1. **半导体物理，能带理论**

|  |
| --- |
| **基本理论** |
| * 固体三种基本类型：无定型；多晶；单晶（大多数半导体材料） * 单电子近似看待每个电子在平均势场运动，简化研究晶体电子能态，该理论称为能带论 * 共有化运动：原子组成晶体后，原子间同能级的电子在相邻原子间转移，其中外层最显著。半导体理论分析的核心 * 不同能级电子处于各自壳层，对应确定的能量，如下表：  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | | H | 1s1 |  |  |  |  | | He | 1s2 |  |  |  |  | | Li | 1s2 | 2s1 |  |  |  | | C | 1s2 | 2s2 | 2p2 |  |  | | Si | 1s2 | 2s2 | 2p6 | 3s2 | 3p2 |  * 对2个孤立原子靠近，考虑2s是一度简并，2p是三度简并（3个状态，容纳6个电子），2s分裂为2个能级，2p分裂为6个能级 * 每个2s最多容纳2个电子，每个2p最多容纳6个电子，推广至晶体（N个原子）则分裂成能带：一共可容纳8N个电子，分为上下两能带，各容纳4N，不与s/p对应。一共4N个外层电子，下能带填满为价带，上能带空，即为导带 * 满带不产生电流，内层能级占据满带；导体的能带是部分占满的；绝缘体和半导体能带类似；半导体受外界影响（光照、加热）之后，**在外电场的作用下**能导电，价带电子进入导带本征激发（区别于掺杂半导体导电）；金属和半导体最大差别是半导体的价带空穴和导带电子均参与导电 * 有效质量包含了半导体内部势场的作用 * 硅禁带宽度1.12eV，锗禁带宽度0.67eV，禁带宽度大于2.3eV即为宽禁带半导体，包括SiC，GaN等，禁带宽度大、热导率高、介电常数低、电子漂移饱和速度高 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **半导体电子状态** | | |
| **类型** | **波函数方程** | **E和k关系** |
| 自由电子 |  |  |
| 晶体中电子  （周期势场） |  | E(k)周期且为多值函数。近似求解E(k)（引出电子有效质量）。关键定义：    泰勒展开可以得到    能带顶有效质量为负值，能带底有效质量为正值 |
| 有限晶体  （边长L） | k分立，kx=2πnx/L，ky=2πny/L，kz=2πnz/L，  能级准连续，每个能带有N个能级，N是原胞数 | |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **缺陷（结构角度）** | | | | | |
| 点缺陷 | 空位、间隙原子  *（源于振动，而非杂质影响）* | | 弗仑克尔缺陷（间隙+空位原子） | | |
| 肖特基缺陷（空位原子） | | |
| 线缺陷 | 位错  *（也能产生施主受主，并可改变能带形状）* | | | | |
| 面缺陷 | 层错、晶粒间界 | | | | |
| **杂质（能级角度）** | | | | | |
| 单质 | 间隙式 | Li+在硅锗中  *（相对于硅体积很小）* | |  | |
| 替位式 | III/V族元素在硅锗中 | |  | |
| V族施主 |  |
| III族受主 |  |
| 从氢原子基态电离能E0和电子惯性质量m0可以推导： | | | |
| 深能级杂质对导电影响不如浅能级；  复合作用强于浅能级，也称复合中心（金） | | | | |
| 化合物 | GaP中掺杂氮N，取代磷P，该能级称为等电子陷阱，等电子杂质效应  虽然电中性，但由于电负性有差别，但能俘获载流子成为带电中心 | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **载流子统计分布思路** | | | | | | | | | | | | |
| 本征半导体n0/p0分析脉络 |  | | | | | | | | | | | |
| 杂质半导体nD+/pA-分析脉络 |  | | | | | | | | | | | |
| 费米能级EF | | | 费米分布  *（服从泡利不相容*  *简并性系统）* | | | | 玻尔兹曼分布  *（不服从泡利不相容*  *非简并性系统）* | | | | E和k关系 | |
| 系统的化学势，可以从EF确定某温度下各量子态的电子分布。可视为热力学平衡时，电子有1/2概率占据的假想能级（大于0K）。 | | |  | | | | 当E-EF>>k0T时，电子占据概率： | | | | 价带顶 | |
| 当EF-E>>k0T时，空穴占据概率： | | | | 导带底 | |
| **载流子统计分布计算** | | | | | | | | | | | | |
| 导带电子/价带空穴浓度n0/p0 | 非简并  *（EF与导带/价带很远）* | | | |  | | | | |  | | |
|  | | | | |
| 简并  *（EF与导带/价带很近）* | | | |  | | | | |
|  | | | | |
| 对某一半导体材料，无论本征或掺杂，浓度乘积只与温度有关， | | | | | | | | | | | |
| 本征半导体 | 高温下本征材料的载流子占主导，但性能不稳定  Ei是本征半导体费米能级，而非禁带中线 | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | | | | |
| 杂质半导体 | 电离施主/受主浓度 | | |  | | | | |  | | | |
|  | | | | |  | | | |
|  | | | | | | | | | | | |
| n型半导体  提高温度  *（分阶段讨论易于求解EF）* | | | 阶段 | | 原理 | | 电中性条件 | | | | 费米能级 |
| 低温弱电离区 | | 本征激发可忽略，载流子主要由杂质提供，也很少 | |  | | | | 起点    先上升再下降 |
| 中间电离区 | | 温度升高到EF=ED | |  | | | |  |
| 强电离区 | | 电子几乎全部来自于杂质 | |  | | | |  |
| 过渡区 | | 电子一部分来自于杂质，一部分来自于本征激发 | |  | | | |  |
| 高温本征激发区 | | 800K以上发生，n0>>ND，p0>>NA，本征载流子>>杂质电离载流子 | |  | | | |  |
|  | | | | | | | | |
| **简并半导体相关效应** | | | | | | | | | | | | |
| 重掺杂效应 | | 杂质浓度达到一定数量，载流子出现简并化 | | | | | | | | | | |
| 低温载流子冻析效应 | |  | | | | | | | | | | |
| 禁带变窄效应 | |  | | | | | | | | | | |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **非平衡载流子** | | |
| n型半导体非平衡载流子注入与复合 |  | |
|  |  | |
|  |  |  |

1. **PN结**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **PN结基本理论** | | |
| **制造方法** | 合金法、扩散法、生长法、离子注入法 | |
| **杂质分布** | 突变结  （合金结/浅扩散结） | 线性缓变结  （深扩散结） |
| **能带接触** | 能带的主体指的是电子的能量。当接触后凭空出现一个电场，由n指向p，本来n区电子到p区的同能带位置不需要克服能量，现在需要提高能量，则n区能带下降；反观p区能带上升。 | |
| 同样是硅材料的EcEv本来是相等的，但费米能级不等，接触后发生电子转移，势垒区弯折，直到EF趋于相等。对能带移动的能量角度理解：动力来自结合后的内建电场，内建电场使得p区电子能量上升，p区能带抬高；n区空穴能量上升（电子能量下降，n区能带降低）。      硅VD约0.7V，锗VD约0.32V | |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **PN结电学特性** | | |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **PN结击穿** | | |
| **类型** | **原理** | **推进击穿** |
| 雪崩击穿 |  | 势垒区厚，载流子充分加速 |
| 隧道/齐纳击穿 | 足够小 | 势垒区薄，杂质浓度高 |
| 热电击穿 |  | 结温高 |

1. **金半接触，MIS结构**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **金半接触基本理论** | | | | | | |
| 功函数 | 从费米能级到自由电子所需能量 | | | | | |
| 金属Wm | |  | | | |
| 半导体Ws | |  | | | |
| 电子亲和能 | 从导带底到自由电子所需能量 | | | | | |
| 半导体χ | |  | | | |
| 接触过程 | n型 | Wm>Ws |  |  |  |  |
| 接触前 | 连接，远距离 | 近距离 | 接触 |
| Wm<Ws |  | | | |
| p型 | Wm>Ws |  | | | |
| Wm<Ws |  | | | |

1. **氮化镓GaN**