

半导体器件

制造技术

7
52

半导体情报编辑部

毛主席语录

领导我们事业的核心力量是中国共产党。

指导我们思想的理论基础是马克思列宁主义。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，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。

认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践去。

要认真总结经验。

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。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。

中国应当对于人类有较大的贡献。

团结起来，争取更大的胜利。

序

灿烂的思想政治之花，必然结成丰满的经济之果。伟大的无产阶级文化大革命空前地焕发了人民群众的社会主义革命积极性，推动着我国社会主义建设迅猛发展。奋战在半导体工业战线上的革命战士，在伟大领袖毛主席和以毛主席为首、林副主席为副的党中央领导下，在“九大”团结胜利的路线指引下，高举《鞍钢宪法》的伟大旗帜，狠批了刘贼的“洋奴哲学”、“爬行主义”、“专家路线”等反革命修正主义黑货，坚持毛主席“独立自主、自力更生”的方针、“走自己工业发展的道路”，掀起全国大办电子工业的热潮。在全国革命和生产一派大好形势的鼓舞和推动下，为适应半导体工业的技术革新和技术革命的群众运动的新高潮，遵照毛主席关于“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，我们组织部份工人同志和技术人员编写了“半导体器件制造技术”讲座，在《半导体情报》上连载，现经修改和补充，汇编成书，供领导和同志们参考。

本书不涉及半导体的基本概念和器件的设计理论及电路应用，着重介绍制造硅晶体管 and 集成电路的平面工艺。在编写过程中，我们力求通俗易懂和切合实用。

由于我们活学活用毛泽东思想不够，业务水平有限，缺点错误在所难免，敬希同志们批评指正。

《半导体情报》编辑部

一九七一年五月

目 录

一、概述	(1)
1—1 半导体器件制造工艺的发展简史	(1)
1—2 半导体器件制造工艺原理	(3)
二、硅外延工艺	(7)
2—1 基本原理	(8)
2—2 设备	(10)
2—3 工艺条件	(13)
2—4 硅外延层的参数及其检验	(18)
2—5 生长硅外延层的其它方法	(24)
2—6 气相生长法一些应用	(26)
三、砷化镓外延工艺	(26)
3—1 砷化镓汽相外延	(27)
3—2 砷化镓液相外延	(36)
3—3 砷化镓外延工艺中的几个问题	(40)
四、氧化工艺	(44)
4—1 湿氧化法	(45)
4—2 低温热解有机氧硅烷淀积二氧化硅法	(47)
4—3 二氧化硅膜厚度的测量	(48)
五、扩散工艺	(50)
5—1 扩散的一些主要方法	(50)
5—2 扩散中控制的主要参数	(53)
5—3 扩散结果的测量	(55)

5—4	扩散法与其他方法的比较	(60)
六、隔离工艺(60)		
6—1	P—N 结隔离技术	(61)
6—2	介质隔离技术	(69)
6—3	空气隔离技术	(73)
七、制版工艺(79)		
7—1	图形设计和电路图形的布局	(79)
7—2	原图的制做	(82)
7—3	一次缩小和步进重复照相	(83)
7—4	光刻掩模的复制	(99)
7—5	感光材料	(101)
7—6	新技术	(110)
7—7	显影液、定影液和化学药品简介	(116)
八、光刻工艺(121)		
8—1	光敏抗蚀剂	(125)
8—2	光刻的一般工艺过程	(126)
8—3	投影曝光和电子束曝光简介	(129)
九、蒸发工艺(131)		
9—1	蒸发工艺的一般概念	(131)
9—2	蒸发方法	(133)
9—3	蒸发设备及工艺(电阻加热)	(136)
十、溅射工艺(141)		
10—1	溅射的一般概念	(141)
10—2	溅射方法	(142)
10—3	等离子溅射的设备及工艺	(147)
十一、装架工艺(151)		

11—1	特性测试	(151)
11—2	管芯片割裂	(154)
11—3	欧姆接触烧制	(155)
11—4	引线键合	(157)
十二、封装工艺		(161)
12—1	金属封装工艺	(161)
12—2	塑料封装工艺	(163)
十三、器件测试		(170)
13—1	晶体管基本电参数的测试	(170)
13—2	晶体管特殊参数的测试	(179)
十四、质量检验		(190)
14—1	产品质量的重要性	(190)
14—2	质量检验的基础知识	(191)
14—3	试验方法	(203)
十五、附录		(222)
附录一	锗、硅和砷化镓的主要物理性能	(222)
附录二	一些常用的金属和合金的主要物理性能	(223)
附录三	在锗、硅和砷化镓中杂质的分凝系数	(224)
附录四	热电偶种类及使用的温度范围	(225)
附录五	常用物理常数	(225)

一、概 述

1—1 半导体器件制造工艺的发展简史

伟大领袖毛主席教导我们说：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，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。”半导体器件制造工艺的发展是完全符合毛主席所指出的这条客观规律的。

早在1895年，人们就成功地利用了金属丝与自然晶体的检波作用作检波器，而且，这种检波器被广泛用于第一次世界大战前的军事及其他部门的通讯设备中。由于基本理论研究的发展，以及整机应用和制造技术的相互促进，终于在1948年发现了具有放大作用的原始的点接触晶体管。早期的晶体检波器和以后的点接触晶体管，不但在电性能上是十分低劣的，而且金属触丝与晶体表面的接触也是很不可靠的，这就在很大程度上限制了它们的应用范围。

“实践、认识、再实践、再认识，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识之每一循环的内容，都比较地进到了高一级的程度。”器件制造技术发展的需要，又推动了半导体材料制造技术的发展。1950年前后，用切克劳斯基法拉出了锗单晶，不久又拉出了硅单晶。1951年前后，发展了锗的区域提纯技术和硅的无坩埚区域提纯技术，从而成功地制成了

纯度高达八个“9”的锗、硅单晶，大大推动了器件的发展。

在点接触晶体管及PN结理论的基础上，再加上锗、硅材料制造技术的发展，1951年，人们第一次用合金法制成了合金结晶体管。这种晶体管的两个PN结分别位于半导体片子两面的中心，PN结是用适当的金属（如半导体片是N型锗时，可用铟）与半导体片烧结合金而成的。这种晶体管的PN结面积较大，又称为面结型晶体管。这种晶体管虽然制造技术简单，但稳定性差、噪声大、功率小和频率低等原因，仍不能满足整机应用的需要。

1955年左右，人们成功地将扩散技术用于晶体管的制作中，并于1956年制成了扩散型晶体管。由于扩散深度可以精确控制，这就在很大程度上满足了当时整机发展对高频器件的要求。

1958年，人们又先后提出了微合金扩散晶体管，台面型晶体管和合金扩散晶体管，这些晶体管都利用了扩散技术，并在原来制造技术的基础上有所改进。不过，由于半导体器件制造技术的发展，采用这些技术已越来越少了（尤其是硅器件）。

半导体器件制造技术的发展是十分迅速的，1960年出现了在工艺上有很革新的平面晶体管。由于采用了表面钝化技术和光刻技术，这种晶体管的稳定性高，控制几何形状方便，管芯尺寸可作得很精密。

半导体集成电路的概念早在1952年就提出来了，并于1953年就开始进行研究。但由于有关技术的发展尚不成熟，早期的进展很慢。集成电路的迅速发展是在1960年以后，这主要与平面技术的提出和逐步成熟有关。1961到1962年试制

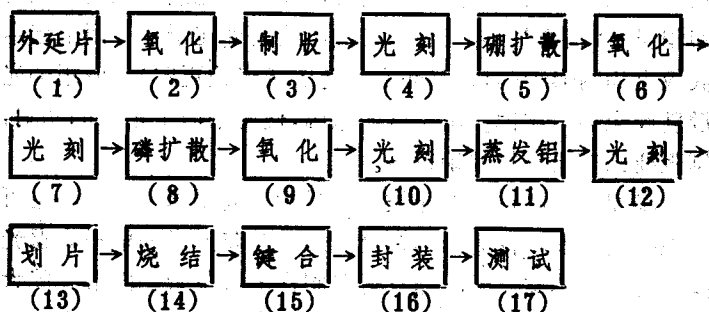
成了几种电路，1963年可以说是集成电路的各方面发展都比较成熟并投入大批生产的一年。目前的集成电路都普遍采用平面技术。

由于器件向更高频率和更大功率发展的需要，近几年来，又迅速发展了电子束曝光技术，离子注入掺杂技术和溅射技术等。

1—2 半导体器件制造工艺原理

半导体器件制造技术涉及的内容很多，我们将着重介绍平面工艺及集成电路制造中的某些特殊工艺（如隔离技术等）。为了对制造技术的全貌有一个概括的了解，下面我们以两个工艺流程为基础，对其中的主要工序进行简单的说明。

平面晶体管的主要工艺流程：



(1) 外延片：晶体管的集电极击穿电压和饱和压降等参数对原始材料的要求是矛盾的，前者希望原始材料的电阻率高些，后者则希望低些，为了解决这个矛盾，可在低电阻率的硅片上外延生长一层电阻率较高的硅单晶。低电阻率的

硅片可降低集电极本体串联电阻，高电阻率的外延层可提高集电极的击穿电压。

(2) 氧化：平面工艺利用的是选择扩散，在硅片上预备制作器件的地方扩散适当的杂质，其他地方则用适当薄膜掩蔽起来，不让杂质往硅片内扩散。在硅片上通过适当的方法生长一层二氧化硅，即可达到上述目的。在需要扩散杂质的地方用腐蚀剂腐蚀出窗口，其他地方的二氧化硅则可阻止磷、硼等杂质通过。二氧化硅的另一个作用是“钝化”，防止空气中的水汽等侵入管芯表面，导致器件性能恶化。

(3) 制版、(4) 光刻：要在二氧化硅薄膜内开出窗口，需要经过一个比较复杂的过程。从原理上说，“制版”的过程就相当于普通照相中制作底片的过程，平面工艺中所用的“版”相当于一般的底片；光刻的过程则相当于普通照相中用底片在相纸上印出照片的过程，涂复了光致抗蚀剂的硅片即相当于“相纸”。与普通照相的不同之处在于，平面工艺中底版上的图形十分精密（线宽可达1微米或更窄），所用的光敏乳胶应能耐腐蚀。由于这些原因，使得平面工艺中的光刻，制版要比普通照相复杂得多。

早期发展的投影曝光技术对版的精度要求不太高，也可以在一定程度上提高光刻精度。最近几年发展的电子束曝光技术，完全不需要版，而且可以制作出很复杂的图形并能大幅度地提高光刻精度（现已达到0.5微米左右）。不过，设备费用较昂贵，而且，效率较低。

(5) 硼扩散：扩散硼作为晶体管基区掺杂之用。

(6) 氧化：意义同(2)。

(7) 光刻：在二氧化硅上刻出扩散发射区的窗口。

(8) 磷扩散：扩散磷，作为发射区掺杂之用。

(9) 氧化：进一步改善钝化作用。

(10) 光刻：刻出发射极和基极电极接触区。

(11) 蒸发铝：在真空中于高温下把铝蒸发到硅片表面上，其中蒸发到电极接触区上的铝与硅形成欧姆接触。

(12) 光刻：刻掉作电极以外的其他铝膜。

(13) 划片：有时一个硅片上同时制作许多管芯。到这一步工序就用金刚刀或刀片将各个管芯分开。

(14) 烧结：用适当合金（如金锡合金）将管芯的背面烧焊在管壳底盘上（在氢气中进行）。

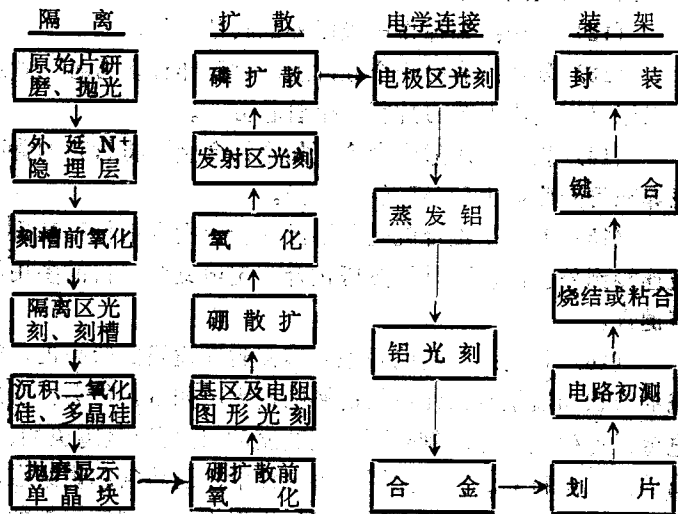
(15) 键合：键合就是用铝丝或金丝把发射极和基极电极连接到外引线。可采用热压键合或超声键合，目前多用超声键合。

(16) 封装：封装就是把管芯密封在适当的管壳内。管壳的形状和质量对器件性能的影响很大，如散热能力、引线电感、寄生电容等。管壳可以是金属的，也可以是陶瓷的、玻璃的、或塑料的。有时为了改善热性能，还将管芯烧结在氧化铍（这种材料绝缘好、导热好）陶瓷上。伸到管壳外的引线有三条的，也有四条的（其中有一条是接地用的）。引线有细丝状的，也有带状的，分布在一条直线上或相互垂直（带状引线电感小，引线分布在一条直线上或相互垂直时，寄生电容小）。

(17) 测试：经过上述各道工序后，器件的电性能究竟是否符合要求，只有通过电性能的测试才能鉴别出来。通常，需要测量电流放大系数、击穿电压、反向饱和电流等。如果是高频低噪声晶体管，还须测量噪声系数、截止频率；如果

是开关晶体管，还须测量开关时间、正向压降、饱和压降；如果是高频功率晶体管，还须测量输出功率、截止频率、功率增益等。

集成电路的主要工艺流程：



其中需要加以说明的是隔离问题。隔离是单片集成电路的特点之一，隔离的好坏对集成电路的特性有很大的影响，隔离的作用是从电学上把同一单片电路中的各元件、器件分隔开。以上工艺流程是针对介质隔离而言的。由于单片集成电路中晶体管的集电极与发射极、基极电极在同一表面上，故为了减小集电极串联电阻，须在原始硅片上的集电极区外延生长一个N⁺“隐埋层”。为了实现隔离，须从原始硅片外延 N⁺“隐埋层”的一边进行光刻，然后再沿光刻窗口进行深腐蚀（即刻槽），

根据需把隐埋层和原始硅片分割成一个个的“小岛”。再在各“小岛”上沉积二氧化硅（隔离介质）和多晶硅。最后，再研磨抛光原始材料未刻槽的一面，一直磨抛到出现槽底和原始单晶材料的厚度符合要求为止。这样，原始单晶材料就成为一个个具有 N^+ 隐埋层、四周覆盖有二氧化硅的“孤岛”了，多晶硅起着支撑这些孤岛的作用。

工艺流程中的其他工序同前面介绍的晶体管的工序大同小异，这里就不再重复了。下面我们分别对硅外延、砷化镓外延、氧化、扩散、隔离、制版、光刻、蒸发、溅射、烧结、装架、键合、封装、器件测试和器件质量检验等工序进行介绍。

二、硅外延工艺

N/N^+ 硅外延片是现在硅器件使用的最基础材料，估计在相当长的一个时期仍是如此。因为用 N/N^+ 结构材料做器件，比一般单晶片兼有高击穿电压和低串联电阻的特点，因而大大地提高了器件的电学性能。而且制造 N 型单晶薄层的工艺比较容易，多片生产时其厚度、电阻率、均匀性、完整性等都能得到较好的控制，因此几年来，硅外延材料的研制工作，以及以这材料为基础的硅器件研制工作，有了很大的发展。

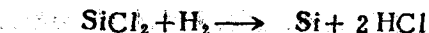
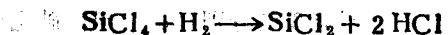
在伟大的七十年代，在毛主席的“坚持政治挂帅，加强党的领导，大搞群众运动，实行两参一改三结合，大搞技术革新和技术革命”的革命路线指引下，我国的半导体材料和半导体器件研制工作，必将飞速发展，并在最短的时间内赶上和超过世界先进水平。

这里着重介绍四氯化硅氢还原法制备 N/N^+ 硅外延片的

原理、设备、工艺条件及材料检验，并简单介绍制备硅外延片的其它几种方法和气相生长工艺的某些应用。

2-1 基本原理

四氯化硅是比较容易制取和提纯的，而且性质比较稳定，是制备高纯硅的原料，也是制备硅外延薄层的原料。四氯化硅在高温下被氢还原，反应如下：



当反应在硅单晶片——衬底上进行时，还原出来的硅原子就规则地附加在衬底的晶格上，外延生长成单晶薄层，如图 2·1 所示。因为气相均相反应的活化能高，而高温的硅衬底表面又提供活性大的台阶，因此可以认为，反应是反应气体（或经中间产物）吸附在衬底表面受表面催化而进行，单晶薄层则以台阶横向运动的方式连续增长。

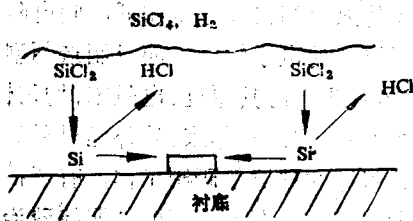


图 2·1 外延层台阶式生长的示意图

外延层生长速度与许多因素有关。图 2·2 表示硅淀积速度与衬底温度的关系。这是在立式反应管中的实验结果，它表明淀积速度随着温度的升高而加快。生长温度低于 1050℃ 时，得到的是多晶层，通常实用温度为 1150~1200℃。

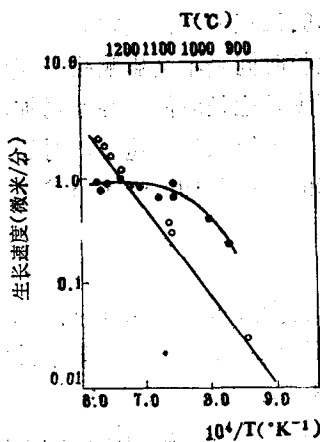


图 2.2 生长速度与衬底温度的关系

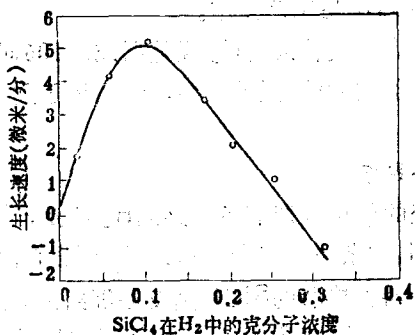


图 2.3 生长速度与SiCl₄浓度的关系

图 2.3 表示淀积速度与SiCl₄浓度的关系。可以看到，淀积速度开始随SiCl₄浓度的增加而增加，在0.10克分子浓度下达到峰值，然后随SiCl₄浓度的进一步增加而减少，最后在0.28克分子浓度以上，淀积速度成为负值，衬底被腐蚀。

通常实用的浓度为0.01克分子浓度左右。

可以想到，生长时间是不会影响生长速度的，实验结果也表明，生长层厚度随生长时间线性地增加。

衬底的晶向明显地影响生长速度。对于三个主要晶向的生长速度，按 $\langle 100 \rangle \rightarrow \langle 110 \rangle \rightarrow \langle 111 \rangle$ 次序递降。

2-2 设备

工艺所需的设备大致可分为四部分：氢气纯化器、活塞系统、反应室和高频炉。图 2·4 是整个设备的示意图。

(1) H_2 纯化器

为了得到高质量的硅外延单晶层，必须使用高纯度的氢气。一般有害杂质(如 O_2 , H_2O 等)含量少于 1×10^{-5} 克分子百分数的 H_2 即可满足工艺要求。

以钯—银合金膜构成的 H_2 提纯器或以 105 催化剂分子筛和气体过滤器组成的 H_2 提纯管组，都可用于此工艺，效果都很好。

(2) 活塞系统

活塞系统的作用是调节各分路的 H_2 流量，并最后把含有定量的 $SiCl_4$ 和杂质的混合气送入反应室。它由活塞、流量计、 $SiCl_4$ 蒸发器和掺杂的 $SiCl_4$ 蒸发器等组成。活塞可用玻璃活塞或聚四氟乙烯阀。流量计采用浮子流量计。蒸发器是石英瓶(浸在冰水浴中)。连接管用聚乙烯、聚氯乙烯或氟塑料管。工艺要求这一系统的气密性要好，其构件要耐腐蚀，以免引入其它杂质。

(3) 反应室

图 2·4 中所示的是一种用透明石英管制成的水平反应