**第一章：集成电路与器件概论**

晶体管：作为电路中的开关，是二进制编码的基础，施加一个负压，则负电荷会排斥电子

真空电子管的发展：1897年，布朗发明了第一个阴极射线管CRT；同年，汤姆生证明电子存在；加热金属物质，活跃于质子外围的自由电子容易游离，若此时施加正电压，游离电子就会流动，这样1904年，佛来明造出第一支二极真空管，阳极和阴极之间只允许电流从阳极流向阴极单向导通的特性被称为整流效应。

真空三极管：德福雷斯特将二极管加以改良，于1906年制造出第一支三极管，从此真空管的应用开始实现；在真空二极管内添加栅栏式金属网，就形成了真空三极管，第三个级称为栅极，栅极能够控制放大电信号，栅极上的微量电压信号能够控制一直阴极放射出的电子数量，所以阳极的波形与栅极完全一致，却具有比栅极信号更大的能量，栅极加低电位，则会排斥电子，加正电位，则会吸引电子加速。

电子管缺陷：十分消耗电能、灯丝容易烧断需要更换、体积大、重量重

1945年，贝尔实验室成立了以肖克莱为首包括布拉顿、巴丁等的半导体研究小组，他们研究了利用半导体材料制作放大器件的可能

微小电流少量变化对另外的电流产生很大影响，这就是“放大”作用。（在锗片的底面接上电极，在另一面插上细针并通上电流， 然后让另一根细针尽量靠近它，并通上微弱的电流，这样就会使原来的电流产生很大的变化。）

（加正电压）发射极、（加负电压）集电极、（锗晶体）基极，点接触电晶体，在基极和发射极之间输入一个弱信号，在基极和集电极之间的输出端，就放大为一个强信号了

1948年正式进入晶体管时代，在为点接触电晶体命名时，布拉顿根据它的电阻变换特性，取名为transistor，中文译为晶体管；1951年，西方电器公司开始生产商用锗点接触晶体管

点接触型晶体管缺点：噪声大、功率大时难以控制、适用范围窄，制造工艺复杂

肖克莱提出p-n接面制作接面晶体管的方法，称为双极型晶体管

1956年，富勒和赖斯发明了半导体生产的扩散工艺

场效应晶体管：1926年，Julius Lilienfeld描述了一种基于硫化铜半导体特性的三电极放大装置；1950年，贝尔实验室的卡恩和艾塔拉发明了金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）

1950年．西泽润一和渡边宁发明结式场效应晶体管（JFET）

1956年，通用电气公司发明晶闸管

1967年，卡恩和施敏制作了浮栅型MOSFET

晶体管是代替真空管的电子信号放大元件，被称为20世纪最重要的发明

1954年，贝尔实验室开发了第一台晶体管化的计算机TRADIC（第一个电子计算机，1946年ENIAC，使用真空管制作）

1952年，达默提出了集成电路的思想

集成电路（IC）

Jack Kilby （TI）集成电路之父

集成电路：在一个半导体材料上做多个电子元器件，用互联线将其连接起来，成为一个电子器件

硅谷发展：

1. 萌芽期：1891-1938
2. 晶体管时期：1939-1958，晶体管生产和晶体管技术
3. 集成电路时期：1959-1978，平面集成电路
4. 个人电脑时期：1971-1990，英特尔、苹果

肖克利：1956年获得诺贝尔奖并成立肖克利晶体管公司，吸引大量人才

八叛逆接受飞兆（仙童）摄影器材公司的资助于1957年创办飞兆半导体公司

1955年，安德鲁斯和邦德采用印刷技术中的光刻技术，使硅晶圆上地扩散窗口得以精准蚀刻

印制电路板（PCB）的发明者是奥地利人保罗·爱斯勒（PaulEisler），他于1936年在一个收音机装置内采用了印刷电路板。1943年，美国人将该技术大量使用于军用收音机内。1948年，美国正式认可这个发明用于商业用途。自20世纪50年代中期起，印刷电路版技术才开始被广泛采用。

（部分内容整理）

摩尔定律（戈登 摩尔提出）集成电路上的晶体管密度每两年就会翻倍

摩尔第二定律（岩石定律）：制造这些设备的成本每4年翻一番

平面工艺：在Si半导体芯片上通过氧化、光刻、扩散、离子注入等一系列流程，制作出晶体管和集成电路；器件和电路都在芯片表面一层附近处，整个芯片基本平坦；制作出的晶体管成为平面晶体管

晶片准备平面工艺封装测试

晶体生长：晶圆切、磨、抛（直拉法、区熔法、外延法）

平面工艺流程：

1. 准备：准备单晶硅片（平整，无缺陷），硅片表面清洗
2. 氧化：在硅片两面形成氧化层（薄膜生长），为后续磷扩散做准备，热生长一层氧化层作为扩散的掩蔽膜
3. 涂胶：在氧化层上涂上光刻胶（正胶），光刻胶可分为负性胶和正性胶，光照后形成不可溶物质的微负性胶，反之形成可溶性物质的微正性胶，涂胶后有个加固过程叫烘烤
4. 曝光：在光刻胶上放上掩膜版，最后曝光形成的窗口最终成为pn结二极管的位置
5. 显影：使用显影液除去曝光后硅片上应去掉的那部分光致蚀剂，再进行烘烤坚膜，除去多余光刻胶
6. 腐蚀：光刻胶有一定抗腐蚀能力，这样腐蚀只会破坏没有光刻胶处的氧化膜；腐蚀液只能对二氧化硅膜、铝膜、铬膜起腐蚀作用，而对硅和其他材料无作用（控制腐蚀速度和时间），常采用氢氟酸-氟化铵缓冲腐蚀液
7. 去胶：溶剂去胶；氧化去胶；等离子去胶
8. 杂质扩散：
9. 驱入：硅片经过适当清洗后，进行杂质再分布，形成pn结
10. 外延：
11. 隔离
12. 金属化：在外层覆盖金属，使得器件与外部连接起来，有多种方法
13. 封装：

半导体器件发展最新进展：

半导体相关历史：

**第二章：晶体结构与缺陷**

半导体分为元素半导体和化合物半导体

固体材料主要结构类型：晶体（单晶体、多晶体）、非晶体、准晶体、纳米晶体

晶体结构：粒子在固体中的空间排列方式成为晶体结构

空间点阵（布喇菲点阵）：晶体内部结构可以概括为一些相同的点子的有规律周期性无限分布，点子可以是原子、离子、分子或其他集团的重心

结点代表结构中相同的位置，每个结点周围情况一样，通常代表基元的重心

基元：重复排列的具体基本结构单元称为基元

（基元+点阵=晶体结构）

布喇菲格子：

晶格：通过点阵中的结点可以做很多平行的直线族和平行的晶面组，点阵就成为一些网格，称为晶格

把晶格基元抽象为一个几何点，点的集合称为布喇菲点阵或布喇菲格子，如果其完全由一种相同的原子组成就称为布喇菲格子，如果晶体的基元包含两种或两种以上的原子，称为复式格子，每个基元中相应的同种原子各构成的和结点相同的网格称为子晶格

原（晶）胞：晶体的最小重复单元，对于简单晶格，可以利用三个位置矢量的叠加表示任意原子的位置，对于复式晶格，则还需要加上原胞中其相对位置

固体物理学原胞：原胞最小重复单元，结点只在顶角上，内部和面上不含其它结点，固体物理学原胞只含一种原子，基矢一般用表示

结晶学原胞：为了反映晶体的周期性和对称性，取最小重复单元的几倍作为原胞，结点不仅在顶角上，也可在体心和面心上，基矢一般用a,b,c表示

几种简单晶体结构：简立方结构；体心立方结构；面心立方结构；金刚石与闪锌矿（金刚石结构的顶角和面心为硫离子，内部为锌离子）结构（注意个别原子的不等价）；密积结构（立方密积结构ABCABC；六角密积结构ABAB）（注意其固体物理学晶胞和怎样取固体物理学原胞和结晶学原胞基矢）

配位数：晶体中一个原子最近的临近原子数目，反映了粒子排列的紧密程度

晶向和晶面：

（未整理）

**第三章：固体理论基础**

**第五章：半导体中载流子的输运现象**

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

（未整理）

电离杂质的库伦散射：

（未整理）

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：

少数载流子浓度！！！！