

Z
N 6075
2

晶体管原理及工艺



国营江南无线电器材厂

前 言

我们遵照伟大领袖毛主席关于“走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路”的教导，自一九七一年以来，陆续开办了有关半导体方面的技术短训班，从工人中培养了一批技术骨干。

我们结合本厂的生产实际，参考国内有关兄弟单位的图书资料，编写了这本《晶体管原理及工艺》教材。

在编写过程中，根据教学需要，侧重于半导体的基本概念和生产工艺的介绍。有关晶体管设计中所碰到的主要数据和参量，采用查图表的方法获得的。

由于水平所限，此材料不可避免地会出现许多谬误和不当之处，希读者批评指正。

毛主席语录

马克思主义的哲学辩证唯物论有两个最显著的特点：一个是它的阶级性，公然申明辩证唯物论是为无产阶级服务的；再一个是它的实践性，强调理论对于实践的依赖关系，理论的基础是实践，又反过来为实践服务。

同样，工人也是这样，以工为主，也要兼学军事、政治、文化。

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

第一章 半导体基础知识	1
第一节 什么是半导体	1
1—1 什么叫半导体.....	1
1—2 空穴是怎样导电的.....	3
第二节 半导体的导电性	5
2—1 两种类型的杂质—施主和受主.....	5
2—2 少数载流子和多数载流子.....	7
2—3 载流子的迁移率.....	7
2—4 平衡载流子与非平衡载流子.....	9
2—5 非平衡载流子的注入、扩散、复合、寿命 和俘获.....	9
第三节 PN结及其性质	12
3—1 什么是PN结.....	12
3—2 PN结中的载流子扩散.....	12
3—3 PN结能带及势垒.....	14
3—4 两种类型PN结—突变结与缓变结.....	16
3—5 PN结的伏安特性.....	17
3—6 PN结的击穿.....	18
3—7 PN结的电容.....	22
第二章 硅单晶的制备及参数测量	34
第一节 直拉法生长硅单晶的简介	34
1—1 单晶, 多晶和籽晶.....	34

1—2	拉单晶	34
1—3	拉单晶的主要设备及原料	35
第二节	拉晶前的准备工作	35
2—1	清洁处理	36
2—2	硅单晶电阻率与掺杂技术	37
2—3	装炉	39
2—4	加热熔化	39
第三节	直拉法生长硅单晶的工艺过程	39
3—1	下种	40
3—2	收颈	40
3—3	放肩	41
3—4	等径生长	41
3—5	收尾拉光	41
第四节	硅单晶的物理测试	43
4—1	单晶体的检验	43
4—2	晶体的取向	44
4—3	位错的观察	45
4—4	导电类型的测定	47
4—5	电阻率的测量	48
4—6	非平衡少数载流子寿命的测量	50
4—7	影响晶体质量的其他参数的探索问题	52
第三章	外延工艺	53
第一节	外延工艺和原理	54
1—1	基本原理	54
1—2	外延设备	55
1—3	外延工艺	59

第二节	外延生长的原理及层错的形成	62
2—1	生长的原理	62
2—2	层错的形成	64
第三节	外延层的检验	65
3—1	电阻率的检验	65
3—2	外延层厚度的测量	68
3—3	层错(位错)的测量	69
3—4	夹层的检验	70
第四节	外延时出现的问题及解决的方法	72
4—1	外延层的电阻率与厚度的均匀性	72
4—2	夹层的产生	73
4—3	外延层的缺陷	74
第四章	晶体管的基本结构	77
第一节	合金管	78
第二节	平面管	79
第五章	制版技术	81
第一节	概念	81
1—1	制版的意义	81
1—2	光刻掩膜版应该满足的要求	81
1—3	制版的工艺流程	82
第二节	原图的制备	82
2—1	原图制备的方法	82
2—2	刻图的工艺过程	83
第三节	初缩	84
3—1	初缩机的主要装置及其要点	84

3—2	成象原理及物镜的选择	85
3—3	初缩工艺过程	86
第四节	精缩分步	87
4—1	精缩分步机的结构	88
4—2	精缩分步工艺的操作过程	88
4—3	精缩分步中问题的讨论	90
第五节	明胶版复印	91
5—1	意义及原理	91
5—2	复印的要点	91
第六节	显影、定影工艺	92
6—1	显影液的成分及作用	92
6—2	影响显影效果的主要因素	94
6—3	显影液的配制及使用	95
6—4	停显液、定影液配方及使用	96
第七节	超微粒干版的制备	97
7—1	超微粒干版(明胶版)的简介	97
7—2	超微粒干版的制备	97
7—3	制备超微粒干版的点滴体会	99
第八节	真空蒸铬	101
8—1	蒸铬的原理和蒸发系统	101
8—2	蒸发的工艺过程	102
第九节	铬版复印	103
9—1	铬版复印的原理	103
9—2	铬版复印的工艺流程	103
第六章	氧化扩散工艺	106
第一节	氧化原理及氧化方法	106

1—1	平面晶体管中二氧化硅层的作用	106
1—2	SiO ₂ 的形成方法和原理	108
1—3	氧化层厚度的测量	113
1—4	氧化工艺中的一些质量问题	114
第二节	扩散原理及扩散方法	116
2—1	概述	116
2—2	扩散方法的介绍	120
2—3	扩散的基本原理	129
2—4	扩散中的一些实际问题的讨论	143

第七章 光刻技术

第一节	光刻胶	149
第二节	光刻工艺流程	151
2—1	硅片的清洁处理	151
2—2	涂胶	152
2—3	前烘	153
2—4	对准与曝光	153
2—5	显影与坚膜	154
2—6	腐蚀	154
2—7	去胶检查	156
第三节	问题讨论	156
3—1	影响光刻分辨率的因素	156
3—2	浮胶	158
3—3	钻蚀	158
3—4	针孔	159
3—5	小岛	160
第四节	投影曝光和电子束曝光简介	160

4—1	投影曝光法	161
4—2	电子束曝光法	162
第八章 欧姆接触		163
第一节	什么是欧姆接触	163
第二节	两种欧姆接触	164
第三节	真空镀膜	165
3—1	真空蒸发	165
3—2	合金	167
3—3	蒸发铝时常出现的问题及讨论	169
第四节	溅射技术	170
4—1	高频溅射	171
4—2	等离子溅射	172
第五节	烧结	173
5—1	银膏烧结	173
5—2	合金法烧结	174
第六节	引线焊接	175
6—1	热压焊接引线	176
6—2	超声键合连接引线	177
第九章 晶体管参数及测量		180
第一节	晶体管原理和特性	181
1—1	晶体管的放大原理	181
1—2	晶体管的伏安特性曲线	184
第二节	晶体管的放大特性参数	187
2—1	共基极电流放大系数 α	188
2—2	共发射极电流放大系数 β	188

2—3	怎样提高电流放大倍数	189
2—4	功率增益 K_P	191
第三节	晶体管的频率特性参数	192
3—1	基极电阻 γ_{bb}'	193
3—2	集电结电容 C_C	194
3—3	特征频率 f_T	195
第四节	晶体管的极限参线	197
4—1	P—N结的雪崩击穿机理	197
4—2	击穿电压 BV_{cbo} , BV_{ceo} , BV_{cso} 的测量	198
4—3	如何提高击穿电压	200
4—4	二次击穿简介	202
4—5	集电极最大允许电流 I_{CM}	205
4—6	集电极最大允许耗散功率 P_{CM}	206
第五节	集电极—发射极间饱和压降 V_{CEs}	208
第六节	晶体管的开关参数	210
第七节	晶体管的噪声系数	213
第十章	射频频功率晶体管的设计	216
第一节	设计总则	216
第二节	管芯设计	218
第三节	管壳设计	231
第四节	工艺设计	233
	附 录	237

第一章 半导体基础知识

第一节 什么是半导体

1-1 什么叫半导体

作为无线电技术的“心脏”——晶体管是用半导体材料做成的，那么什么叫半导体呢？

大家知道，世界是由物质构成的，物质按导电的性能分为三类：导体，绝缘体，半导体。

容易导电的物质称为导体，如金、银、铜、铝等各种金属与合金都是良导体，它们的电导率在 $10^5 \sim 10^8$ 欧姆⁻¹·厘米⁻¹ 范围内；反之，不容易导电的物质称为绝缘体，如橡皮、玻璃、陶瓷和塑料等都是绝缘体，它们的电导率在 $10^{-15} \sim 10^{-10}$ 欧姆⁻¹·厘米⁻¹ 之间。电导率介于上面两种物质之间的固体称为半导体。譬如：锗、硅、砷化镓，大多数金属氧化物都属于半导体。

我们知道，世界上的物质都是由分子组成的，分子是由原子组成的，原子又是由电子和原子核组成的。从原子的排列的形式来看，可以把物质分成晶体和非晶体两大类。绝大多数半导体都是晶体，他们通常具有特殊的外形。

现在我们进一步从物质的内部特性来看半导体与金属，绝缘体的区别。和原子中的电子一样，晶体中的电子并不是可以具有任何能量的，电子的可能能量是一些不连续的分裂数值，每一分裂值称为能级。晶体中电子的全部能级按其所占的能量

可分为许多组，每一组中能级的数目常常恰好等于构成晶体的原子数，或是它的整数倍，可见能级的数目是非常多的（因为体积为一立方厘米的晶体中含有的原子数在 10^{22} 到 10^{23} 个）。能级数目虽然这样多，一组能级所占的能量范围都是很小的。由此可见，在同一组中能级间的距离很小，使得在一组中能级几乎可看作在一个范围（带）内连续变化的。一组能级称为能带。

一个能带和相邻一个能带之间的能量间隔内没有能级，电子不能存在于这个能量间隔中。这一能量范围称为禁带，禁带的能量间隔称为禁带宽度，用电子伏的能量单位表示。图 1 中示意地表示出电子在晶体中的能级、能带情况。图中能级上画一黑点表示这一能级上占有一个电子。每个能级上就象双人座位一样，只能容纳两个电子。各个原子内层的电子受原子核束缚较紧，因此能量较小，它们处于下面的一些能带，而参与导电的价电子则处于比这些能带高的一个能带。金属与绝缘体或半导体的主要区别就是：在金属中价电子的能带未被填满，而绝缘体和半导体中，这一能带恰好被全部价电子填满。这个能带称为满带。而一群电子如果填满一个能带，那么它们是不会产生电流的。这就与公路上停满了汽车，交通阻塞，汽车就无法通行一样。所

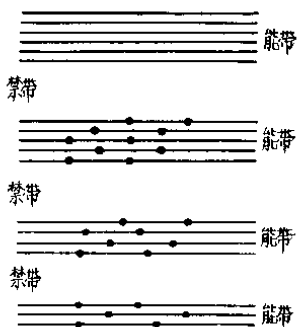


图 1 电子在晶体中的能级、能带情况

图 1 中示意地表示出电子在晶体中的能级、能带情况。图中能级上画一黑点表示这一能级上占有一个电子。每个能级上就象双人座位一样，只能容纳两个电子。各个原子内层的电子受原子核束缚较紧，因此能量较小，它们处于下面的一些能带，而参与导电的价电子则处于比这些能带高的一个能带。金属与绝缘体或半导体的主要区别就是：在金属中价电子的能带未被填满，而绝缘体和半导体中，这一能带恰好被全部价电子填满。这个能带称为满带。而一群电子如果填满一个能带，那么它们是不会产生电流的。这就与公路上停满了汽车，交通阻塞，汽车就无法通行一样。所

以在金属中，价电子能带中的电子能够参加导电运动，它的电导率很高。而在温度极低时，半导体和绝缘体中虽然有许多电子，却不能导电。

那么半导体和绝缘体又有什么区别呢？原来在满带顶上隔着有限能量 E_g 有对应于价电子激发态的导带，这是一个空带。半导体和绝缘体的区别就是禁带宽度 E_g 不同，半导体的禁带宽度小，绝缘体的禁带宽度大。如：碳的 $E_g \approx 6$ 电子伏特，硅的 $E_g \approx 1.10$ 电子伏特，锗的 $E_g \approx 0.68 \sim 0.72$ 电子伏特。因此，锗和硅在绝对零度 0°K ($= -273^\circ\text{C}$) 时，电导率为零，当温度上升后，满带内的电子，由于热激发，跃进到导带，使导带内有一些电子，电导率随之增加，这就是半导体。而碳的 E_g 很大，热激发的电子很少，所以电导率很小。

还有一个现象值得大家注意，当电子受热或光激发到导带时，满带会形成电子的“缺少状态”。设电子电荷为 $-q$ ，失去一个电子，而留下的空位可以看成是一个带 $+q$ 电荷的粒子，因而称为空穴。锗和硅就是依靠电子和空穴导电的。它们的区别是：电子带 $-q$ 电荷，在外加电场时，电子的运动方向与电场方向相反；空穴带 $+q$ 电荷，在电场作用下，空穴是顺着电场方向运动的，电子和空穴都称为载流子。

1—2 空穴是怎样导电的

上面说过，当一个电子从满带激发到导带中一个能态时，在满带中留下一个空态。在半导体情形中这相当于一个破裂键，硅晶体的如图 2 所示，这个空态叫做一个空穴。显然跃迁到导带中去的每一个电子都造成一个空穴。因为满带中的一个空穴实质是一个没有充填的能态，满带中的一个电子可以进入到这个空穴中而产生另一个空穴。这种过程可以不断重复，满

带电子每填充一个空穴就产生另一个空穴。因此在满带中有可能发生电导。

我们可以把这种导电过程看成是空穴的运动比看成是电子的运动更为方便，即空穴在电子运动的相反方向

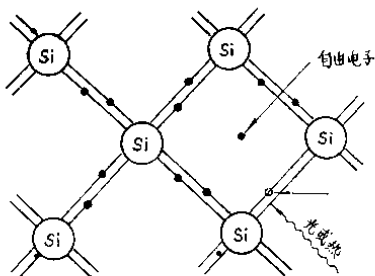


图 2 破裂键产生一个电子空穴对

上运动。这种现象可以加以简化，例如：设想有许多价电子排列成一列，列中有一个电子缺额，如图 3 所示，缺额电子代表着一个空穴；当每个相邻电子向左移动去填充空穴时，空穴则向右运动，如图 3 (b)。在一连串的电子跃迁之后，空穴已经运动到很远的右边如图 3 (c)。运动造成了负电荷向左边迁移，或者实际上造成正电荷向右边迁移。所以空穴的运动不用带负电的电子的运动来说明，而用正电荷的运动来模拟。

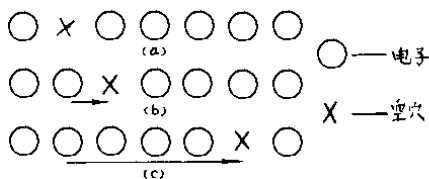


图 3 空穴电导的模拟

总之，在室温下，一块纯净的半导体中有许多个电子被激发到导带去，在满带中，留下相同数目的空穴。而且空穴及电子分别作为正电荷及负电荷对电导作出贡献。

第二节 半导体的导电性

半导体的电导率除了其数值在一定的范围以内，此外，还有一个特征，就是强烈地依赖于内部结构并随外界条件而有明显的变化；相同的半导体，由于晶体结构完整性的程度不同，电导率往往有明显的差别；温度增加或有光照射，半导体的电导率往往剧烈增加。正是这些独特的性质，使半导体得到极为广泛的应用。下面谈一谈半导体为什么有这些性质。

2-1 两种类型的杂质——施主和受主

理想的完全没有别种元素(杂质)和缺陷的半导体称为本征半导体。如图4(a)所示，如果我们在半导体锗或硅中掺入少量的非锗、非硅元素，这种非锗非硅的元素，我们称它们为掺入锗或硅中的杂质。

加到半导体里的杂质可以分为两种类型：一种叫做施主杂质，将它加到半导体中去后，杂质原子能给出电子，使半导体中产生许多带负电的电子，如在硅中磷、砷等五族元素称为施主杂质，杂质原子本身由于失去电子而带正电。另一种叫做受主杂质，在加有受主杂质的半导体中，由于受主杂质原子能接受电子，致使半导体中产生许多带正电的空穴，如在硅中硼、铝等三族元素称为受主杂质。受主杂质原子接受电子，而带负电。

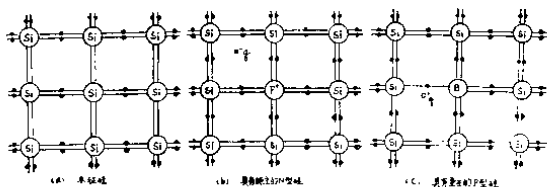
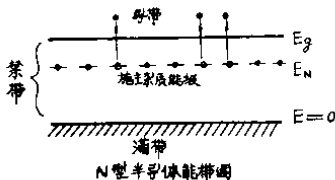


图 4 半导体的三种类型

掺有施主杂质的半导体叫做电子型半导体，通常称作N型半导体；掺有受主杂质的半导体叫做空穴型半导体，通常称作P型半导体。



有施主能级和受主能级的半导体可用图 5 表示：

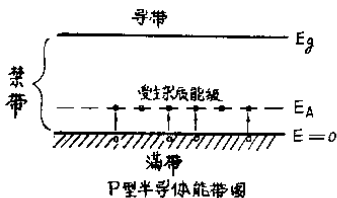


图 5 有施主受主杂质能级的半导体能带图

半导体的电导率随温度的变化，一般是非常激烈的。这主要是载流子浓度随温度有剧烈的变化。温度增加，施主杂质能级中的电子激发到导带，载流子浓度增加，致使电导率增加。

2-2 少数载流子和多数载流子

N型半导体中的电子和P型半导体中的空穴，都是带电的粒子，它们像金属导线中的自由电子一样能够传输电流，使电流通过半导体。因此我们把半导体中的电子和空穴都叫做载流子。

在N型或P型半导体中，都包含着电子和空穴这一对矛盾。毛主席教导我们：“矛盾着的两方面中，必有一方面是主要的，他方面是次要的。其主要的方面，即所谓矛盾起主导作用的方面。事物的性质，主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的。”在N型半导体中，电子很多，空穴很少，发生传导电子导电的现象，其电子处于支配地位，是矛盾的主要方面。所以电子称为多数载流子，空穴称少数载流子；在P型半导体中空穴很多，电子很少，带来了空穴导电的现象，这时空穴处于支配地位，是矛盾的主要方面，所以称空穴为多数载流子，电子为少数载流子。

2-3 载流子的迁移率

半导体的电导率，除了决定于载流子浓度以外，还和载流子在电场作用下的运动速度有关。在电场作用下，载流子除了无规则的热运动外，还在电场方向上获得了附加的漂移速度 V_0 。载流子在和原子碰撞时就失去了这种定向的漂移速度，重新又开始作混乱的热运动，然后又在电场的作用下被加速，这样一直继续下去，使各个载流子在电场作用下都取得了同一方向的附加运动，即漂移运动，从而使半导体表现出电流效应。这种电流称为漂移电流。

载流子的漂移速度 V 与电场强度 E 成正比

$$V = \mu E$$