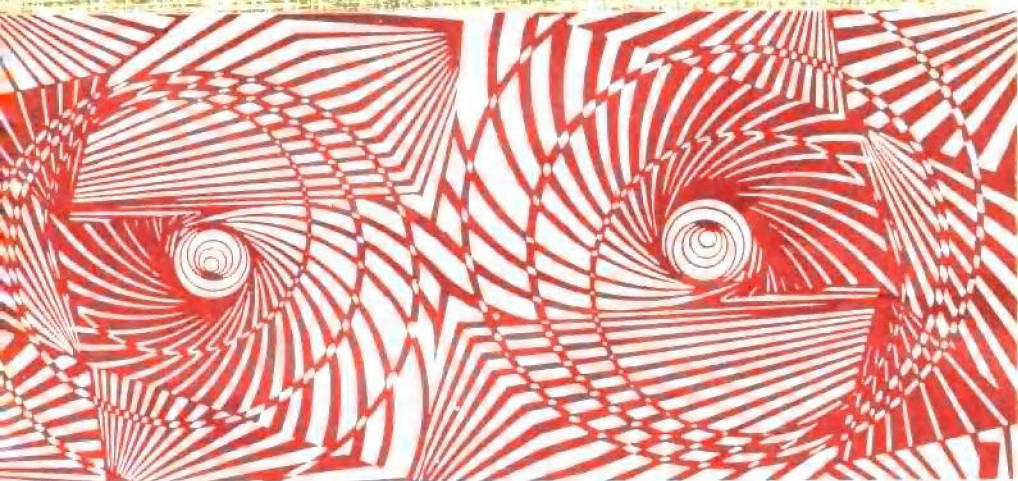


准分子激光微细加工技术

张玉书 张庆有 著



吉林大学出版社

准分子激光微细加工技术

张玉书 张庆有 著

吉林大学出版社出版 吉林省新华书店发行
(长春市东中华路 29 号) 长春电影制片厂印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32 1990 年 10 月第 1 版
印张: 8.937 1990 年 10 月第 1 次印刷
字数: 216 千字 印数 1—700 册

ISBN 7—5601—0619—6/TN·4 定价: 2.10 元

序 言

半导体工业是目前最重要的骨干工业之一。在一定程度上可以说当今电子世界主要以半导体技术进步为轴心向外发展,因为几乎所有的工业部门都离不开半导体元件及其仪器设备。

近 40 年的实践已经证明,半导体工业的发展史就是其加工技术不断微细化的历史。

微细加工技术是随着 LSI 和 VLSI 的不断发展而产生的新兴技术领域。其中主要包括离子注入、等离子体 CVD、离子束曝光和离子束刻蚀等先进技术。由于准分子激光固有的短波长、大光子能量、高分辨率等特点,使其在微细加工技术领域具有明显的应用前景。正因如此,目前已引起世界各国相关学者、企业界以及管理部门的极大重视,在短短的几年时间里,已在激光曝光、激光掺杂、激光 CVD 和激光诱导刻蚀等方面取得了突破性进展。

当然,准分子激光技术的应用绝非限于微细加工技术领域,在激光化学、激光生物医学和激光新材料等学科领域也孕育着潜在的活力。

本书仅对准分子激光微细加工技术基础、应用实例及前景展望等作概要介绍,希望能激起相关学者对这一 80 年代新兴技术的足够重视,促进该技术在我国得以迅速发展。

由于我们知识水平有限,加上时间仓促,特别是本书内容涉及多种学科领域,因此在论述过程中难免有错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

1990 年 5 月 1 日于长春

目 录

第一章 微细加工技术概论	(1)
1.1 基本工艺与复合工艺	(1)
1.1.1 基本工艺	(2)
1.1.2 复合工艺	(3)
1.2 离子注入	(5)
1.2.1 离子注入技术基础	(5)
1.2.2 杂质分布	(7)
1.2.3 离子注入装置	(8)
1.2.4 退火技术	(9)
1.2.5 离子注入技术的优点和缺点	(10)
1.3 等离子体 CVD	(11)
1.3.1 CVD 技术基础	(12)
1.3.2 等离子体 CVD	(15)
1.3.3 CVD 膜的评价	(18)
1.4 亚微米光刻	(19)
1.4.1 电子束曝光	(19)
1.4.2 X 射线曝光	(26)
1.4.3 离子束曝光	(29)
1.5 等离子刻蚀	(30)
1.5.1 刻蚀技术概要	(30)
1.5.2 等离子刻蚀技术基础	(34)
1.5.3 等离子刻蚀气体	(37)
1.5.4 等离子刻蚀装置	(40)
1.5.5 无掩膜离子束加工	(41)
第二章 准分子激光器	(43)
2.1 概 述	(43)
2.1.1 基本概念	(43)

2.1.2	泵浦方式及特点	(46)
2.1.3	准分子激光器应用	(50)
2.2	电子束泵浦激光器	(53)
2.2.1	稀有气体准分子态	(53)
2.2.2	电子束泵浦系统	(56)
2.2.3	激光器结构	(59)
2.2.4	激射基本性能	(62)
2.3	放电泵浦激光器	(65)
2.3.1	预电离原理与方式	(66)
2.3.2	放电泵浦机理	(72)
2.3.3	泵浦电源及放电回路	(76)
2.3.4	实用化激光器系统	(87)
2.4	微波与质子束泵浦	(92)
2.4.1	微波泵浦	(92)
2.4.2	质子束泵浦	(97)

第三章 表面处理与掺杂..... (101)

3.1	强激光吸收效应	(101)
3.1.1	基本光学性质	(101)
3.1.2	自聚焦效应	(105)
3.1.3	自由载流子效应	(108)
3.1.4	表面行为	(114)
3.2	热传导过程	(118)
3.2.1	热传导方程	(118)
3.2.2	均匀光束与高斯光束	(121)
3.2.3	变参量影响及其处理	(125)
3.3	激光热处理	(131)
3.3.1	表面层热反应速率	(132)
3.3.2	激光退火	(135)
3.3.3	化合物合成	(140)
3.4	表面掺杂	(143)
3.4.1	激光熔化方式	(144)

3.4.2	潜热贡献	(146)
3.4.3	掺杂机理	(152)
3.4.4	掺杂性质及特点	(159)
第四章	激光 CVD 技术	(166)
4.1	光 CVD 基本原理	(166)
4.1.1	热解	(166)
4.1.2	蒸发	(167)
4.1.3	光解	(168)
4.2	激光 CVD 主要特点	(171)
4.2.1	低温淀积	(171)
4.2.2	选择激励	(171)
4.2.3	空间局部淀积	(172)
4.3	激光 CVD 应用	(173)
4.3.1	金属膜	(175)
4.3.2	绝缘膜	(179)
4.3.3	半导体膜	(184)
4.4	激光 CVD 展望	(192)
第五章	激光曝光技术	(194)
5.1	激光曝光技术基础	(194)
5.1.1	反射和驻波	(195)
5.1.2	光的衍射	(201)
5.1.3	远紫外曝光	(208)
5.2	激光曝光技术特性	(209)
5.2.1	准分子激光特性	(209)
5.2.2	感光特性	(211)
5.2.3	实用性	(215)
5.3	准分子激光曝光应用	(215)
5.3.1	接触式曝光	(216)
5.3.2	投影式曝光	(218)
5.4	课题与展望	(223)

第六章 激光刻蚀	(227)
6.1 激光刻蚀方式与机理	(227)
6.1.1 激光诱导刻蚀	(227)
6.1.2 激光直接刻蚀	(235)
6.2 刻蚀性质与特点	(245)
6.2.1 半导体材料	(246)
6.2.2 金属与介质	(253)
6.2.3 有机高分子聚合物	(258)
6.3 刻蚀工艺与技术	(264)
6.3.1 基本系统	(265)
6.3.2 扫描与投影系统	(268)
6.3.3 刻蚀极限与损伤	(273)

第一章 微细加工技术概论

大规模集成电路和集成光学的发展，要求器件日趋高密度化、高集成化和多功能化：为适应这一要求，制造工艺技术必须满足图形精细化、过程低温化、控制精密化、环境超净化的要求。基于这些技术要求，逐渐形成了以电子束、离子束、激光束为中心的新兴技术，即微细加工技术。与传统湿法技术相比，这种技术有时也称为干法加工技术。从加工精度考虑，也有人称其为亚微米加工技术。

在这一章，我们主要从半导体器件工艺技术出发，重点介绍微细加工技术的几个主干技术，即离子注入技术、等离子CVD技术、电子束曝光技术和离子刻蚀技术。

1.1 基本工艺与复合工艺

一个典型的半导体器件制造工艺流程如图 1.1.1 所示。从图可以看出，一个完整器件制造过程是由几个基本工艺技术构成的，包括洗净技术、氧化技术、扩散技术、刻蚀技术等。这些基本工艺技术以光刻技术为中心反复使用，构成各种器件的完整工艺过程。

晶体管等器件开发的初期，其基本工艺过程比较简单，仅包括单晶的研磨、合金、扩散、烧结等。但是随着器件本身复杂程度的提高，其制造工艺也随之复杂化。尽管如此，仍可以将复杂的器件制备工艺划分为一系列的“基本工艺”，每一基本工艺即是一个专门的技术领域。每一种器件的制备工艺都是由不同的基本工艺技术构成的。一个新器件的开发必然又要引入

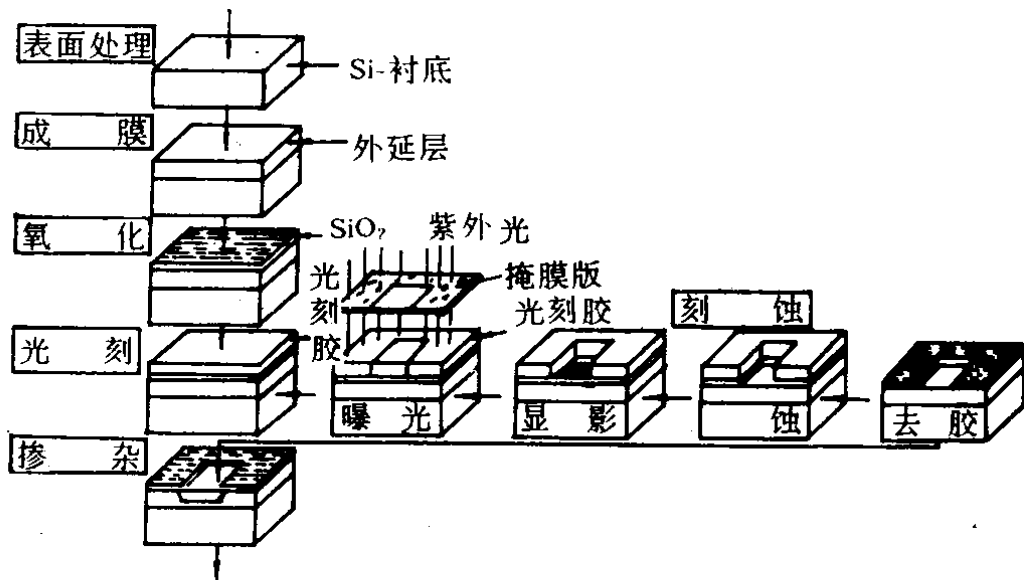


图 1.1.1 基本工艺技术流程

新的工艺技术，而这种新技术本身往往也是由几个基本工艺技术组成的。比如平面工艺技术，就是由扩散、氧化、光刻等技术构成的。这种为制造某些器件而组成的工艺技术整体统称为复合工艺技术。

1.1.1 基本工艺

从图 1.1.1 可以看出，典型的半导体器件工艺技术流程主

表 1.1.1 半导体器件基本工艺技术

1	表面处理		
2	氧化技术		
3	掺 杂 技 术	3.1	热扩散技术
		3.2	离子注入技术（注入和退火）
4	薄膜形成技术	4.1	PVD 技术（物理气相生长）
		4.2	CVD 技术（化学气相生长）
5	光 刻 技 术	5.1	光刻（向光刻胶转让图形）
		5.2	刻蚀（衬底加工）

要是几个基本工艺过程的循环使用，这些主要工艺过程可以归纳成表 1.1.1。这就是前面讲的基本工艺技术。

这些基本工艺不仅是技术问题，也包括技术本身的基础物理和化学问题，比如表面化学、杂质扩散、紫外光学、高分子化学等。除此之外，与这些技术相关的各种材料、装置以及技术评价等问题也都是非常重要的。

1.1.2 复合工艺

如前所述，复合工艺技术可以说是制备某种器件的工艺技术。各种器件的最基本形式主要有三种：

- (1) npn 平面晶体管。
- (2) 双极 pn 结分离型 IC。
- (3) Al 栅 PMOS, CMOS。

其他器件大多均由上述基本形式附加几个基本工艺所构成的。表 1.1.2 给出了复合工艺技术的典型实例

表中把掩膜制作、单晶制备和组装技术与复合技术并列，主要是考虑到这几种技术确实是构成器件工艺技术的基本要素。但应该看到这些技术是由某些与传统基本工艺不同的特殊基本工艺技术所构成的。

从表 1.1.2 中也可以看出，为制造 MOSIC 器件，需要用到所有的工艺技术，具有很强的综合性。这里要指出的是，表 1.1.2 中的复合技术远没包括我们以后重点涉及的微细加工技术领域的新兴工艺技术，如果计及这个领域，则复合工艺技术将更加复杂化。然而如今的 MOSIC 器件制造却必须使用这些更先进的工艺技术。

复合工艺技术大体可分为：

- (1) 器件制备工艺技术，如平面隔离技术、Si 栅制备技术、多层布线技术及局部氧化技术等。

表 1.1.2 复合工艺实例

复合工艺技术		表面处理	氮化	热扩散	离子注入	PVD	CVD	光刻	蚀刻	
1.	平面技术		✓	✓			✓			
2.	隔离技术		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
3.	自对准技术		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
4.	钝化技术	✓	✓	✓		✓				
5.	欧姆接触技术	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
6.	多层布线技术				✓	✓	✓	✓		
7.	吸气技术	✓	✓	✓	✓	✓				
8.	退火技术		✓	✓	✓					
9.	异质外延技术	✓				✓				
10.	硅栅技术	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
11.	复合器件技术	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
12.	掩膜制作技术									晶体管
13.	单晶制备技术									
14.	组装技术									
										双极 IC
										MOS IC

(2) 改善器件性能的技术，如器件的高压化、高速化、高频化和低噪声化等技术。

(3) 器件制备的新兴技术，如激光束或电子束退火、异质结构外延技术等。

(4) 提高材料利用率和稳定性的技术，如钝化技术和吸气技术等。

(5) 简化器件工艺的技术，如自对准技术等。

(6) 复合器件技术，如为提高器件价值的 DMOS 技术和 n

沟道 CMOS 技术等。

和基本工艺技术一样，复合工艺技术也包括技术本身的基础和相关材料、装置及技术评价等问题。

1.2 离子注入

离子注入技术与传统的热扩散技术均属表 1.1.1 中基本工艺技术中的掺杂技术。这种技术实际上从 1950 年已经在晶体管制作工艺中应用。为了适应 LSI 的高集成化、高密度化和多功能化的要求，更精密地控制结线和阻值就显得十分突出。同时就工业化生产而言，提高重复性和处理能力也非常重要，传统的热扩散技术已无法满足这些要求，从而迫使离子注入技术走向实用化。

离子注入技术之所以具有高精密掺杂的可控性，主要是注入离子数直接依赖于积分电流，而注入深度则可由加速电压决定。因此，容易实现对注入杂质数量和深度的严格控制。

1.2.1 离子注入技术基础

离子注入系采用高能离子与衬底碰撞，并以物理方式注入衬底。其注入深度由碰撞离子入射能量、离子种类、衬底的状态等条件确定。图 1.2.1 给出了在衬底中注入的离子状态模式。注

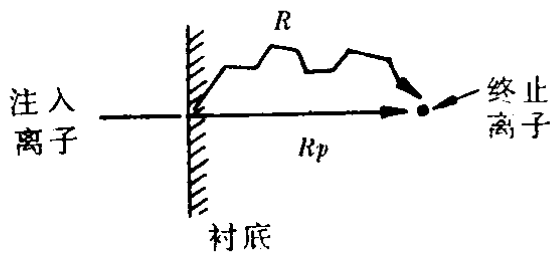


图 1.2.1 注入衬底中的离子状态

入离子在衬底晶体中向内部前进，并不断碰撞直至终止。这一过程将造成离子周围的晶体损伤，形成注入区域晶体表面损伤层。

对于每个离子，其终止行程 R 及其投影距离 R_p ，各不相同。如果把平均值记为 $\bar{R}_p$ ，则注入离子的行程和纵方向的浓度分布具有高斯形式：

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta\bar{R}_p} \exp\left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2\Delta\bar{R}_p^2}\right] \quad (1.2-1)$$

这里 $N(x)$ 为离子浓度， Q 为注入离子总量， $\bar{R}_p$ 为平均行程， $\Delta\bar{R}_p$ 为行程标准偏差， x 为深度。

这一关系如图 1.2.2 所示。可以看出在 $x = \bar{R}_p$ 处， $N(\bar{R}_p)$ 有极大值，大约为 $Q/\bar{R}_p$ 的 40%。

当采用掩膜时，注入离子的横向分布可用高斯和误差函数组合近似模型求得。图 1.2.3 给出了这种方法的结果。

由于离子的行程与注入离子能量、离子种类以及衬底状态有关，故注入

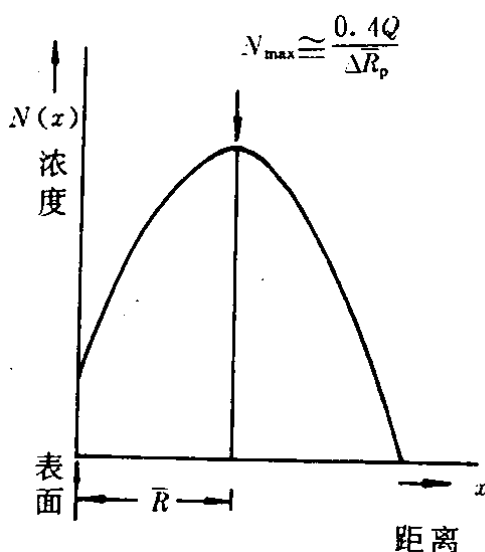


图 1.2.2 高斯近似的杂质浓度分布

离子的分布是一个复杂的问题。必须指出，上述近似忽略了注入离子的沟道效应。实际上，衬底晶体的晶格是规则有序的，在某一方向，晶格间隙较大，注入离子可以达到很深的位置，即所谓沟道效应。这种效应依赖于衬底晶体的晶面、离子的注入角度、离子种类及能量等。显然，沟道效应对注入离子的分布具有很大影响。如果注入离子的入射角超过某一临界值，则沟道效应可以忽略。在前面的理论模型中，实际上是假定晶格排列是无序的，因此其结果与计及沟道效应时有显著差别。图 1.2.4 给出了这两种结果的对比。

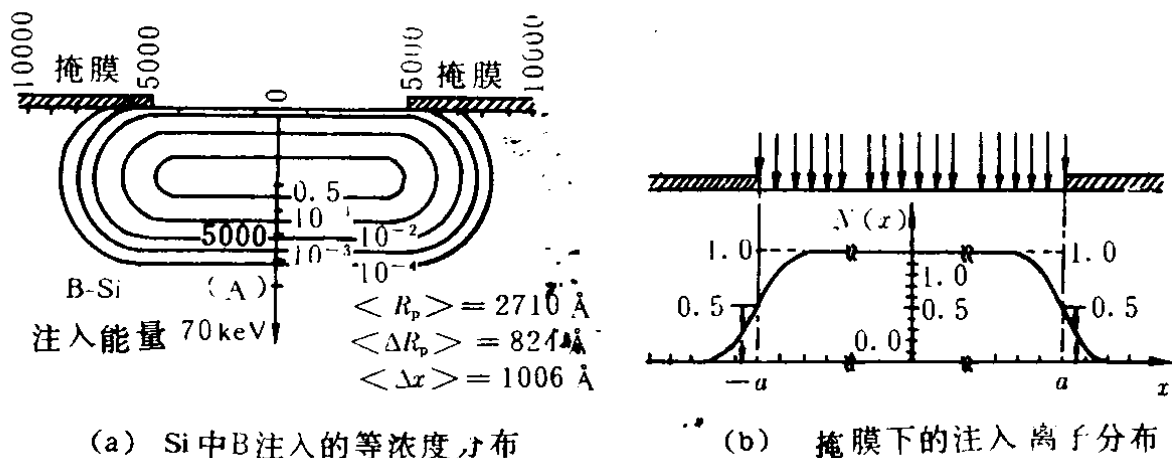


图 1.2.3 注入离子的横向分布

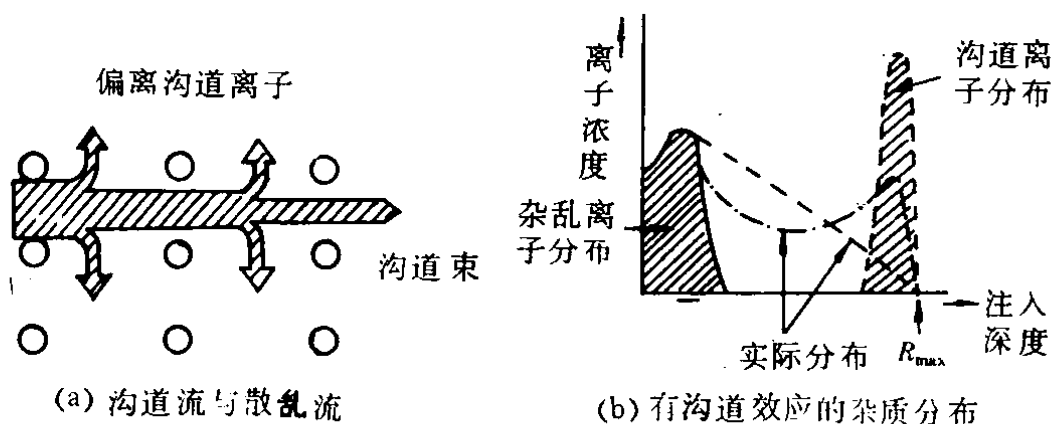


图 1.2.4 沟道效应模型

1.2.2 杂质分布

实际器件要求的杂质分布，并不希望其最大值发生在衬底晶体内部。这就要求注入离子的入射角在沟道效应临界角以上，并同时加热衬底晶体。这样做的结果不但可忽视沟道效应，而且衬底加热的结果可使高斯分布得以修正为近似热扩散的杂质分布。图 1.2.5 就是 B、P、As 在 Si 中实际杂质分布与高斯分布的比较。其中实线为高斯分布近似曲线，虚线为实验曲线。

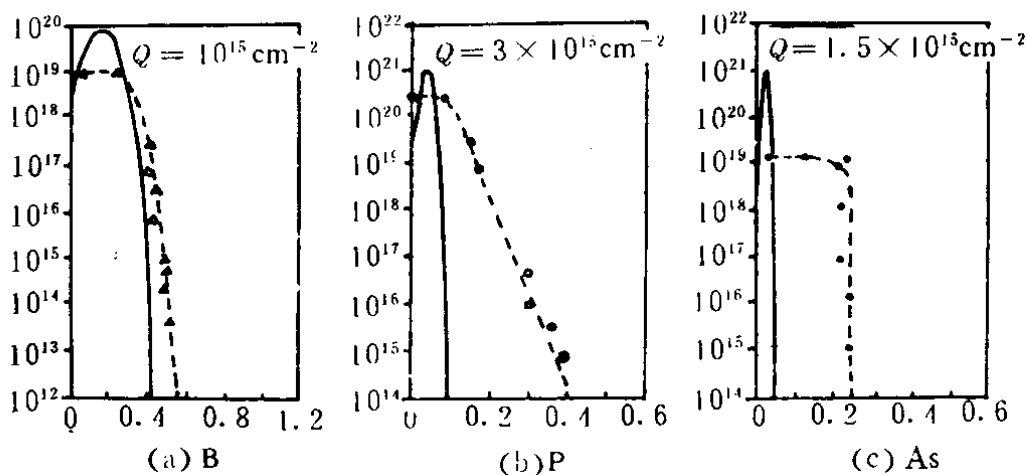


图 1.2.5 离子注入杂质分布
($\langle 111 \rangle$ Si, 30keV, 衬底温度 525℃, 束角 22°)

为了控制杂质分布,也可以采用适当的掩膜方式。实际上,离子注入技术可以利用掩膜选择注入。如果选用一种厚度大于注入离子行程的材料作为掩膜,则注入离子将终止在掩膜材料内,从而达到选择注入的目的。实验证明一般光刻胶即可作为离子注入的掩膜。这种光刻胶与离子注入技术结合,对器件工艺技术低温化起到了非常好的作用。另外,适当地选择掩膜厚度,也可改变掩膜下衬底内注入离子状态,达到控制注入杂质分布的目的。

1.2.3 离子注入装置

离子注入装置一般由离子源、质量分析仪、加速管、离子偏转系统、离子注入室等构成。整个系统均处于真空状态。离子源可由化合物或单质蒸发提供,比如 B、P、As 等离子源可采用其氧化物、氢化物及其与氢的混合气体。在一般情况下,离子源先经过质量分析器取出特定的离子而后加速。当然,某些情况下也可以先加速后分离。

离子注入装置可按离子束强度分为中电流和高电流两种,

按最大注入能量，通常有 200keV 和 400keV 两个规格。

对于半导体器件工业化规模生产的情况，离子注入装置的主要问题是如何实现样品处理的自动化和离子束的扫描。其中离子束扫描可通过离子束偏转、样品移动或两者结合来实现。图 1.2.6 是一个典型的离子注入系统简图。

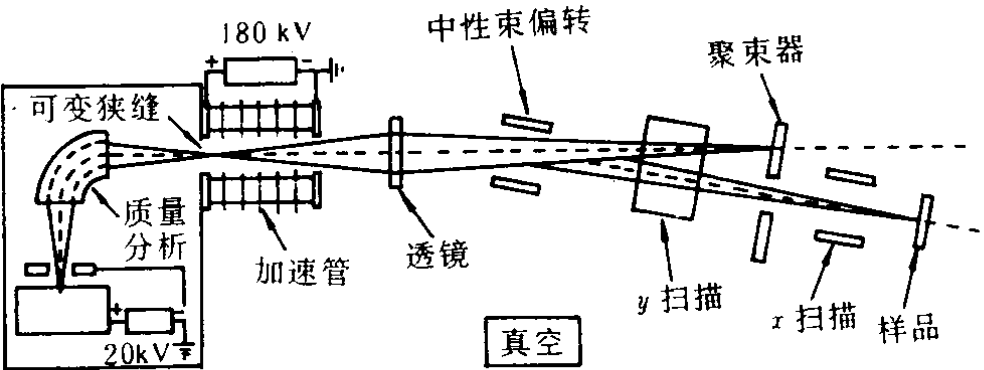


图 1.2.6 典型离子注入装置构造

1.2.4 退火技术

由于离子注入必然带来注入层的晶体损伤，所以在离子注入技术中常常附有退火技术。

在一般情况下，离子注入层的晶体损伤可以通过热退火得以消除。离子注入引起的晶体损伤通常认为是离子经过区域的非晶化造成的，而热退火则可使这种非晶层复原成单晶，其温度一般在 550℃ 左右。退火的另一个作用是可使注入衬底晶体中成为施主或受主的载流子活化，通常温度约在 800℃。

除上述热退火技术外，还有激光退火、电子束退火等方式。这些退火方式只在衬底表面层实施热处理，热扩散极小，因而对器件制备更为有利。因为离子注入技术是工艺技术低温化的极好方式，当然不希望热退火再引起杂质的重新分布。从这个意义讲，对激光退火和电子束退火等技术更有深入研究的

必要。

1.2.5 离子注入技术的优点和缺点

在结束这节之前，我们把离子注入技术的优缺点做概要总结。

1. 离子注入技术的优点

(1) 因为注入离子源是通过质量分离取出的，所以可获得高纯度的掺杂。

(2) 注入离子量可作为电流积分取出，因而可精确控制掺杂量。

(3) 可做到低温掺杂。

(4) 注入层杂质分布可通过离子种类、注入量、注入能量、衬底方位等综合设计确定。

(5) 可以用离子束直线性控制其横向扩展。

(6) 必要时可实现阶跃式掺杂，如在晶体内部形成高阻层等。

2. 离子注入技术的缺点

(1) 设备装置庞大，特别是涉及大电流、高电压和高真空系统等，比较复杂。

(2) 离子注入后会给衬底造成晶体损伤。

(3) 由于注入能量限制，不能形成深的掺杂。

(4) 离子注入装置处理能力有限。

综上所述可以看出离子注入技术的优点是很突出的，正因如此，目前这种技术在大规模集成电路中得到普遍应用。至于上述缺点，随着装置技术的进步会逐渐得到克服。