固体材料主要结构：①晶体（单晶体；多晶体）②非晶体③准晶体④纳米晶体

点阵（布拉菲格子，相同的点可以代表原子、离子、分子、集团，结点一般为基元的重心）+基元=晶体结构

连接点阵中的结点，得到直线族和晶面族，点阵成为网格，成为晶格。把晶格中的基元抽象成几何点，点的集合称为布喇菲点阵（格子），如果基元中包含两个或以上原子，则称为复式格子，而基元中的网格称为子晶格。（不同的原子各自构成自身的布喇菲格子，称为子晶格，若干个相同的子晶格相互位移套构而形成所谓的复式格子）

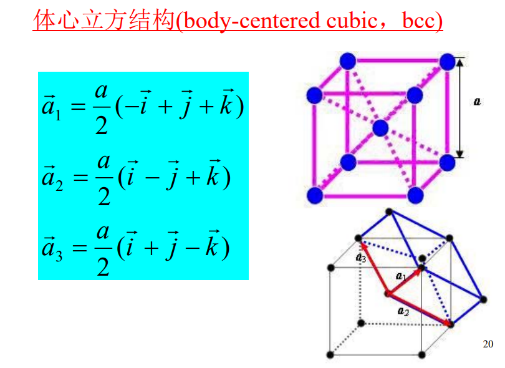
原（晶）胞，晶体的最小重复单元，当平移布喇菲格子的所有格点，将精准填满空间。定义基矢为晶胞的三个相互独立的边矢。

固体物理学原胞，结点只在顶角上，内部和面上不含其它结点，固体物理学原胞只包含一种原子。（基矢为）

结晶学原胞，（为了反映晶体的周期性和对称性，常取最小重复单元的几倍）结点不仅在顶角上，也可以在体心和面心上。（a,b,c）

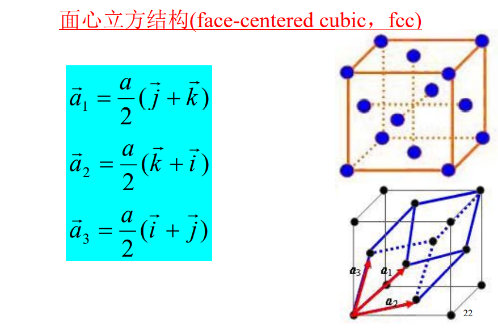
简立方结构

体心立方结构



其固体物理学原胞为

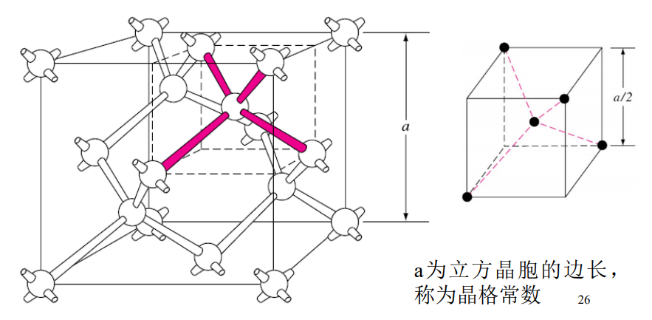
面心立方结构：



其固体物理学原胞为

计算晶胞中原子个数的计算：贡献值法

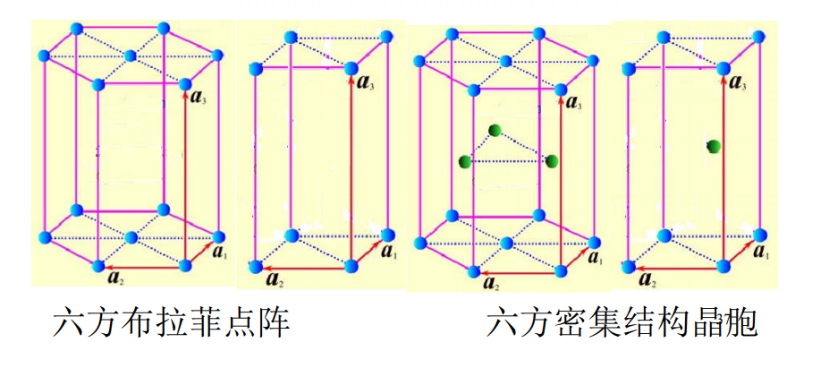
晶体结构与闪锌矿结构：由两个面心立方结构套构形成，布喇菲格子为面心立方，复式晶格，配位数为4，两个面心立方格子沿体对角线位移对角线长，但是金刚石结构并不是布拉菲格子，因为相邻的两个原子虽然相同但是不等价，固体物理学原胞的取法同面心立方的布拉菲原胞的取法相同，原胞中包含两个不等价的原子。



闪锌矿结构：（GaAs，ZnS，SiC）在金刚石结构中，顶角与面心处为硫离子， 而在立方单元的内部为锌离子

密积结构：一般由无方向性的金属键、范德华力等结合的晶体中，趋向于相互配位数最高

六角密积：ABAB；立方密积：ABCABC（面心立方晶格的（111）面为立方密积）



金刚石结构空间利用率为34%

对布喇菲格子，每一族晶列的取向称为晶向，所有与该晶列平行的全同晶列集合称为晶列族

求晶向的方法：取一格点O为原点，确定为基矢，则一方向位矢为，互质时，可以表示为。

晶向上原子排列规律相同但是空间方位不同的晶向属于同一晶向族，用<uvw>表示。

在布喇菲格子中，不在同一晶列上的三个结点决定一个晶面，与该晶面平行的晶面构成一晶面族，每一族晶面的特点是平行且等距，描述方法有方向余弦和坐标轴截距。

密勒指数：假设某个晶面与a、b、c轴的截距分别为pa，qb，sc，且p、q、s为整数，那么取其分别的倒数，特定晶面取向即可以表示为（）,一般用于结晶学原胞，对于等效晶面，用{}来表示

需要考虑一些特殊情况：①截距为负值，则在指数上加上横杠②截距为0，选取同一晶面族中的另一个晶面③截距为无穷大则对应指数为0

立方晶系中，晶列指数和晶面指数相同的晶向和晶面是正交的

金刚石结构的{111}晶面是原子密排面，为双层密排面，面间原子结合力弱

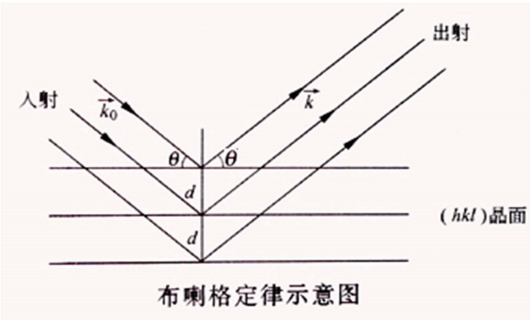
金刚石结构晶面特点：①容易沿着面断裂②腐蚀容易暴露表面③晶格缺陷容易在面间形成和扩展④晶体生长时容易形成晶面

倒格子：每个晶体结构有两个点阵与之联系，晶体点阵和倒易点阵，晶体衍射图是晶体倒易点阵的影响，而显微图像是真实晶体结构的映像。两个点阵由倒格矢定义式联系，倒易点阵是傅里叶空间映射

设基矢体积为，那么倒格基矢为，其余类似，倒格子基矢与正格子基矢满足关系：，这样对于任意正格子位矢与倒格子位矢有，且，其中为倒格子原胞体积，任何晶体的正格子和倒格子互为正倒格子

倒格子所组成的空间可理解 为状态空间或 k空间，正格子所组成的空间是位置空间或 坐标空间。

布拉格反射定律：，劳厄方程与布拉格反射公式在确定衍射极大方向上是完全 等价的。



衍射方程的得到需要以下几个假设：①入射光与衍射光线可看做平行光线②不考虑康普顿效应③先研究布喇菲格子

入射光波矢与衍射光波矢满足关系（）时，满足衍射加强条件，同时由于两个波矢的模相等，所以的垂直平分线必然平分两个波矢的夹角，也意味着在晶面（）上，所以也可以理解为反射。衍射极大方向即为反射方向

倒易点阵的格点与晶体点阵中的晶面族存在一一对应关系，因为为晶面族（）的法向方向，而且其长度表示晶面族的间距倒数，这样可以用倒易矢量来表示一族晶面。

一般正、倒点阵式同一种布喇菲格子（面心和体心互为正倒）

波矢。

晶体中的缺陷：按几何形状：①点缺陷②线缺陷③面缺陷；按形成原因：①热缺陷②杂质缺陷③非化学计量缺陷等

点缺陷：

1.热缺陷：①肖特基缺陷：原子脱离正常格点，留下空位②弗伦克尔缺陷：脱离格点流血间隙原子和空位③间隙原子：被挤进间隙

2.杂质原子：外来原子进入晶体而产生的缺陷。缺陷浓度与杂质含量有关，而与 温度无关。

影响：①提高电阻②加快扩散迁移③形成其他晶体缺陷④改变材料力学性能

线缺陷：

1.位错：①刃位错：滑移矢量与位错线垂直②螺位错：滑移矢量与位错线平行③混合位错

产生位错的原因：机械应力，热应力，晶格失配

滑移面常是原子面密度较大的晶 面；而滑移方向则是原子线密度较大的方向。

面缺陷：晶界，小角晶界，层错，孪晶

如果出现面缺陷，则该晶体不能用来制作集成电路。

晶体结合力与晶体分类：

离子键与离子晶体

离子晶体是复式格子，配位数最多只能是8，结合能高，硬度高，导电性差

共价键与共价晶体（原子晶体）

不存在单个分子，共价晶体的晶格必然为复式格子，具有饱和性和方向性

金属键和金属晶体

晶体结合靠电子云和正离子实，会有排斥作用

特点：多采用面心立方或者六角密排结构，配位数12（也有体心立方）；金属的结合能较低，良好导电和导热性能

范德瓦耳斯力与分子晶体

硬度小，易升华，多为密堆积结构，配位12，结合能低，导电性能差、熔点低，分为极性和非极性

氢键与氢键晶体

氢原子同时与两个原子成键，就会形成氢键，键的特 点来源于氢的特性。氢键具有饱和性，氢原子核与Y原子之间的力为库仑力

第三章 固体物理理论基础

布里渊区：

改变一个倒格矢，波函数不发生变化，为保证一一对应关系，只取一个倒格子原胞的体积，第一布里渊区：，

允带与禁带

对于Si原子，只考虑最外层4个价电子，3s有两个量子态，3p有六种量子态，两个Si相互作用后，4个量子态处于低能带，4个量子态处于高能带。T=0时，电子都处于最低能量状态，导带没有电子，价带填满电子，二者之间为禁带宽度。绝对零度时，价带完全被电子填满，所有价电子都 组成了共价键。导带完全为空。

导带底与价带顶之间能量差为禁带宽度。

如果一个态的经典描述近似成 立，则在量子力学中这个态就由一个波包 (wave packet)代表，可以把德布罗意波组成波包，用粒子 的观点讨论波包的运动，这个方法可用于讨论晶体 电子在外场作用下的运动规律。

根据Ehrenfest定理，在粒子动能较大，外场变化缓慢时，可以过渡到经典情形。可在不违背不确定原理的前提下，足够精确地给出电子的坐标和动量

有效质量：晶体中电子还收到周期势场的作用，实际上有，而使用有效质量表示，有，有效质量反映了粒子的质量和其内部作用力的作用效果。

外力，速度，而、，故而有，（）

即，

一般为张量，有效质量反比于曲线曲率，带顶为负，带底为正

绝缘体允带全空或者全满，禁带宽度较大

半导体几乎全空或者全满，近代宽度较小

金属有半满型和允带交叠型

能带结构是指能量E和波矢k之间的关系，通常是在布里渊区中两个最重要对称方向给出E和k的关系

有两种表示能带结构的方法：简化的能带图和等能面

简化能带图

等能面由k空间中能量相等的点构成的曲面，通常把导带的极小值成为能谷。

硅有六个能谷，为间接带隙半导体材料，跃迁时涉及到能量和动量变化

Ge的导带极小值在[111]方向的布里渊区边界，共8个极小值，实际上相差一个倒格矢，所以Ge导带只有四个彼此对称的极小值。

硅和锗都是间接禁带半导体

GaAs转移电子效应，直接带隙半导体材料

量子态密度：k取值为分离的，但是由于晶体体积较大，所以k的分布较为密集，电子的能级也是密集的，为准连续分布，引入态密度概念，设表示在之间的量子态数目，量子态密度为

在三维空间中，态密度为（之间的k空间体积），（由于考虑电子自旋所以会乘以2）

计算时先算出在小于E内的状态数，再关于E求导

导带中电子的态密度分布为（单位体积）（为导带底）

空穴的态密度为（单位体积）（是价带顶）

麦克斯韦-玻尔兹曼统计分布函数：不同粒子可以区分，不同能态上允许存在的粒子数量不受限制

波色-爱因斯坦统计分布函数：不同粒子无法区分，但是每个量子态上允许存在的粒子数不受限

费米-狄拉克统计分布函数：粒子无法区分，并且每个量子态上只允许一个微观原子

费米-狄拉克分布函数与费米能级：，为单位体积晶体材料，单位能量间隔区间内存在的微管粒子数量，反映的是能量为E的一个量子态被一个电子占据的概率

当时，有麦克斯韦-玻尔兹曼近似，一般是

第四章 热平衡状态下的半导体

热平衡时，半导体中电子在导带的分布情况由态密度和填充几率决定，即，而空穴的分布则为，表示的是单位体积单位能量区间内的空穴、电子数量

费米能级一定处于导带底和价带顶之间

计算得电子浓度，，空穴浓度，

注意同时有重空穴和轻空穴的GaAs的量子态密度表达中的有效质量

Si导带极小值有六个，Ge为四个，S代表能谷数，令，则，为导带电子态密度有效质量

本征载流子浓度，，

计算出的本征载流子浓度与实际相差较多的原因：电子和空穴的有效质量通常是低温下利用回旋共振实验方法得到，室温下有误差，态密度函数利用三维无限深势阱模型得到，也与实际有偏差。

本征半导体的费米能级位置

杂质分为间隙式杂质与替位式杂质，杂质浓度单位为1

杂质电离时需要的最小能量称为杂质电离能，为施主能级与导带底的能量间隔

提供导带电子的杂质称为施主杂质或N型杂质，束缚在施主杂质附近的量子态相应能级为施主能级，具有相同能量的孤立能级，为虚线，如P

起到点作用的主要是从施主能级激发到导带的电子，称为N型半导体

相应的，有受主杂质和受主能级，如B，称为P型半导体

掺有一定杂质（无论是施主杂质还是受主杂质）的半导 体单晶材料称为非本征半导体材料。在非本征半导体材 料中，导电电子和价带空穴的浓度则不相等

类氢模型：靠近价带顶或者导带底的杂质能级称为浅能级，浅能级可以由氢类似，杂质电离能

在半导体中，若同时存在着施主和受主杂质，施受 主杂质之间有互相抵消的作用，通常称为杂质的补 偿作用。

当受主能级低于施主能级，电子浓度为，反之同理

当受主与施主浓度相当，则会产生杂质补偿，导致被误认为高纯度半导体

深能级特点：①电离能大，对热平衡中载流子浓度影响小

②作为电子和空穴的复合中心，可以减少非平衡载流子寿命

③可以在禁带中引入多重杂质能级

在GaAs材料中，Ge原子往往倾向于表 现为受主杂质，而Si原子则倾向于表现为施主杂质。

非本征半导体材料的载流子分布：电子和空穴的浓度不再相等

当加入施主杂质，电子浓度增大，费米能级偏向导带底

此时，

质量作用定律：，该式子是在玻尔兹曼近似下得到，所以必须保证成立条件，否则需要使用费米-狄拉克积分

杂质浓度较低为非简并半导体，而当掺杂浓度增加到施主或者受主电子之间出现相互作用时，原来孤立的能级变为能带，并与导带底或者价带顶发生重叠，此时导带中电子的浓度将超过态密度 Nc 的数值，费米能级也将进入到导带中，通常我们把这 种类型的半导体材料称为简并 的 n型或者p型半导体材料

杂质原子统计分布规律：

杂质能级与能带中能级的区别：能带中的能级可以容纳 两个自旋相反的电子，而杂质能级如施主能级只能容纳 一个任意自旋的电子，或者失去该电子；所以杂质能级 被占据的几率不能用标准的费米分布函数。

占据施主能级的概率为，为施主电子能级简并度，通常为2，

Si和GaAs为4

杂质冻结效应：在绝对零度附近，无论是施主杂质，还 是受主杂质，都无法发生电离，因而也都不能向半导体 材料中贡献出导带电子或价带空穴，

热平衡状态下的电子浓度和空穴浓度（电中 性原理）:

半导体材料中任 意位置处，正电荷密度之和必须等于负电荷密度之和。

完全电离时，有，得到，

掺杂及温度变化对费米能级位置的影响：

N型：，同时有

P型：，同时有

第五章 半导体中载流子输送现象

载流子输运机理一般有两种：漂移运动和扩散运动

漂移运动：由电场引起的载流子运动

扩散运动：由浓度梯度引起的载流子运动

（半导体温度梯度也可以引起载流子运动，但是由于尺寸，这一效应可以忽略）

重要假设：虽然输运过程中电子和空穴净流动，但是热平衡状态不受干扰

温度越高，电子在无规则热运动时发生的两次与晶格原子的碰撞之间的自由运动时间越短

由于碰撞作用，电子速度不会无限制增加，会由于碰撞不断失去定向运动的速度，平均来看，电子在外加电场下会获得一个平均的定向运动速度

空穴的漂移速度仅是随机热运动速度的微小扰动

欧姆定律

漂移电流密度：，

设再留平均自由弛豫时间为，由牛二，有，定义迁移率为

相应的有，电子迁移率为，空穴迁移率为，

注意本征电导率

，，可见平均漂移速度与场强成正比（低场强情况下）

这样半导体材料中，总漂移电流密度可以表示为

半导体主要散射机制：

半导体载流子在做运动时会和格点原子、杂质原子（离子）和其他载流子发生碰撞，就是电子波在传播过程中受到散射

电子对载流子的加速作用只存在于连续的两次散射之间

晶格散射（声子散射）：晶格热振动破坏了理想周期性势场，导致载流子与晶格原子发生相互作用，单纯由晶格振动散射引起的关系为

不同频率的波在同一介质中的传播速度不同，就会造成色散

单原子链的振动

晶格振动具有波的形式——格波

在晶格振动中，保留相互作用能泰勒展开式子的第一项常数项和第三项二次项，而第二项为零（因为之前处于平衡）,这样就可以近似为简谐

设第n个原子受力为

那么其运动方程为：

对于简谐运动，其解为，当满足上面方程时结果成立

对于格波，其位置只能取格点位置为na，一个格波解表示所有原子同时做频率为的振动，不同原子存在相位差

格波相速度为，不同原子相位差，当量原子相位因子相差为时，两个原子因振动产生的位移相同，而相差时，两个原子有相反的位移

Q改变整数倍，格波描述的原子振动完全相同

两个临近原子之间的关联使得振动表现为行波形式，且允许频率不只是一个

为了保证是q的单值函数，将q限制在到之间，则在此区域外q不能提供更多不同的波，q的取值范围为布里渊区

色散关系：将解代入方程得到，，简化为，进一步化为

群速度为介质中能量传输速度，即为色散曲线的斜率。

（长波近似未整理）

玻恩-卡门条件（周期性边界条件）：有限原子核无限原子链的区别在于边界处原子所处状态不同，实际上，使用一些特殊边界条件计算有限原子链的振动谱，所得关系与所设边界条件无关，并且结果与无限长原子链结果相同，只是原来的连续谱变为分裂谱

，则，,，这样在布里渊区内，q只能有N个不同取值

在这样条件下，q空间的态密度，两个q值之间最小间隔为，也就是其密度为，二维晶体态密度为，三维晶体为

双原子链的振动：设相邻两种同种原子的间距为2a，甲原子质量为M，乙原子质量为m

此时格波的解：，，代入方程，得到色散关系，，化简为，

同样q存在布里渊区，双原子链的玻恩-卡门条件：，，，

与单原子链一样，q只能取N个不同的值，而每一个q对应两个频率ω+，ω-，因此，双原子链共有2N个格波。 即波矢数等于晶体原胞数，总格波数等于晶体自由度数

的长波极限分为光学波和声学波

光学波：原胞中两种原子振幅相反，长波近似时，原胞质心保持不动，可用光来激发

声学波：两种不同原子的振幅方向相同，声学波代表原胞质心的振动

半导体中格点原子的振动要引起载 流子的散射，称为晶格振动散射 。

电离杂质的库伦散射：

离化的杂质原子周围就会形成库仑势场 ，载流子因运动靠近后其速度大小和方向均会发生 改变，也就是发生了散射，这种散射机构就称作电 离杂质散射

单纯由电力杂质散射所决定的载流子迁移率随温度和总掺杂浓度的变化关系为：

而

迁移率：

半导体材料的电导率和电阻率：

在外加电场时，半导体材料中载流子漂移电流为：，这样可知电导率为，电子电导率，

电阻率为

对于非本征半导体材料的电导率主要由多数载流子的浓度及其迁移率决定

对于等能面试球形的半导体，电流密度和电场方向是一致，电导率是标量；对于导带中有几个对称的能谷的半导体，在每一个能谷中电子的电导率是张量，在计入各个能谷中电子总贡献时，电导率才是标量

对于Si，有椭球型能谷，沿主轴方向，设纵向迁移率为，横向迁移率为，则设三组能谷的电子浓度都为，则电流密度为，（r=x，y，z），进一步可表示为，这样电导率为标量，其中称为电导有效质量（证明空穴电导有效质量）

载流子的漂移速度饱和效应

载流子总的运动速度为随机热运动速度与定向漂移运动速度之和

在低电场时，载流子定向漂移速度远低于热运动速度，载流子平均自由运动时间主要取决于载流子热运动，这样载流子迁移率可以看做常数

当电场较强时，载流子定向漂移速度已经与热运动速度相当，这时载流子平均自由运动时间由二者共同决定，这样载流子平均自由运动时间将随外加电场增强而下降，使得载流子迁移率随着外加电场不断增大而下降，最终出现漂移运动速度出现饱和现象

对于GaAs晶体是个特例，其存在负微分迁移率的区间，这将导致负微分电阻特性，可用于振荡器电路设计。在低电场下，GaAs单晶材料导带中的电子能量比较低，主要集中在有效质量较小的下能谷，因而有较大的迁移率，而电场较强时，导带中部分电子被加速进入有效质量较大的上能谷，这部分电子迁移率下降，从而导致负微分迁移率的出现

载流子扩散运动

电子平均自由程定义为电子在一个自由运动时间通过的距离

单位时间通过某处界面沿着x轴运动的净电子流密度，沿z方向的电流密度为，为电子扩散系数，同样对于空穴有

这样半导体材料中四种电流机制：电子漂流电流、电子扩散电流、空穴漂移电流、空穴扩散电流

总的电流密度可以表示为，对于更一般的三维状况有

缓变杂质分布的影响

考虑一块非均匀掺杂的半导体材料，假设其处于热平衡状态，则最终费米能级在整块半导体材料中应保持为一个常数

此时多数载流子会从浓度高的位置流向浓度低的位置，同时留下内建电场，阻止电子的进一步扩散，此时达到平衡后，空间各处电子浓度不完全等同于施主杂质的掺杂浓度，但是差别不大

有热平衡状态下半导体材料费米能级保持为常数，因而非均匀掺杂半导体不同位置不同

热平衡状态下：非均匀掺杂将导致在空间的各个位置杂质浓度不同，从而载流子浓度不同。形成的载流子浓度梯度将产生扩散电流。并且由于局域的剩余电荷（杂质离子）存在而产生内建电场

内建电场形成的漂移电流与扩散电流方向相反，当达到动态平衡时，两电流相等，从而不表现处宏观电流，从而有迁移率与扩散系数之间的关系：爱因斯坦关系

当达到平衡时，空间各处电子能量E与电势之间满足关系：，定义各处费米势能为，根据泊松方程，半导体各处电场强度为

假设半导体材料满足玻尔兹曼近似和杂质完全电离的条件，那么，而是关于空间位置x的函数，所以也关于空间有函数关系

爱因斯坦关系：非均匀半导体在热平衡状态下，其内部电子电流和空穴电流都为零，有，假设仍然满足准电中性条件，即，将其代入方程，则可以得到爱因斯坦关系

载流子产生与复合

平衡态标志：半导体电子系统有统一的费米能级

电子和空穴的激发与复合达到了动态平衡，其浓度时恒定的，唯一由费米能级决定

非简并半导体平衡态判据

如果偏离平衡态，会向着新的平衡进行，如变化温度，光注入

载流子产生：一个价带电子激发到导带，形成一对可以参与导电的电子-空穴对

载流子复合：一个导带电子跃迁至价带

平衡为动态平衡

假设半导体中，电子和空穴的产生率分别为和，表示其单位时间单位体积激发产生的导带电子和价带空穴数，而对于导带和价带之间的产生过程，电子和空穴是成对产生的，即

类似的，有电子和空穴的复合率和，对于导带与价带之间的直接复合过程，也有，热平衡状态下，复合率等于产生率

电荷运输现象中，外场作用，只是改变载流子在一个能带中能级之间的分布，而没有引起电子在能带之间的跃迁，在导带和价带中载流子数目都没有改变，这种处于热平衡状态下的载流子浓度，成为平衡载流子浓度

半导体处于热平衡的判据式：

但是，在外界作用下（光注入和电注入），能带中载流子数目发生明显改变，即产生非平衡载流子，大多数情况下，非平衡载流子都是在半导体的局部区域产生，除了在电场作用下漂移运动还要做漂移运动

施加外界作用后，比平衡态多出来的载流子，称为过剩载流子，或非平衡载流子

设想一个n型半导体，若照射光光子能量大于禁带宽度，那么价带电子被激发到导带，使得导带比平衡多了电子，价带多了空穴，此时，且，其产生率可以记为和，而且

通常所说的非平衡载流子都是指非平衡少数载流子

当存在过剩载流子产生，半导体材料不再处于热平衡状态，有，过剩载流子也会不断复合，假设过剩电子和过剩空穴的复合率，分别为和，也有

小的电子和空穴浓度（相比于态密度）几乎不影响和产生率有关的占据几率

电子空穴复合率R：单位时间单位体积符合小时的导带电子和价带空穴数，复合率与导带中的占据态密度以及价带中的空状态密度有关，因此复合率与电子空穴浓度有关

在一块载流子均匀分布的半导体中，载流子数目随时间的变化率：，

以光注入非平衡载流子为例：

时，处于热平衡态

时，开始光照，产生附加产生率，此时

同时，载流子浓度升高，会导致复合率R上升，令净复合率为

这样产生总的效应：

之后一段时间后，撤去光照，附加产生率消失，此时，载流子浓度下降，并引起复合率的下降

一个导带电子和一个夹带空穴发生复合的速率与二者的浓度成正比，而复合的几率不随时间改变，因此有，其中，，其中只与温度有关，与浓度无关，其中，为热平衡时产生率

上面式子可以化简为：

小注入时，过剩载流子浓度远远低于热平衡时多数载流子浓度；大注入时，过剩载流子的浓度 接 近或超过热平衡时多数载流子的浓度。

对于非本征半导体，电子浓度和空穴浓度相差悬殊

小注入条件下，方程容易求解

考虑p型材料，则电子浓度可以忽略，有，那么可以计算得，，其中，为过剩载流子寿命（载流子数目变为原来的所需时间），而为过剩多数或者少数载流子

过剩少数载流子复合率，，注意过剩少数载流子寿命与多数载流子浓度有关

产生与复合的三种主要过程：

1. 带与带之间的产生与复合过程：电子在导带与价带之间直接跃迁
2. 通过产生-复合中心的间接产生与复合过程：非平衡载流子通过半导体中的杂质和缺陷在禁带中形成的复合中心的复合过程就是间接复合
3. 俄歇复合过程：电子与空穴复合时，将能量传递给另一个电子或空穴，使之跃迁复合的过程，是碰撞电离的逆过程

准费米能级：当外界的影响破坏了热平衡，此时不再具有统一的费米能级。可近似认为注入到能带内的非平衡电子在导带内是处于一种“准平衡状态”，准费米能级偏离费米能级的大小，亦即反映了必定偏离 热平衡状态的程度。它们偏离越大，说明不平衡情况越 显著；两者靠得越近越接近平衡态；两者重合时，形成 统一的费米能级，半导体处于平衡态。因此引进准费米 能级，可以更形象地了解非平衡态地情况。

霍尔效应：

霍尔系数，对于n型半导体，

霍尔电压为

进而可以得到迁移率，