

高等学校教材

集成电路 工艺基础

王阳元 关旭东 马俊如 编著

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是固体物理教学丛书中的第18本。

本书结合集成电路工艺技术发展的主要分支，侧重讲解它们的物理基础。主要内容包括：硅晶体结构、扩散、离子注入、外延、氧化、化学汽相淀积、光刻、刻蚀、多晶硅和难熔金属硅化物薄膜、金属化、钝化和砷化镓集成电路工艺基础等十二章。

本书可供微电子专业、半导体专业等有关课程作教材，也可供从事集成电路研制和生产的科技人员阅读。

高等学校教材

集成电路工艺基础

王阳元 关旭东 马俊如 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 19.75 字数 510 000

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数0001—1 600

ISBN 7-04-003314-3/TN·151

定价 7.25元

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及其各分支学科课程教学的需要，高等学校理科物理学教材编审委员会固体物理编审小组和高等教育出版社组织编写了一套固体物理学科的教学参考书，其中包括固体物理学及其各分支学科的基础课程和实验课程用的教学参考书和一部《固体物理学大辞典》。这些书将由高等教育出版社陆续出版。

本书是这套书中的一本。

前 言

北京大学微电子学专业大学本科生和研究生的《集成电路工艺基础》和《大规模/超大规模集成电路工艺技术》课是由我们负责讲授的，这本书是在几年来上述课程的讲稿的基础上经过修改、补充而写成的。

集成电路工艺，从50年代末，60年代初发展出平面工艺以来，经过20多年的发展，已经形成了一整套适应于大规模和超大规模集成电路（LSI/VLSI）研制与生产需要的工艺技术，并正在不断涌现新的为发展特大规模集成电路（ULSI）所需要的新工艺、新技术。一代电路要求一代新的加工技术，反之，也只得一代新工艺才能有一代新电路。工艺技术是集成电路的基础，也是微电子学领域最迅速发展的领域之一，它吸引了众多的科学家、工程师为之终生奋斗。“集成电路工艺基础”和“大规模/超大规模集成电路工艺技术”也成为微电子学专业学生重要的必修课程之一。

虽然有关集成电路工艺基础方面的教材和专著在国际范围来看，应当说是不少了，但是真正适用于我国学生使用的教材还不多。人民教育出版社曾在1977年出版过一本《半导体器件工艺原理》，但是正如我们前面所谈到的，由于集成电路及其工艺技术发展十分迅速，10年前出版的教科书当然已很难适应现在的需要了。最近翻译出版的二本集成电路工艺技术方面的书，特别是由施敏主编的，由贝耳实验室科学家们撰写的《VLSI Technology》，在内容上是比较先进的，但是它比较侧重于技术的总结，而在原理与基础的阐述方面却显不足，因而作为学生特别是研究生的参考书是十分合适的，但作为一本教材，特别是本科生的教材却嫌过分技术性了些，这就促使我们编写了这本教材。我们编写本书的目的是结合工艺技术发展的主要分支侧重讲解其物理基础，

即就“物”讲“理”，以期加深同学们的理性认识，从而有助于提高他们掌握现有集成电路工艺技术及发展新的工艺技术的自觉性。

本书的基本内容可作大学本科生及硕士研究生的教材，同时也可作为从事集成电路生产和研制单位工程技术人员的参考书。

全书除导论外共十二章。在导论中扼要地介绍了集成电路发展简况，然后又以 $2\mu\text{m}$ CMOS工艺为典型例子介绍了芯片制造工艺。以便在分别阅读各章之前，使读者对集成电路概貌有一初步了解，对各个工艺在芯片制造过程中的作用有一个感性认识。在第一章介绍了硅晶体结构以后，逐次分章介绍各个工艺技术。我们特别将多晶硅和硅化物薄膜从金属化一章中分离出来，单独作为一章。这是基于互连在集成电路中的重要性随着集成度的提高越来越增加的缘故。当前VLSI中“互连”不仅在面积上占了整个芯片面积的80%左右，而且也是限制电路速度的主要因素。而在第十章中我们则重点介绍铝金属化及有关问题。全书都是以硅集成电路和工艺为基点来论述的，但是基于GaAs集成电路的重要性，我们在第十二章中作了简略的介绍。GaAs集成电路以其独特的高速优点在90年代将有更大的发展，但是全面地论述GaAs集成电路显然是另一本著作的任务。所以我们在这儿只能“提一下”为他们的进一步学习提供一些基础知识。

本书第一、二、三、四、五章即硅晶体结构、扩散、离子注入、外延和氧化是由关旭东执笔写成的。第七章光刻和第八章刻蚀是由中国科学院微电子中心研究员马俊如撰写的。马俊如研究员长期从事这方面的科学研究工作，这几年又应邀在北京大学给研究生讲授光刻和刻蚀。导论、第六章化学汽相淀积、第九章多晶硅和难熔金属硅化物薄膜，第十章金属化和第十一章钝化是由王阳元执笔撰写的。第十二章砷化镓集成电路工艺基础则是王阳元和关旭东合编的，武国英同志给研究生主讲硅化物薄膜，又是这一科研课题的主要负责人之一，在编写第九章硅化物部分时我们进行了多次的讨论，并选用了他讲义中的部分内容，因此这一

章是我们合作的成果。

在全书编写过程中得到了北京大学微电子学研究所的同事们和国内不少同行专家给以多方面的关心、支持和帮助，韩汝琦教授，王忠烈教授，李瑞伟教授，武国英、张利春、祝忠德、谭长华、许铭真教授等在百忙之中为我们审阅了书稿，特别是复旦大学李炳宗教授不辞辛苦审阅了全书，提出了许多宝贵的意见，使我们的拙作得以完成，对此，我们谨向他们表示诚挚的谢意。

由于水平所限，再加上时间匆促，许多地方未能细细推敲，粗陋和错误之处一定不少，谨请同行朋友和读者批评指正。

王阳元、关旭东

一九八七年十月于北京大学

微电子学研究所

主要符号表

A	面积
$a_i (i = 1, 2, 3)$	晶格基矢
B	磁感应强度
C	电容
D	扩散系数
	曝光剂量
E	电场强度
E	能量
E_A	受主能级
E_C	导带底能量
E_D	施主能级
E_F	费米能级
E_g	带隙
E_i	本征费米能级
E_v	价带顶能量
E_i	界面陷阱
f_T	截止频率
g	自旋校正因子
h	普朗克常数
h_{tc}	共发射极小信号电流增益
I	光强
j	扩散粒子流密度
k	玻耳兹曼常数
L	扩散长度
l_m	电子平均自由程
m	质量
	分凝系数
m_0	自由电子质量
m^*	有效质量

N	原胞数
	原子数
n	电子浓度
N_A	受主杂质浓度
N_D	施主杂质浓度
N_B	外延层中的杂质浓度分布
n_i	本征载流子浓度
	间隙原子密度
N_s	衬底掺杂浓度
	表面浓度
	单位面积的离子注入剂量
n_v	空位密度
P_i	跳跃率
Q_d	表面耗尽区中电荷
Q_{eff}	氧化物分布电荷的集总等效量
Q_{fo}	固定正电荷
Q_{ss}	单位面积有效界面电荷
R	电阻, 分辨率, 射程。
R_c	接触电阻
R_i	投影射程
$R_s, R_{\square}$	薄层电阻或方块电阻
r_{bb}	基区串联电阻
S	感光灵敏度
S_e	碰撞电离截面
S_c	电子阻止本领
S_n	核阻止本领
T	温度
t	时间
t_{ox}	绝缘层厚度
v	速度
V_I	阈值电压

x	结深
y	成品率
	溅射产额
α	吸收系数
AE	激活能
ϵ	介电常数
ϵ_0	真空介电常数
ϵ_A	电离能
λ	波长
μ_{eff}	有效表面迁移率
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
ρ	电阻率
σ	电导率
σ_n	电子俘获截面
σ_p	空穴俘获截面
τ	寿命
	弛豫时间
ϕ_B	肖特基势垒
ϕ_F	费米能级
ϕ_{Ms}	金属与硅的功函数差
ϕ_s	表面势

目 录

主要符号表	1
导论	1
§ 1 集成电路技术的发展	1
§ 2 集成电路制造	7
§ 3 集成电路芯片加工工艺举例	13
参考文献	23
第一章 硅的晶体结构	24
§ 1.1 硅晶体结构的特点	24
1.1.1 晶胞	24
1.1.2 原子密度	25
1.1.3 共价四面体	25
1.1.4 晶体内部的空隙	26
§ 1.2 晶向、晶面和堆积模型	27
1.2.1 晶向	27
1.2.2 晶面	29
1.2.3 堆积模型	31
1.2.4 双层密排面	33
§ 1.3 硅晶体中的缺陷	35
1.3.1 点缺陷	35
1.3.2 线缺陷	37
1.3.3 面缺陷	40
1.3.4 体缺陷	40
§ 1.4 硅中杂质	40
§ 1.5 杂质在硅晶体中的溶解度	45
参考文献	50
第二章 扩散	51
§ 2.1 杂质扩散机构	51
2.1.1 间隙式扩散	51
2.1.2 替位式扩散	53
§ 2.2 扩散系数与扩散方程	55

2.2.1	扩散系数	55
2.2.2	扩散方程	58
§ 2.3	扩散杂质的分布	60
2.3.1	恒定表面源扩散	60
2.3.2	有限表面源扩散	63
2.3.3	两步扩散	66
§ 2.4	影响杂质分布的其它因素	70
2.4.1	二维扩散	70
2.4.2	扩散系数与杂质浓度的关系	72
2.4.3	电场效应	75
2.4.4	发射区推进效应	76
§ 2.5	常用杂质硼、磷和砷在硅中的性质	77
2.5.1	硼在硅中的性质	77
2.5.2	磷在硅中的性质	79
2.5.3	砷在硅中的性质	81
§ 2.6	扩散工艺	84
2.6.1	固态源扩散	84
2.6.2	液态源扩散	86
2.6.3	气态源扩散	87
§ 2.7	常用杂质的扩散方法	88
2.7.1	硼扩散	88
2.7.2	磷扩散	92
2.7.3	砷扩散	94
2.7.4	锑扩散	95
§ 2.8	金在硅中的性质	95
2.8.1	金在硅中的固溶度	96
2.8.2	金在硅中的扩散机构及扩散系数	98
2.8.3	金扩散工艺	100
§ 2.9	结深和方块电阻的测量	101
2.9.1	结深测量	101
2.9.2	扩散层电阻	103
2.9.3	方块电阻的测量	104
参考文献		107
第三章 离子注入		109
§ 3.1	核碰撞和电子碰撞	111
3.1.1	核阻止本领	113
3.1.2	电子阻止本领	117

3.1.3	约化能量和约化质量	112
3.1.4	射程粗略计算	118
§ 3.2	注入离子在无定形靶中的分布	120
3.2.1	纵向分布	120
3.2.2	横向效应	122
§ 3.3	晶格损伤	126
3.3.1	级联碰撞	127
3.3.2	移位原子数目的估算	128
3.3.3	损伤区的分布	129
3.3.4	非晶层的形成	130
§ 3.4	热退火	131
3.4.1	硅材料的热退火特性	132
3.4.2	硼的退火特性	133
3.4.3	磷的退火特性	135
3.4.4	热退火过程中的扩散效应	136
3.4.5	快速退火	137
§ 3.5	离子注入技术在集成电路制造中的应用	139
3.5.1	对MOS晶体管阈值电压的控制	140
3.5.2	自对准金属栅结构	141
3.5.3	在CMOS结构中的应用	142
参考文献		144

第四章 外延

§ 4.1	四氯化硅氢还原法外延	148
4.1.1	化学反应过程	148
4.1.2	影响生长速率的主要因素	151
§ 4.2	外延层中杂质浓度的分布	154
4.2.1	掺杂原理	155
4.2.2	扩散效应	157
4.2.3	自掺杂效应	159
§ 4.3	硅烷热分解法外延, 选择外延	162
4.3.1	硅烷热分解法外延	162
4.3.2	选择外延	164
§ 4.4	外延层的缺陷	165
4.4.1	表面缺陷	166
4.4.2	体内缺陷	167
4.4.3	隐埋图形的漂移和畸变	170
§ 4.5	外延层厚度的测量	172

4.5.1 层错法	172
4.5.2 红外干涉法	174
§ 4.6 外延层电阻率的测量	177
4.6.1 三探针法	177
4.6.2 扩展电阻法	179
参考文献	182

第五章 氧化 185

§ 5.1 SiO_2 的结构及性质	185
5.1.1 结构	185
5.1.2 SiO_2 的主要性质	187
§ 5.2 SiO_2 的掩蔽作用	189
5.2.1 杂质在 SiO_2 中的存在形式	189
5.2.2 杂质在 SiO_2 中的扩散系数	191
5.2.3 掩蔽层厚度的确定	192
§ 5.3 硅的热氧化	195
5.3.1 干氧氧化	196
5.3.2 水汽氧化	197
5.3.3 湿氧氧化	198
§ 5.4 热氧化生长动力学	198
§ 5.5 决定氧化常数的各种因素	204
5.5.1 氧化剂分压	204
5.5.2 氧化温度	205
5.5.3 A 、 B 值	207
§ 5.6 影响氧化速率的其它因素	209
5.6.1 快速初始氧化阶段	209
5.6.2 硅表面晶向对氧化速率的影响	210
5.6.3 杂质对氧化速率的影响	213
§ 5.7 热氧化过程中杂质的再分布	217
5.7.1 杂质的再分布	217
5.7.2 再分布对硅表面杂质浓度的影响	220
§ 5.8 热氧化工艺的发展	222
5.8.1 薄层氧化工艺	222
5.8.2 高压热氧化	225
§ 5.9 多晶硅薄膜的热氧化	228
5.9.1 多晶硅薄膜氧化的特征	228
5.9.2 晶粒界面的增强氧化和多晶硅薄膜氧化的应力模型	229
5.9.3 SiO_2 的粘滞流效应和多晶硅薄膜氧化特征阶段的消失	231

5.9.4 掺杂增强氧化	232
§ 5.10 硅化物的氧化	234
5.10.1 硅化物的氧化机理	234
5.10.2 影响硅化物氧化的因素	240
§ 5.11 椭圆法测量SiO ₂ 薄膜厚度	241
参考文献	245
第六章 化学汽相淀积	249
§ 6.1 化学汽相淀积设备	249
§ 6.2 化学汽相淀积动力学	254
6.2.1 复相生长薄膜的过程	254
6.2.2 Grove模型	256
6.2.3 边界层与质量转移系数	257
§ 6.3 低压化学汽相淀积	261
§ 6.4 化学汽相淀积氮化硅薄膜	263
6.4.1 低压化学汽相淀积氮化硅薄膜	264
6.4.2 等离子体增强化学汽相淀积氮化硅薄膜	267
6.4.3 化学汽相淀积氮化硅的性质	268
§ 6.5 化学汽相淀积多晶硅薄膜	273
6.5.1 低压化学汽相淀积多晶硅动力学	273
6.5.2 多晶硅形貌和结构与淀积条件的关系	277
6.5.3 掺杂对多晶硅薄膜的影响	280
§ 6.6 化学汽相淀积 SiO ₂ 薄膜	284
6.6.1 低温化学汽相淀积SiO ₂ 薄膜	284
6.6.2 掺磷SiO ₂ (PSG) 的淀积	285
6.6.3 正硅酸乙脂[Si(OC ₂ H ₅) ₄ , (TEOS)]的热分解	288
6.6.4 化学汽相淀积的 SiO ₂ 薄膜性质	290
参考文献	291
第七章 光刻原理和技术	293
§ 7.1 前言	293
§ 7.2 光刻工艺流程	295
7.2.1 涂胶	296
7.2.2 前烘	297
7.2.3 曝光	300
7.2.4 显影	300
7.2.5 坚膜	301
7.2.6 腐蚀、淀积和去胶	302

7.2.7	光刻胶	302
§ 7.3	分辨率	303
§ 7.4	灵敏度 S	306
7.4.1	光化反应	307
7.4.2	光刻胶中光的吸收系数 α	308
7.4.3	增感	311
7.4.4	影响灵敏度的一些因素	312
§ 7.5	缺陷	314
7.5.1	用玻耳兹曼统计计算缺陷与成品率的关系	315
7.5.2	用玻色-爱因斯坦统计探讨缺陷和成品率的关系	315
7.5.3	缺陷与成品率关系的修正计算方法	317
7.5.4	缺陷的产生、控制与检测	319
§ 7.6	紫外光曝光	323
7.6.1	接近式曝光	324
7.6.2	接触式曝光	328
7.6.3	投影光刻	328
7.6.4	光学传递函数 (MTF)	330
§ 7.7	X射线曝光	331
7.7.1	X射线曝光系统	331
7.7.2	图形的畸变	332
7.7.3	X射线曝光掩模	334
7.7.4	X射线光刻胶	335
7.7.5	X射线光源	336
§ 7.8	电子束曝光	339
7.8.1	弹性散射	340
7.8.2	非弹性散射	341
7.8.3	邻近效应	342
§ 7.9	小结	344
参考文献		345
第八章	刻蚀	347
§ 8.1	VLSI对图形转移的要求和刻蚀方法	347
8.1.1	VLSI对图形转移的要求	347
8.1.2	湿法刻蚀	349
8.1.3	干法刻蚀	351
§ 8.2	等离子体的一般特性	351
8.2.1	气体电离和等离子体	351
8.2.2	等离子体的准电中性	353

8.2.3	等离子体中两种温度概念	354
8.2.4	等离子体的扩散	355
8.2.5	等离子体电势	356
8.2.6	直流辉光放电	357
8.2.7	射频辉光放电	359
§ 8.3	等离子刻蚀	362
8.3.1	自由基对刻蚀的贡献	363
8.3.2	物理和化学的混合模型	363
§ 8.4	刻蚀反应器结构	364
8.4.1	圆筒形反应器	364
8.4.2	平板型反应器	366
§ 8.5	硅和二氧化硅的刻蚀	369
8.5.1	刻蚀气体	369
8.5.2	刻蚀条件与刻蚀速率的关系	371
8.5.3	Si/SiO ₂ 的刻蚀选择比	375
§ 8.6	铝及其合金的刻蚀	378
8.6.1	刻蚀气体的选择	379
8.6.2	铝的氧化物的刻蚀	379
8.6.3	沾污对铝刻蚀的影响	381
§ 8.7	难熔金属硅化物的刻蚀	386
§ 8.8	小结	392
	参考文献	393

第九章 多晶硅薄膜和难熔金属硅化物薄膜

§ 9.1	多晶硅栅	396
9.1.1	多晶硅栅的自对准和它对器件工作频率的影响	396
9.1.2	多晶硅栅对MOS晶体管开启电压的影响	399
§ 9.2	多晶硅电学性质	404
9.2.1	多晶硅电学特性	404
9.2.2	多晶硅薄膜的电导率理论	408
9.2.3	多晶硅薄膜的载流子迁移率理论	416
§ 9.3	多晶硅互连的局限性和难熔金属硅化物的应用	417
9.3.1	多晶硅互连的局限性	417
9.3.2	难熔金属硅化物的应用	420
§ 9.4	溅射淀积的基本原理	422
9.4.1	硅化物的淀积方法	422
9.4.2	直流溅射淀积的基本原理	425

9.4.3 射频 (RF) 溅射淀积	433
9.4.4 磁控溅射淀积	434
9.4.5 离子束溅射和反应溅射淀积	436
§ 9.5 溅射淀积硅化物	438
9.5.1 纯金属和硅双靶共溅射淀积硅化物薄膜	438
9.5.2 化合物靶溅射淀积硅化物薄膜	441
§ 9.6 硅化物的形成、组份和结构	443
9.6.1 硅化物的形成机制	443
9.6.2 硅化物形成的相序	445
9.6.3 硅化物的结构	447
§ 9.7 硅化物的电学性质	454
9.7.1 硅化物的电导率	454
9.7.2 硅化物肖特基势垒	458
§ 9.8 多晶硅/硅化物复合栅和互连	461
9.8.1 多晶硅/硅化物复合栅结构	462
9.8.2 复合栅中多晶硅/硅化物厚度比的考虑	462
参考文献	464

第十章 金属化

§ 10.1 引论	468
§ 10.2 金属薄膜的真空淀积	470
10.2.1 真空蒸发淀积薄膜的物理过程	470
10.2.2 真空蒸发设备	479
10.2.3 蒸发淀积薄膜的厚度分布	484
§ 10.3 Al/Si 接触和它的改进	488
10.3.1 Al/Si 接触中的几个物理现象	488
10.3.2 Al/Si 接触中的尖楔现象	491
10.3.3 Al/Si 欧姆接触和肖特基接触	493
10.3.4 Al/Si 接触的改进	496
§ 10.4 电迁移现象	501
10.4.1 电迁移现象的物理机制	501
10.4.2 中值失效时间 (MTF)	503
10.4.3 改进铝电迁移的方法	505
§ 10.5 台阶覆盖	509
10.5.1 金属化中台阶覆盖问题	509
10.5.2 改善台阶覆盖的方法	511