

# 半导体器件

物理与工艺

[美] A.S. 格罗夫 著

科学出版社

73.73

375

# 半 导 体 器 件

物理与工艺

[美] A. S. 格罗夫著

齐 建 译

科 学 出 版 社

10-23/17

## 内 容 简 介

本书是关于硅平面器件工艺和物理方面的一本导论，共十二章，分三篇。第一篇共三章，介绍外延、氧化、扩散工艺的原理。第二篇共五章，介绍半导体物理的有关结论以及 p-n 结、结型晶体管 and 结型场效应晶体管的原理。第三篇共四章，讨论半导体器件生产、科研中较为重要的问题——半导体表面问题，包括表面的一般理论，硅-二氧化硅系统的性质，表面对 p-n 结的影响，以及表面场效应晶体管。

本书可供从事半导体器件方面工作的工人、技术人员和研究人员，以及大专院校有关专业师生参考。

A. S. Grove  
PHYSICS AND TECHNOLOGY OF  
SEMICONDUCTOR DEVICES

John Wiley and Sons, Inc., 1967

## 半 导 体 器 件 物 理 与 工 艺

[美] A. S. 格罗夫著  
齐 建 译

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 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

\*

1976 年 3 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1976 年 3 月 第 一 次 印 刷 印张：11 3/8

印数：0001—26,250 字数：239,000

统一书号：15031·117

本社书号：622·15—7

定 价：0.90 元

## 译者前言

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了《半导体器件物理与工艺》一书，供有关人员参考。

本书是关于硅平面器件工艺和物理方面的一本导论，侧重于概念和原理的叙述，很少冗长繁复的数学推导，比较简明扼要。全书共十二章，分三篇。第一篇共三章，分别介绍平面工艺中外延、氧化、扩散的原理，叙述比较细致。第二篇共五章，概述半导体物理的有关结论，并着重讨论 p-n 结、结型晶体管 and 结型场效应晶体管的原理，内容一般。第三篇共四章，介绍半导体表面问题的各个方面，包括表面的一般理论，硅-二氧化硅系统性质，表面对 p-n 结的影响，以及表面场效应晶体管。鉴于当前对于表面问题的重视，这第三篇是本书比较有参考价值的部分，可作为表面问题的一个入门。

对于原书中一些错误或不妥之处，我们一般用译者注加以说明；而对于个别技术上的差错，则已作了改正。我们希望读者在参阅本书时，遵循毛主席的教导，“以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化”。

此外，由于译者水平有限，错误与不当之处在所难免，切望读者批评指正。

齐建

于北京工业大学

# 目 录

译者前言 .....	i
导言 平面工艺 .....	1

## 第一篇 固态工艺

第一章 汽相生长 .....	5
1.1 生长的动力学 .....	7
1.2 气相质量转移 .....	11
1.3 气体的一些性质 .....	17
第二章 热氧化 .....	20
2.1 氧化物生长的动力学 .....	21
2.2 空间电荷对氧化的影响 .....	29
第三章 固态扩散 .....	33
3.1 流密度 .....	33
3.2 输运方程 .....	39
3.3 扩散层 .....	40
3.4 与简单扩散理论的偏离 .....	56
3.5 热氧化过程中杂质的再分布 .....	66
3.6 通过二氧化硅层的扩散(氧化物掩蔽) .....	72
3.7 外延生长中杂质的再分布 .....	75

## 第二篇 半导体和半导体器件

第四章 半导体物理基础 .....	86
4.1 固体的能带理论 .....	86
4.2 半导体中的电子和空穴 .....	89

4.3	费米-狄喇克分布函数 .....	93
4.4	平衡态下半导体的重要公式 .....	94
4.5	电子和空穴的输运 .....	101
第五章	非平衡条件下的半导体 .....	112
5.1	注入 .....	112
5.2	复合过程的动力学 .....	122
5.3	低注入下的寿命 .....	130
5.4	表面复合 .....	132
5.5	复合-产生中心的来源 .....	136
第六章	p-n 结 .....	144
6.1	静电学 .....	146
6.2	突变结的空间电荷区 .....	149
6.3	线性缓变结的空间电荷区 .....	158
6.4	扩散结的空间电荷区 .....	160
6.5	电容-电压特性 .....	164
6.6	电流-电压特性 .....	167
6.7	结的击穿 .....	186
6.8	瞬态性质 .....	196
第七章	结型晶体管 .....	203
7.1	晶体管的工作原理 .....	204
7.2	晶体管中的电流; 电流增益 .....	209
7.3	简单理论的极限和修正 .....	218
7.4	基区电阻 .....	224
7.5	最大电压极限 .....	226
7.6	最小电压极限 .....	229
7.7	热极限 .....	232
第八章	结型场效应晶体管 .....	239
8.1	工作原理 .....	240
8.2	结型场效应晶体管的特性 .....	244
8.3	简单理论的修正 .....	249

### 第三篇 表面效应和表面控制器件

第九章 半导体表面理论 .....	256
9.1 表面空间电荷区的特性——平衡情况 .....	257
9.2 理想 MIS(或 MOS)结构 .....	264
9.3 功函数差、绝缘体中电荷、表面态对 MOS 特性的影响 .....	271
第十章 表面对 p-n 结的影响 .....	282
10.1 表面空间电荷区特性——非平衡情况 .....	282
10.2 栅控二极管结构 .....	288
10.3 表面空间电荷区中的复合-产生过程 .....	291
10.4 场感应结和沟道电流 .....	297
10.5 表面对结击穿电压的影响 .....	302
第十一章 表面场效应晶体管 .....	309
11.1 工作原理 .....	310
11.2 表面场效应晶体管的特性 .....	313
11.3 简单理论的修正 .....	320
11.4 其它类型的表面场效应晶体管 .....	322
第十二章 硅-二氧化硅系统的性质 .....	327
12.1 快表面态 .....	328
12.2 氧化物内的空间电荷 .....	330
12.3 表面态电荷 .....	335
12.4 势垒能量 .....	338
12.5 表面迁移率 .....	339
12.6 氧化物表面的电导 .....	340
12.7 其它绝缘体 .....	343

本书所用符号表

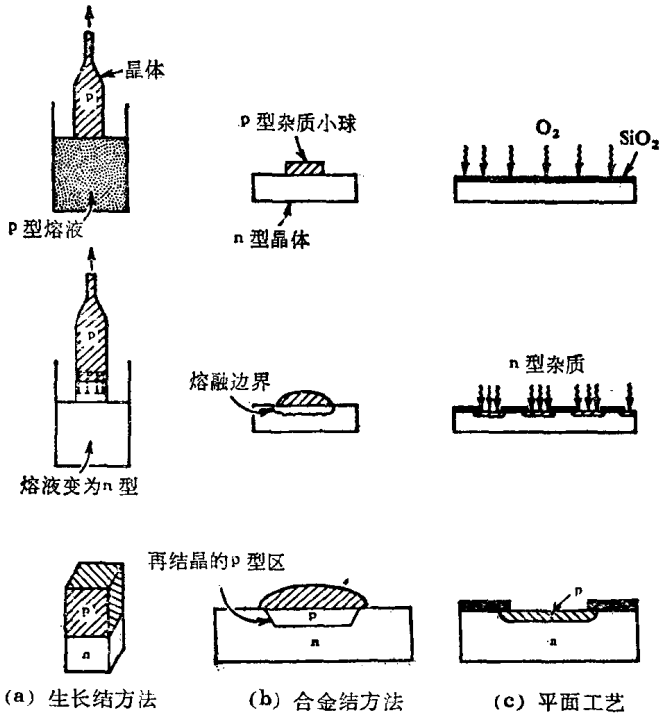
一些重要的数

半导体的重要电子性质

# 导 言 平 面 工 艺

关于平面工艺以及用这种工艺制造的半导体器件的介绍始于1960年<sup>[1]</sup>。从此,平面工艺就成了制造半导体器件和集成电路的主要方法,它对半导体器件迅速取代各种较老的电子学元件,并深入到电子学应用的崭新领域作出了有力的贡献。

象大多数重要的工艺进展一样,平面工艺也是从前几代工艺中脱胎出来的。因此,叙述平面工艺的发展过程及其基





本原理的最好方法是将它和两种最重要的早期半导体器件制造方法，即生长结方法和合金结方法作一个比较。这三种工艺都在附图中予以说明。

生长结方法<sup>[2]</sup>中，半导体单晶是由掺有某种杂质的半导体熔液(这里以 p 型为例)生长出来的。在生长过程中的某一时刻，突然改变熔液中的掺杂浓度，例如投入一颗含有施主杂质的小球。结果，单晶的其余部分将长成 n 型的。生长完成以后，把晶体按如图所示的虚线切成含有 p-n 结的小条。

结型晶体管发明之后的头几年中，这个方法 是极其重要的。譬如说，用这种方法生产了第一批用来验证 p-n 结电流-电压特性理论的二极管。但是，从大批量生产的角度来看，生长结方法还不如早期半导体器件工艺中提出的另一种方法——合金结方法。

合金结方法<sup>[3]</sup>中，将一个含有受主型杂质(以此为例)的小球放在一个 n 型半导体片子上。然后将它们一起加热到足够高的温度，使小球以融解或合金的形式渗入半导体片子。晶体冷却之后，小球下面形成一个受主型杂质饱和的再结晶区。这样就得到了一个 p-n 结。

这种方法过去是，而且现在仍然是二极管和晶体管(主要是锗器件)的大批量生产中使用的—种成功的方法。然而，随着半导体器件的应用范围愈来愈广泛，对其性能的要求也大大提高了。在这些日益提高的要求面前，合金结方法很快就暴露了其固有的局限性。譬如说，后面将会看到，决定结型晶体管性能的最重要因素是两个结之间的距离。在合金过程中，结的位置是由再结晶区渗入半导体的距离所决定的，而这一渗入距离总是难以控制的。

于是，便要探索一种能够精确控制 p-n 结位置的方法，这就导致了扩散结<sup>[4]</sup>的发展。扩散结的形成方式与合金过程有

其相似之处，即片子的表面也是暴露于包含在例如气体中的相反类型的高浓度杂质源之中。不过，在这种情况下不发生相变；杂质靠固态扩散进入半导体晶体内部，而固态扩散能够非常精确地加以控制。

此外，还因为发现二氧化硅薄层能够有效地掩蔽大多数最重要的受主和施主杂质的扩散<sup>[5]</sup>，因而半导体几何图形的控制精度也提高了；用二氧化硅覆盖半导体，然后在用光刻选定的面积上除去氧化层而作选择扩散，这样便能勾画出器件的几何图形。

平面工艺则兼有用固态扩散方法形成结和利用二氧化硅掩膜精确控制器件几何图形这两方面的优点，如图c所示。它也得益于这样一个很重要的事实：有氧化层覆盖的硅表面的电特性优于裸露表面的电特性。

正是由于最后一个原因，半导体器件易受周围环境影响的弱点得到了极大的克服，从而提高了器件特性的重复性和稳定性。最近，利用热氧化硅结构还使表面场效应器件从大约三十年前就提出设想以来第一次有可能付诸实现。意义更为重大的一点是，平面工艺导致了集成电路的发展。尽管只有短短几年，已有种种迹象表明，集成电路对电子学各个方面，从工艺、设计直到应用的影响之深广，也许与十年前半导体器件诞生的影响可相比拟。

### 阅读参考材料

早期形成结的方法的概述，可参阅 W. C. Dunlap, *Handbook of Semiconductor Electronics* (半导体电子学手册) 第 7 节。L. P. Hunter 编，McGraw-Hill Book Co., 1962, 第 2 版。

平面工艺及其对集成电路的应用的详述，可参阅 G. E. Moore, *Microelectronics* (微电子学) 第 5 章，E. Keonjiau 编，McGraw-Hill Book Co., 1963。

## 参 考 文 献

- [1] J. A. Hoerni, *IRE Electron Devices Meeting*, Washington, D. C. (1960).
- [2] C. K. Teal, M. Sparks, and E. Buehler, *Phys. Rev.* **81**, 637 (1951).
- [3] R. N. Hall and W. C. Dunlap, *Phys. Rev.* **80**, 467 (1950).
- [4] M. Tanenbaum and D. E. Thomas, *Bell System Tech. J.*, **35**, 1 (1956); C. A. Lee, *Bell System Tech. J.*, **35**, 23 (1956).
- [5] C. J. Frosch and L. Derrick, *J. Electrochem. Soc.*, **104**, 547 (1957).

# 第一篇 固态工艺

---

## 第一章 汽相生长

在半导体工艺中,汽相生长技术应用于金属(例如铝)、绝缘体(例如  $\text{SiO}_2$ )和半导体(例如硅)的淀积。从器件制造的观点来看,其中最重要的是在半导体单晶衬底上生长同种半导体的单晶薄层。这种生长称为外延。

在半导体器件工艺中,外延生长之所以重要,是由于外延薄层中的杂质浓度可以很容易通过控制气体中杂质浓度予以单独调节,而不依赖于衬底中的杂质。这样,外延生长就能用来在外延层与衬底之间形成 p-n 结。更为重要的是,应用外延技术能够使杂质浓度比较低的薄层在同种杂质浓度高得多的衬底上进行生长。这样,就能减小衬底的串联电阻而没有改变半导体器件的特性。

由于半导体的外延生长是如此重要,因此对它作了很详尽的研究,进行这种生长的方法有好几种。本章中,我们讨论在硅外延生长中使用得最广泛的方法:四氯化硅的汽相还原。(如要了解其它类型的汽相生长反应,可参阅列于本章末的阅读参考材料。)

在硅外延生长中已经使用的两种反应器如图 1.1 所示。图 1.1 a 是托伊雷尔(Theuerer)<sup>[1]</sup>的工作中使用的主式反应器。图 1.1 b 是谢泼德(Shepherd)<sup>[2]</sup>在较后的研究使用的卧式反应器。后者是目前工业上使用的典型的反应器。用这种反应器,可以在许多片子上同时生长外延薄层。不论用哪

种反应器,外延时都是通进含有一定浓度四氯化硅的氢气流. 气体流过放在托座上的硅片,而托座用射频感应线圈加热. 反应器本身具有石英壁或玻璃壁. 由于是用感应加热,因此在生长过程中反应器壁仍是冷的. 这就避免了在反应器壁上的淀积,并使来自反应器壁的沾污减至最小.

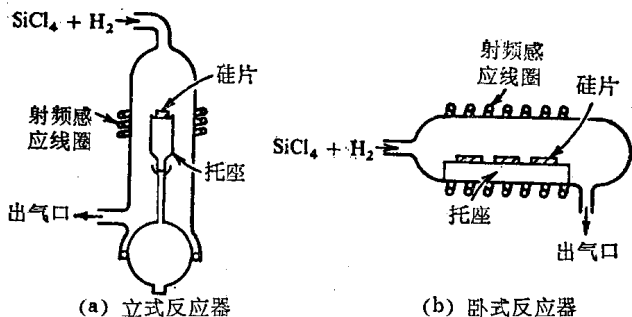
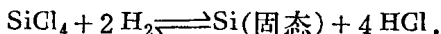


图 1.1 用于硅外延生长的反应器

虽然材料的汽相淀积能够在较低的温度下进行,但是,外延生长本身要求较高的淀积温度,在硅的情况下一般要超过 1000°C. 外延生长所以要较高的温度是因为为了形成单晶薄层,被淀积的原子必须在晶格中找到合适的位置. 如果降低淀积温度,被淀积的原子的活动性将随之减小,长成的薄层变得愈来愈不完美,最终将失去结晶的性质.

导致硅薄层生长的整个反应是



此反应是可逆的,亦即反应能沿任一方向进行. 如果进入反应器的运载气体中含有 HCl,那么硅将不是进行生长,而是被腐蚀掉.

此外,也还了解到在上述生长反应的同时,还发生一个与它相竞争的反应,此反应为



由于有这个反应,如果 SiCl<sub>4</sub> 的浓度很高,即使在进入的气流

中没有值得考虑的 HCl 浓度, 仍将发生硅的腐蚀. 这在图 1.2 中予以说明, 此图给出气体中四氯化硅浓度对生长反应的影响. (气体中的浓度最方便是用克分子分数给出. 克分子分数  $Y$  定义为气体中给定种类的分子数目与总的分子数目之比.) 显然在开始时沉积速率随着  $\text{SiCl}_4$  浓度的增加而增加. 当  $\text{SiCl}_4$  的克分子分数达到 0.1 左右时, 生长速率达到最大. 再增加  $\text{SiCl}_4$  的浓度将引起生长速率的减小, 最后甚至导致硅表面的腐蚀.

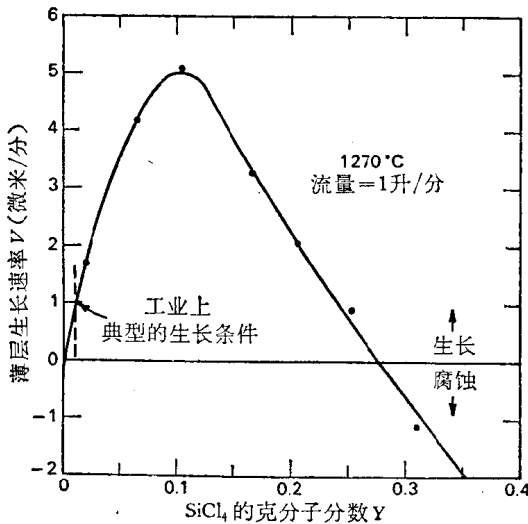


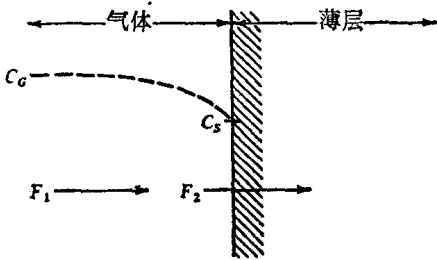
图 1.2  $\text{SiCl}_4$  浓度对硅沉积的影响<sup>[1]</sup>

硅通常在如图 1.2 中所给出的低浓度区域内生长, 典型的生长速率约 1 微米/分. 在这个区域内, 薄层生长速率  $V$  与气体混合物中  $\text{SiCl}_4$  的克分子分数的关系近似是线性的.

### 1.1 生长的动力学

现在我们在一个非常简单的模型的基础上来研究薄层生

长的动力学<sup>[3]</sup>。图 1.3 描述了这个模型的要点，图中我们给



出了气体中四氯化硅浓度的分布，并标出了从气体内部流向生长薄层表面的四氯化硅粒子流密度  $F_1$ ，以及与薄层生长反应所消耗的四氯化

图 1.3 生长过程模型。气流方向垂直于纸面。硅相应的粒子流密度  $F_2$ 。（粒子流密度\*定义为单位时间内流过单位面积的原子或分子的数目。）

我们用线性公式

$$F_1 = h_G(C_G - C_S) \quad (1.1)$$

来近似粒子流密度  $F_1$ ，其中  $C_G$  和  $C_S$  分别是气体内部和表面的  $\text{SiCl}_4$  浓度（每立方厘米的分子数），而  $h_G$  是气相质量转移系数。在生长薄层表面上进行化学反应所消耗的粒子流密度  $F_2$  用线性公式

$$F_2 = k_S C_S \quad (1.2)$$

来近似，其中  $k_S$  是表面化学反应速率常数。这些线性近似与欧姆定律是类似的：它们把粒子流密度描述成与一个驱动力成正比。在质量转移的情况下，驱动力是浓度差；在一级化学反应的情况下（这里就是假定为一级反应），驱动力是反应剂的浓度<sup>1)</sup>。

\* 原文中的“flux”，意思是“流”。本书中除按此定义使用“flux”外，有时还用“单位时间内流过某一截面的粒子数”。我们在必要时，将按文中定义的“flux”译为“流密度”，以示区别。鉴于所讨论的都是一维问题，当不致引起误解。——译者注

1) 严格地讲，我们还应包括反应生成物  $\text{HCl}$  从表面回到气体内部去的粒子流密度。目前为简单起见，我们忽略了它。这相当于假定反应生成物的质量转移系数比  $\text{SiCl}_4$  的要大得多。

在稳定状态下,  $F_1 = F_2 = F$ 。利用这个条件, 我们可以解上述两个方程以得到在气体-薄层界面上四氯化硅的表面浓度,

$$C_s = \frac{C_g}{1 + k_s/h_g} \quad (1.3)$$

这个公式表明, 如果  $h_g \ll k_s$ , 表面浓度将趋于零。这个条件通常称之为质量转移控制。而如果  $h_g \gg k_s$ , 那么表面浓度将趋于  $C_g$ 。这个条件通常称之为表面反应控制。

现在我们能够容易地把硅薄层生长速率表示出来

$$V = \frac{F}{N_1} = \frac{k_s h_g}{k_s + h_g} \frac{C_g}{N_1} \quad (1.4)$$

其中  $N_1$  是结合成单位体积薄层的硅原子数目。其值对硅薄层是  $5.0 \times 10^{22}$  厘米<sup>-3</sup>。因为  $C_g = Y C_T$ , 其中  $C_T$  是气体中每立方厘米分子的总数, 我们得到生长速率的表示式

$$V = \frac{k_s h_g}{k_s + h_g} \frac{C_T}{N_1} Y \quad (1.5)$$

注意这个式子的下述特点。首先它预期薄层生长速率正比于反应剂的克分子分数  $Y$ 。如同我们以前就知道的, 这与  $Y$  值较小时的实验观察是一致的, 而实践上通常遇到的正是  $Y$  值较小的情况。其次, 在给定克分子分数的情况下, 生长速率由  $h_g$  和  $k_s$  中较小的那个决定。这对应于质量转移控制和表面反应控制条件这两个极限情况。在这些极限情况下, 生长速率分别由

$$V = \frac{C_T}{N_1} k_s Y \quad (\text{表面反应控制}) \quad (1.6)$$

或

$$V = \frac{C_T}{N_1} h_g Y \quad (\text{质量转移控制}) \quad (1.7)$$

给出。



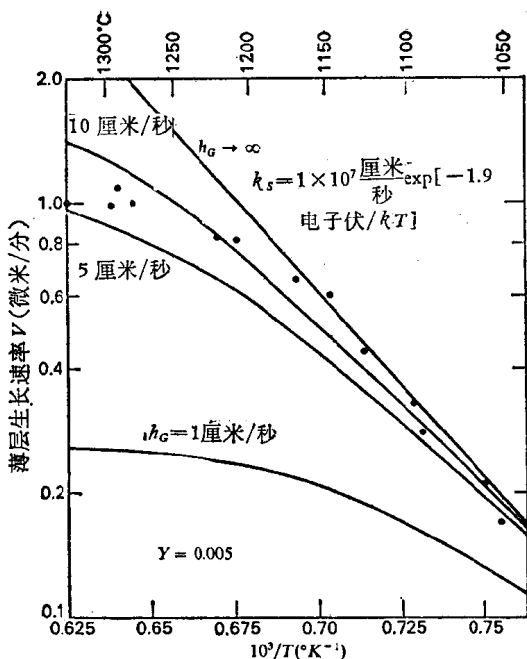


图 1.4 薄层生长速率与温度的关系。点表示实验数据<sup>[2]</sup>，曲线是基于式(1.5)计算的

图 1.4 中用点给出了谢泼德<sup>[2]</sup>在实验上观察到的薄层生长速率与温度的依赖关系，显然，在低温下生长速率服从一个指数规律  $V \propto e^{-E_a/kT}$ ，其激活能大约是 1.9 电子伏。托伊雷尔<sup>[1]</sup>在这个温度范围内也观察到一个指数型的温度依赖关系，其激活能为 1.6 电子伏。在高温下，生长速率曲线就平下来，它对于温度变得比较不敏感了。

因为化学反应速率常数和温度的依赖关系通常是指数型的，而质量转移系数对温度的变化是比较地不敏感的，因此简单的模型就解释了图 1.4 给出的生长速率与温度依赖关系的数据的一般特点。调节  $k_s$  和  $h_G$  以使式 (1.5) 与这些数据相符，我们就能作出如该图所示的一些理论曲线。看来在  $h_G \cong$