

可控硅丛书

· 2 ·

双 扩 散

西安整流器研究所

一九七一年八月

毛主席語录

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

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。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

前 言

可控硅（即可控硅整流元件）的发明使得半导体元件从弱电领域跨入强电领域，给强电技术的改革创造了十分有利的条件。

由于它能以微小的电流控制大功率的机电设备，因而成为工业生产实现电子化、自动化的一个重要元件。

另外，它的另一显著特点是体积小、重量轻、效率高、寿命长、使用维护方便，使得它广泛地应用在冶金、矿山、机电、燃化、造纸、交通以及国防等工业部门。

把可控硅用于轧钢机的直流转动系统上，代替原来的直流变流机组，提高了轧钢速度，消除了工作环境的噪音，而设备的体积和重量大为减小，维护也很方便。

在电弧炉炼钢中，用可控硅自动控制电极升降代替原来的手工配电，不仅缩短了熔炼时间，提高质量、节省电力，而且大大减轻了工人同志的劳动强度。

……。

随着可控硅在国民经济各部门的广泛应用，不仅要求供给数量更多的元件，而且对元件质量的要求也日益增高。其中最突出的一点就是希望可控硅有更大的额定电流、同时具有更高的耐压。大容量化已成为可控硅研制中的一个重要课题。

在可控硅问世后的几年里，“扩散合金法”是较普遍采用的制造可控硅的方法。因为它具有工艺简便、生产周期短的优

点，直到现在，仍然是广泛采用的方法之一。可控硅容量的提高，首先意味着制造工艺中必须成功地解决获得更大面积、均匀平坦P-N结的问题。

过去的“扩散合金法”用合金烧结的办法得到可控硅管芯的阴极。容量提高，硅片面积增大，黄金消耗量猛增；更重要的是，合金烧结中P-N结不平坦性越来越严重，直接影响元件质量的提高。如果把阴极的合金方法改用浓度、深度易于控制的扩散法是否有所改善呢？基于此，就出现了制造可控硅的“双扩散法”（即“全扩散法”）。

“双扩散法”的出现，是可控硅制造工艺不断革新的结果，是事物发展的必然趋势。

尽管“双扩散法”比起“扩散合金法”工艺复杂、需要设备多、生产周期长，但同时具有不用黄金、工艺灵活、有利于元件容量提高以及实现某些特殊要求等突出的优点，因而在近几年来得到了迅速的发展和广泛的应用。

我国工人阶级在史无前例的无产阶级文化大革命中，遵循伟大领袖毛主席“自力更生”、“艰苦奋斗”的教导，狠抓革命、猛促生产，成功地用“双扩散法”制造出大容量平板压接式可控硅，并投入生产，为发展我国电子工业做出了贡献。

这本小册子是为了普及、推广“双扩散”工艺而编写的，着重介绍用“双扩散法”制造可控硅管芯的基本原理及工艺。由于我们活学活用毛主席著作很不够，经验不多，错误和不妥之处在所难免，希望广大的工人、革命技术人员提出宝贵意见。

第一章 关于PN结的知识

可控硅整流元件（以下简称“可控硅”）是包含三个P-N结的半导体元件。因此，与其它半导体元件如半导体二极管、晶体三极管、硅整流元件一样，P-N结的制造是生产可控硅的基本组成部分之一。为了说明P-N结的制造过程及制造方法，我们先要弄清楚什么是P-N结。

1.1 半导体、导体和绝缘体

谁都知道，金、银、铜、铝等金属是电的良好导体；而塑料、橡胶、陶瓷是电的绝缘体。因为金属的电阻很小，很容易让电流通过；塑料等电阻非常大，电流几乎不能通过。除了以上二种物质以外，还存在一种物质，如锗、硅等，它们的电阻比金属大得多，但是又比塑料小得多，因此它们的导电性能远比不上金属导体，却又大大超过塑料等绝缘体，我们称锗、硅这类物质为半导体。

半导体材料的导电能力在不同的情况下有很大的差别，最显著的是，当温度升高或受到光照时它的导电能力变得很强，温度降低或不受光照时导电性能则很差。

为什么半导体的导电性能随外界条件变化这样大呢？

毛主席教导我们：“我们看事情必须要看它的实质，而把它的现象只看作入门的向导，一进了门就要抓住它的实质，这才是可靠的科学的分析方法。”

为了找出半导体导电性能随外界条件而剧烈变化的原

因，我们首先要弄清楚半导体是怎么导电的，它与导体和绝缘体有什么不同。

金属能够导电是由于金属中存在许多自由电子，它们可以在金属中自由运动。如果把金属两端通过导线联结在电池的正负两端如图1.1，金属内带负电的自由电子不断地跑向电池的正极，大量的电子又源源不断地由电池的负极补充进来。这样一来，金属中就有大量电子由负极流向正极，形成了一个电子流，金属中也就存在了一个由正极流向负极的电流。

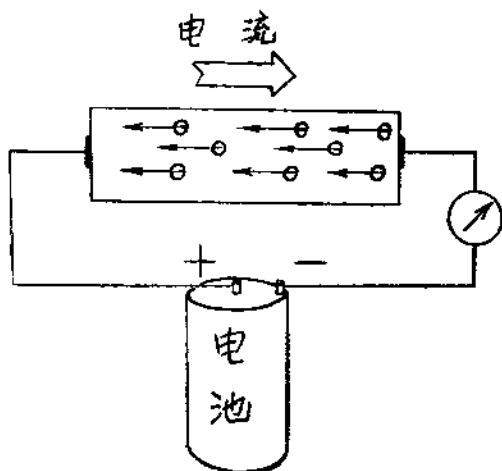
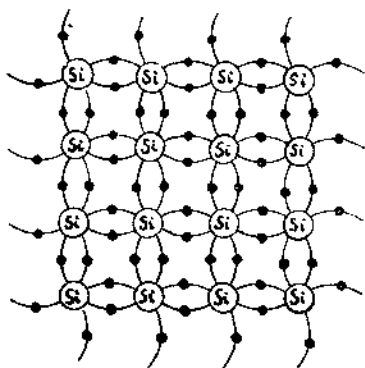


图1.1金属导体导电机构

如果加热金属，使金属的温度升高，由于金属原子的运动（通常叫晶格振动）变得剧烈，电子在金属中的运动受到的阻力变大，也就是金属的电阻变大，这时，同样的条件下（同一块金属、同样的电池）因温度升高，电流将变小。我们说金属导体具有正的电阻温度系数，即温度升高，电阻跟

着变大，不过这个变化很小。

绝缘体为什么不能导电呢？因为绝缘体中的自由电子极少，一般较低的电压，不能使它导电。如果施加的电压很高，形成很强的电场，数量很少的自由电子获得了很高的能量，在它的撞击下自由电子不断增加，当电压超过某一个值以后，绝缘体也会导电，这就是绝缘体的击穿，不过，这电压值很高，要几千伏，甚至几万伏。



半导体是怎么导电的呢？我们以硅为例说明。

一块纯净的硅单晶是由成千上万的硅原子组成，它们整整齐齐地排列着。每个硅原子最外层有四个电子围绕着它。由于每个硅原子四周有四个硅原子离它最近，而且距离相等，所以每一个硅原子外面相当于有八个电子围绕着它，参见图1.2。

看1.2硅单晶原子结构示意图

这些电子不停地运动，有的电子就有可能脱离硅原子核的吸引在晶体中运动成为自由电子；

当某一硅原子失去一个电子以后，就带上了电，电量等于电子的电荷量，符号是正的。我们称这个带正电的缺位为**空穴**，它也可以在晶体中自由运动，参见图1.3。

尽管硅单晶中有带负电的自由电子和带正电的空穴，由于电子和空穴的数量相等，整个单晶体还是不带电的，保持电中性。

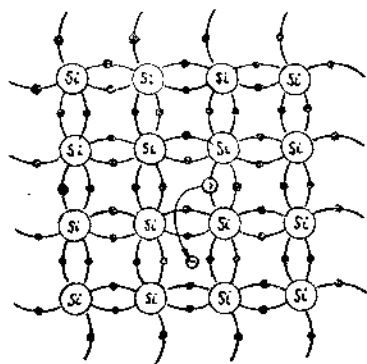


图1.3本征硅单晶导电机构

如果温度升高，束缚在硅原子中的电子能量变大，有更多的机会脱离硅原子跑到晶体中成为自由电子，空穴也相应增加，这一作用远远比由于晶格热振动对电子、空穴的阻碍来得大，硅单晶的导电性能随温度升高而增强。

如果用光照射硅单晶，光的能量也可以将束缚电子激发成自由电子使其导电性能增强。

半导体中能够自由运动的电子和空穴，它们分别带有负电和正电，成了输运电荷的载体，像称运送货物的汽车为载货车一样，称这些电子和空穴为载流子。

此外半导体另一个更显著的特点是，掺入极少量的其他如磷、硼等元素，它的导电性能会变得很强，这留在下一节讲。

1.2 N型半导体和P型半导体

任何物质都不可能是绝对纯粹的，半导体也是这样。硅单晶中常常混入少量的其他物质的原子，如硼、磷、铝、砷、镓、金、铜、氧等等。我们称这些物质为杂质。

硅晶体中掺入的杂质即使很少，却会大大改变硅的导电能力，使它的导电能力显著增强。

为什么会这样呢？

我们首先看掺磷、砷、锑等杂质的情况。这些杂质原子

在硅中代替了原来硅原子的位置如图1.4所示。

这些杂质都是元素周期表中的V族元素，原子的最外层都有五个电子，与周围四个硅原子结合在一起时便多出一个电子，而且这个电子很容易脱离杂质原子的束缚而成为自由电子，这叫杂质的离化（即杂质原子失掉电子变成离子）。在室温下，

这些杂质几乎全部离化，硅晶体中自由电子大量增加，因此，把极少量杂质掺入硅晶体，就会使它的导电性能大大提高。

掺入磷、砷、锑等V族杂质的硅单晶主要是依靠电子导电，称它为N型硅单晶。由于这些杂质能释放出电子称它们为施主杂质，也叫N型杂质。

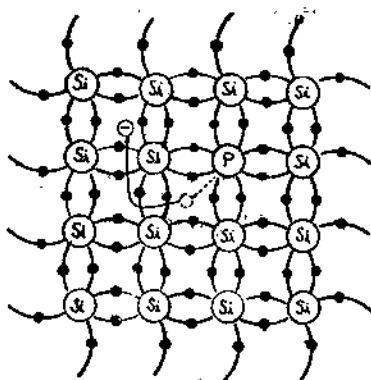


图1.4硅中掺有杂质磷时的导电机构

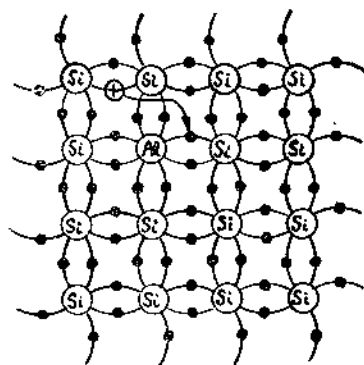


图1.5硅中掺有杂质铝时的导电机构

空位，见图1.5。

如果掺入的杂质是铝、镓、铟等Ⅲ族元素，情况就不同了，因为这些杂质原子最外层只有三个电子，取代了硅原子以后，邻近它的四个硅原子便有一个缺少一电子，即产生一个带正电的空位，见图1.5。

如果掺入的杂质是铝、镓、铟等Ⅲ族元素，情况就不同了，因为这些杂质原子最外层只有三个电子，取代了硅原子以后，邻近它的四个硅原子便有一个缺少一电子，即产生一个带正电的空位，见图1.5。

同样，在室温下，这些杂质也全部离化，硅单晶中出现了大量的空穴。我们称主要依靠空穴导电的硅单晶为P型硅单晶，称这些杂质为受主杂质或P型杂质。

由上可知，硅单晶中掺入的杂质越多，载流子的浓度越大，即电子或空穴越多，硅的导电能力越强电阻率越小。因此，可以用载流子浓度（杂质浓度）表示硅单晶的导电能

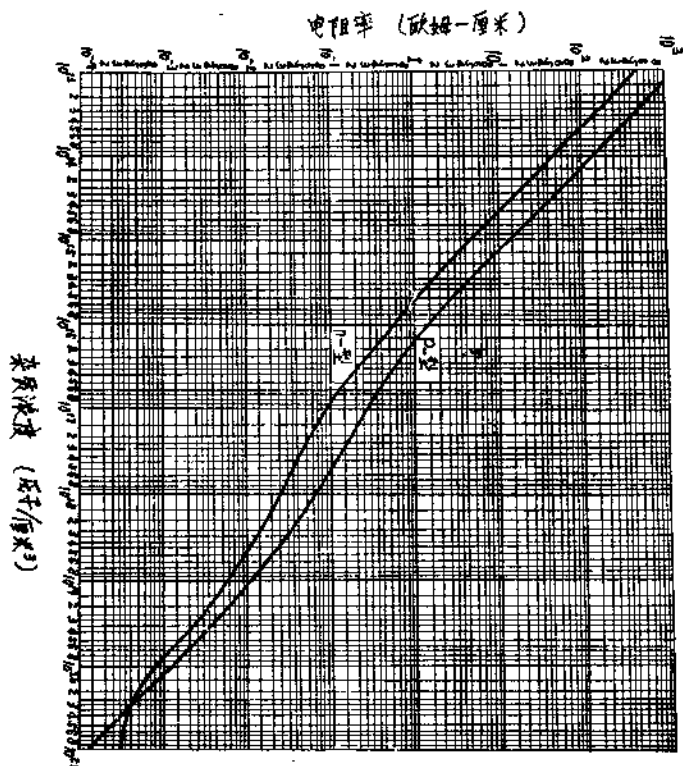


图1.6室温下硅电阻率与杂质浓度的关系

力，图1.6画出了硅电阻率与杂质浓度的关系曲线。

1.3 多数载流子与少数载流子

上面讲到了硅单晶中有许多自由电子和空穴，我们称它们为载流子。

绝对纯净的半导体（其中一点儿杂质也没有）叫本征半导体，本征半导体中的自由电子和空穴很少，而且数目相等（称它为本征载流子），导电能力很差，电阻率很高。

实际上，本征半导体是不存在的，多多少少都要混入一些杂质，如果混入的杂质很少，其浓度远远比本征载流子的浓度小，就可以认为是本征半导体。否则混入施主杂质的是N型半导体，混入受主杂质的是P型半导体。

在N型半导体中自由电子的数量远远多于空穴，因此，N型半导体主要依靠电子导电，称N型半导体中的自由电子为多数载流子，空穴是少数载流子。

对P型半导体而言，情况正好相反，空穴远远多于电子，P型半导体主要依靠空穴导电，称空穴是P型半导体的多数载流子，而自由电子是少数载流子。

必须指出，多数载流子和少数载流子并非绝对的，看对那一种半导体而言；对N型半导体来说，电子是多数载流子，空穴是少数载流子；对P型半导体来说，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

为了简单起见，通常把多数载流子叫成多子；少数载流子叫成少子。

1.4 奇异的现象

单个的N型半导体与P型半导体是具有一定导电能力的物质，没有什么奇妙的地方。

但是如果把一块完整的半导体材料，如硅，一端做成N型的，另一端做成P型的，并在它的二端加以电压，就会发现一个奇异的现象。

假若在金属导体或电阻二端加一个直流电压，不管哪端加正，在导体或电阻中通过的电流是大小相同的。比如，平常用万用电表测量电阻时，将黑表笔（电池正极）接左端、红表笔（电池负极）接右端测出的数值与黑笔接右、红笔接左测出的数值是一样的，就是这个道理。

对于上述半导体是否还是这样呢？

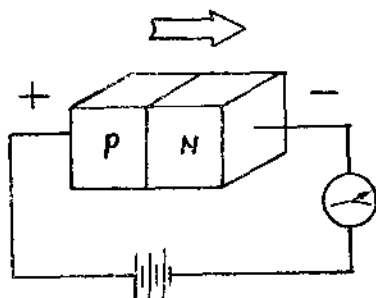


图1.7(a)pn结正向连接

对调，负极接P型一侧，正极接N型一侧，（注意直流电表极性也要对调）如图1.7(b)，这时发现，慢慢增加电源电压，电流表的指针，开始的时候稍有增加，到一定值后，随电压的增加，电流不再增加，达到饱

我们把电池负极接在直流表的负端，电流表的正端接在N型半导体一侧；电池的正极接P型半导体一侧。电池电压是可以调节的，慢慢增加电池电压，就会发现电流表的指示很快上升变得很大，见图1.7(a)。

如果把电池的正、负极

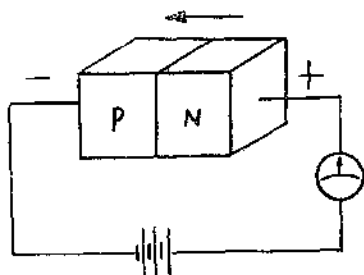


图1.7(b)pN结反向连接

和，这个饱和电流是很小的。

由上面的实验可知，当把电池正极接在P型半导体上，负极接在N型半导体上，此时电阻很小，可以流过很大的电流，称为正向连接。

当把电池正极接N型半导体，负极接P型半导体，呈现出很高的电阻，很不容易流过电流，称为反向连接。

1.5 PN结和阻挡层

P型半导体中有自由运动的空穴，N型半导体中有自由电子。由于它们不停地运动，在P型半导体和N型半导体交界面处，P区的空穴会越过界面跑到N区去，N区的电子也会跑到P区，见图1.8, 1.9。

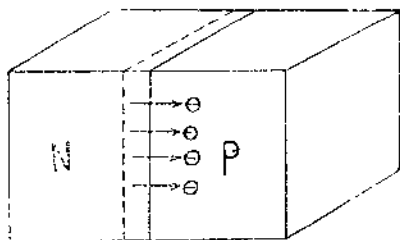


图1.8 P区空穴向N区扩散

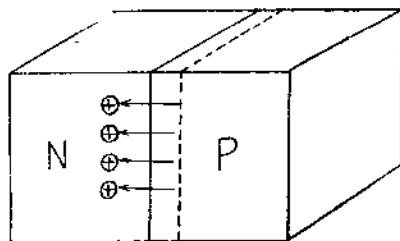


图1.9 N区自由电子向P区扩散

由于空穴带正电，电子带负电，交界面附近的P型半导体失去空穴多出电子而带负电，界面附近的N型半导体失掉电子多出空穴而带正电。

P型半导体带负电，就会吸引跑到N区的空穴；N型半导体带正电，就吸引跑到P区的电子。这个过程与空穴、电子

分别向N区、P区运动是相反的过程，当这二个过程平衡以后，就达到了稳定状态。

处于稳定状态下，交界面的两侧有一带电的薄层，P区一侧带负电N区一侧带正电，见图1.10。

这一层就是我们所说的PN结。

由于它能够阻止电子、空穴继续穿过交界面分别向P区和N区运动，所以也叫阻挡层。

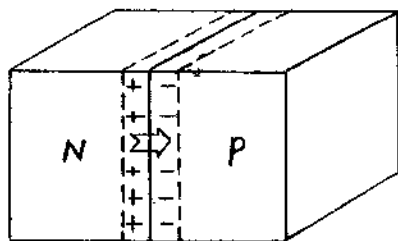


图1.10PN结的带电薄层

1.9 PN结是怎样整流的

前面讲了，PN结正向连接时，电阻很小，通过PN结的电流很大，PN结反向连接时，电阻很大，通过PN结的反向饱和电流很小。为什么PN结会有在一个方向（正向）允许电流流过，在另一个方向（反向）几乎不允许电流流过的现象呢？

我们先看正向连接的情况。PN结还没有与电极连接时，

P区部分的薄层带有负电，N区部分的薄层带有正电。PN结内的电场方向由N区指向P区，称它为PN结自建场，见图1.11。

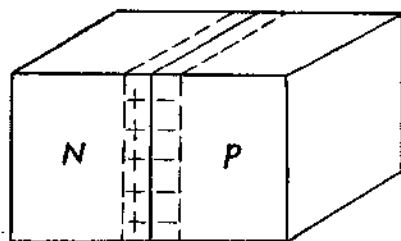


图1.11PN结内的自建场

正向连接时，P区接

正极，N区接负极，外加

电压在半导体内产生一个由P区指向N区的电场，这个外加电场方向恰与PN结的内建场方向相反，因而抵消了PN结内原先存在的内建场，使阻挡层的厚度减小，见图1.12。在外电

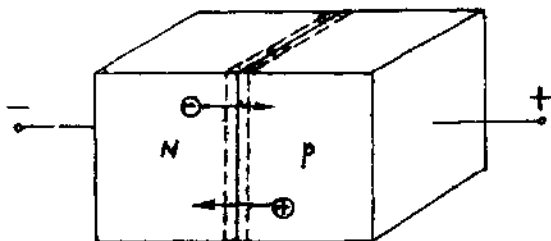


图1.12正向连接时阻挡层减薄

场的作用下，P区的空穴，N区的电子不断地被吸引到PN结交界处，PN结的电阻大大下降，电流很容易通过。随着外加电压的增加，外电场不断增强，进一步抵消PN结的自建场，所以通过PN结的电流迅速增加。在反向连接时，P区接负极，N区接正极，外加电压在PN结上产生的电场由N区指向P区，与PN结原先存在的内建场方向恰恰相同。加强了阻止电子、空穴分别向P区和N区流动的作用，N区的电子，P区的空穴背离PN结，分别向两边运动，因而阻挡层变厚，电阻也大大增加，见图1.13。

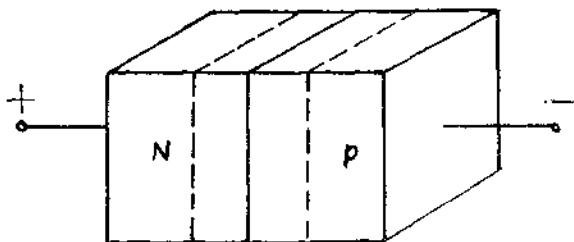


图1.13反向联结时阻挡层增厚

反向电压开始增加时，电子、空穴背离PN结分别向两边

运动，因此反向电流稍有增加，阻挡层也随之变厚，电压继续增加，阻挡层继续增厚，外加电压几乎全部加在阻挡层上，这时反向电流几乎不再增加，也就是说：反向电流达到饱和。

如果接在PN结两端的电压不是电池那样的直流电压，而是方向不断变化的交流电压，当P区为正，N区为负时，电流可以流过；电源电压改变成P区为负，N区为正时，电流几乎不能流过。这样，不管电源电压正负方向如何改变，流过PN结的电流却总是一个方向的，这就是所谓的整流现象。

第二章 用扩散法制造PN结

PN结有整流作用，这一点是非常重要的。但是PN结是怎样制造出来的呢？

把一块P型半导体和一块N型半导体重叠在一起，显然是得不到PN结的。

由于半导体中掺入不同型号的杂质，就会变成相应型号的半导体，比如，硅中掺入磷、砷或锑等杂质就成了N型硅，掺入硼、铝、镓、或镉等杂质则变成P型硅。

从这里我们得到了启发，如果拿来一块N型半导体，只要想办法掺进硼或铝等受主杂质，使之在某一部分受主杂质多于原来的施主杂质，这部分N型半导体转变成P型，在其交界面就形成了一个PN结。

如何在半导体中掺入所要求的杂质，成了制造PN结的实质问题。

制造PN结，方法很多，我们先看一看合金法。

从事硅整流元件制造的工人同志都知道，当把一个很薄的铝片放在N型硅片上，在真空烧结炉中加热到一定温度，铝和硅熔合在一起，温度慢慢降低，熔化了硅慢慢凝结，变成含有大量铝原子的再结晶层，因为它含有的受主杂质——铝的浓度很高，所以是P型硅。这样在N型硅片上就出现了一层P型硅，也就得到了一个PN结。见图2·1。

如果把N型硅片换成P型硅片，铝片换成含有锑的金