺水平的提高，半导体化学的研究领域和对象也将不断地扩展。

①陈永芳“半导体的早期发展史”物理双月刊(二十卷二期), 1988 年 4 月, pp225-229

②《半导体材料》杨树人, 王宗昌, 王兢编著, 科学出版社, 2004.3

③《半导体物理学》刘思科, 朱秉升, 罗晋生等编著, 电子工业出版社, 2003.8

④百度百科