

集成电路工艺与設備

北京半导体器件二厂資料室 譯

科 学 出 版 社

1 9 7 2

内 容 简 介

本书系根据美国1967年出版的《Integrated Circuit Technology》一书译出。其主要特点是结合集成电路的主要工序,对所使用的各种设备作了介绍。这其中包括外延扩散、真空系统、制版、金属化、划片、焊接、最后封装、红外线分析、电子束加工、自动测试、电路失效机理分析等设备以及生产线上的各种辅助设施。

本书涉及面广,比较易懂,可供从事这方面工作的工人、技术人员参考。

集成电路工艺与设备

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

*

1972年5月第一版 1972年5月第一次印刷

定价: 0.80 元

目 录

第一章 扩散和外延设备.....	(1)
1-1 概述	(1)
1-2 氧化和扩散技术	(2)
1-3 外延生长	(17)
1-4 与设备有关的加工过程及其技术问题	(19)
1-5 扩散设备	(22)
1-6 外延生长设备	(32)
1-7 控制和分析设备	(37)
1-8 维修和安全措施	(39)
第二章 真空系统.....	(42)
2-1 概述	(42)
2-2 应用真空的设备	(44)
2-3 工作特性	(45)
2-4 技术条件的制订	(46)
2-5 真空抽运方法	(47)
2-6 设备	(49)
2-7 真空室	(49)
2-8 抽运系统	(53)
2-9 淀积设备	(62)
2-10 控制装置和监控设备	(62)
2-11 蒸发淀积	(63)
2-12 溅射淀积	(65)
2-13 其它淀积方法	(67)
2-14 掩模	(68)

2-15	操作方法	(68)
第三章 光掩模		
第三章 光掩模		
3-1	概述	(74)
3-2	一般要求	(74)
3-3	一般步骤	(75)
3-4	专用设备	(76)
3-5	原图	(78)
3-6	第一次缩小照相机	(79)
3-7	分步重复照相机	(82)
3-8	生产用掩模的材料	(92)
3-9	一次和分步重复最终缩小系统的展望	(93)
第四章 金属化、划片和电路组装设备		
第四章 金属化、划片和电路组装设备		
4-1	概述	(95)
4-2	硅片的焊接点	(95)
4-3	隔离和互连	(97)
4-4	探针测试和金属保护	(103)
4-5	分割小片	(106)
4-6	小片连接	(109)
4-7	细丝压焊和指状式焊接	(117)
第五章 电子束装置		
第五章 电子束装置		
5-1	电子束的基本特性	(126)
5-2	微型图案制造技术	(134)
5-3	电子束焊接	(138)
5-4	电子显微镜	(140)
5-5	电子束微分析器	(149)
第六章 最后金属封装和塑料封装		
第六章 最后金属封装和塑料封装		
6-1	与金属封装有关的一些因素	(161)

6-2	与塑料封装有关的一些因素	(167)
6-3	金属封装与塑料封装中的组装工序	(176)
6-4	结束语	(188)
第七章 红外检验和掩模对准		(190)
7-1	红外检验概述	(190)
7-2	原理	(190)
7-3	红外在微型电路中的应用	(191)
7-4	检验微型电路用的红外显微镜	(194)
7-5	红外显微镜使用的检测器	(196)
7-6	红外显微镜的灵敏度	(199)
7-7	显微镜系统的参量	(201)
7-8	热显微照相	(204)
7-9	扫描时间极限	(208)
7-10	高速扫描显微镜	(208)
7-11	掩模对准概述	(209)
7-12	显微镜	(212)
7-13	双视场显微镜	(218)
7-14	显微镜的照明	(220)
7-15	曝光机附件	(223)
7-16	注意事项	(228)
7-17	展望	(230)
第八章 丝网漏印电路的制造		(232)
8-1	概述	(232)
8-2	基本方法	(233)
8-3	掩模的配置与漏印板的制备	(234)
8-4	印浆的配置	(241)
8-5	焙烧前的准备工作	(241)
8-6	焙烧	(242)
8-7	电阻微调	(244)

8-8	设备	(246)
8-9	展望	(247)
第九章 集成电路的自动测试设备		(249)
9-1	概述	(249)
9-2	集成电路的电特性测试	(249)
9-3	基本测试方法	(251)
9-4	集成电路测试系统的基本装置	(256)
9-5	触发	(260)
9-6	动态测试	(263)
9-7	自动测试系统中应考虑的几个问题	(265)
9-8	集成电路测试系统	(268)
第十章 集成电路的新型测试仪表		(277)
10-1	概述	(277)
10-2	硅器件加工中的测量技术	(278)
10-3	低温电子器件	(290)
10-4	光电子器件	(297)
第十一章 失效机理的研究与分析		(311)
11-1	概述	(311)
11-2	表面状况的检验	(334)
11-3	电特性的测试	(344)
11-4	化学检验, 结晶检验和机械检验	(346)
11-5	失效机理的产生和确定	(353)
第十二章 微型电子器件工厂的生产设施		(363)
12-1	各种辅助设施	(364)
12-2	特殊问题	(366)
12-3	各道工序对生产设施的要求	(368)
12-4	满足各种需要的设计方案	(373)
12-5	辅助设备的详细设计	(381)
12-6	结束语	(395)

第一章 扩散和外延设备

1-1 概 述

本章所讨论的扩散和外延设备，可以精确地控制半导体集成电路的掺杂量。这些设备的重要项目有：温度控制、杂质控制、流程时间和纯度的精确控制。在讨论工艺和设备过程中，除总的介绍外，硅将作为重要材料来考虑，顺便也要提到其它半导体材料。工艺控制问题将在以后的章节中讨论，因为它与在硅片中提供合适结构用的设备有关。

首先，将半导体集成电路的主要制造过程扼要地作一介绍。集成电路的原材料是硅片，经过各种材料制备方法的加工，硅片应尽可能平整，并且没有表面损伤。硅片的厚度一般是在 75—250 微米之间。就在此硅片的表面和内部，采用各种加工方法，进行图形制作和掺杂控制，最后制成集成电路。

由于集成电路相当小，在硅片上一次可以制作许多电路，然后把硅片分割成单个集成电路。基于以上这些考虑，本章将以硅片加工来叙述整个加工过程。大多数器件，先要在硅片上外延生长一层具有合适杂质和厚度的外延层。然后将此外延层或硅片（如果不要求外延层的话）进行氧化，即在靠近表面的一个薄区上覆盖一层二氧化硅，或使之转变成二氧化硅；再用第三章介绍的光刻工艺，在二氧化硅上开几个窗口，杂质就通过这些窗口扩散进去，形成器件的结构。在典型的功能块制造过程中，这种操作工序要进行好几次。以后的工

序（见第四章）就是蒸发淀积焊接点和各个区域之间的互连；接着就是划片、焊接和最后封装。

过去使用的掺杂技术种类繁多，如合金结和生长结。现在出现了新技术，如离子掺杂法。但是，几乎所有的半导体集成电路都使用扩散和外延生长。扩散可以在硅片的特定区域里掺杂，外延生长是在整个表面上均匀掺杂。

扩散方法之所以能在特定区域里进行掺杂，是由于二氧化硅能掩蔽某些杂质扩散。因此，利用二氧化硅的掩蔽作用，按照几何图形来控制杂质扩散。二氧化硅可以用热生长法将半导体硅片的表面转变成二氧化硅，也可以用淀积法在半导体硅片上淀积二氧化硅。其它材料，诸如氮化硅和一氧化硅，也可以用作扩散掩模。

通过含硅化合物诸如硅烷、四氯化硅和三氯硅烷的热分解作用，可在单晶硅片上淀积单晶硅，这就是大家所熟悉的外延生长。用外延生长方法，可以在单晶硅片上生长具有均匀电阻率的单晶层。

氧化、扩散和外延生长将要进行详细的讨论。首先讨论基本的方面，然后再讨论加工过程中使用的设备。

1-2 氧化和扩散技术

目前平面集成电路的制造，主要依靠二氧化硅（ SiO_2 ）对各种施主和受主杂质的选择性掩蔽扩散能力，在功能块中产生和限定有源区和无源区。举例来说，如果使硅在氧化气氛中加热，就会在硅表面上形成一层二氧化硅薄膜。若有选择性地除去二氧化硅薄膜，并将硅片置于施主或受主杂质气氛中加热，则杂质就有选择性地从已除去二氧化硅薄膜的区域里扩散进去。这就是功能块制造的基础。下面讨论的扩散和

氧化工艺，主要是关于气流系统中使用的氧化物的制备和扩散控制方法。

氧化 二氧化硅薄膜在半导体器件工艺中可以用作扩散掩模和扩散源，保护器件不受外界条件影响，以及实现器件的整个表面钝化。二氧化硅薄膜的制备方法有如下几种：

1. 热氧化；
2. 化学淀积；
3. 电解氧化；
4. 反应溅射。

在功能块的制造工艺中，普遍采用热氧化和化学淀积这两种方法来形成二氧化硅薄膜。

1. 热氧化 从热力学上来讲，在室温下用干氧、水汽或丙

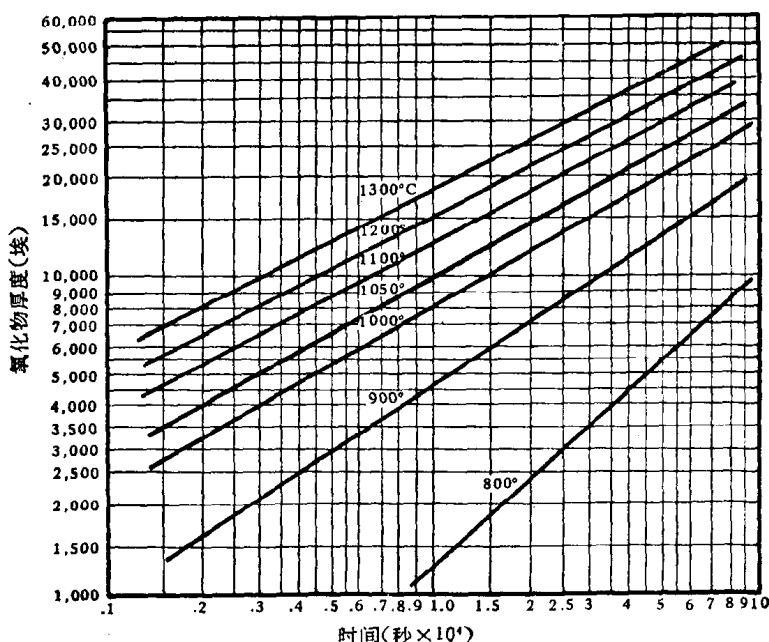


图 1-1 水汽氧化时氧化物在硅的 [111] 面上的生长速度

者结合一起可使硅氧化；不过反应速度太慢，实际上行不通。在大气压力下，温度低于 900°C 时，其反应速度还是相当慢的，所以热氧化技术要使用较高的温度。一般使用的温度范围为 $1000\text{—}1200^{\circ}\text{C}$ ，氧化时间在 $20\text{—}90$ 分钟之间，才能得到适合于作扩散掩模用的氧化物厚度。这些过程主要是受氧扩散到硅-氧化物的界面控制，其反应可用抛物线定律来表示：

$$x^2 = kt$$

式中 x 为氧化物重量或厚度， t 为时间， k 为“速率常数”。速率常数作为材料电阻率或杂质掺杂和晶体取向的函数。由于

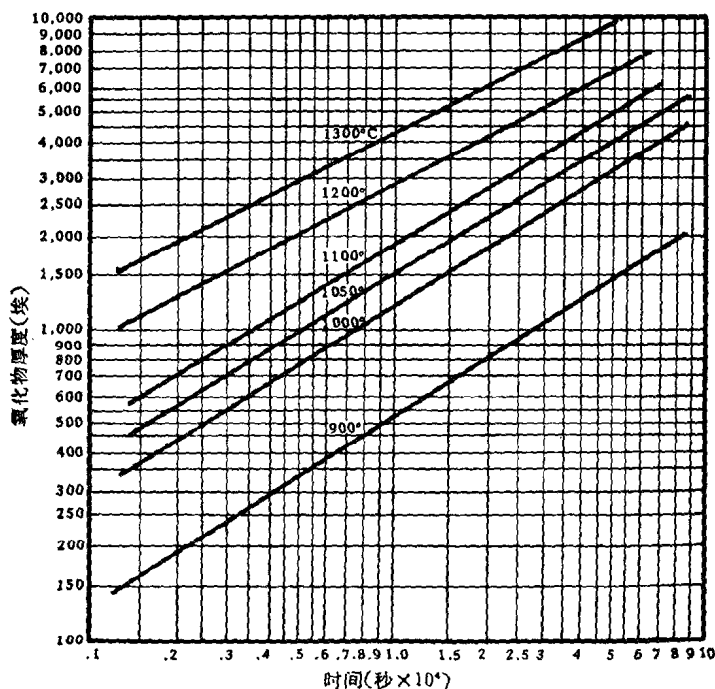


图 1-2 干氧化时氧化物在硅的 [111] 面上的生长速度

二氧化硅薄膜中水的扩散系数较高，所以硅的水汽氧化比硅的干氧氧化具有较高的速度。用硅的热氧化法所获得的二氧化硅薄膜密度较大（例如 $2.2-2.3$ 克/厘米³），而对基片的附着力又好，是目前最通用的一种方法。图 1-1 和图 1-2 分别示出了在水汽和干氧气氛下氧化物生长速度同温度和时间的函数关系。图 1-3 所示是硅的热氧化法所使用的典型系统示意图。

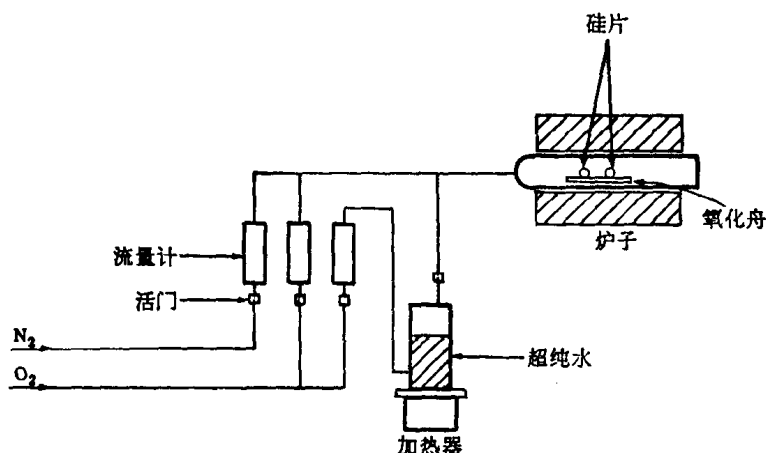
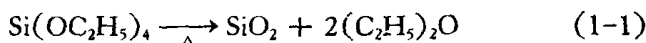


图 1-3 硅的热氧化系统

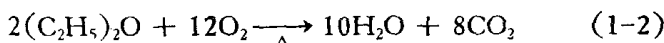
用高温热氧化方法生长二氧化硅薄膜时，由于使用了很高的温度，致使硅样品特性发生变化，如硅-二氧化硅界面的杂质再分布、载流子寿命的改变等，这些都是与高温过程有关系。这是高温热氧化方法的不足之处。下面讨论低温生长厚氧化物的问题。

2. 化学淀积 化学淀积技术可以在比较低的温度下生长二氧化硅。例如，有许多含有 Si-O 键的有机化合物将不可逆地热分解成二氧化硅和碳氢化合物。普遍使用的“低温”（即 700°C 以下）淀积法，是在氧气氛中分解四乙氧基硅烷

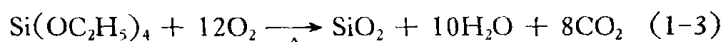
(TEOS)。四乙氧基硅烷的分解式如下：



碳氢化合物裂解



产生副产品水和二氧化碳。合并方程式(1-1)和(1-2),得出整个反应式:



只要提供过量的氧气,温度大约高于 350°C,就可以发生上述反应。上述分解所用的温度范围一般为 500—700°C。四乙氧基硅烷薄膜的淀积速度如图 1-4 所示。图 1-5 是通过上述分解反应来淀积二氧化硅用的典型系统示意图。淀积温度不能超出上限值,因为在 750°C 和高于 750°C 时,碳氢化合物的分解使碳进入薄膜。例如,使用 600°C 的温度,能够以 250 埃/分的速度淀积一层透明的无定形二氧化硅。此氧化物淀积薄层不影响基片的电阻率,不过淀积 20,000 埃或多于 20,000 埃(原文均为 20,00 埃,疑误——译者注)的氧化物时,基片产生形变,位错密度也相应增大。

扩散 扩散是目前在制造功能块中最广泛地用来形成 p-n 结的方法。例如,在高温下将 p-型半导体硅片置于含有 n-型杂质扩散剂的气氛中,就可以形成扩散结。同样,将 n-型半导体置于 p-型杂质扩散剂中,就可以形成 p-n 结或二极管,也可以通过与基片同一类型物质的扩散来改变电阻率。扩散结均匀地进入晶体表面,并保持表面外形。如果经过汽相腐蚀或化学腐蚀之后,表面很平的话,那么, p-n 结也同样是很平整的。在表面下形成的 p-n 结深度是由扩散时间和温度来确定的。可以用来形成 p 区的第三族元素(即受主杂质)中,硼用得最广泛。磷是用来形成 n 区的最普通的施主杂质,不过,也有使用砷和锑的。

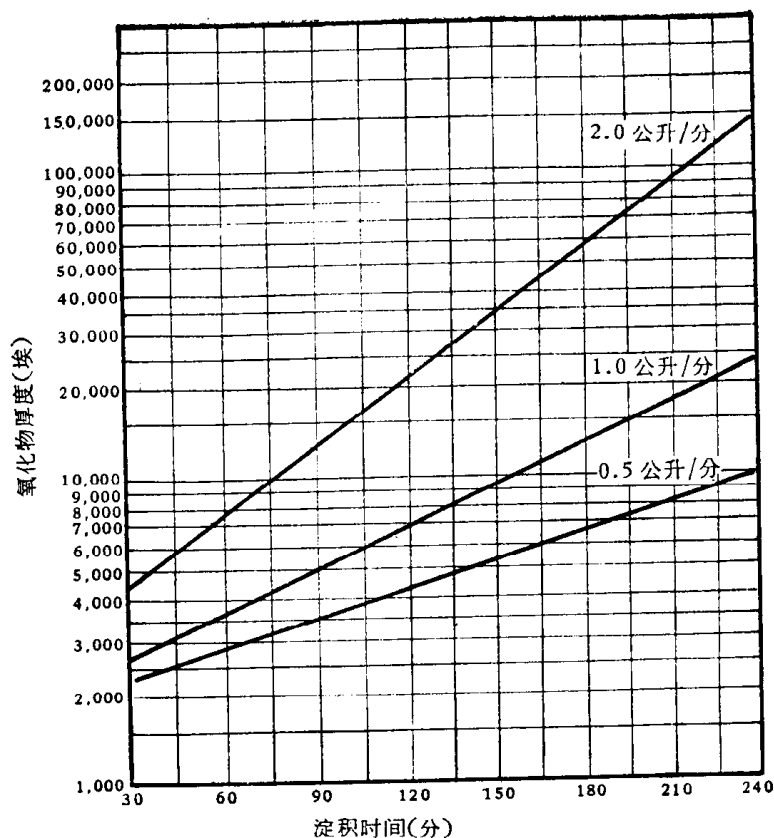


图 1-4 通过分解四乙氧基硅烷, 二氧化硅在硅上的生长速度
(硅片温度为 600°C)

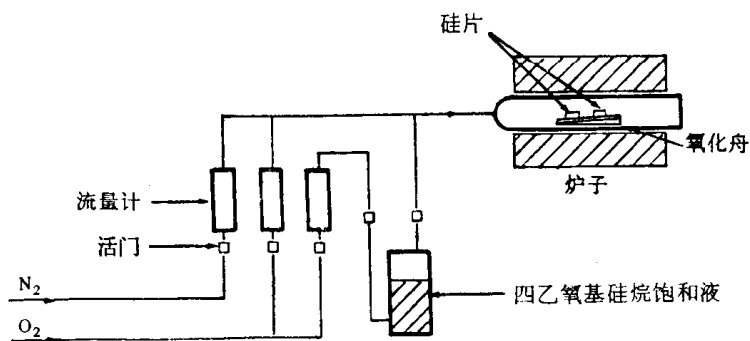


图 1-5 利用分解四乙氧基硅烷来淀积二氧化硅薄膜所使用的系统

杂质在固态半导体晶体中的扩散可用下列扩散方程式^[1]来加以控制:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (1-4)$$

式中 C 为杂质浓度, 原子数/厘米³; D 为扩散系数。对各种边界条件解此方程式, 可以得出特殊扩散形式的表示式。

假定在平面 $X = 0$ 时存在一个无限的杂质源, 并假定对整个扩散时间 t 来说, 在 $C = C_0$ 的半导体中 $X = 0$ 处保持一恒定浓度, 那末该方程的一维解是余误差函数^[2]

$$C(X) = C_0 \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (1-5)$$

以此方程式求结深, 并考虑如果晶体内含有一个与扩散杂质类型相反的具有均匀浓度 C' 的杂质, 则在值 $X = X_0$ 时, 扩散曲线相交于 $C = C'$, 即结深。图 1-6 用图解说明了这个余

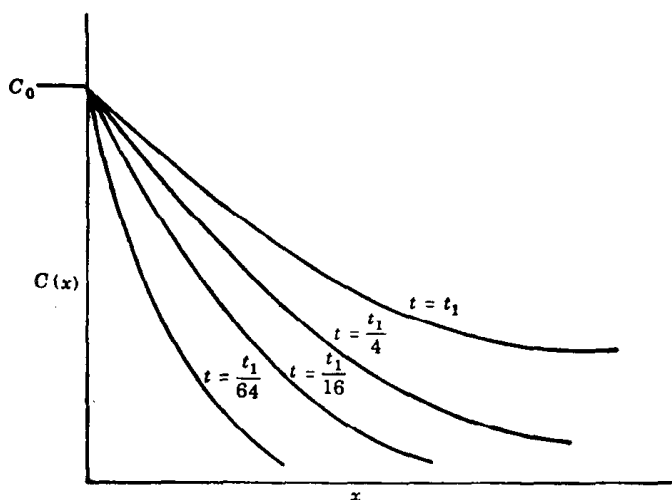


图 1-6 扩散方程式的余误差函数解:

$$C(x) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

误差函数的解以及所取得的扩散分布图形。

根据初始条件, 方程式 (1-4) 有好几种解。如果假定一个很高的表面浓度 (即 $C(X=0)$) 比 C_B 大得多 (式中 C_B 为本体浓度), 则上述微分方程式的解可由下式近似求出:

$$X_0 \cong 8(Dt)^{1/2} \quad (1-6)$$

式中 X_0 就是由 $C(X_0) = C_B$ 求出的结深。表 1-1 中列出了杂质扩散到硅中的重要参数。

表 1-1 硅中杂质的扩散距离

扩散常数 D (厘米 ² /秒)	温度 °C		深度 (埃)				
	硼	磷	$t=1$ 秒	10	10^2	10^3	10^4
10^{-12}	1,140	1,115	800	2,500	8,000	25,000	80,000
10^{-14}	875	845	80	250	800	2,500	8,000
10^{-16}	695	660	8	25	80	250	800

如果扩散杂质的总量不变, 而不是半导体表面的杂质浓度不变, 则可应用下列高斯解^[3]

$$C(X) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{X^2}{4Dt}} \quad (1-7)$$

式中 Q 为初始表面浓度, 原子数/厘米²。其典型结果如图 1-7 所示。

各种杂质的特殊解取决于杂质的扩散系数及其在半导体中的固溶度。固溶度限定了表面掺杂的极限, 或是某种杂质对硅片掺杂的最高浓度, 而扩散系数是指杂质扩散的速度。扩散速度较快的杂质可减少扩散时间, 不过, 集成电路制造过程要求多个扩散工序, 因此最初的扩散工序必须用较慢的扩散杂质, 以免这些杂质在以后操作中产生再分布。

扩散的类型很多。这里着重介绍最常用的一些扩散技术。不过这些扩散技术只是力图改变扩散方程的边界条件, 以便

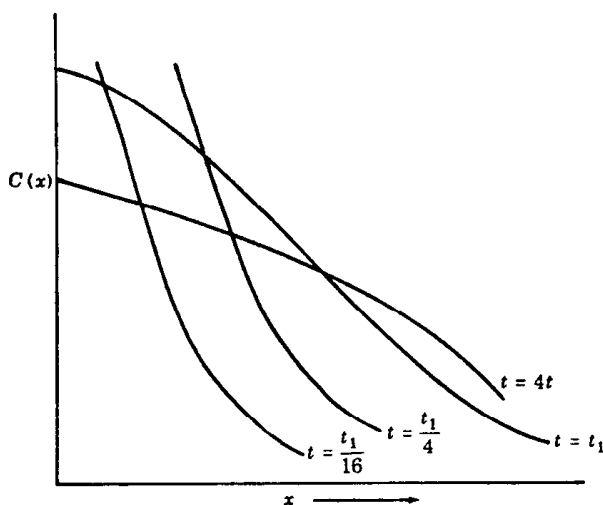


图 1-7 扩散方程的高斯解:

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt}$$

得到不同的扩散分布图形。

制造硅集成电路所使用的杂质是周期表中的第三和第五族元素。其它杂质,如金和锂可以用来改变某种集成电路的寿命。在现代硅器件的平面工艺中,最常用的 p-型杂质是硼,磷是常用的 n-型杂质。硼由于它的扩散系数比磷低,也被广泛地采用。硅器件初期广泛使用的镓,由于它不能用二氧化硅薄层进行掩蔽扩散,所以很少使用。基于这些情况,下面主要讨论硼、磷、砷的扩散。

过去五年中,扩散工艺变化很大。初期使用的结形成方法,例如真空或闭管扩散,已为一种更易控制的开管扩散所代替。在开管扩散过程中,利用携带气体流将所需的小量杂质输送到硅片上。开管扩散方法基本上有三种,它们的特点是杂质源的性质各不一样:

	硼	磷	砷
(1) 固体源	B_2O_3	P_2O_5, P_3N_5	As_2O_3
(2) 液体源	BBr_3	$POCl_3$	$AsCl_3$
(3) 气体源	B_2H_6	PH_3	AsH_3

液体和气体杂质源几乎已完全取代了固体源，因为固态扩散的杂质浓度主要是取决于固体的温度，可控能力很差，杂质源温度的微小变化就会导致蒸汽压力的大幅度变化，从而使携带气体的杂质分量产生难以控制的变化。先进的扩散方法是使用全气体系统，这是控制携带气体中杂质浓度最有效的方法（特别是在低浓度值时）。

在扩散操作中，有两个必须加以控制的变量：淀积电阻率和结深。淀积电阻率 ρ_s 是以欧姆/平方（平方无量纲，下同——译者注）为单位，结深 x_0 是以微米为单位。关于这些变量的分析和测量，将在 1-7 节中讨论。

应该指出，扩散过程包括两个阶段：(1) 预扩散（淀积），(2) 主扩散（再分布）。在预扩散阶段，将杂质淀积在硅片表面上，进入表面的扩散很浅。图 1-8 表示了扩散过程中存在

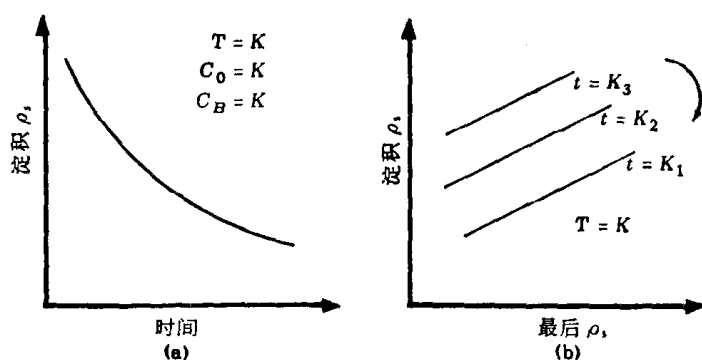


图 1-8 两步扩散法的一般关系