

新技术简介丛书

可控硅



305.2/4033



科学出版社

内 容 简 介

在六十年代迅速发展起来的可控硅整流元件，是电子技术中一种新型的大功率半导体器件。它比电动机-发电机组、闸流管、引燃管、磁放大器等旧式可调节的整流设备，具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、运行中无噪声、无毒、无磨损、无须预热、使用维修方便等显著优点，并具备一系列新的可贵的功能。目前它在广播、调光、造纸、有色冶炼、轧钢可逆拖动、机床无级调速、电机励磁、电力牵引、电炉控温、印染、石油钻井、化工及国防等许多方面得到广泛应用，显示出极大的优越性，它已成为弱电控制与强电输出之间的得力桥梁。

本书主要介绍半导体、p-n 结、多晶、单晶、可控硅等基本概念，对多晶、单晶的制取，可控硅的制造，它的特点、广泛用途、基本参数以及新发展也作了简要的叙述，以使广大工农兵、革命干部、革命知识青年在这方面有个初步的了解。

可 控 硅

科 学 出 版 社 出 版

北京西直门外三里河路2号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1970年12月第一版 1971年1月第二次印刷

统一书号：15031·2

本社书号：6·15-7

定 价： 0.11 元

原书缺页

原书缺页

原书缺页

原书缺页

实际器件对电阻率的不同要求来对杂质掺入的数量进行严格的控制。如果掺杂过多,载流子数目太多,导电能力大大提高,电阻率大大下降,变成导体了,就失去了半导体的作用。

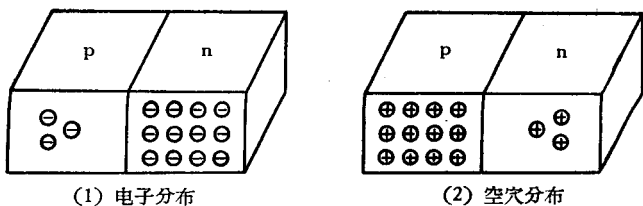
综上所述可以列成下表:

类 型	特 点	取 得
P 型半导体	空 穴 导 电	掺入杂质如: 硼、镓、铝等三价元素
n 型半导体	电 子 导 电	掺入杂质如: 磷、砷、锑等五价元素

什么是 p-n 结?

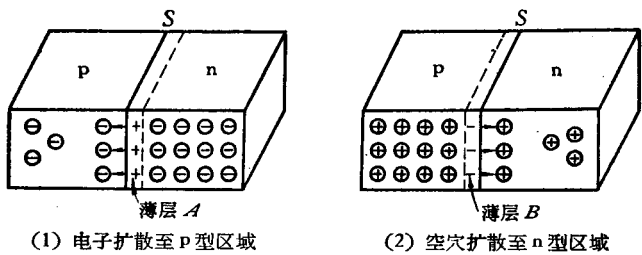
如果在 n 型(或 P 型)半导体上,用一定的工艺方法再形成一层 P 型(或 n 型)半导体,那么,我们就将 P 型层与 n 型层相互交界的地方叫做 p-n 结。p-n 结具有很特殊的导电性能:单向导电性。要是外加电压在 P 型半导体一端接正极, n 型半导体一端接负极,则有较大的电流通过负载,这个电压就叫做正向电压;反之,当在 P 型半导体一端接外加电压负极, n 型半导体一端接外加电压正极,则只有很小很小的电流通过负载,这个电压就叫做反向电压。

p-n 结为什么具有这种特殊的导电性能,“**内因是变化的根据**”。如前所述,在 P 型半导体中,带正电荷的空穴是多数载流子,起主要的导电作用,而带负电荷的电子是少数载流子;在 n 型半导体中,带负电荷的电子是多数载流子,起主要的导电作用,而带正电荷的空穴是少数载流子。当一块半导体中,如果一边是 n 型半导体,另一边是 P 型半导体,则在 n 型半导体里面,电子的浓度远远超过了空穴的浓度,而在 P 型半导体里面,空穴浓度远远超过电子的浓度(图 1)。由于这



(1) 电子分布 (2) 空穴分布
图1 p型半导体和n型半导体中电子和空穴的分布图

种不均匀的浓度分布，而载流子受热运动的影响，力图使其分布均匀，因此，n型区域内的电子就向p型半导体一边扩散，扩散的结果，n型区域中邻近p型区域一边的薄层A中有一部分电子扩散到p型区域中去了。由于薄层A失去一些电子，因此变成带正电(图2(1))。同样，p型区域中邻近n型



(1) 电子扩散至p型区域 (2) 空穴扩散至n型区域
图2 载流子在半导体中的扩散

区域一边的薄层B中有一部分空穴扩散到n型区域一边去了，结果使薄层B带有负电(图2(2))。上述的电子和空穴的扩散是同时进行的，所以薄层A和B同时产生于n型和p型界面S的两侧。

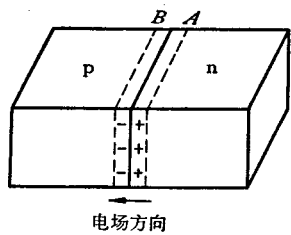


图3 载流子扩散产生的电场

由于电子和空穴扩散的结果，使薄层A带正电，薄层B带负电。因此在A、B间产生一个电场的方向是由

n型区域指向P型区域的，它阻止电子从n型区域进入P型区域，阻止空穴从P型区域进入n型区域。也就是说，电场阻止扩散作用的进行。当达到平衡状态时，n型区域的电子和P型区的空穴不再减少了，薄层厚度也不再增加。上述的薄层称为阻挡层，由它即构成了p-n结，它阻止扩散作用的进行。

当p-n结加上正向电压时(图4)，外加电源在p-n结中所产生的电场的方向恰好同p-n结原来存在的电场方向相反。因此，p-n结中原来的电场被削弱，阻挡层变薄，电阻很小，流过很大电流。

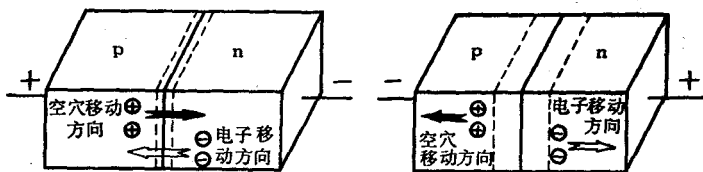


图4 外加正向电压时阻挡层变薄

图5 外加反向电压时阻挡层变厚

相反，当在p-n结上加上反向电压时(图5)，阻挡层变厚，电阻大大增加。只有少数载流子能穿过p-n结，故流过的电流很小。

利用p-n结的这种单向导电性能可以制成半导体整流器、二极管等器件。又利用几个p-n结之间相互作用，进一步可以制成三极管及可控硅等器件。

什么是多晶硅和单晶硅？

半导体材料硅是一种晶体。

硅晶体又有单晶体和多晶体之分。所谓单晶体就是从晶体内部构造来看，原子的排列是严格、整齐、一致的，整个晶体

到处都完全均一,也就是说由一个晶核有规律地长大而形成。晶核就是形成晶体的基本粒子,实际上就是微小的单晶体。多晶体由很多“微小的单晶体”杂乱无章地组合而成,也就是说是由许多晶核杂乱无章长大组合形成的。

多晶硅是不能直接用来作半导体器件的,这是因为半导体材料特性与晶体结构的完整程度有很大关系。多晶硅是由很多“微小的单晶体”杂乱无章地组合而成,每个“微小的单晶体”的原子结构是一样的,由于是杂乱无章地组合,无一定规律和一定方向,因此,从总的晶体来看,原子排列是混乱的,晶体结构是不完整的,严重地破坏了它的半导体性能。所以,能用作半导体器件的就是单晶硅。

单晶硅可以由多晶硅加工控制得到,通常叫“拉单晶”。

怎样制取多晶硅?

从原料——石英石到生产出半导体元件,大体要经过以下几个主要步骤:

1. 石英石(主要成份是二氧化硅 SiO_2) 用碳(或石墨)还原,去掉其中的氧(O_2),获得含硅(Si) 97% 以上的粗硅(也有称作硅铁或硅石的);
2. 粗硅经一系列化学反应和提纯,获取多晶硅;
3. 由多晶硅控制单晶硅,在控制的过程中加入适当种类和数量的杂质,得到 n 型硅半导体或 P 型硅半导体;
4. 利用 n 型硅半导体和 P 型硅半导体制成元件,例如二极管、三极管、可控硅等等。

文化大革命以前,大叛徒、大内奸、大工贼刘少奇,推行了一整套反革命修正主义路线,阻碍和扼杀了电子工业的发展。

在伟大领袖毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命取得决定性胜利之后,我国工人阶级遵循毛主席关于“**我们不能走世界各国技术发展的老路,跟在别人后面一步一步地爬行**”的伟大教导,破除迷信,解放思想,大搞综合利用,土法上马,以大跃进的速度生产出大量合乎要求的多晶硅,为我国电子工业的发展作出了巨大的贡献。

目前,生产多晶硅的方法基本有三种:四氯化硅氢还原法,三氯氢硅氢还原法和硅烷法。

一、四氯化硅氢还原法

将粗硅(含硅 97%以上,其余为杂质)通以氯气(Cl_2),得到四氯化硅(SiCl_4),但它是不纯净的,含有多种杂质,必须设法除去,提纯四氯化硅。然后将提纯的四氯化硅与经过净化了的高纯度氢气(H_2)在还原炉内发生还原反应,从而制取多晶硅,其简要生产流程如图 6 所示。

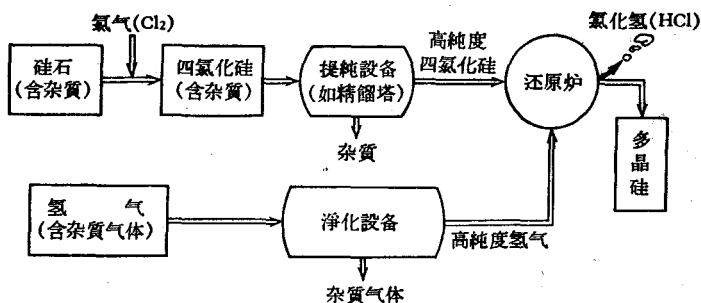


图 6 四氯化硅氢还原法基本流程

对四氯化硅的提纯是很重要的一环。提纯方法也分三种。

1. 精馏法: 精馏法原理是根据四氯化硅与杂质具有不同挥发能力(即沸点不同)的特性, 控制提纯设备——精馏塔的温度, 从而除掉杂质。一般分两步, 首先经过粗馏(用不锈钢或碳钢作成粗馏塔), 除去较易除去的杂质, 如铁、钛、铝等, 然后再精馏(用石英筛板塔或不锈钢塔), 除去更难除去的杂质, 获得高纯度四氯化硅。

这种方法不需引进任何试剂, 设备简单, 大部分杂质都能较彻底地清除。但对硼、磷等杂质的彻底清除有一定困难, 不过实践证明, 精馏法提纯后的纯度是能满足要求的。

2. 固体吸附法: 利用有效的吸附剂(如各种活性炭、水合氧化物和硅酸盐等), 将四氯化硅中所含的杂质吸附, 从而提纯了四氯化硅。此法除去杂质的效果较好, 能克服精馏法提纯的不足, 更有效地除掉硼、磷等难除杂质。缺点是生产不方便, 效率较低。因此目前用得较多的是精馏法, 固体吸附法可作为精馏法的补充, 以改善提纯效果。

3. 萃取法: 这种方法虽然有一定效果, 但要用大量高纯度萃取剂, 成本较高, 且萃取剂多用无水的高浓度酸, 劳动条件较差, 操作复杂, 因此一般很少用。

要获得高纯度多晶硅, 还必须把氢气净化, 除去氢气中含的氧、水汽、二氧化碳、氮等杂质气体。所用方法很多, 一般用吸附法, 利用活性炭、活性铜等吸附剂, 或用分子筛、细菌过滤器等设备提纯氢气。

提纯后的四氯化硅和氢气通入还原炉进行还原反应, 用钼丝作载体(也可用高纯硅作载体), 通电流加热钼丝(温度 $1100\text{—}1200^{\circ}\text{C}$), 被还原的硅便在钼丝上生长, 经过一定时间, 长成带有钼芯的多晶硅棒, 将钼芯与硅棒分离取出, 即获多晶硅。若用高纯硅作载体就不用分离了, 但需预先将硅芯高压击穿, 需增加高压击穿设备。

二、三氯氢硅氢还原法

三氯氢硅氢还原法基本原理和流程(图7)与四氯化硅氢

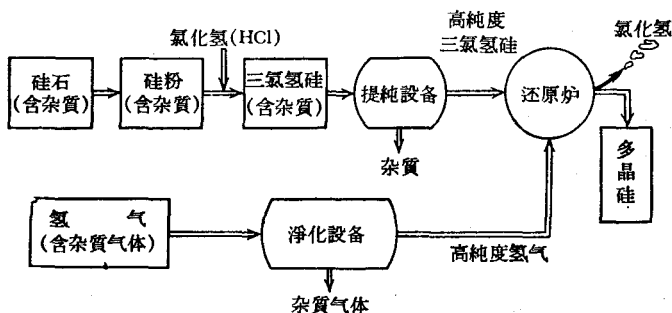


图7 三氯氢硅氢还原法基本流程

还原法大体相同,区别在于中间化合物是三氯氢硅(SiHCl_3)。将硅石用粉碎机捣碎成硅粉,然后通以氯化氢(HCl)气体,得到三氯氢硅。再将三氯氢硅提纯除去杂质,方法也与四氯化硅的提纯相同(如用精馏法等),由于三氯氢硅与所含杂质的挥发能力相差更大,所以除去硼、磷等杂质的效果更好。三氯氢硅氢还原法的优点是生长多晶硅的速度快,生产周期短。

三、硅烷法

硅烷是指硅氢化合物——甲硅烷(SiH_4)而言。它在 600°C 以上就可分解成硅和氢气,硅烷法就是利用这一特性,直接加热硅烷,使之分解,获取多晶硅(图8)。

生产硅烷的方法很多,用得较普遍的是硅合金法。首先在干燥的氯化铵(NH_4Cl)和硅化镁(Mg_2Si),由加热镁及硅粉

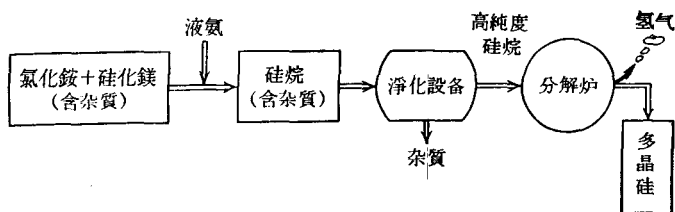


图8 硅烷法基本流程

制得)的混合物中,加入低温液氨,发生反应产生气体硅烷。然后将硅烷提纯,气体硅烷经低温回流除去硼的氢化物等杂质并回收氨,再经活性炭、浓硫酸、分子筛和过滤器净化。将高纯硅烷气体通入分解炉,分解出的硅在800—900℃的钼丝(或高纯硅棒)上长成为多晶硅。

硅烷法有许多优点,工艺流程简单、设备少、产率高、纯度高、产品电阻率高等,为提高器件质量和提供新器件创造了条件。但硅烷气体有毒,易爆,这是它的缺点。

以上三种生产多晶硅的方法,各有优缺点,四氯化硅氢还原法,取材容易,设备简单,但生产时间长;三氯氢硅氢还原法,生产时间短,但取材不如前者;硅烷法是一种新型的工艺方法,优点很多,虽然在生产工艺过程中还有一些问题,但是,我们只要按照伟大领袖毛主席“人类总得不断地总结经验,有所发现,有所发明,有所创造,有所前进”的教导,硅烷法生产多晶硅必定以更加完善的工艺水平出现在半导体材料行列中。

怎样拉制单晶硅?

单晶硅的制造工艺有直拉法和区熔法两类。前者拉出的单晶,晶体结构完整(位错密度小),不易散裂,但纯度较差,电

阻率分布不均匀;后者则相反,区熔单晶纯度高,电阻率分布均匀,但位错密度大,结构松散,有时易裂。这里仅介绍直拉法。

直拉法所用的主要原料有:多晶硅;籽晶——做为单晶生长的“引子”,籽晶是选择质量最好的小块单晶硅,并经过精细加工(研磨、化学腐蚀、抛光等)制得的;掺杂剂——根据所需要的导电类型和电阻率,选择适当类型和数量的杂质,如生产n型单晶硅用磷作掺杂剂。主要设备:单晶炉(图9)。

将多晶硅置于单晶炉内的石英坩埚中,籽晶用钼夹头固定在拉杆的下端,用高频感应或电阻加热的方法使多晶硅在石英坩埚内熔化(熔点 1420°C),降下拉杆引入籽晶,并把掺杂剂投入熔体中,然后将拉杆边旋转边缓慢地提拉(拉杆与坩埚朝相反方向旋转),并通过观察窗进行监视,严格控制转速、拉杆提拉速度及温度,这样单晶就沿着籽晶的一定方向有规律地、外形呈棒状地生长起来。这就是直拉法的简单过程。

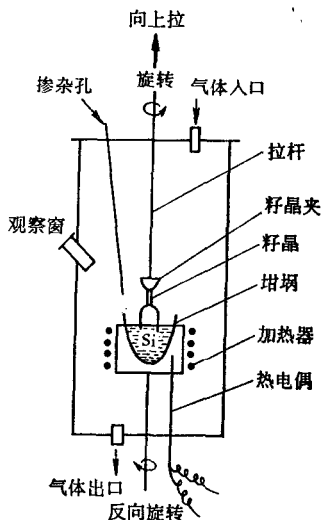


图9 单晶炉示意图

单晶硅有哪些基本参数?

毛主席教导我们:“对情况和问题一定要注意到它们的数量方面,要有基本的数量的分析。任何质量都表现为一定的

数量,没有数量也就没有质量。”电阻率,少数载流子寿命,位错密度等是单晶硅的基本参数。为了制成性能好,成品率高的半导体器件,以及满足各种不同类型器件的要求,对这些基本参数都必须作数量的分析,对它们提出了严格的要求。所谓“参数”,就是表示单晶硅好坏的标准。

在这里介绍一下单晶的主要参数的基本意义。

1. 电阻率: 表示单晶硅的导电能力大小,单位是欧姆·厘米,各种不同器件对电阻率的要求也不同,如:作可控硅整流器一般要求电阻率 30—60 欧姆·厘米;一般晶体管只要求几个欧姆·厘米。生产单晶硅必须根据器件的要求,严格控制掺杂,以期得到器件所需电阻率的单晶硅。

2. 位错密度: 理想情况下,在单晶体内,原子都整齐地按一定规则排列着。但“完全的纯是没有的”,在实际单晶体内,有些原子并不严格按规律排在预定的位置上,即有位错现象产生,则称此现象为原子的位错。位错表明晶体结构的不完整性,也是晶体缺陷的一种表现。随着现代提纯技术和单晶制备技术的发展,其他晶体缺陷基本能克服或满足器件要求,而位错成了主要的晶体缺陷,它对晶体的许多性能都有影响。

在每平方厘米面积上产生位错的多少称为位错密度,一般控制出来的单晶要求位错密度越小越好。利用检验每平方厘米面积上腐蚀坑的多少,来测量位错密度(用腐蚀液腐蚀单晶面,在金相显微镜下可观察到其表面坑坑洼洼的腐蚀坑)。对生产可控硅元件要求位错密度小于 1 万—10 万/平方厘米。

3. 少数载流子寿命: 当有外加条件影响时(如外加电压或用光脉冲照射),单晶硅内“电子”和“空穴”都要增多,破坏了原有的平衡状态,这些新产生出来的载流子叫“非平衡载流子”,它对半导体器件有很重要意义,尤其是非平衡少数载流子更有价值(n 型半导体,非平衡少数载流子指的“空穴”)。多

数器件是靠非平衡少数载流子来工作的。如：一般晶体管都是利用非平衡少数载流子来实现放大作用的，可控硅亦是利用非平衡少数载流子来进行工作的。单晶硅的少数载流子寿命就是指非平衡少数载流子在外加条件取消后，在半导体中平均存在的时间(以微秒计算)，不同的半导体器件对这个时间要求不同，一般晶体管要求少数载流子寿命长，使放大作用好，可控硅元件要求寿命，一般 100 微秒即可。

4. 导电型号：是 P 型单晶硅还是 n 型单晶硅，用作可控硅的单晶硅片应选择 n 型的单晶硅。

什么是可控硅？

可控硅是最近几年出现的一种新型的半导体器件，它的全名叫可控硅整流器，其特点是：能够把交流电变成直流电，同时在整流过程中控制其大小，而且还能将直流电(或交流电)变成各种不同频率的交流电。可控硅整流器比普通的整流器多一个极，共有三个极：阳极、阴极和控制极(见图 10)。

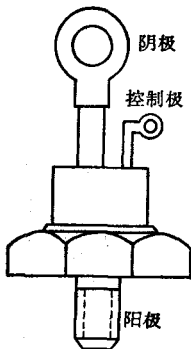


图 10 螺栓型可控硅示意图

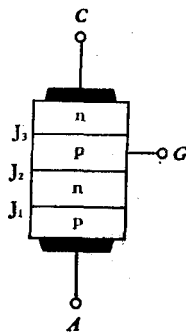


图 11 可控硅的结构