

906 半导体物理学

第一章重点

1、金刚石型结构（共价键）：硅、锗

金刚石型结构的结晶学晶胞可以看作是两个面心立方晶胞沿立方体的空间对角线互相位移了四分之一的空间对角线长度套构而成。沿晶胞的[111]方向看，就是正四面体结构：每个原子和周围四个原子组成以 sp^3 杂化轨道形成且夹角皆为 $109^\circ 28'$ 的共价键 $\sqrt{}$ 。

闪锌矿型结构（混合键）：III（镓铟）-V（磷砷）族化合物如砷化镓、磷化镓、磷化铟等

闪锌矿型结构的结晶学晶胞可以看作是两类原子各自组成的面心立方晶胞沿立方体的空间对角线互相位移了四分之一的空间对角线长度套构而成。沿晶胞的[111]方向看，就是正四面体结构：每个原子被四个异族原子包围，每个原子和周围四个原子组成以 sp^3 杂化轨道形成的共价键，但这种结合的性质具有不同程度的离子性，又称这类半导体为极性半导体。在共价结合占优时，这种化合物倾向于构成闪锌矿型结构。在离子性结合占优时，这种化合物倾向于构成纤锌矿型结构。

III（镓铟）-V（磷砷）族化合物半导体能带结构的异同：

- A. 价带极大值稍许偏离布里渊区的中心，价带在布里渊区中心是简并的，具有一个重空穴带，一个轻空穴带和由自旋-轨道耦合而分裂出来的第三个能带，且重空穴有效质量相差不大
- B. 各种化合物导带结构不同，他们在[100]、[111]方向和布里渊区中心都有导带极小值，但最低的极小值在布里渊区中所处的位置不完全相同：在平均原子序数较低的化合物中，最低的极小值在[100]或[111]方向；在平均原子序数高的化合物中，最低的极小值在布里渊区的中心，且导带电子有效质量较小，禁带宽度窄。

纤锌矿型结构（混合键）的II-VI族化合物如硫化锌、硫化镉、硒化锌、硒化镉等

由一系列II和VI族原子层构成的双原子层沿[001]方向堆积起来，II-VI原子具有离子性，故倾向于构成纤锌矿型结构。

2、内外壳层电子共有化运动的差异：内壳层的电子原来处于低能级，共有化运动很弱，其能级分裂小，能带窄，外壳层电子原来处于高能级，特别是价电子，共有化运动很显著，如同自由运动的电子，常称为“准自由电子”，其能级分裂很厉害，能带很宽。

3、晶体中的电子运动：单电子近似认为，晶体中的某一个电子是在周期性排列且固定不动的原子核势场，以及其他大量电子的平均势场中运动，且这个势场也是周期性变化的，且它的周期与晶格的周期相同。

孤立原子中的电子：在该原子的核和其他电子的势场中运动。

自由运动的电子：在一恒定为零的势场中运动。晶格中的电子与自由电子的运动相似。

4、讨论半导体中电子有效质量的物理意义和性质。

- a. 有效质量表示能带中的电子受外电场力时，外电场力与电子加速度的比例系数，由于它概括了半导体内部势场对能带电子的作用，使得在解决半导体中的电子在外力作用下的运动规律时，可以不涉及半导体内部势场的作用。
- b. 由于晶体的各向异性，反映出有效质量的各向异性，在 k 空间的三主轴上，有效质量 m_x^* ， m_y^* ， m_z^* 一般情况下是不等的。
- c. 在能带底附近，电子的有效质量是正的，在能带顶附近，电子的有效质量是负的；在 $E \sim k$ 关系的拐点，电子的有效质量趋于无穷大，说明此状态的电子从外场中获得的能量全部释放给晶格，电子不受外电场的影响。
- d. 内层电子形成的能带窄， $E \sim k$ 曲线的曲率小，有效质量大；外层电子的能带宽，有效质量小，其共有化运动强，在外力作用下可获得更大的加速度。

5、为什么可以认为空穴带有正电荷？

半导体是由大量带正电的原子核和带负电的电子组成，这些正负电荷数量相等，整个半导体是电中性的，而且价键完整的原子附近也呈电中性。但是空状态所在处，由于失去了一个价键上的电子，因而破坏了局部的电中性，出现了一个未被抵消的正电荷，这个正电荷为空状态所具有，所以说空穴带正电。

6、描述空穴的特征。

答：空穴是几乎被电子充满的能带中未被电子占据的少数空量子态，相当于具有一个正电荷和正的有效质量的一种准粒子。引进空穴概念后，可以把价带中大量电子对电流的贡献用少量的空穴表达出来，即价带上的空穴参与导电，是本征半导体的导电机构。它具有的特征有：空穴数等于价带中空状态数、具有正电荷和正的有效质量、空穴的波矢等于原状态内电子波矢的负值、空穴的能量等于原状态内电子能量的负值。

7、为什么在硅的回旋共振实验中沿不同的方向可以观察到不同的吸收峰？为什么沿[100]方向可以观察到两个吸收峰？

答：半导体中的电子在恒定磁场中受洛伦兹力作用，将做回旋运动，此时在半导体上再加上交变磁场，当交变磁场的角频率等于电子的回旋频率时，发生强烈的共振吸收现象，称为回旋共振。回旋共振实验的目的是为了测出载流子有效质量，了解能带结构。

硅导带极值附近等能面是长轴沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的旋转椭球面，所以电子有效质量是各向异性。对于某个方向的旋转椭球面而言，在 k 空间的三主轴上，有效质量 m_x^* ， m_y^* ， m_z^* 一般情况下是不等的。在简约布里渊区共有六个这样的椭球。在发生强烈的共振吸收现象时，载流子有效质量的大小不仅与 k 空间三主轴上的电子有效质量 m_x^* ， m_y^* ， m_z^* 有关，还和外加交变磁场的磁感应强度与 k 空间三个坐标轴 k_x 、 k_y 、 k_z 的夹角余弦有关。所以当磁感应强度沿不同方向时，与 k 空间的三个主轴的夹角余弦也不同，载流子有效质量的大小也不同，即沿不同的方向可以观察到不同的吸收峰。当磁感应强度沿[100]方向时，与 k 空间的 $\langle 100 \rangle$ 方向夹角形成两个余弦值，所以能测到两个不同的载流子有效质量值，因而可以观察到两个吸收峰。

8、分析硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）半导体能带结构（导、价）的特点

硅：a. 属于间接带隙半导体，室温下，禁带宽度为 1.12eV，且随着温度的增加，禁带宽度逐渐减小。

b. 价带极大值位于波矢 $k=0$ ，即布里渊区的中心，考虑自旋情况，价带是六度简并的。

c. 导带极小值位于 k 空间 $\langle 100 \rangle$ 方向的布里渊区中心到布里渊区边界的 0.85 倍处。导带极值附近等能面是长轴沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的旋转椭球面，在简约布里渊区共有六个这样的椭球。

锗：a. 属于间接带隙半导体，室温下，禁带宽度为 0.67eV，且随着温度的增加，禁带宽度逐渐减小。

b. 价带极大值位于波矢 $k=0$ ，即布里渊区的中心，考虑自旋情况，价带是六度简并的。

c. 导带极小值位于 k 空间 $\langle 111 \rangle$ 方向的简约布里渊区的边界上。导带极值附近等能面是长轴沿 $\langle 111 \rangle$ 方向的旋转椭球面，每个椭球面有半个在布里渊区内，所以在简约布里渊区有四个这样的椭球。

砷化镓：a. 属于直接带隙半导体，室温下，禁带宽度为 1.43eV，且随着温度的增加，禁带宽度逐渐减小。

b. 价带极大值稍许偏离布里渊区的中心，价带在布里渊区中心是简并的，具有一个重空穴带，一个轻空穴带和由自旋-轨道耦合而分裂出来的第三个能带。

c. 导带极小值位于布里渊区中心。导带极值附近的等能面是球形等能面，在简约布里渊区只有一个。在 $\langle 111 \rangle$ 方向布里渊区边界还有一个次低能谷，比最低能谷高出 0.29eV，在简约布里渊区中，共有八个这样次低极值点。

9、砷化镓导带最低能谷中电子有效质量 m_{n1}^* 和次低能谷中有效质量 m_{n2}^* 哪个大，该性质有何应用？

答：N 型砷化镓的能带结构中，导带有两个能谷分别是：位于布里渊区中心的最低能谷 1 和在 $\langle 111 \rangle$ 方向布里渊区边界处比最低能谷极值高出 0.29eV 的次低能谷 2，能谷 2 的曲率比能谷 1 小，所以能谷 2 的电子有效质量较大，迁移率较小。

把砷化镓材料置于外电场中时，能谷 1 中的电子从电场中吸收足够的能量跃迁到能谷 2 中发生能谷间散射。（进入能谷 2 中的电子，有效质量增加，迁移率降低，平均漂移速度减小，电导率（ $nq\mu$ ）下降，产生负阻效应与负微分电导，其意义是随着电场强度增大而电流密度减小。）导致其总电导率随电场的增加时而增加，时而减小，从而体内形成了高频电流振荡的现象。

应用：耿氏器件：利用耿氏效应制作的一种能产生微波振荡的负阻器件。

10、宽禁带半导体的特征：

禁带宽度大于等于 2.3eV 的半导体称为宽禁带半导体，如 SiC、GaN 等这类材料具有禁带宽度大、热导率高、电子漂移饱和速度高、介电常数低等特性，可制作为高频、高功率、高温、抗辐射、和高密度集成的电子器件。

第二章重点

1、实际半导体材料晶格存在偏离理想情况的复杂现象：

原子在具有严格周期性晶格格点的平衡位置附近振动；半导体材料中含有若干杂质；半导体晶格结构存在着各种形式的缺陷，如点缺陷：空位、间隙原子。线缺陷：位错。面缺陷：晶界；杂质和缺陷的存在，使得严格按周期性排列的原子所产生的周期性势场受到破坏，在禁带中引入相应的能级。

2、现有两块外观完全相同的硅单晶，其中一块是高纯度的本征硅，另一块是含有杂质并完全补偿的硅，举出一种能识别它们的实验方法，并说明实验原理。

答：半导体光吸收法：在室温下，先用波长为 $2\mu\text{m}$ 的红外光分别照射两块外观完全相同的硅单晶，然后用欧姆表分别测它们的电阻，电阻小的那块晶体就是含有杂质并完全补偿的硅。大的就是高纯度的本征硅。

在室温下，本征硅的禁带宽度是 1.12eV ，本征吸收长波限为 $1.1\mu\text{m}$ ，电子要发生本征跃迁，必须吸收大于等于 1.12eV 的光子能量，相当多的价带电子才会跃迁到导带，导电性增强。含有杂质并完全补偿的硅只要受到波长大于 $1.1\mu\text{m}$ 的光去照射晶体，就可以使杂质能级上的电子跃迁到导带，使载流子浓度增大，导电性增强，所以用波长为 $2\mu\text{m}$ 的光可以增大杂质硅的导电性，但不会增强本征硅的导电性。

3、以硅中掺磷、硼为例，讨论 V、III 族杂质的作用。

V、III 族杂质在硅、锗中重视替位式杂质，一个磷原子占据了硅原子的位置，磷原子有五个价电子，其中四个价电子与周围的四个硅原子形成共价键，形成一个正电中心磷离子和一个多余价电子。当这个束缚在正电中心磷离子附近的多余价电子吸收了杂质电离能后，就成为了可以在晶格中自由运动的导电电子，在外加电压作用下，产生电流。

一个硼原子占据了硅原子的位置，硼原子有三个价电子，当它和周围的四个硅原子形成共价键时，它必须从别处的硅原子中夺取一个价电子，于是在硅晶体的共价键中产生了一个空穴和一个负电中心硼离子。当这个束缚在负电中心硼离子附近的空穴吸收了杂质电离能后，就成为了可以在晶格共价键中自由运动的导电空穴，在外压作用下，共价键上的电子在价键间运动产生电流。

4、半导体中，浅能级杂质和深能级杂质的作用有何不同？

答：如果施、受主能级分别离导带底和价带顶很近，杂质电离能很小，在常温下杂质基本全部电离，使导、价带分别增加电子和空穴，这些能级称为浅能级，相应的杂质称为浅能级杂质。这类杂质在半导体中的作用是：（1）改变导电类型：轻掺杂施主杂质的半导体主要靠导带电子导电，轻掺杂受主杂质的半导体主要靠价带空穴导电；（2）控制导电能力：通过控制掺杂浓度，来控制载流子浓度，从而控制半导体的导电能力。

如果施、受主能级分别离导带底和价带顶很远，杂质电离能大，不容易电离，这些能级称为深能级，相应的杂质称为深能级杂质。这类杂质在半导体中可产生多重电离，并引入多个能级。这类杂质在半导体中的作用是：对浅能级杂质进行补偿、对非平衡载流子起复合中心的作用（从而降低非平衡载流子的寿命）。对载流子浓度和导电类型的影响没有浅能级杂质显著。但是半导体掺入过量深能级杂质，杂质电离后成为带电中心，对载流子起散射作用，使载流子迁移率减小，电阻率升高，电导率下降，导电性能下降，这样的半导体材料性能差，不能用于制造器件。

5、举例说明哪些杂质在硅中形成深能级，在半导体材料中引入深能级对材料特性有什么影响？

答：如果施、受主能级分别离导带底和价带顶很远，杂质电离能大，不容易电离，这些能级称为深能级，相应的杂质称为深能级杂质。这类杂质在半导体中可产生多重电离，并引入多个能级。这类杂质有金、银、铜等非 III、V 族杂质。这类杂质在半导体中的作用是：对浅能级杂质进行补偿、对非平衡载流子起复合中心的作用。

（1）在半导体掺入适量深能级杂质，可以适当降低非平衡载流子的寿命，这样的半导体材料可

以用来制造高频器件。如硅中掺适量金可以用来制造高频器件，而不影响材料电阻率等电学性能。

(2) 半导体掺入过量深能级杂质，杂质电离后成为带电中心，对载流子起散射作用，使载流子迁移率减小，电阻率升高，电导率下降，导电性能下降，这样的半导体材料电学性能差，不能用于制造器件。

6、分析金在硅中形成的深能级情况，并说明掺金对载流子寿命的影响，或说掺金为什么可以改变硅中非平衡载流子的寿命？

答：如果施、受主能级分别离导带底和价带顶很远，杂质电离能大，不容易电离，这些能级称为深能级，相应的杂质称为深能级杂质。深能级杂质对非平衡载流子起复合中心的作用。

金在半导体硅中是一种双性替位式杂质，从而在硅中引入双重深能级。在 n 型硅中，由于杂质的补偿作用，硅中的金原子接受来自浅施主能级上的电子，形成负电中心 Au^- ，起受主作用，形成受主深能级。在 p 型硅中，由于杂质的补偿作用，硅中的金原子上的电子跃迁到浅受主能级上，自身成为正电中心 Au^+ ，起施主作用，形成施主深能级。

在 n 型硅中，金负离子 Au^- 对少数载流子空穴起到俘获的作用，从而缩短了少数载流子空穴的寿命。在 p 型硅中，金正离子 Au^+ 对少数载流子电子起到俘获的作用，从而缩短了少数载流子电子的寿命。从复合角度说，无论在 n 型硅或在 p 型硅中，金都是有效的复合中心，电子和空穴可以通过复合中心能级进行间接复合，从而缩短了少数载流子电子的寿命。

7、定性分析金在锗中形成的深能级情况。

答：金是 I 族元素，在锗中是替位式杂质，中性金原子只有一个价电子，且电离能大。杂质金原子电离后，价电子进入导带而成为带一个电子电荷的金正电中心，禁带中出现靠近价带顶的施主深能级。

中性金原子还可以接受周围四个锗原子的价带电子。中性金原子可分别接受一、二、三个价带电子，成为带一个、两个、三个电子电荷的负电中心，在禁带中引入三种受主深能级。由于电子间的库伦排斥作用，金从价带接受第二个电子所需要的电离能比接受第一个电子时的大，接受第三个电子时的电离能又比接受第二个电子时的大，所以接受三个电子的受主深能级离价带顶最远，其次是接受两个电子，接受一个电子的受主深能级离价带顶相对近些，但还是比浅能级深得多。

8、以硅在砷化镓中的掺杂为例，分析 IV 族杂质在 III-V 族半导体中的双性行为。

答：IV 族元素有碳、硅、锗、锡、铅，若取代 III 族原子则起施主杂质作用，若取代 V 族原子则起受主杂质作用。往砷化镓中掺杂硅，硅取代镓原子。当硅杂质电离后，每一个硅向导带提供一个导电电子，导带中的电子浓度随着硅杂质浓度的增加而增加。

当硅杂质浓度达到一定程度后，硅原子不仅取代镓原子起施主杂质作用，还取代了砷原子受主杂质作用，因而对于取代 III 族原子镓的硅施主杂质起到补偿作用，从而降低了有效施主杂质浓度，使导带电子浓度趋于饱和。

硅在砷化镓中既能取代镓表现为施主杂质，又能取代砷表现为受主杂质，这种性质称为杂质的双性行为。

9、为什么说在施主杂质和受主杂质同时存在的半导体中，材料的载流子浓度由两种杂质浓度之差决定，材料的迁移率由两种浓度之和决定？

答：（杂质原子电离时，能够释放电子而产生导电电子并形成不可移动的正电中心，这种杂质称为施主杂质。杂质原子电离时，能够接受电子而产生导电空穴并形成不可移动的负电中心，这种杂质称为受主杂质。）当半导体中同时存在施、受主杂质时，在半导体的禁带中将会引入相应的施主能级和受主能级。在半导体中同时存在施、受主能级时，因为施主能级上的电子能量高于受主能级，所以电子首先跃迁到受主能级上，从而使它们提供载流子的能力抵消，即发生杂质补偿作用。当两种杂质浓度不等时，经过补偿作用后，两种杂质浓度之差就是半导体的净杂质浓度，它是向导带或价带提供载流子的有效杂质浓度。所以材料的载流子浓度由两种杂质浓度之差决定。

迁移率是指单位场强下载流子的平均漂移速度。迁移率大小主要受杂质浓度和温度的影响。（1）当杂质浓度较低时，晶格振动散射起主要作用，电离杂质散射起次要作用，（载流子的迁移率随温度的增加而降低。）（2）当温度较低，杂质浓度较高情况下，电离杂质散射起主要作用，（晶格振动散射起次要作用，载流子的迁移率主要受电离杂质的影响）。

无论以上哪种情况，电离杂质散射的强弱都和两种杂质浓度总量有关。由于杂质的补偿作用，施、受主电离后留下的正、负离子都对载流子起到散射作用，从而降低载流子的迁移率。所以可以认为：两种杂质浓度之和决定着两种杂质电离后正、负离子的总数，从而影响着载流子受到电离杂质散射的强弱，最终决定材料的迁移率。

10、点缺陷（空位和间隙原子）的表现

当半导体硅、锗存在空位时，由于空位最邻近有四个原子，每个原子各有一个不成对的电子，成为倾向于接受电子的不饱和共价键，因此空位表现为受主作用。而每个间隙原子有四个可以失去的未成共价键的电子，表现出施主的作用。

除了热振动因素形成空位和间隙原子外，成分偏离正常的化学比也会形成点缺陷，从而影响甚至改变材料的导电类型（光、电注入和掺杂也会影响哦！！）。如在硫分压大的气氛中处理硫（+6）化铅（+4），（硫多了，需要从别处取电子给硫配成共价键，）则可伴随产生铅空位而获得p型硫化铅。在铅分压大的气氛中处理硫（+6）化铅（+4），则可伴随产生硫空位而获得n型硫化铅。

11、线缺陷（位错）的表现

以锗为例来说明，在位错所在处，锗原子E只与周围三个原子形成共价键，还有一个不成对的电子成为不饱和的共价键，这是锗原子E是电中性。当这一不饱和键俘获一个电子后，原子E多一个电子成为负电中心，起了受主作用。当这不饱和键失去电子后，原子E少了个电子成为正电中心，起了施主作用。所以锗中位错相当于一串受主或施主。

第三章重点

1、费米能级的物理意义是什么？为什么说费米能级标志着电子填充能级的水平？

答：费米能级不一定是系统中的一个真正的能级，它是费米分布函数中的一个参量，具有能量的单位，它标志着电子填充能级的水平，其大小等于系统中增加或减少一个电子所引起系统自由能的变化，所以被称为费米能级。

物理意义：它和温度、半导体材料的导电类型、杂质的含量、以及能量零点的选取有关。1、将半导体中大量电子的集体看成一个热力学系统，费米能级就是系统的化学势，对处于热平衡状态的电子系统有统一的费米能级。2、在热力学温度为零度时，费米能级可看成量子态是否被电子占据的一个界限。3、费米能级的位置比较直观地标志了电子占据量子态的状况，通常说它标志着电子填充能级的水平。费米能级越高，说明有较多的能量较高的量子态上有电子。

原因：当系统在热力学温度零度时，能量小于费米能级的量子态被电子占据的概率是 100%，这些量子态上都是有电子的；能量大于费米能级的量子态被电子占据的概率是 0，这些量子态上都是没有电子。所以在热力学温度为零度时，费米能级可看成量子态是否被电子占据的一个界限。当系统温度高于热力学温度零度但不是特别高时，一般可以认为，能量小于费米能级的量子态基本上被电子占据，能量大于费米能级的量子态基本上没有被电子占据，而电子占据费米能级的概率在各种温度下总是 1/2。综上所述，费米能级的位置比较直观地标志了电子占据量子态的状况，所以通常说费米能级标志着电子填充能级的水平。

2、为什么半导体器件有极限工作温度？硅、锗、砷化镓器件哪个具有更高的极限工作温度？为什么？

答：在一定温度范围内，半导体器件中本征载流子浓度没有超过杂质电离所提供的载流子浓度，如果杂质全部电离，载流子浓度几乎是不变的，那么器件就能稳定工作。但是随着温度的升高，不仅半导体的禁带宽度变小，而且有更多的电子能够从价带热激发到导带产生电子空穴对，导致本征载流子浓度迅速增大，本征激发占主要地位，使得器件不能稳定工作。因此每一种半导体材料制成的器件都有一定的极限工作温度，超过这一温度后，器件就失效了。很明显，禁带宽度越大，本征激发占主要地位所需要的温度也越高，即极限工作温度越高。常温下，硅、锗、砷化镓的禁带宽度分别为 1.14eV、0.67eV、1.43eV，所以砷化镓具有更高的极限工作温度。

3、为什么说在杂质半导体中，费米能级的位置不但反映了半导体的导电类型，而且还反映了半导体的掺杂水平？

以 n 型半导体为例来说明这个问题，在低温弱电离区时，导带中的电子是从施主杂质电离产生的；随着温度的升高，导带中电子浓度也增加，而费米能级则从施主能级以上往下降到施主能级以下；当 E_f 下降到 E_0 以下若干 K_0T 时，施主杂质全部电离，导带中电子等于施主浓度，处于饱和区；再升高温度，杂质电离已经不能增加电子数，但本征激发产生的电子迅速增加着，半导体进入过渡区，这时导带中的电子由数量级相近的本征激发部分和杂质电离部分组成，而费米能级则继续下降；当温度再升高时，本征激发成为载流子的主要来源，载流子浓度急剧上升，而费米能级下降到禁带中线处，半导体进入本征激发区。所以说在杂质半导体中费米能级的位置反映了半导体的导电类型。

对于 n 型半导体费米能级位于禁带中线以上， N_0 越大，费米能级位置就越高。所以说在杂质半导体中费米能级的位置反映了半导体的掺杂水平。

4、不同掺杂情况下的半导体的费米能级

强 P 型中， N_A 大，导带中电子最少，价带中电子也最少，电子填充能带的水平最低， E_f 也最低；弱 P 型中，导带及价带电子稍多，能带被电子填充的水平也稍高， E_f 也升高了；本征半导体，无

掺杂，导带和价带中载流子数一样多；弱N型中，导带及价带中电子更多了，能带被电子填充的水平也更高了， E_F 升到禁带中线以上，强N型中，导带及价带中电子最多，能带被电子填充的水平最高， E_F 也最高。

5、分析杂质完全电离的p型半导体其费米能级随温度的变化。

答：费米能级不一定是系统中的一个真正的能级，它是费米分布函数中的一个参量，具有能量的单位，它标志着电子填充能级的水平，其大小等于系统中增加或减少一个电子所引起系统自由能的变化，所以被称为费米能级。

当温度升高至某一温度时，p型半导体中的受主杂质达到完全电离。但是随着温度的继续升高，不仅p型半导体的禁带宽度变小，而且有更多的电子能够从价带热激发到导带产生电子空穴对，导致本征载流子浓度迅速增大，最终本征激发占主要地位，p型半导体进入本征激发区。所以随着温度的升高，费米能级逐渐远离价带方面，向本征费米能级即禁带中线靠近，能值也随温度升高而增大。

6、分析重掺杂使半导体的禁带宽度变窄的原因，或说简并半导体中禁带变窄效应形成的原因。

答：在重掺杂半导体中，杂质浓度对能带结构的作用表现在对两个能态密度函数的影响上。一个是与宿主晶格相联系的态密度，另一个是与杂质原子相联系的态密度。

对于n型硅，随着杂质浓度的增加，杂质向晶格提供的电子数越来越多，这些过量电子的屏蔽作用改变了宿主原子最外层电子所处的周期势场，而杂质原子本身在宿主晶格中分布的涨落性进一步使这一周期势场发生变化，这就导致了能带结构的改变——导带失去了原有的明确的边界，其边缘伸到了禁带，形成了所谓“能带尾”。这是对第一个能态密度的影响造成的。

对第二个能态密度的影响：随着杂质浓度的提高，杂质原子间的距离不断缩小，相邻杂质原子外层电子的波函数相互交叠，所对应的能态密度也随之变化，孤立的杂质能级扩展为准连续的杂质能带。

这样，在重掺杂半导体中，由于以上能带结构的变化，形成了简并能带，便导致了禁带宽度的变窄。

第四章重点

1、载流子在外电场力作用下作加速运动，漂移速度应该不断增大，电流密度将无限增大，但是实际上是在恒定磁场作用下，电流密度恒定，为什么呢？

答：载流子在电场力作用下的加速运动，使得载流子获得漂移速度，但载流子不断遭到散射，使载流子的运动方向不断改变且漂移速度不能无限积累起来，也就是说经过散射后，他们失去了获得的附加速度，所以漂移速度不会不断增大，而是会达到恒定的平均漂移速度。

2、简述硅材料中载流子散射的几种主要机制，并说明在低掺杂浓度的半导体中随温度的升高，载流子迁移率的变化趋势。

答：硅材料中载流子的主要散射机制有：电离杂质散射、晶格振动散射。

电离杂质散射：施、受主杂质在电离后分别是正离子和负离子，正离子或负离子的周围会形成一个库仑势场，运动到这个电离杂质附近的载流子将受到这个库仑场的作用，使载流子运动速度的大小或方向发生改变，即电离杂质散射。常以散射概率来描述散射的强弱，它代表单位时间内一

个载流子受到散射的次数。电离杂质的浓度越高，载流子便越容易遭到电离杂质散射；温度越高，载流子热运动的平均速度就越大，载流子便越不容易遭到散射。

晶格振动散射：在一定温度下，晶格中的原子都在其平衡位置振动，而振动是由若干个不同的格波组成。当电子与格波发生散射而交换能量时，电子速度会发生变化，而格波会吸收或释放一个声子，电子在晶体中被格波散射相当于电子与声子的碰撞，这种载流子与晶格的作用就称为晶格振动散射。对硅材料而言，晶格振动散射包括声学波散射和光学波散射，其中声学波散射是主要散射机构，温度越高，载流子受到的声学波散射就越显著，而光学波对载流子的散射概率也随温度升高而增大。

迁移率是指单位场强下载流子的平均漂移速度。当杂质浓度较低时，晶格振动散射起主要作用，电离杂质散射起次要作用，载流子的迁移率随温度的增加而降低。

补：其他散射：

多能谷散射：对多能谷半导体，电子可以从一个极值附近散射到另一个极值附近，这种散射称为多能谷散射；

中性杂质散射：低温下，杂质没有充分电离，这种没电离的杂质呈中性，这种中性杂质对周期性势场有一定的微扰作用而引起散射。但它只有在低温下，重掺杂的半导体中才起主要散射作用；

位错散射：位错线俘获电子后，周围会形成一个由电离施主组成的圆柱形正空间电荷区，垂直于这个空间电荷区运动的电子将受到散射，即位错散射；

合金散射：多元合金中的其中两种同族原子在晶格位置上的随机排列，对周期性势场产生一定的微扰作用，引起对载流子的散射，及合金散射。

3、影响硅半导体中电子迁移率的因素主要有哪些？试简单分析。

迁移率是指单位场强下载流子的平均漂移速度。

影响硅半导体中电子迁移率的因素有杂质浓度和温度。

a. 当杂质浓度较低时，晶格振动散射起主要作用，载流子的迁移率随温度的增加而降低。

b. 当杂质浓度高到 10^{18}cm^{-3} 后，在低温范围，随着温度的升高，电子迁移率缓慢上升，到一定温度才下降，可知在温度低时，杂质散射起主要作用。当温度较高时，迁移率又随着温度的升高而下降，此时，以晶格振动散射为主。

c. 当温度不变时，杂质浓度越高，载流子受到电离杂质散射的概率就越大，迁移率就越小。

4、关于硅的少子迁移率和多子迁移率的问题

A. 室温下，掺杂浓度较低时 (10^{15}cm^{-3})，n 型硅多子和 p 型硅少子迁移率趋近于相同值 ($1330\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)，p 型硅多子和 n 型硅少子迁移率趋近于相同值 ($495\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)；当杂质浓度增大时，四子的迁移率都会单调下降；

B. 浓度一定时，n 型硅少子迁移率大于多子迁移率，p 型硅少子迁移率大于多子迁移率。原因：以重掺杂 n 型硅说明问题：第一、施主能级扩展为杂质能带，导致禁带宽度变窄，导带电子不仅受到电离杂质的散射，还会被施主能级俘获，从而一部分电子在杂质带上运动，另一部分电子经过一定时间被释放到导带参与导电，这些电子在导带中作漂移运动时，不断被施主能级俘获、释放、再俘获、再释放，使得电子的漂移速度减慢，降低了电子的漂移速度。但是，价带中的少子空穴还是在价带中作漂移运动，掺杂对少子迁移率的影响不大。同理，p 型重掺杂硅中，禁带变窄效应发生在价带顶，少子电子仍处于正常的底部，故少子电子迁移率大。所以杂质浓度增大后，少子迁移率大于多子迁移率。

5、分析硅（Si）和砷化镓（GaAs）中电子平均漂移速度在不同电场作用下的变化特点。

答：硅：a. 在低电场下（ $0-10^3\text{V/cm}$ ），电流密度与电场强度关系服从欧姆定律，迁移率恒定且与电场无关，电子平均漂移速度与电场强度成正比，电子平均漂移速度随着电场增加而增大。
b. 在中等强度电场下（ $10^3\text{V/cm}-10^4\text{V/cm}$ ），电子从电场中获得能量，电子和声学波发生散射，以声学波声子的形式将能量传给晶格，迁移率随着电场的增加而降低，电子平均漂移速度与电场强度呈亚线性关系，即电子平均漂移速度与电场强度不成正比，电子平均漂移速度随着电场增加而缓慢增大。
c. 在强电场下（ $10^4\text{V/cm}-$ ），电子从电场中获得巨大能量，电子成为热载流子和光学波发生散射，以光学波声子的形式将大部分能量传给晶格，电子获得的能量大部分消失，迁移率随着电场的增加而降低，随着电场强度的增加，平均漂移速度达到饱和。

砷化镓：a. 在低电场下（ $0-3\times 10^3\text{V/cm}$ ），电子平均漂移速度与电场强度成正比，电子平均漂移速度随着电场增加而增大。
b. 在中等强度电场下（ $3\times 10^3\text{V/cm}-2\times 10^4\text{V/cm}$ ），砷化镓的最低导带能谷 1 中的电子从电场中吸收足够的能量跃迁到次低导带能谷 2 中，发生能谷间散射。进入次低能谷 2 中的电子，有效质量增加，迁移率降低，平均漂移速度减小，即电子平均漂移速度随着电场增加而减小。
c. 在强电场下（ $2\times 10^4\text{V/cm}-$ ），大部分电子转移到能谷 2 中，随着电场强度的增加，电子平均漂移速度达到饱和。

6、什么是耿氏效应？什么是负阻效应？分析其形成物理机制和应用。

答：当高于某一临界值的恒定直流电压加到 N 型砷化镓两端电极上时，半导体内的电流就会以很高的频率振荡，这种在半导体体内产生高频电流的现象称为耿氏效应。

物理机制：N 型砷化镓的能带结构中，导带有两个能谷分别是：位于布里渊区中心的最低能谷 1 和在 $\langle 111 \rangle$ 方向布里渊区边界处比最低能谷极值高出 0.29eV 的次低能谷 2，能谷 2 的曲率比能谷 1 小，所以能谷 2 的电子有效质量较大，迁移率较小。

把砷化镓材料置于外电场中时，能谷 1 中的电子从电场中吸收足够的能量跃迁到能谷 2 中发生能谷间散射。（进入能谷 2 中的电子，有效质量增加，迁移率降低，平均漂移速度减小，电导率（ $nq\mu$ ）下降，产生负阻效应与负微分电导，其意义是随着电场强度增大而电流密度减小。）导致其电导率随电场的增加时而增加，时而减小，从而体内形成了高频电流振荡的现象。

应用：耿氏器件：利用耿氏效应制作的一种能产生微波振荡的负阻器件。

第五章重点

1、光注入引起半导体载流子的稳定扩散

对一块均匀掺杂的 n 型半导体，电离施主带正电，电子带负电，由于电中性要求，各处电荷密度为零，载流子分布均匀。当用恒定的光均匀照射半导体的一面，并假定在半导体表面薄层内，光大部分被吸收，那么在表面薄层内将不断产生非平衡载流子，而内部非平衡载流子却很少，引起非平衡载流子从表面向内部扩散。由于表面不断注入，所以半导体表面薄层非平衡载流子浓度保持恒定值，半导体内部各点的空穴浓度也不随时间改变，形成稳定的分布，这种情况称为稳定扩散。

2、分析半导体中非平衡载流子的各种复合途径，并说明复合后能量放出的三种方式。

答：a、按跃迁的方式，复合分为直接复合和间接复合：

直接复合：电子在导带和价带之间的直接跃迁，引起电子和空穴的复合，称为直接复合。

间接复合：电子和空穴通过禁带中的能级（复合中心）发生的复合称作间接复合。

b、根据复合发生的位置，复合分为体内复合和表面复合：

表面复合：非平衡载流子主要通过半导体表面的杂质和表面特有的缺陷在禁带中形成的复合中心能级进行的复合，称为表面复合，它也属于间接复合。

c、按复合释能方式分为俄歇复合和辐射复合：

载流子从高能级向低能级跃迁，发生电子-空穴复合时，把多余的能量传给另一个载流子，使这个载流子被激发到能量更高的能级上去，当它重新跃迁回低能级时，多余的能量常以声子形式放出，这种复合称为俄歇复合。

辐射复合包括发射光子和发射声子的复合：伴随着复合，将有发光现象，称为发光复合；载流子将多余的能量以声子的方式传给晶格，加强晶格的振动，即为发射声子的复合。这也是复合后能量放出的三种方式。

3、说明直接复合和间接复合的物理意义。为什么深能级才能起有效复合中心的作用？

直接复合：电子在导带和价带之间的直接跃迁，引起电子和空穴的复合；间接复合：电子和空穴通过禁带中的能级（复合中心）发生的复合；

如果施、受主能级分别离导带底和价带顶很远，杂质电离能大，不容易电离，这些能级称为深能级。因为深能级主要位于禁带中央附近，非平衡载流子在此位置进行间接复合的概率最大，浅能级即远离禁带中央的能级，不能起有效的复合中心的作用，所以说深能级起有效复合中心的作用。

4、试分析半导体中由复合中心导致的复合过程。与陷阱中心的区别是什么？为什么说陷阱的存在增加了系统从非平衡态恢复到平衡态的弛豫时间？

答：促进复合过程的杂质和缺陷称为复合中心，电子和空穴通过禁带中的能级（复合中心）发生的复合称作间接复合，间接复合共有四个微观过程：

a. 俘获电子的过程：复合中心能级从导带俘获电子。

b. 发射电子过程：复合中心能级上的电子被激发到导带的过程。

c. 俘获空穴过程：复合中心能级从价带俘获空穴或电子由复合中心落入价带与空穴复合。

d. 发射空穴过程：复合中心能级向价带发射了一个空穴或价带电子被激发到复合中心能级上。

区别：复合中心对于电子和空穴都具有差不多大小的俘获几率，并且主要位于禁带中央，它主要起促进载流子的复合，从而降低非平衡载流子的寿命。

陷阱中心，这是一种具有陷阱效应的杂质或缺陷。陷阱中心的特点就是俘获一种过剩载流子的作用特别强，俘获另一种过剩载流子的作用特别弱，所以陷阱中心具有存储一种载流子的作用。例如电子陷阱就起着存储电子的作用，空穴陷阱就起着存储空穴的作用，所以陷阱的存在增加了系统从非平衡态恢复到平衡态的弛豫时间。一般，陷阱中心的能级深度要比复合中心能级的浅，而且只有当杂质能级与平衡时费米能级重合，才最有利于陷阱作用。

系统从不平衡态逐渐恢复到平衡态所经历的时间称为弛豫时间。电子落入陷阱后，基本上不能直

接与空穴复合，它们必须首先被激发到导带，然后才能再通过复合中心而复合。相对复合中心从导带俘获电子的平均时间而言，陷阱中的电子激发到导带所需的平均时间要长的多，同样，空穴陷阱也是如此。所以陷阱的存在增加了系统从非平衡态恢复到平衡态的弛豫时间。

5、非平衡载流子寿命的物理意义，其长短标志着什么？为什么说寿命是半导体的一个结构灵敏的参数？

答：非平衡载流子的平均生存时间称为非平衡载流子的寿命，它标志着非平衡载流子浓度减小到原值的 $1/e$ 所经历的时间。寿命不同，非平衡载流子衰减的快慢不同，寿命越短，衰减越快。半导体表面处的杂质、表面特有的缺陷可在禁带中形成复合中心能级，半导体中若存在深能级杂质，以及位错等缺陷也会在禁带中引入复合中心能级。有效复合中心对于电子和空穴都具有俘获的作用，促进载流子的复合，从而降低非平衡载流子的寿命。所以寿命值的大小与材料的完整性、某些杂质的含量以及样品的表面态有极密切的关系，所以说寿命是半导体的一个结构灵敏的参数。

6、半导体中载流子的迁移率和扩散系数的意义是什么？两者有什么关系？

迁移率是指单位场强下载流子的平均漂移速度，单位是 $m^2/v.s$ 或 $cm^2/v.s$ 。它表示载流子在电场作用下进行漂移运动难易程度的物理量，运动得越快，迁移率越大；运动得慢，迁移率小。

扩散系数是指单位浓度梯度作用下的粒子流密度，单位 m^2/s 或 cm^2/s 。它表示存在浓度梯度时，载流子从高浓度处往低浓度处进行扩散运动的难易程度。扩散越快，扩散系数就越大；扩散越慢，扩散系数就越小。

关系：载流子的迁移率和扩散系数都是表征载流子运动快慢的物理量，迁移率和扩散系数之间存在有正比的关系——爱因斯坦关系。

7、半导体中的载流子有哪两种不同的运动机制？是对其做简单分析。

答：a、漂移运动：半导体中，载流子在电场力作用下的运动，称为载流子的漂移运动。常用迁移率来表征漂移运动的快慢。迁移率是指单位场强下载流子的平均漂移速度，单位是 $m^2/v.s$ 或 $cm^2/v.s$ 。它表示载流子在电场作用下进行漂移运动难易程度的物理量，漂移运动得越快，迁移率越大；漂移运动得慢，迁移率小。载流子的漂移运动产生漂移电流。

b. 扩散运动：由于载流子浓度分布不均匀，导致载流子从高浓度处向低浓度处逐渐扩散的过程，称为载流子的扩散运动。常用扩散系数来表征扩散运动的快慢。扩散系数是指单位浓度梯度作用下的粒子流密度，单位 m^2/s 或 cm^2/s 。它表示存在浓度梯度时，载流子从高浓度处往低浓度处进行扩散运动的难易程度。扩散运动越快，扩散系数就越大；扩散运动越慢，扩散系数就越小。载流子的扩散运动产生扩散电流。

c. 关系：载流子的两种运动都可以产生电流。载流子的迁移率和扩散系数都是表征载流子运动快慢的物理量，迁移率和扩散系数之间存在有正比的关系——爱因斯坦关系

第六章重点

1、pn 结的形成方法、整流效应、作用与用途。

答：形成方法：将同种半导体材料的 n 型和 p 型两部分紧密结合在一起，在交界处形成一个结，即 pn 结。制造 pn 结的方法有合金法、扩散法、离子注入法和外延生长法等。

合金法：把一小粒铝放在一块 n 型单晶硅片上，加热到一定的温度，形成铝硅的熔融体，然后降低温度，熔融体开始凝固，在 n 型硅片上形成一含有高浓度铝的 p 型硅薄层，它与 n 型硅衬底的交界面即为 pn 结（铝硅合金结）。

合金结的特点：n 型区中施主杂质浓度均匀分布，p 型区中受主杂质浓度均匀分布，在交界面处，杂质浓度由 p 型突变为 n 型，这种杂质分布的 pn 结就是突变结。

扩散法：在 n 型单晶硅片上，将金属杂质原子从晶片表面注入，从而在硅晶体内形成一定的杂质浓度梯度，在有高浓度的金属杂质一侧形成 p 型半导体，它与另一部分的 n 型硅的交界面即为 pn 结。

特点：在这种结中，杂质浓度从 p 区到 n 区是逐渐变化的，称之为缓变节。

pn 结的整流效应：pn 结上加正向偏压时，正向电流密度随正向偏压呈指数关系迅速增大，而 pn 结在反向偏压下，反向电流密度为常量，与外加电压无关，即 pn 结的整流特性。

pn 结上加正向电压，外加电压的电场与内建电场的方向相反，使内建电场减弱，势垒区变窄，多数载流子的扩散运动强于漂移运动，形成从 p 区通过 pn 结流向 n 区的净扩散流，这就是 pn 结的正向电流。随着外加电压的增加，势垒高度越来越小，净扩散电流越来越大，因此随着外加正向电压的增加，正向电流迅速增大。

pn 结上加反向电压，外加电压的电场与内建电场的方向相同，使内建电场增强，势垒区变宽，减少了多子的相互扩散，增加了少子的漂移。势垒区边界处的少子被电场驱走后，内部的少子就来补充，形成反向偏压下的电子扩散流和空穴扩散流，形成从 n 区流向 p 区的反向电流。因为少子浓度低，随着反向偏压的增大，少子的浓度梯度基本不变，所以扩散流不随电压变化。

作用与用途：a. pn 结中由于空间电荷区的作用，形成对电子运动有阻碍的势垒，载流子通过这个势垒时，按它的运动方向有难有易，利用这种现象（整流效应）可制成 pn 结二极管。

b. 当光照射 pn 结时，由于自建电场的作用，使光照产生的电子-空穴对定向运动形成光电流。利用这个现象（光生伏特效应）可制成光电池。

c. 利用 pn 结电容与偏压有关（电容效应）可制成变容二极管，利用高掺杂浓度制成隧道二极管。

d. 当 pn 结施加压力时，电导率有明显的变化，利用这个原理可制成功敏器件。

2、为什么 pn 结空间电荷区也叫势垒区、耗尽区呢？

在 pn 结的空间电荷区中能带发生弯曲，电子从电势能低的 n 区向电势能高的 p 区运动时，必须克服这一势能高坡才能达到 p 区，同理，空穴也必须克服这一势能高坡才能达到 n 区，这一势能高坡通常称为 pn 结的势垒，故空间电荷区也称为势垒区。在室温附近，对于绝大部分势垒区，其中杂质虽然都已电离，但载流子浓度比起 n 区和 p 区的多子浓度小的多，好像已经耗尽了，所以通常也称势垒区为耗尽区。

3、pn 结的接触电势差和哪些因素有关？是对其做简单分析。该接触电势差是否可以超过禁带宽度，为什么？

答：平衡 pn 结的空间电荷区两端间的电势差称为 pn 结接触电势差。在非简并情况下，pn 结接触

电势差 $V_0 = \frac{k_0 T}{q} \left(\ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$ ，表明接触电势差和 pn 结两边的掺杂浓度、温度、材料的禁带宽度有

关。在一定温度下，突变结两边的掺杂浓度越高，接触电势差越大；禁带宽度越大，本征载流子浓度 n_i 就越小，接触电势差就越大。在非简并情况下，接触电势差不能超过禁带宽度，因为 n 区和 p 区的准费米能级之差完全由 pn 结的势垒高度来补偿，而 n 区和 p 区的准费米能级之差是小于禁带宽度的，所以 pn 结的势垒高度不会超过禁带宽度（但是重掺杂有可能，这里不讨论）。

4、分析 pn 结在正偏和反偏时的势垒区变化特点。

答：pn 结在正偏时，因为势垒区内载流子浓度很小，电阻很大，势垒区外的 p 区和 n 区中载流子浓度很大，电阻很小，所以外加正向电压基本落在势垒区。正向偏压在势垒区产生了与内建电场方向相反的电场，因而减弱了势垒区中的电场强度，这就表明空间电荷相应减小，势垒区的宽度也减小，势垒高度下降。势垒区电场的减弱，破坏了载流子的扩散运动和漂移运动之间原有的平衡，削弱了载流子在势垒区中的漂移运动，使扩散流大于漂移流。

pn 结在反偏时，反向偏压在势垒区产生了与内建电场方向一致的电场，因而增强了势垒区中的电场强度，这就表明空间电荷相应增多，势垒区的宽度也变大，势垒高度上升。势垒区电场的增强，破坏了载流子的扩散运动和漂移运动之间原有的平衡，增强了载流子在势垒区中的漂移运动，使漂移流大于扩散流。

5、理想 pn 结模型满足的条件以及 pn 结电流电压偏离理想方程的因素。

理想条件：a. 小注入条件：注入的少数载流子浓度比平衡多数载流子浓度小得多。

b. 突变耗尽层条件：外加电压和接触电势差都降落在耗尽层上，耗尽层中的电荷是由电离施主和电离受主的电荷组成，耗尽层外的半导体是电中性的。注入的少数载流子在 p 区和 n 区都是纯扩散运动。

c. 通过耗尽层的电子和空穴电流为常量，不考虑耗尽层中载流子的产生及复合作用。

d. 玻尔兹曼边界条件：在耗尽层两端，载流子分布满足玻尔兹曼统计分布。

偏离理想：表面效应、势垒区中的产生与复合、大注入条件、

6、试分析实际 pn 结电流电压特性偏离理想情况的主要因素（深能级对 pn 结的电流电压特性的影响）。

答：a. 势垒区的产生电流（深能级对 pn 结的电流电压特性的影响）：pn 结处于热平衡状态时，势垒区内通过复合中心的载流子产生率等于复合率。当 pn 结加反向偏压时，势垒区内的电场加强，所以在势垒区内，由于热激发作用，通过复合中心产生的电子空穴对来不及复合就被强电场驱走了，使得势垒区内通过复合中心的载流子的产生率大于复合率，具有净产生率，形成另一部分反向电流，即势垒区的产生电流。它与势垒区边界附近的少数载流子扩散电流一起构成 pn 结总的反向电流，它大于理想的反向电流。

b. 势垒区的复合电流（深能级对 pn 结的电流电压特性的影响）：在正向偏压下，从 n 区注入 p 区的电子和 p 区注入 n 区的空穴，在势垒区内通过有效复合中心复合了一部分，构成另一股正向电流，即势垒区的复合电流。它与电子从 n 区向 p 区以及空穴从 p 区向 n 区的净扩散电流一起构成 pn 结总的正向电流。它大于理想的正向电流。

c. 大注入情况：在正向偏压较大时，注入的少子的浓度接近或超过该区多子浓度的情况，这样的注入称为大注入。以 p^+n 为例。（ p^+n 的正向电流主要由 p^+ 区注入 n 区的空穴电流，由 n 区注入

p^+ 区的电子电流可忽略不计。)当大注入时,电注入的空穴浓度接近或靠近 n 区多子浓度,注入的空穴在 n 区边界形成积累,(它们向 n 区内部扩散时,在空穴扩散区内形成一定的浓度分布,为了保持电中性,) n 区的多子相应地增加同等数量,也在空穴扩散区形成电子浓度分布。电子浓度分布的存在,使电子在空穴扩散方向上也发生扩散运动,从而产生(电离施主,在 n 区内形成从 n 区指向 p 区的)内建新电场,方向与势垒区内的内建电场一致。这个内建新电场对电子的漂移作用抵消了它的扩散作用。内建新电场的存在,(使得落在势垒区的正向偏压降低,)增强了内建电场强度,(提高了势垒区载流子的漂移电流,)使得多子的净扩散电流减小。使得实际的正向电流小于理想的正向电流。

7、试分析 pn 结中势垒、扩散电容的物理起源及影响势垒、扩散电容大小的主要因素。

答:势垒电容:随着 pn 结外加正向偏压的增加, n 区的电子和 p 区的空穴由于中和势垒区中部分的电离施主和电离受主,削弱了内建电场,使势垒区宽度变窄,空间电荷数量减少,即外加正向偏压增加时,将有一部分电子和空穴存入势垒区中。反之当正向偏压减小时,内建电场增强,势垒区宽度变宽,空间电荷数量增多,即有部分电子和空穴从势垒区中取出。对于加反向偏压的情况可做类似分析。

由于 pn 结外加电压的变化,引起电子和空穴在势垒区的存入和取出作用,导致势垒区的空间电荷数量随外加电压而变化,就把 pn 结的电容效应称为势垒电容。

影响势垒电容大小的因素:结的面积以及轻掺杂一边的杂质浓度越大,势垒电容也越大;正向电压越大,势垒电容也越大。反向电压越大,势垒电容就越小。

扩散电容:pn 结外加正向偏压时, n 区的电子注入 p 区,在势垒区与 p 区边界 p 区一侧一个扩散长度内,形成了非平衡电子与空穴的积累,同样在 n 区也有非平衡空穴和电子的积累。当正向偏压增加时,由 n 区注入 p 区的电子增加,一部分电子扩散走了,一部分增加了 p 区电子的积累,增加了浓度梯度。所以外加电压变化时, p 区扩散区积累的非平衡电子也随之增加,与之保持电中性的空穴也增加。同样 n 区也是这种情况。

由于 pn 结外加电压的变化,引起电子和空穴在扩散区的积累或减少,导致扩散区的电荷数量随外加电压而变化,就把 pn 结的电容效应称为扩散电容。

影响扩散电容大小的因素:结的面积越大,扩散电容也越大。外加正向电压越大,扩散电容也越大。

8、pn 结的击穿过程各有几种?分析各击穿过程产生机理。

答:雪崩击穿、隧道击穿、热电击穿。

雪崩击穿:pn 结在较大的反向电压下,空间电荷区有很强电场。通过空间电荷区的电子和空穴,在电场作用下,获得很高的能量,去撞击价带中的电子而产生电子-空穴对。新产生的电子-空穴对在电场作用下去撞出其他价带电子,产生新的电子-空穴对。这样雪崩式的繁衍下去,使 pn 结的反向电流迅速增大而出现击穿现象,即雪崩击穿。

隧道击穿:当 pn 结增加反向偏压到一定程度时,势垒区能带发生极大倾斜,使 n 区的导带底比 p 区的价带顶还低,从强电场中获得巨大能量的大量 p 区价带电子能够穿过禁带即隧道到达 n 区导带中,使反向电流急剧增大,于是 pn 结就发生隧道击穿。

热电击穿:当施加在 pn 结上的反向电压逐渐增大时,反向电流热损耗也随之增大,这将产生大量热能,进而导致结温上升。结温的上升,又使得反向饱和电流密度增大,产生的热能也迅速增大,进而又导致结温的上升。如此反复循环下去,最后反向电流密度无限增大而发生击穿。这种

由于热不稳定性引起的击穿，称为热电击穿。

9、解释硅 pn 结的反向电流随反向电压增大而增大的原因。

答：当对硅 pn 结施加的反向电压增大到击穿电压时，反向电流随反向电压增大而增大，发生击穿的机制有三种：雪崩击穿、隧道击穿、热电击穿。

雪崩击穿：pn 结在较大的反向电压下，空间电荷区有很强电场。通过空间电荷区的电子和空穴，在电场作用下，获得很高的能量，去撞击价带中的电子而产生电子-空穴对。新产生的电子-空穴对在电场作用下去撞出其他价带电子，产生新的电子-空穴对。这样雪崩式的繁衍下去，使 pn 结的反向电流迅速增大而出现击穿现象，即雪崩击穿。

隧道击穿：当 pn 结增加反向偏压到一定程度时，势垒区能带发生极大倾斜，使 n 区的导带底比 p 区的价带顶还低，从强电场中获得巨大能量的大量 p 区价带电子能够穿过禁带即隧道到达 n 区导带中，使反向电流急剧增大，于是 pn 结就发生隧道击穿。

热电击穿：当施加在 pn 结上的反向电压逐渐增大时，反向电流热损耗也随之增大，这将产生大量热能，进而导致结温上升。结温的上升，又使得反向饱和电流密度增大，产生的热能也迅速增大，进而又导致结温的上升。如此反复循环下去，最后反向电流密度无限增大而发生击穿。这种由于热不稳定性引起的击穿，称为热电击穿。

10、区别雪崩击穿和隧道击穿机制的不同，并说明双极晶体管中的结击穿多数表现为雪崩击穿的原因。

答：pn 结在较大的反向电压下，空间电荷区有很强电场。通过空间电荷区的电子和空穴，在电场作用下，获得很高的能量，去撞击价带中的电子而产生电子-空穴对。新产生的电子-空穴对在电场作用下去撞出其他价带电子，产生新的电子和空穴对。这样雪崩式的繁衍下去，使 pn 结的反向电流迅速增大而出现击穿现象，即雪崩击穿。

在强电场作用下，由于隧道效应，使大量电子从价带穿过禁带而进入到导带所引起的一种击穿现象，称为隧道击穿。这时产生强电场的外加电压就称为隧道击穿电压。

雪崩击穿和隧道击穿机制的区别：雪崩击穿不仅与势垒区中的电场有关还和势垒宽度有关，只有达到一定的势垒宽度，载流子才能在势垒区中不断加速产生雪崩倍增所需要的动能。而隧道效应的产生需要在杂质浓度较高且势垒宽度较小时，才有利于隧道击穿。一般击穿电压在 6V 以下是齐纳击穿，在 6V 以上是雪崩击穿。杂质浓度越高，两者所需要的击穿电压就越低。

11、分析隧道二极管中负阻特性的形成机制。

答：由简并化的重掺杂 p 型和 n 型半导体紧密结合形成的 pn 结称为隧道结。由隧道结制成的二极管称为隧道二极管。

在 n、p 区都是重掺杂的 pn 结上加正向偏压，当正向偏压从峰值电压增加到谷值电压时，隧道电流逐渐减小的现象，即负阻现象。

当给隧道结加正向电压，随着正向电压的增大，势垒高度不断下降，越来越多的 n 区导带电子可以穿过隧道到 p 区价带的空量子态，使隧道电流不断增大，直至达到峰值电流，电压达到峰值电压。

再继续增大正向电压，势垒高度进一步降低，在隧道结两边能量相同的量子态减少，越来越少的 n 区导带电子可以穿过隧道到 p 区价带的空量子态，使隧道电流随正向电压的增加不断减小，直至达到谷值电流，电压达到谷值电压。这就是隧道二极管负阻特性的形成机制。

第七章重点

1、金属与半导体的接触电势差形成原因；不考虑表面态，其大小与什么有关？表面态是如何影响接触势垒的？镜像力和隧道效应又是如何影响接触势垒的？

答：当费米能级不在同一水平上的金属和半导体相接触时，费米能级较高一侧的电子将向费米能级较低的一侧流动，直到金属和半导体的费米能级在同一水平上为止，而电子的净流动使得金属和半导体之间产生电势差，这个由于接触而产生的电势差称为接触电势差，可以认为接触电势差完全补偿了原来金半费米能级的不同。

$V_{ms} = (W_s - W_m) / q$ ；不考虑表面态，其接触电势差的大小与金属的功函数，半导体的功函数有关，而掺杂浓度又影响着半导体的功函数。

（表面态对半导体的影响：表面态所对应的能级是位于半导体禁带中距离价带顶 $1/3$ 禁带宽度的表面能级。以 n 型半导体表面存在受主表面态为例，半导体费米能级高于表面能级，由于杂质的补偿作用，在表面能级到费米能级间的能级基本上为电子填满，表面带负电。半导体表面附近必定出现正的空间电荷区，形成电子的势垒，势垒区中的正电荷与表面态上的负电荷数量相等。若表面态密度很大，杂质能级上的电子就会不断补偿表面能级，直到杂质能级上已无电子补偿或费米能级接近表面能级为止，势垒高度就等于原来费米能级和表面能级之差，这时势垒高度被高表面态密度钉扎。）

表面态对影响接触势垒的影响：以金属功函数大于 n 型半导体功函数为例，当金半接触时，由于半导体费米能级高于金属费米能级，半导体高受主表面态上可以有足够多的电子流向金属，直到两者的费米能级在同一水平，而半导体势垒区不发生变化，势垒高度被高表面态密度钉扎。这时势垒区中的正电荷等于表面受主态上的负电荷与金属表面负电荷之和。所以说，当半导体的表面态密度很高时，它可以屏蔽金属接触对接触势垒的影响，使半导体内的势垒高度和金属的功函数几乎无关。

镜像力和隧道效应对金半接触势垒的影响（镜像力和隧道效应使金半接触反向电流随反向电压的增加更显著的原因）

答：一个电子距金属表面的距离为 x ，则它与感应电荷之间的吸引力，相当于该电子与位于 $(-x)$ 处等量正电荷之间的吸引力，这个正电荷称为镜像电荷，这个吸引力称为镜像力。由于镜像力的作用，使电子具有镜像势能，它会削弱（无镜像力时的）电子势垒，使势垒高度降低。由于电子的镜像电势随着反向电压的增大而增大，所以镜像力所引起的势垒降低量随反向电压的增大而增大。因此镜像力使金半接触反向电流随反向电压的增加更显著。

根据隧道效应原理，当势垒厚度小于发生隧道效应的临界势垒厚度时，金属电子可以穿过隧道到达靠近金属的半导体一侧，即发生隧道效应，使得半导体电子势垒高度降低。反向电压的增大，半导体的势垒宽度就越窄，就越容易发生隧道效应。所以隧道效应所引起的势垒降低量随反向电压的增大而增大。因此隧道效应使金半接触反向电流随反向电压的增加更显著。

2、对金属与 n、p 型半导体接触，在什么情况下有可能形成阻挡层、反阻挡层？为什么？

答：对金属与 n 型半导体：

金半接触时，当金属的功函数大于半导体功函数，金属的费米能级将低于半导体的费米能级，半

导体中的电子向金属流动，直到金半费米能级在同一水平，电子才没有净流动。结果使金属表面带负电，半导体表面形成正的空间电荷区，电场方向由体内指向表面，表面势小于零，使表面能带向上弯曲，形成表面势垒。势垒区主要由电离施主形成，电子浓度比体内小很多，是个高阻区域，形成阻挡层。

金半接触时，当金属的功函数小于 n 型半导体功函数，也有可能形成 n 型阻挡层，原因：当 n 型半导体表面有很高的受主表面态密度时，由于杂质补偿作用，半导体表面出现正的空间电荷区，形成 n 型阻挡层，半导体的势垒高度被高表面态密度钉扎。当金属的功函数小于 n 型半导体功函数，金属的费米能级高于半导体费米能级，金属电子将流向半导体，但是不是流向半导体体内，而是流向受主表面态。直到两者的费米能级在同一水平，而半导体 n 型阻挡层不发生变化。所以说，当半导体的表面态密度很高时，它可以屏蔽金属接触对阻挡层的影响，使半导体内的阻挡层和金属的功函数几乎无关。

金半接触时，当金属的功函数小于半导体功函数时，（金属的费米能级将高于半导体的费米能级，金属的电子向半导体流动，直到金半费米能级在同一水平，电子才没有净流动，）结果使金属表面带正电，半导体表面形成负的空间电荷区，电场方向由表面指向体内，表面势大于零，使表面能带向下弯曲，形成表面势垒。势垒区的电子浓度比体内大很多，是个高导区域，形成反阻挡层。对金属与 p 型半导体：

金半接触时，当金属的功函数大于半导体功函数，金属的费米能级将低于半导体的费米能级，半导体中的电子向金属流动，直到金半费米能级在同一水平，电子才没有净流动。结果使金属表面带负电，半导体表面形成正的空间电荷区，电场方向由体内指向表面，表面势小于零，使表面能带向上弯曲，形成表面势垒。由于 p 型半导体中的电子主要集中在价带，所以电子向金属流动，在价带留下了等量的空穴。所以表面的空穴浓度比体内大很多，是个高导区域，表面层形成反阻挡层。

金半接触时，当金属的功函数小于半导体功函数，金属的费米能级将高于半导体的费米能级，金属中的电子向半导体流动，直到金半费米能级在同一水平，电子才没有净流动。结果使金属表面带正电，半导体表面形成负的空间电荷区，电场方向由表面指向体内，表面势大于零，使表面能带向下弯曲，形成表面势垒。势垒区主要由电离受主形成，空穴浓度比体内小很多，是个高阻区域，形成阻挡层。

3、定性说明金半接触（阻挡层）的整流效应：

答：金半接触的整流效应是指阻挡层的整流效应，由于阻挡层是高阻区域，外加电压主要落在阻挡层上。当外加电压与表面势符号相同时，阻挡层势垒升高，否则下降。

以金属与 n 型半导体接触，表面势小于零为例来说明。

当外加电压为正时（金接正），使半导体一侧的势垒高度下降，半导体流向金属的电子超过金属到半导体的电子数，形成一股从金属到半导体的正向净电流，它是由 n 型半导体多数载流子构成的。外加电压越大，电子势垒下降就越多，正向电流也就越大。

当外加电压为负时（金接负），使半导体一侧的势垒高度上升，半导体流向金属的电子少于金属到半导体的电子数，形成一股从半导体到金属的反向净电流。由于金属中的电子要越过相当高的势垒才能到达半导体中，因此反向电流很小。金属势垒不随外加电压变化，所以金属到半导体的电子流是恒定的。随着反向电压的增大，反向电流趋于饱和。

以金属与 p 型半导体接触，表面势大于零为例来说明。

当外加电压为负时（金接负），使半导体一侧的空穴势垒高度下降，形成一股从半导体到金属的正向净电流，它是由 p 型半导体多数载流子构成的。外加负电压越大，空穴势垒下降就越多，正向电流也就越大。

当外加电压为正时（金接正），使半导体一侧的空穴势垒高度上升，半导体流向金属的空穴少于金属到半导体的空穴数，形成一股从金属到半导体的反向净电流。由于金属中的空穴要越过相当高的势垒才能到达半导体中，因此反向电流很小。金属势垒不随外加电压变化，所以金属到半导体的净空穴流是恒定的。随着正向电压的增大，反向电流趋于饱和。

可见，无论是 n 型阻挡层还是 p 型阻挡层，正向电流都对应于多数载流子由半导体到金属所形成的电流。

对 n 型阻挡层，当势垒的宽度比电子的平均自由程大得多时，电子通过势垒区要发生多次碰撞，这样的阻挡层称为厚阻挡层，扩散理论适用于厚阻挡层的理论。

当 n 型阻挡层很薄，电子的平均自由程远大于势垒宽度时，电子在势垒区的碰撞可以忽略，起决定作用的是势垒高度，热电子发射理论适用于这种情况。

4、什么是肖特基二极管？它和 pn 结二极管相比有什么特点？

答：利用金属和半导体整流接触特性制成的二极管称为肖特基势垒二极管。它和 pn 结二极管都具有相似的电流电压关系，即都具有单向导电性。和 pn 结二极管相比又有两个突出特点：多数载流子工作，具有高频特性；低的导通电压。

a. 就载流子的运动形式而言，pn 结正向导通时，由 p 区注入 n 区的空穴或由 n 区注入 p 区的电子，都是少数载流子，他们先形成一定的积累，然后靠扩散运动形成电流。这种非平衡载流子的积累称为电荷存储效应，它使 pn 结具有低频的特点。而金属与 n 型半导体接触，正向导通时，从半导体流入金属的电子并不发生积累，而是直接成为漂移电流流走。也就是说肖特基势垒二极管的正向电流，主要由半导体中的多数载流子进入金属形成的。因此肖特基势垒二极管比 pn 结二极管有更好的高频特性。

所以正向导通时，多子器件肖特基二极管是多数载流子工作，具有高频特性，而少子器件 pn 结二极管是少数载流子在工作，频率低。肖特基势垒二极管对于高频和快速开关的应用来说是理想的

b. 低的导通电压：对于同样的使用电流，肖特基势垒二极管将有较低的正向导通电压。

5、金属探针与半导体接触以测量半导体的电阻率时，为什么要增加表面复合？

答：在金属和 n 型半导体的整流接触上加正向电压，就有空穴从金属流向半导体，在阻挡层内形成积累，然后扩散进入半导体内部。这种现象称为少数载流子的注入。当金属探针与半导体接触来测量半导体电阻率时，会发生少数载流子的注入现象，从而使少数载流子浓度增加，影响半导体电阻率的测量。所以要增加表面复合，使空穴与电子在表面发生复合，避免发生少数载流子的注入现象。

6、何谓欧姆接触？理论上，如何在金属与半导体间形成欧姆接触？实际集成电路工艺中一般采用哪些方法实现？和肖特基接触有什么区别？

答：欧姆接触是指金属与重掺杂半导体接触时具有线性和对称的电流电压关系，其产生的接触电阻远小于材料电阻，而且金属与半导体之间无少数载流子注入。

理论上，主要利用隧道效应的原理在半导体上制造欧姆接触。金属与半导体接触时，如果半导体

掺杂浓度很高，则势垒区宽度变得很薄，电子也要通过隧道效应贯穿势垒产生相当大的隧道电流，甚至超过热电子发射电流而成为电流的主要部分。当隧道电流占主要地位时，它的接触电阻可以很小，可以用作欧姆接触。

形成欧姆接触的方法有三种：a. 选择适当电阻，使金属和半导体之间不形成势垒而形成表面积层。b. 在靠近金属的半导体表面薄层用一定工艺方法形成高掺杂层，使半导体与金属接触时形成的表面耗尽层很薄，以致产生隧道效应。具有较小的接触电阻，获得接近理想的欧姆接触。

肖特基接触是指金属和半导体材料相接触的时候，在界面处半导体的能带弯曲，形成肖特基势垒（厚阻挡层），而势垒的存在导致了大的界面电阻，这样的接触是肖特基接触。与之对应的是欧姆接触（薄阻挡层），界面处势垒非常小或者是没有接触势垒。

第八章重点

1、MIS 结构在什么条件下可以简化为理想 MIS 结构？

- 答：a. 金属与半导体间功函数差为零；
b. 在绝缘层内没有任何电荷且绝缘层完全不导电；
c. 绝缘体与半导体界面处不存在任何界面态；

2、已知由一个 n、p 型半导体构成的理想 MIS 结构，分析加不同偏压时的半导体表面状况，并说明表面强反型形成条件。

答：对 p 型半导体：

- a. 多数载流子堆积状态：当金半加负电压时（金接负），产生了从半导体内部指向表面的电场，表面势为负值，表面处能带向上弯曲。（在热平衡状态下，半导体内费米能级保持定值，）故随着向表面接近，费米能级离价带顶就越近，价带中的空穴浓度随之增加。在靠近表面一侧，价带顶甚至高过费米能级，故在表面层出现多数载流子空穴的堆积。
- b. 平带状态：当金半不加电压时，表面势为零，表面处能带不发生弯曲，表面处空穴浓度与体内一致，称之为平带状态。
- c. 多数载流子耗尽状态：当金半加正电压时（金接正），产生了从半导体表面指向内部的电场，表面势为正值，表面处能带向下弯曲。在（在热平衡状态下，半导体内费米能级保持定值，）故随着向表面接近，费米能级离价带顶就越远，价带中的空穴浓度随之降低。在靠近表面一侧，价带顶比费米能级低很多，故表面出现载流子空穴的耗尽状态。
- d. 多数载流子深耗尽状态：在金半间加快速增长的正电压，导致表面层达到耗尽而其中少数载流子还来不及产生，使得耗尽层的宽度远大于强反型的最大耗尽层宽度，这种半导体表面的这种状态称为深耗尽状态。
- e. 少数载流子反型状态：当金半加极大正电压时（金接正），产生了从半导体表面指向内部的电场，表面势为正值，表面处能带进一步向下弯曲，随着向表面靠近，费米能级就越高于禁带中央，即费米能级离导带底比离价带顶更近。这意味着表面处（电子浓度超过了空穴浓度，形成与原来半导体衬底导电类型相反的一层，）出现了反型层，（这种情况下，半导体空间电荷层内的负电荷由已电离的受主负电荷和反型层中的电子组成）就把这种状态称为少数载流子反型状态。

随着外加正电压的增大，当表面势能 $q\psi_s$ 大于等于半导体内禁带中央能量 E_i 与费米能级 E_f 之差 $q\psi_b$ 的 2 倍，即 $\psi_s \geq 2\psi_b$ 时，表面就出现强反型状态，其中 $\psi_b = 2\psi_i$ 是发生强反型的临界条件。一旦出现强反型状态，反型层中积累的电子就会屏蔽外电场的作用，表面耗尽层宽度就会达到一个极大值并且不再随外加电压的增加而增加。

对 n 型半导体：

- a. 多数载流子堆积状态：当金半加正电压时（金接正），产生了从半导体表面指向内部的电场，表面势为正值，表面处能带向下弯曲。（在热平衡状态下，半导体内费米能级保持定值，）故随着向表面接近，费米能级离导带底就越近，导带底中的电子浓度随之增加。在靠近表面一侧，导带底甚至低过费米能级，故在表面层出现多数载流子电子的堆积。
- b. 平带状态：当金半不加电压时，表面势为零，表面处能带不发生弯曲，表面处电子浓度与体内一致，称之为平带状态。
- c. 多数载流子耗尽状态：当金半加负电压时（金接负），产生了从半导体内部指向表面的电场，表面势为负值，表面处能带向上弯曲。在（在热平衡状态下，半导体内费米能级保持定值，）故随着向表面接近，费米能级离导带底就越远，导带中的电子浓度随之降低。在靠近表面一侧，导带底比费米能级高很多，故表面出现载流子电子的耗尽状态。
- d. 多数载流子深耗尽状态：在金半间加快速增长的负电压，导致表面层达到耗尽而其中少数载流子还来不及产生，使得耗尽层的宽度远大于强反型的最大耗尽层宽度，这种半导体表面的这种状态称为深耗尽状态。
- e. 少数载流子反型状态：当金半加极大负电压时（金接负），产生了从半导体内部指向表面的电场，表面势为负值，表面处能带进一步向上弯曲，随着向表面靠近，费米能级就越低于禁带中央，即费米能级离导带底比离价带顶更远。这意味着表面处（电子浓度低于空穴浓度，形成与原来半导体衬底导电类型相反的一层，）出现了反型层，（这种情况下，半导体空间电荷层内的正电荷由已电离的施主正电荷和反型层中的空穴组成）就把这种状态称为少数载流子反型状态。

随着外加负电压的增大，当表面势能 $q\psi_s$ 大于等于半导体内费米能级 E_F 与禁带中央能量 E_i 之差 $q\psi_B$ 的 2 倍，即 $-\psi_s \geq 2\psi_B$ 时，表面就出现强反型状态，其中 $-\psi_s = 2\psi_B$ 是发生强反型的临界条件。一旦出现强反型状态，反型层中积累的空穴就会屏蔽外电场的作用，表面耗尽层宽度就会达到一个极大值并不再随外加电压的增加而增加。

3、分析 MIS 结构中影响平带电压的因素

答：当加在金属和半导体间的电压为零时，表面势也为零，表面处能带不发生弯曲，这样的金半接触的状态称为平带状态。在非理想 MIS 结构中，为恢复平带状态，所需加在金属和半导体间的电压称为平带电压。

影响平带电压的因素有：

- a. 金属与半导体的功函数差：以铝-二氧化硅-p 型硅组成的 MOS 结构为例来说明。当铝与 p 型硅接触时，由于 p 型硅的功函数大于铝，电子将从铝流向硅中。因此在硅表面层内形成带负电的空间电荷层，在铝表面产生正电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。直到两者的功函数差为零，电子才停止流动。所以由于金属和半导体的功函数差，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。功函数差越大，需加的平带电压也越大（金属接负）。
- b. 绝缘层中的电荷：以绝缘层中存在正电荷为例来说明。当绝缘层中存在薄层正电荷时，金属表面和半导体表面层中会感应出负电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。所以由于绝缘层中存在正电荷，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。绝缘层中的电荷越多且越接近半导体表面，需加的平带电压也越大（金属接负）。
- c. 绝缘体和半导体间存在快界面态：快界面态是指位于硅与二氧化硅界面处而能值位于硅禁带中

的一些分立的或连续的电子能级，以施主型界面态为例来说明。当绝缘体和半导体中存在施主型快界面态时，由于光照等外界因素，电子吸收足够能量后可以从施主型界面能级跃迁到半导体硅中的导带上，而在界面处留下正电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。所以存在界面态，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。被电子填充的快界面态越多，需加的平带电压也越大（金属接负）。

4、影响 MIS 结构 C-V 特性的因素有哪些？是如何影响的？

答：影响理想 MIS 结构 C-V 特性的因素有：a. 半导体材料及绝缘层材料都会影响理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线。b. 当半导体材料及绝缘层材料一定时，C-V 特性曲线随半导体材料的杂质浓度及绝缘层厚度而变。d. MIS 结构的电容和测量频率也有关系，对 p 型半导体，外加偏压接正时，测量频率越低，MIS 结构的总电容就越接近绝缘层电容。

影响非理想 MIS 结构 C-V 特性的因素有：

a. 金属与半导体的功函数差：以铝-二氧化硅-p 型硅组成的 MOS 结构为例来说明。当铝与 p 型硅接触时，由于 p 型硅的功函数大于铝，电子将从铝流向硅中。因此在硅表面层内形成带负电的空间电荷层，在铝表面产生正电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。直到两者的功函数差为零，电子才停止流动。所以由于金属和半导体的功函数差，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。功函数差越大，需加的平带电压也越大（金属接负）。

b. 绝缘层中的电荷：以绝缘层中存在正电荷为例来说明。当绝缘层中存在薄层正电荷时，金属表面和半导体表面层中会感应出负电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。所以由于绝缘层中存在正电荷，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。绝缘层中的电荷越多且越接近半导体表面，需加的平带电压也越大（金属接负）。

c. 绝缘体和半导体中存在快界面态：快界面态是指位于硅与二氧化硅界面处而能值位于硅禁带中的一些分立的或连续的电子能级，以施主型界面态为例来说明。当绝缘体和半导体出存在施主型快界面态时，由于光照等外界因素，电子吸收足够能量后可以从施主型界面能级跃迁到半导体硅中的导带上，而在界面处留下正电荷，出现了从硅表面指向内部的电场，使硅表面层能带向下弯曲。所以存在界面态，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态（理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线向左平行于电压轴平移）。被电子填充的快界面态越多，需加的平带电压也越大（金属接负）。

5、在硅-二氧化硅系统中，存在哪四种形式的电荷？在忽略界面态影响的情况下，可以用什么实验测量 MIS 结构氧化层中固定电荷与可动电荷的密度，以及如何检查降低可动电荷后的效果？分析其实验原理。

答：二氧化硅层中的可动离子、固定表面电荷、电离陷阱电荷以及界面态四种形式的电荷。

二氧化硅层中的可动离子：主要是带正电的钠、钾、氢等离子，这些离子在一定温度和偏压条件下可在二氧化硅层中迁移。

二氧化硅层中的固定表面电荷：这种电荷位于硅与二氧化硅界面附近；面密度是固定不变的；面密度与氧化和退火条件以及硅晶体的取向有关。

二氧化硅层中的电离陷阱电荷：能产生电离的辐射线通过氧化层时，可在二氧化硅中产生电子-

空穴对，在电场作用下，电子发生漂移运动，而空穴在二氧化硅中很难移动，可能陷入陷阱中形成陷阱正电荷。

界面态：指硅-二氧化硅界面处位于禁带中的能级或能带，它可以在短时间内和半导体交换电荷，故又称快界面态。

测量 MIS 结构氧化层中可动电荷和固定表面电荷的密度可用温度-偏压实验；

a. 在初始情况，可动正电荷聚集在金属与氧化层间，对 MIS 结构 C-V 曲线 1 特性没有影响。

b. 在金半加正电压条件下退火处理，可动正电荷漂移运动到靠近半导体表面处，半导体表面能带向下弯曲，这使得 C-V 曲线平行压轴向左移动形成曲线 2，此时半导体表面层并不处于平带状态，可通过曲线 1、2 计算出平带电压之差 V ，根据 $Q=CV$ ，其中 C 为单位面积二氧化硅层的电容，从而计算出可动正电荷的密度 Q 。

检查降低可动电荷后的效果： $a+b+c$

c. 在金半加负电压条件下退火处理，部分可动正电荷漂移运动远离半导体表面处靠近金属与二氧化硅交界处，另一部分可动正电荷残留在氧化层中，这使得 C-V 曲线 2 平行压轴向右移动形成曲线 3，此时半导体表面层并不处于平带状态，可通过曲线 1、3 计算出平带电压大小 V ，根据 $Q=CV$ ，其中 C 为单位面积二氧化硅层的电容，从而计算出残留可动正电荷的密度 Q ， Q 越小，说明去污效果越好。

测量 MIS 结构氧化层中固定表面电荷的密度：氧化层中固定表面电荷产生的原因是硅与二氧化硅附近存在的过剩硅离子。在金半加负电压条件下退火处理，此时带正电的固定表面正电荷在负压电场作用下，从半导体与绝缘体界面处漂移到绝缘体内，形成 C-V 曲线 4，曲线 4 与理论上的 C-V 曲线的压差即平带电压是金半功函数差与固定表面电荷共同作用的结果，由此我们可以计算出由固定表面电荷引起的部分平带电压，从而求出其密度。

6、以 p 型硅为例，分析表面电导随表面势变化的情况。

答：当表面势为负时，表面层内形成多数载流子空穴的积累，使表面电导增加，表面势的绝对值越大，表面电导就越大；当表面势为较小正值且表面处于耗尽状态时，表面电导较小；当表面势为正且表面形成反型层时，反型层中的少数载流子电子数量随表面势的增加而增加，所以表面电导随表面势的增加而增加。

第十章重点

1、在宏观上光与半导体的相互作用用哪几个光学常数来描写？分别说明它们的物理意义。

a. 光进入半导体要发生折射，用折射率来描写，标志着光进入半导体偏离原来传播方向的程度。

b. 消光系数：标志着光进入半导体其强度发生衰减，存在吸收。

c. 吸收系数：其大小 α 相当于光在媒质中传播 $1/\alpha$ 距离时能量减弱到原来的 $1/e$ 。

d. 反射系数：光进入或射出半导体界面时，一部分会反射回原媒质，反射系数标志着反射强弱，大小等于界面反射能量流密度和入射能量流密度之比。

e. 透射系数：光进入半导体界面时，一部分会透射进入半导体，透射系数标志着透射的强弱，大小等于界面透射能流密度和入射能流密度之比。

2、分析半导体中的主要光吸收机制（过程），哪些过程具有确定的长波吸收限？哪些具有带、线状吸收光谱？哪些光吸收对光电导有贡献？并着重分析 Si 和 GaAs 中吸收机制的差别。

本征吸收：半导体中的价带电子吸收大于等于禁带宽度的光子能量后，越过禁带跃迁入空的导带中，形成电子-空穴对，这种由价带直接跃入导带所形成的吸收过程称为本征吸收。

激子吸收：价带中的电子吸收小于禁带宽度的光子能量后离开价带，但因能量不够还不能跃迁到导带成为自由电子，仍然受到空穴的库仑力作用，形成一个新的系统，称为激子。能产生激子的光吸收称为激子吸收。激子是电中性，因此不形成电流，在运动过程中可以通过两种途径消失：通过热激发或其他能量的激发使激子分离成为自由电子和空穴；激子中的电子和空穴通过复合，使激子消灭而同时放出能量。

自由载流子吸收：自由载流子吸收光子后，在同一能带内从低能态跃迁到高能态，这样的吸收就是自由载流子吸收。

杂质吸收：杂质能级上的电子吸收光子后跃迁到导带，空穴吸收光子后从杂质能级跃迁到价带，这种吸收就是杂质吸收。

晶格振动吸收：光照晶体时，光子能量直接转换为晶格振动动能，这种吸收就是晶格振动吸收。

确定的长波吸收限：本征吸收的光子最小能量应等于禁带宽度，杂质吸收的光子最小能量应等于杂质上电子或空穴的电离能；所以都具有长波吸收限。

带状吸收光谱：本征吸收、晶格振动吸收、杂质吸收；

线状吸收光谱：激子吸收、自由载流子吸收；

对光电导有贡献：本征吸收、杂质吸收；

硅是间接带隙半导体，当光子能量小于禁带宽度 1.12eV 时，非本征吸收开始；当光子能量等于禁带宽度时，本征吸收开始。随着光子能量的增加，吸收系数首先上升到一段较平缓的区域，这对应于间接跃迁；随着光子能量的继续增加，吸收系数再一次陡增，发生强烈的光吸收，这表示直接跃迁的开始。

砷化镓属于直接带隙半导体，光子能量大于禁带宽度后，一开始就有强烈吸收，吸收系数陡峻上升，反映出直接跃迁的过程。

3、什么是伯斯坦移动，什么是费朗兹-克尔德十效应？

答：本征的吸收长波限向短波方向移动的现象就是伯斯坦移动，例如对重掺杂 n 型半导体，费米能级位于导带之中，在温度较低时，费米能级以下的电子状态全被电子占满，价电子只能跃迁到费米能级以上的状态，意味着价电子需要比禁带宽度还大的能量，才能发生本征跃迁，因此本征吸收的长波限要向短波方向移动。

在强电场作用下，本征吸收的长波限向长波方向移动，这一现象称为费朗兹-克尔德十效应。这意味着电子从电场中吸收能量后，能量比禁带宽度小的光子也能发生本征吸收，它是通过光子诱导的隧道效应实现的。

4、为什么在整个光电导过程中，光生电子与热平衡电子具有相等的迁移率？

答：当电子刚被激发到导带时，可能比原来在导带中的热平衡电子有较大的能量；但光生电子与晶格碰撞，在极短的时间内就以发射声子的形式丢失多余的能量，变成热平衡电子，所以说光生电子与热平衡电子具有相等的迁移率。

5、本征吸收会导致直接跃迁和间接跃迁，两者有何区别（电子的动、能量守恒关系式），由此说明两者的物理性质。

	直接跃迁	间接跃迁
	电子在吸收或释放光子后，发生价带与导带之间的跃迁，且跃迁前后波矢不变，这种跃迁就是直接跃迁。	电子在跃迁过程中，不仅吸收光子或释放光子，还和晶格交换能量，使得跃迁前后波矢改变，这跃迁就是间接跃迁。
电子应满足的能量守恒	光子能量应该大于等于禁带宽度的能量	
电子应满足的动量守恒	跃迁前后电子的动量差为零。	跃迁前后电子的动量差等于吸收或释放一个声子动量。
物理性质（区别）	只要电子、光子参与，跃迁前后波矢不变。发生概率比间接跃迁的高	需要电子、光子、声子的参与，跃迁前后电子波矢改变。
共同点	电子都要满足能量、动量守恒即满足选择定则；电子都是在导带和价带之间跃迁。	

辨一辨：

(辐射) 跃迁	本征跃迁(带带)	直接跃迁
		间接跃迁
	非本征跃迁	有杂质能级参与
复合	直接复合	发生在价带与导带间
	间接复合	发生在复合中心

6、什么是光电导，光电导的弛豫过程、弛豫时间？

答：光电导：光吸收使半导体中形成非平衡载流子，载流子浓度的增大使半导体电导率增加，这种由光照引起半导体电导率增加的现象称为光电导。由本征吸收引起的光电导称为本征光电导。

弛豫过程：由于光生载流子有一定的寿命，从光照开始光生载流子为零逐渐增加，经过一段时间而达到稳定值（定态光电导）；光照停止，光生载流子从稳定态逐渐衰减而最后消失，由于光电导和光生载流子浓度成正比，这种在光照下，半导体光电导率逐渐上升，光照停止后半导体光电导率逐渐下降的过程，就是光电导弛豫过程。

弛豫时间：光电导衰减为定态光电导的 $1/e$ 所经历的时间。

7、为什么在实际应用中，既要求光电导灵敏度高，又要求弛豫时间短？

答：单位光照度引起的光电导就是光电导灵敏度，弛豫时间越长，单位光照度引起的光电导就越大，灵敏度提高；

但是另一方面，光电导的弛豫时间代表着光敏电阻对光信号反应的快慢，弛豫时间越长，光电导上升缓慢，即对光信号反应慢；弛豫时间越短，即反应快。

在实际应用中，既要求光电导灵敏度高，又要求弛豫时间短，这两者是矛盾的。

8、对于不同的掺杂和晶体缺陷，存在着不同的复合中心和陷阱中心，而复合和陷阱效应对光电导有极大的影响，所以半导体的光电导是种结构灵敏现象，那么，复合和陷阱效应如何影响光电导？

答：a. 少数载流子陷阱作用

以n型半导体为例，半导体中除了复合中心外，还存在空穴陷阱，则光生空穴大部分被空穴陷阱俘获，（相当于夺取了一部分复合中心上的空穴，）极大降低了电子-空穴的复合率，（虽然导带的非平衡自由电子可能与陷阱中心上的空穴进行复合，但概率小，陷阱中心上的空穴只有先被热激发到价带，然后被复合中心俘获，在与光生电子复合）大大增加了自由非平衡电子的寿命（弛豫时间），使单位光照度引起的光电导就越大，即光电导灵敏度增加。所以少数载流子陷阱有增加光电导灵敏度的作用。

b. 多数载流子陷阱作用

以n型半导体为例，半导体中除了复合中心外，还存在高浓度的电子陷阱，则光生电子大部分被电子陷阱俘获。当从光照开始到达到定态光电导的过程中，包含着逐渐填充高浓度陷阱的过程，大大增加了光电导上升的弛豫时间，光电导灵敏度增加。

当光照停止后，除了导带中的非平衡电子通过复合中心与空穴复合外，陷阱中的电子也逐步释放出来，通过复合中心与空穴复合，最后达到平衡态。因此光照停止后，大大增加了光电导下降的弛豫时间。（特别对能级较深的陷阱，被陷电子的热激发概率很小，决定了光电导的衰减时间）。从这方面讲：多数载流子陷阱增加光电导灵敏度的作用。从另一方面：由于所有光激发空穴都在复合中心，陷阱上基本被电子填满，复合中心上的空穴数基本上和陷阱中的电子数相等，陷阱电子越多，复合中心上的空穴也就越多，这极大的增加了导带中光生电子的复合概率，缩短了自由非平衡电子的寿命（弛豫时间），降低了光电导灵敏度。

9、分析半导体中的主要发光机制。

答：处于激发态的非平衡载流子跃迁到低能级与空穴复合，伴随着发射光子的现象称为半导体发光。根据不同的激发方式，可以分为电致发光，光致发光等。电子从高能级向低能级跃迁时，伴随着放出光子，这种跃迁称为辐射跃迁。辐射跃迁包括本征跃迁和非本征跃迁。

导带的电子跃迁到价带，与价带的空穴复合，伴随着发射光子，称为本征跃迁。本征跃迁包括直接跃迁和间接跃迁。

直接跃迁的发光过程只涉及一个电子空穴对和一个光子，辐射效率较高。间接过程除了涉及一个电子空穴对和一个光子，还有声子参与辐射效率低。如直接带隙半导体砷化镓的发光效率就比间接带隙半导体硅来得高。

电子从导带跃迁到杂质能级，或杂质能级上的电子跃迁入价带，或电子在杂质能级之间的跃迁，都伴随发射光子。这种跃迁称为非本征跃迁。对间接带隙半导体而言，本征跃迁是间接跃迁，概率小，所以非本征跃迁起主要作用。

肖特基势垒（金半）二极管：利用金属和半导体整流接触特性制成的二极管称为肖特基势垒二极管。

Pn 结二极管：利用 pn 结整流特性制成的二极管称为 Pn 结二极管。

pn 结隧道二极管：温度一定时，给热平衡隧道结加上电压，通过改变外加电压的大小，就可以使得载流子在禁带中穿越，形成隧道电流，即 Pn 结隧道效应。利用隧道效应制成的二极管就是 pn 结隧道二极管。

光电池（光电二极管）光生电：在内建电场作用下，光生载流子各自向相反方向运动，在 pn 结内形成自 n 区向 p 区的

光生电流。同时光生电动势使 pn 结的势垒降低，载流子的扩散运动强于漂移运动，使得在 pn 结中产生从 p 区向 n 区的正向扩散电流；在 pn 结开路情况下，光生电流和正向电流相等，pn 结两端建立起稳定的电势差，这就是光电池的开路电压。若将 pn 结与外界电路接通，只要光照不停止，就会有电流通过电路，pn 结起了电池的作用，这就是 pn 结光电池的原理。

Pn 结发光二极管 LED（电致发光，注入发光）：在平衡状态 pn 结上加正向偏压，使得 pn 结势垒区和扩散区注入了非平衡少数载流子，这些非平衡少数载流子与多数载流子不断复合而发光，这就是 pn 结注入发光的原理。

10、自发辐射和受激辐射，两者有什么区别？

答：自发辐射：在没有任何外界作用下，原子自发地从激发态回到基态引起光子发射的过程称为自发辐射。

受激辐射：在光辐射的刺激下，受激原子从激发态回到基态引起光子发射的过程称为受激辐射。

区别：自发辐射中，各原子的跃迁都是随机的，所产生的光子能量相等，但这种光辐射的位相和传播方向等各不相同，原子从激发态跃迁到基态伴随着发射一个光子；受激的辐射光的全部特性同入射光辐射完全相同，在入射光子刺激下，原子从激发态跃迁到基态伴随着发射两个同相位、同频率的光子。

11、pn 结激光器要产生激光必须满足哪几个条件？各用什么方法实现？

答：a. 形成分布反转，使受激辐射占优势；

b. 具有共振腔，以实现光量子放大；

c. 至少达到阈值电流密度，使增益至少等于损耗；

对于 a 有：实现 a 必须有电子和空穴的准费米能级之差 $>$ 入射光子的能量 \geq 禁带宽度；

把处于激发态的原子数大于处于基态的原子数的这种反常情况称为分布反转。

形成分布反转的条件：电子和空穴的准费米能级之差 $>$ 禁带宽度；对 p 区和 n 区重掺杂，平衡时，费米能级位于 p 区的价带及 n 区的导带内。当加正向偏压 V 时，pn 结势垒减低，当有 $qV \geq$ 禁带宽度时，（外加电势差由准费米能级差来弥补）结面附近出现电子和空穴的准费米能级之差 $>$ 禁带宽度，这个区域内的导带电子浓度和价带空穴浓度都很高，成为分布反转区。

受激辐射超过吸收的条件：电子和空穴的准费米能级之差 $>$ 入射光子的能量

对于 b 有：系统发射的光子数大于进入系统同样能量的光子数，称为光量子放大。

实现 b 必须有：自发辐射所产生的小部分光子在 pn 结平面内传播，引起其他电子-空穴对的受激辐射，而受激辐射随着注入电流的增大而产生更多能量相同的光子。在共振腔作用下，受激辐射产生的大量光子形成强度大，单色性好的相干光。

对于 c 有：在注入电流作用下，分布反转区内的电流不断增强，称为增益；辐射在共振腔内来回反射，有能量损耗。只有注入电流密度高于达到阈值电流密度，增益才会大于损耗，才有激光发射。