

半导体器件工艺手册

O·D·图雷蒲等 编 王正华 叶小琳 夏如兴 译

电子工业出版社

内 容 简 介

本书以大量的图表,系统地介绍了硅晶体管和集成电路的生产工艺及经常用到的数据和公式,是一本经常需要查阅的工具书。全书共十七章,大致可分为:半导体物理基础、工艺、计算机工艺模拟程序、器件、质量控制和管理等六部分。每章附有例题解答、习题和习题答案。

本书可供从事半导体器件科研和生产的工程技术人员及管理人员参考。

半导体器件工艺手册

O·D·图雷蒲等 编

王正华 叶小琳 夏如兴 译

责任编辑:郭延龄

•

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

隆昌印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

•

开本: 787×10921/16 印张: 17.75 字数: 430 千字

1987 年 5 月第 1 版 1987 年 5 月第 1 次印刷

印数: 0,001—4,500 定价: 3.65 元

统一书号: 15290·408

ISBN7—5053—0031—8/TN11

译 者 的 话

本书是由美国技术之友公司(Technology Associates)于1978年编辑出版,于1982年修订第二次出版。译稿是根据第二版翻译的。原名半导体工艺手册“(Semiconductor Technology Handbook”,但主要内容是当前生产量最大的硅集成电路和硅晶体管的工艺技术,故译稿定名为“半导体器件工艺手册”。

全书共十七章,包括:概论;半导体物理基础;硅材料;氧化;光刻;扩散;离子注入;化学汽相淀积(CVD);金属化;SUPREM 程序;结;MOS 场效应管;双极型器件;质量控制与可靠性;成品率和成本的计算方法;封装和装配;单位转换,词汇表和参考文献。从提供的数据和工艺方法来看,本书大体上反映了美国七十年代末至八十年代初半导体器件工厂的实际水平。书中选用的图表和公式,都是在设计产品、调整工艺、分析实验结果中经常要使用的。对于从事半导体生产和科研的工程技术人员及管理人员是一本必读的工具书。每章并有例题解答、习题及习题答案,对于没有系统地学过半导体专业知识的同志也是一本入门的教科书。国外有人研究微电子学和社会发展的关系时,认为发展中国家如果没有半导体器件工业,就不可能有工业的现代化。本书的出版,如能对广大的半导体器件生产和科研战线的人员有所裨益,是我们最大的愿望。

翻译中,译者对原书中的一些错误作了相应的改正。读者如须深入研究一些问题,还可查阅书后所列参考文献。为了印刷出版的方便,译本的周期表采用北京大学出版的周期表。有关锗、硅、砷化镓等材料性质的表格译者改用厦门大学半导体工艺原理一书类似的附表。特此致谢。

本书翻译出版时受到吴尔楨、郭延龄等同志的鼓励和支持。施容德同志作过文字校订。限于译者水平,译稿中难免缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

译 者 1985 年 8 月

目 录

第一章 概论	1
1.1 半导体工业	1
1.2 平面工艺	1
1.3 器件制造工艺	1
图1-1 增长预测	2
图 1-2 NMOS 工艺流程剖面示意图	5
1.3.1 栅长 $L=2\sim 3\mu\text{m}$, 氧化物绝缘的硅栅 NMOS 工艺流程 (参阅图1-2)	5
图1-3 CMOS 工艺流程剖面示意图	11
1.3.2 氧化物绝缘硅栅 CMOS 工艺流程 (参看图1-3)	12
图 1-4 典型 TTL 工艺流程剖面示意图	15
1.3.3 低功耗肖特基 TTL 典型工艺流程	16
第二章 半导体物理基础	19
2.1 键模型	19
2.2 能带模型	21
2.3 本征载流子浓度	22
2.4 费米能级	23
2.5 电子及空穴的传输	24
2.5.1 热运动	24
2.5.2 漂移	24
2.5.3 电子及空穴的迁移率	24
2.6 寿命	25
2.7 介电特性	25
2.8 硅电阻率的计算	26
习题	26
习题答案	27
表2-1 硅、锗、砷化镓和二氧化硅的性质(室温)	27
元素周期表	28
图SP-1 电阻率和杂质浓度的关系曲线	29
图SP-2 本征载流子浓度与温度的关系曲线	30
图SP-3 载流子浓度的诺模图(算图)	31
图SP-4 费米势和掺杂浓度的关系曲线	32
图SP-5 漂移速度和电场强度的关系曲线	33
图SP-6 迁移率和杂质浓度的关系曲线	34
图SP-7 杂质原子在硅中的能级 ^[6,7]	35
图SP-8 单位面积的电容(以硅、二氧化硅和氮化硅作介质)	36

第三章 硅材料	37
3.1 生产多晶硅	37
3.1.1 粗硅	37
3.1.2 提纯	37
3.2 晶体生长	38
3.2.1 直拉法生产单晶	38
3.2.2 悬浮区熔法生长单晶	40
3.3 制造大圆片	41
3.3.1 大圆片的尺寸	41
3.3.2 大圆片的制造	41
3.3.3 大圆片的晶向	41
3.3.4 边缘倒角	43
3.3.5 背面损伤层	45
3.3.6 大圆片的标记	45
表3-1 硅的染色腐蚀	45
第四章 氧化	47
4.1 热氧化	47
4.1.1 氧化工艺和方法	47
4.1.2 硅的氧化——一种表面反应	49
4.1.3 杂质分布	52
4.1.4 反应速率	52
4.1.5 掩蔽氧化	53
4.1.6 一种Si-SiO ₂ 界面机构图	54
4.1.7 二氧化硅的性质及其测量方法	55
4.1.8 氧化层台阶高度的测定	56
4.2 等离子氧化	57
习题	58
习题答案	59
图 OX-1 在干氧中的氧化速率	61
图 OX-2 在合成水气中的氧化速率	62
图 OX-3 采用 HCl 的硅的热氧化	63
图 OX-4 热氧化期间硼的再分布	64
图 OX-5 热氧化期间磷的再分布	65
图 OX-6 Si ₃ N ₄ 在水气中的氧化	66
图 OX-7 二氧化硅膜的色谱	67
图 OX-8 氧化层台阶高度计算表	68
第五章 光刻	69
5.1 前言	69
5.2 光刻胶	69
5.2.1 正胶	69
5.2.2 负胶	70

5.3 光刻版和光刻机	70
5.4 光刻工艺	71
5.5 干法等离子体腐蚀	74
第六章 扩散	77
6.1 工艺流程	77
6.2 扩散分布的测定	79
6.2.1 预淀积	79
6.2.2 再扩散	81
6.2.3 热循环的积累效应	81
6.2.4 外延层的扩散分布	82
6.2.5 扩散结果的评价方法	82
6.2.6 其它杂质在硅和二氧化硅中的扩散系数	85
6.2.7 扩散例题	85
习题	87
习题答案	89
图 DIF-1 杂质在硅中的固溶度	91
图 DIF-2 替位式杂质在硅中的扩散系数 ^[2,3]	92
图 DIF-3 归一化余误差函数图	93
图 DIF-4 掩蔽磷预淀积所需要的氧化层厚度	94
图 DIF-5 掩蔽硼预淀积所需要的氧化层厚度	95
图 DIF-6 归一化高斯分布图	96
图 DIF-7 外延层中的杂质分布	97
图 DIF-8 杂质在硅中的扩散系数	98
图 DIF-9 杂质在二氧化硅中的扩散系数	99
第七章 离子注入	100
7.1 离子注入工艺	100
7.1.1 杂质源	100
7.1.2 剂量控制	100
7.1.3 分布控制	103
7.1.4 低温工艺	104
7.1.5 均匀性	105
7.1.6 高产额	105
7.1.7 离子注入工艺的几个重要实际问题	105
7.2 根据图表计算注入分布	106
7.2.1 注入分布的计算	106
7.2.2 求注入硅中的离子数 Q	109
7.2.3 举例计算注入分布	109
习题	111
图 II-1 硅及二氧化硅中的离子注入 ^[1]	113
图 II-2 掩蔽膜所需厚度(透过 $<0.0001\%$) ^[1,2]	114

图 II-3 硅及二氧化硅中射程标准偏差	115
图 II-4 氮化硅中的离子注入 ^[1]	116
图 II-5 氮化硅中射程标准偏差	107
第八章 化学汽相淀积 (CVD)	118
8.1 前言	118
8.2 化学汽相淀积设备和淀积工艺	119
8.2.1 常压反应器	119
8.2.2 气相过程和表面过程	120
8.2.3 低压系统	121
8.3 淀积薄膜的性质	123
8.4 硅的外延	124
8.4.1 成核和缺陷	124
8.4.2 外延气体	124
8.4.3 外延掺杂	125
8.4.4 外延层鉴定	126
8.5 多晶硅	127
8.5.1 淀积	127
8.5.2 性质	127
8.6 淀积绝缘材料	128
8.6.1 氮化硅	129
8.6.2 二氧化硅	129
8.7 等离子增强化学汽相淀积	130
8.7.1 机构	130
8.7.2 等离子体反应器	131
8.7.3 等离子体氮化硅	131
8.7.4 等离子体氧化硅	132
8.7.5 等离子体多晶硅	133
8.8 总结	133
图 CVD-1 化学汽相淀积氧化层中磷含量的控制 ^[1]	134
第九章 金属化	135
9.1 对互连金属化的要求	135
9.1.1 欧姆接触	135
9.1.2 接触电阻	135
9.1.3 通路电阻	136
9.1.4 电导率	136
9.1.5 稳定性	136
9.1.6 粘附性	136
9.1.7 可掩蔽性	136
9.1.8 抗腐蚀性	138
9.1.9 可焊性	138
9.1.10 电迁移	138
9.1.11 台阶覆盖	139

9.1.12 淀积的相容性	139
9.2 铝以外的金属化	140
习题	141
图 MET-1 铝对 P 型硅的接触电阻 ^[1]	142
图 MET-2 铝对 N 型硅的接触电阻 ^[1,2]	143
图 MET-3 铝硅相图 ^[4]	144
图 MET-4 硅金相图 ^[4]	145
第十章 SUPREM 程序	146
10.1 SUPREM 语言	146
10.2 SUPREM 控制语句	147
10.3 SUPREM 的潜在能力	147
10.4 图示技术	147
图 10-2 SUPREM 模拟氧化过程中杂质的再分布	148
图 10-3 SUPREM 模拟通过氧化层的离子注入过程	150
图 10-4 SUPREM 模拟计算 阈 电 压	154
第十一章 结	156
11.1 二极管特性	156
11.1.1 单边突变结	157
11.1.2 线性缓变结	157
11.1.3 高电平注入	160
11.2 P-N 结反向击穿电压	161
11.3 二极管结例题	161
习题	162
图 JN-1 硅平面单边突变结的击穿电压 ^[1]	163
图 JN-2 平面二极管的穿通击穿电压 ^[2]	164
图 JN-3 单边突变结的诺模图	165
图 JN-4 线性缓变结的诺模图	166
图 JN-5 扩散结的耗尽层宽度 ^[3]	167
第十二章 MOS 场效应管	168
12.1 电容器工作原理	168
12.2 MOS 电容器能带图	169
12.3 MOS 器件	169
12.3.1 阈值电压	169
12.3.2 NMOS 和 PMOS 器件	169
12.3.3 CMOS 器件	171
12.3.4 增强型和耗尽型器件	171
12.3.5 MOSFET 特性	171
12.3.6 器件增益——跨导	173
12.3.7 MOSFET 速度	173
12.3.8 阈值电压 V_T 的决定方法	174

12.3.9 电容-电压(C-V)分析	176
12.3.10 集成 MOS 器件	179
12.3.11 动态存储单元	180
12.3.12 α 粒子感应的软性故障 ^[14,15,16]	180
12.3.13 热电子 ^[17]	182
12.3.14 MOS 工艺的成比例缩小技术 ^[20,21]	182
12.3.15 其它 MOS 技术	183
习题	183
习题答案	185
图 MOS-1 费米势和基底浓度的关系	187
图 MOS-2 经各种热处理后的氧化层固定电荷 ^[2,3]	188
图 MOS-3 半导体表面强反型时耗尽区宽度和耗尽区内的电荷与掺杂浓度的关系	189
图 MOS-4 电荷与电压换算关系 (对一定厚度的 SiO_2)	190
图 MOS-5 各种栅电极的功函数 ϕ_{MS} 和硅掺杂浓度的关系	191
图 MOS-6 MOS 晶体管栅源阈值电压随不同衬底偏置的变化	192
图 MOS-7 平带电容	193
图 MOS-8 不同氧化层厚度 t_{ox} 时平带电容和最小电容的关系	194
图 MOS-9 反型层内电子、空穴的迁移率和半导体内或表面场区中感应的单位面积 总电荷的函数关系	195
图 MOS-10 反型层中少数载流子电荷数	196
第十三章 双极型器件	197
13.1 双极晶体管	197
13.2 双极晶体管的工作状态	199
13.3 正常工作的双极晶体管	201
13.3.1 发射极电流的组成	201
13.3.2 共发射极电流增益	202
13.3.3 集电极饱和电压 V_{CES}	203
13.3.4 电流增益的图解确定	203
13.4 双极晶体管的电压极限值	203
13.5 饱和电阻的确定	204
13.6 晶体管增益随集电极电流的变化	206
13.7 双极晶体管的开关特性	207
13.8 双极晶体管的极限值	208
13.9 肖特基势垒二极管	210
13.10 肖特基二极管特性	211
13.10.1 二极管自建电压	211
13.10.2 存储时间	212
13.11 肖特基二极管在双极电路中的应用	212
13.12 双极例题	213
习题	215
习题答案	216

图 BP-1 BV_{CEO} 和电流放大系数的关系 ^[1]	218
第十四章 质量控制与可靠性	219
14.1 质量控制	219
14.1.1 统计的质量管理	219
14.1.2 统计现象	219
14.1.3 提高对管理图的信赖	220
14.1.4 统计管理图	220
14.1.5 管理图的图案控制	221
14.1.6 工序能力研究	223
14.1.7 质量控制最重要的方面是采取改进措施(可以认为 QC = Quick Corrective Action)	223
14.2 可靠性	223
14.2.1 加速寿命试验	223
14.2.2 可靠性鉴定	224
14.2.3 电老化(Burn-in)	225
14.2.4 失效分析	225
习题	225
习题答案	226
图 QCR-1 $\bar{X}$ -R 管理图	230
图 QCR-2 Arrhenius 图(图中直线 $E_A = 1.0\text{eV}$)	231
图 QCR-3 对数正态分布	232
图 QCR-4 Goldthwaite 模型	233
第十五章 成品率和成本的计算方法	234
15.1 成品率和成本的计算	234
15.2 集成电路布图的设计规则	236
15.2.1 MOS 集成电路	236
15.2.2 双极型集成电路	237
习题	241
图 YCM-1 总芯片数和芯片面积的关系曲线(英制)	242
图 YCM-2 总芯片数和芯片面积的关系曲线(公制)	243
图 YCM-3 成品率和工序数的关系	244
图 YCM-4 成品率模型	245
图 YCM-5 Murphy 模型	246
图 YCM-6 Soeds 模型	247
图 YCM-7 直径 100mm 硅片芯片成品率和芯片大小的关系曲线	248
第十六章 封装和装配	249
16.1 封装和装配	249
16.2 功率耗散	256
16.3 可靠性	258
16.3.1 湿气	258

16.3.2 键合开路	260
16.3.3 腔室中的粒子	260
16.3.4 钠离子和玷污	260
16.3.5 α 粒子	260
第十七章 单位转换、词汇表和参考文献	261

第一章 概 论

半导体器件工艺手册是按照工具书的要求编写的,可供从事半导体器件的设计和生产,或者负责保证器件达到或超过质量和可靠性管理的工程师和管理干部参考。

1.1 半导体工业

半导体工业是一门蓬勃发展的工业。半导体工业的产品在现有各个工业部门中都得到了应用,并促进了一些新的工业部门的飞跃发展。半导体工业最显著的特点是:自1948年^[1,2]发明晶体管后,其发展是迅速的并且是多变的;随着新产品、新工艺的出现不断改变着本身的工业结构。

没有几个预言家有幸能看到他们的预言得到实现。然而摩尔(Moore)的预测在20年内却得到了证实。图(1-1)展望了今后的增长趋势。在1980~1987年期间内预计每年所需用的器件(以功能为单位折算)增长将是150倍。这样的增长速度将继续向所有技术人员的创造能力提出挑战,并将继续考验他们的技能。

1.2 平面工艺

由仙童公司研制的平面工艺使制造稳定的晶体管成为可能;并推动了五十年代末期和六十年代初期还幼稚的半导体工业向集成电路发展(即将晶体管、电阻和电容做在同一芯片上)。平面工艺的要点如下:

1. 在硅的平坦表面上生长一层稳定的二氧化硅(详见第四章氧化)。
2. 采用光刻技术在二氧化硅上刻出窗口(详见第五章光刻)。
3. 通过刻出的窗口将掺杂剂扩散进硅中去(详见第六章扩散)。掺杂剂沿垂直和水平两个方向向硅中扩散。
4. P-N结在表面处被二氧化硅覆盖,这层二氧化硅不再被去掉,可使器件更稳定。

1.3 器件制造工艺

制造半导体器件须经过100多道工序。本书将以三种普通的工艺类型为例,介绍其制造工序。

1. 栅长 $L = 2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的NMOS硅栅工艺
2. 氧化物绝缘的硅栅CMOS工艺。
3. 双极型低功耗肖特基TTL工艺。

在介绍每种工艺的流程时,同时提供一组器件的剖面图(图1-2、1-3、1-4)。

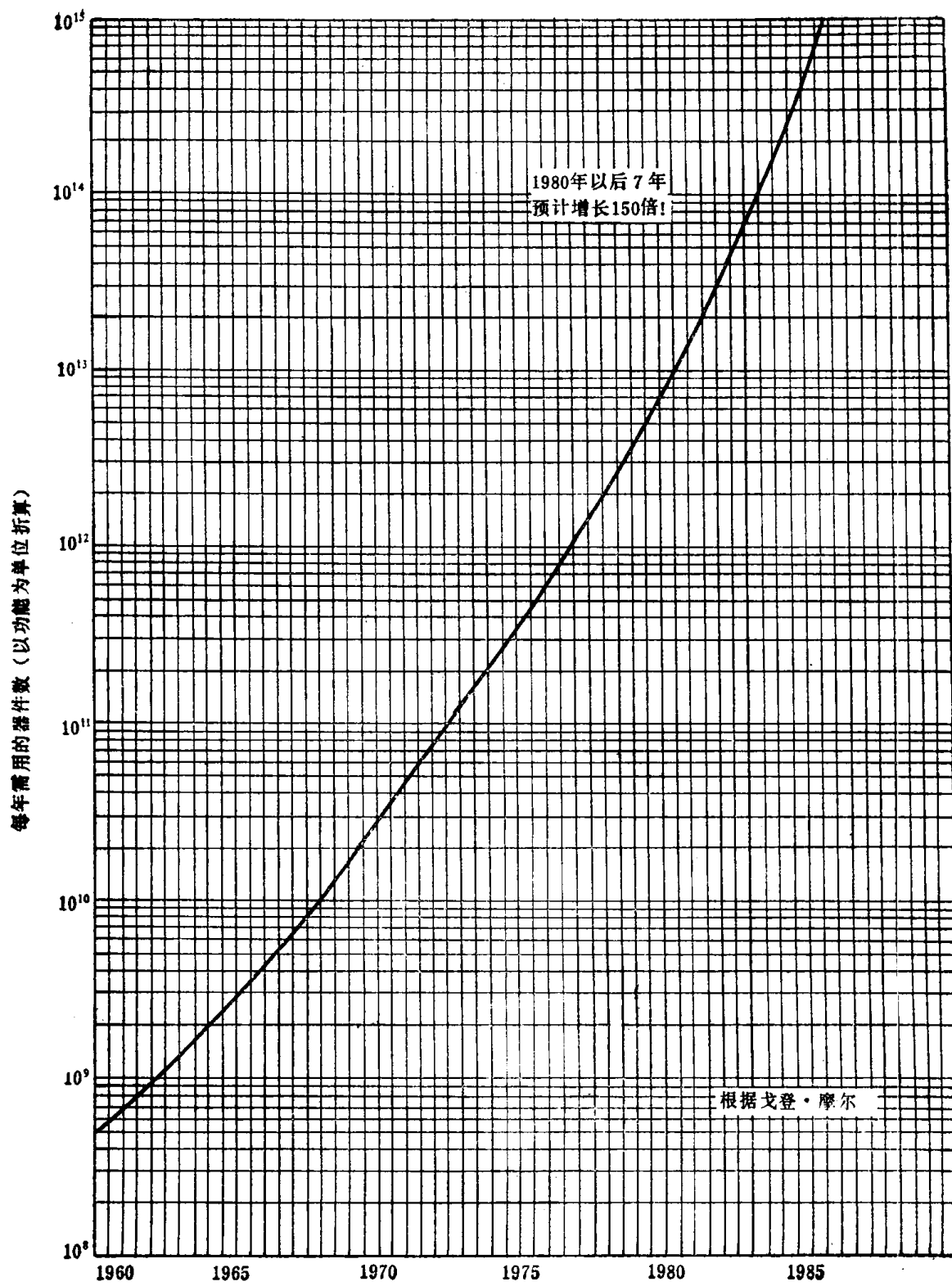
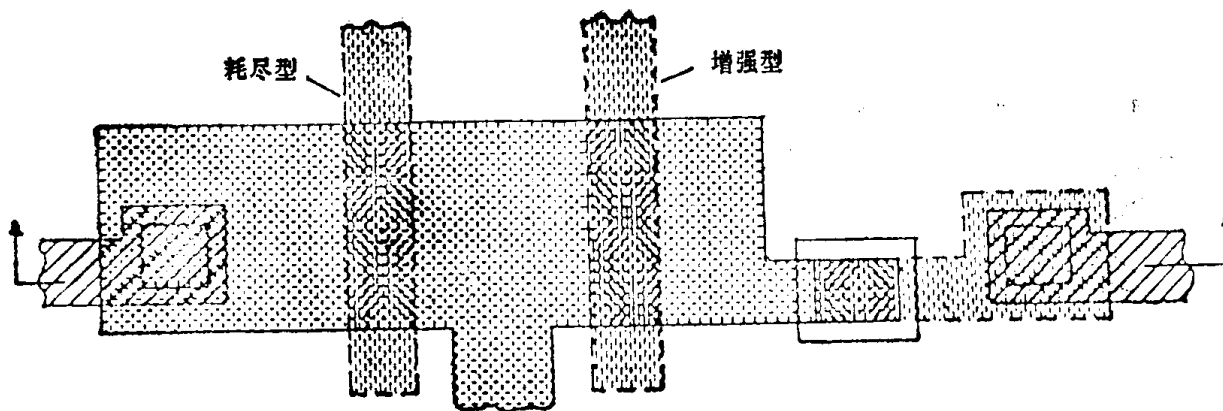
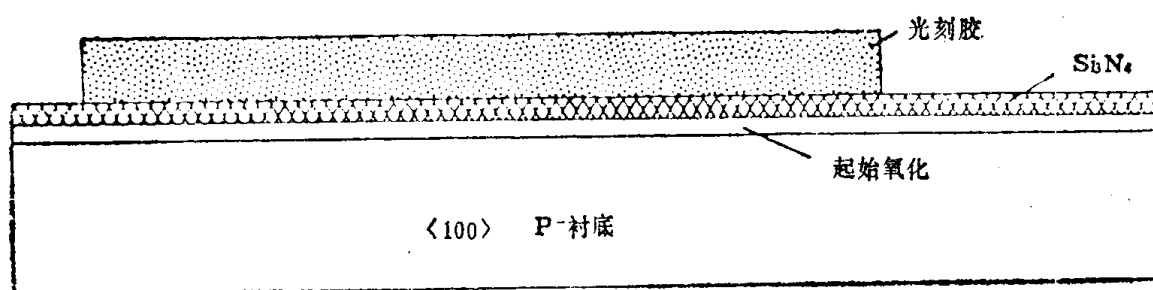


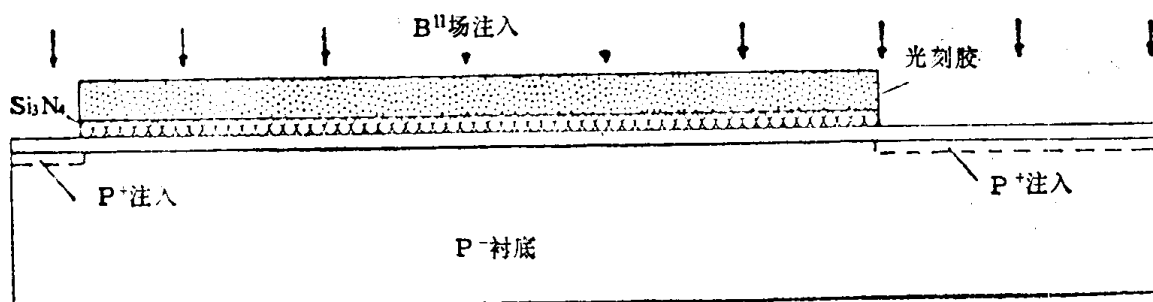
图 1-1 增长预测



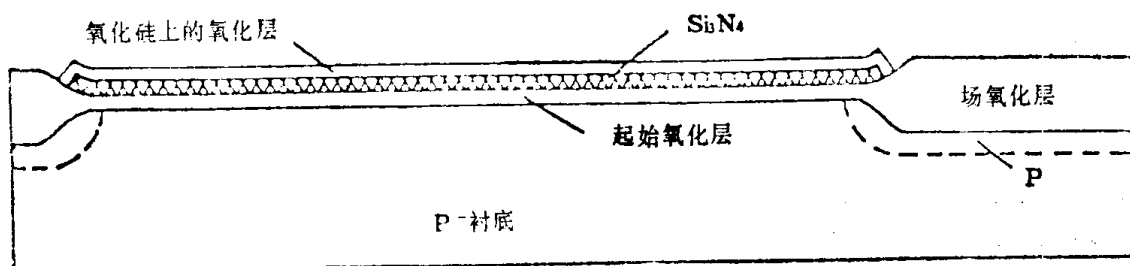
N沟晶体管复合版图



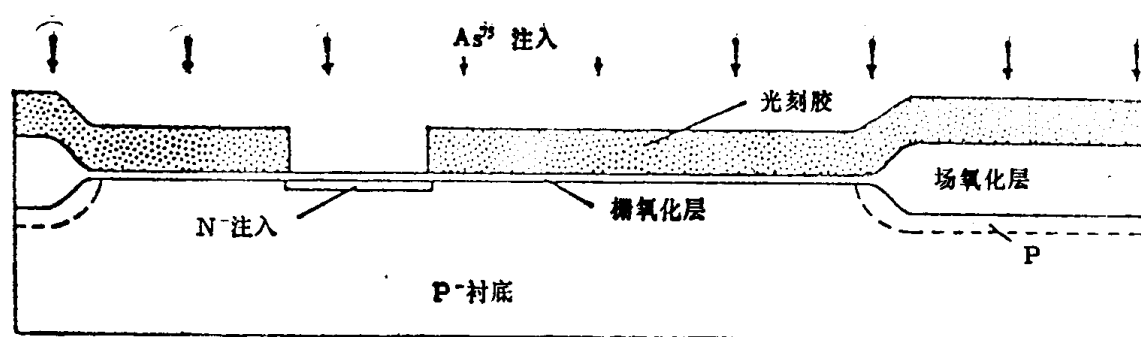
(a) 原始衬底，起始硅片处理及光刻1的光刻胶图案



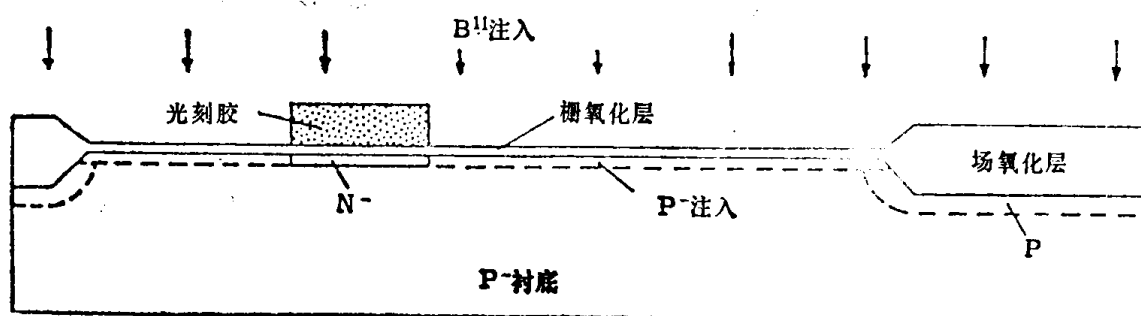
(b) 氧化硅等离子腐蚀和硼的场注入



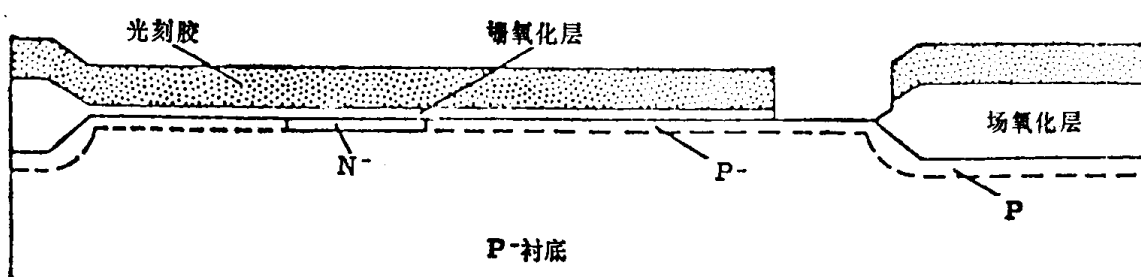
(c) 场区氧化



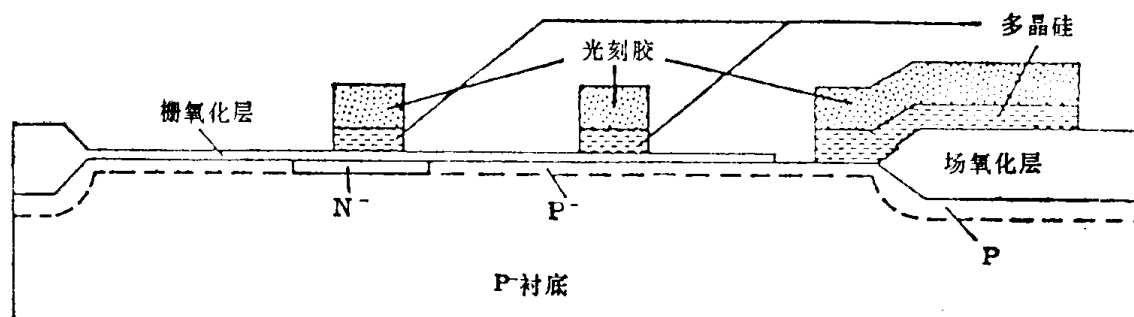
(d) 腐蚀氧化层, 去除Si₃N₄, 腐蚀氧化层, 栅区氧化, 光刻1.1 及耗尽型砷注入



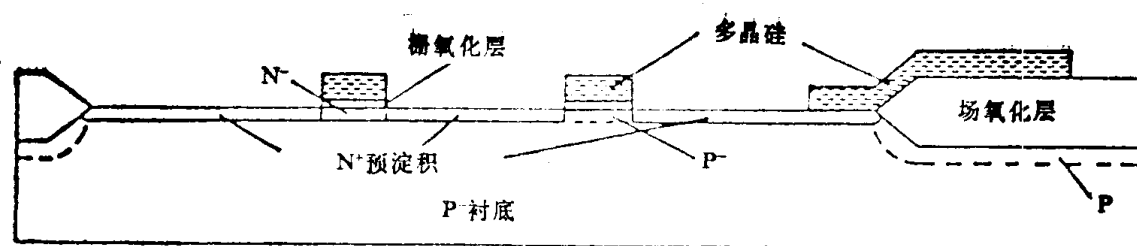
(e) 光刻1.2及增强型硼注入



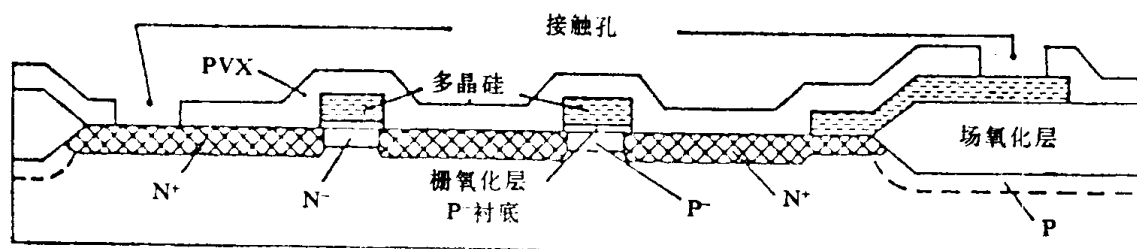
(f) 光刻2及氧化层腐蚀



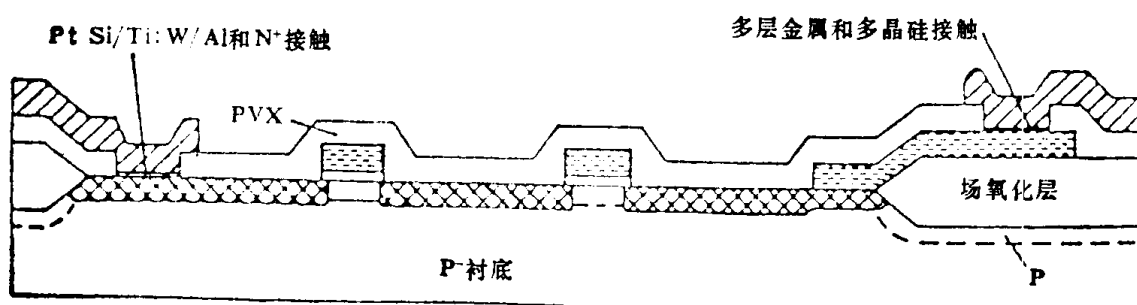
(g) 淀积多晶硅, 光刻3 及等离子腐蚀多晶硅



(h) 腐蚀氧化层，磷预淀积，去玻璃层及再扩散、氧化



(i) 淀积掺磷氧化层，回熔，光刻4及腐蚀接触孔



(j) 溅射铂，形成铂-硅，去除铂。溅射钛-钨，淀积铝，光刻5及腐蚀金属层

(k) 合金化，中测，淀积氧化层，光刻6及腐蚀引线孔。硅片减薄，蒸金及金的合金化

图1-2 NMOS工艺流程剖面示意图

1.3.1 栅长 $L = 2 \sim 3\mu\text{m}$ ，氧化物绝缘的硅栅 NMOS 工艺流程(参阅图1-2)

原始材料	3 吋(76mm) 或4吋(100mm) P 型硅片；晶向为<100>；电阻率在 $5\Omega\cdot\text{cm}$ ($3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$) 至 $50\Omega\cdot\text{cm}$ ($2.5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$) 范围内
一次氧化	温度 $900 \sim 1050^\circ\text{C}$ ；氧化层厚 $0.08 \sim 0.15\mu\text{m}$ ；测量氧化层厚度
淀积氮化硅	用 LPCVD 方法，厚度为 $0.08 \sim 0.15\mu\text{m}$
光刻 1 (参阅图 1-2(a)及(b))	刻场区。本工序需在黄色光照明区进行 1a 匀胶(如用正胶必须用 HMDS 作预涂层) 1b 前烘 1c 将版与硅片参考面对准(或将版和以前形成的图形对准)并曝光 1d 显影 1e 目视检查(测量关键尺寸(CD) 返修或报废) 1f 坚膜(如果用等离子刻蚀，或在离子注入前不一定要坚膜)

(续表)

光刻 1 (参阅图 1-2 (a)及(b))	1g 等离子刻蚀氮化硅(参阅表 5-2)(这步刻蚀后不去胶,因为要用胶作为场注入的阻挡层) 1h 最后检查并检验关键尺寸(CD),将退回的片子除去氮化硅及氧化层并进行返修
场注入 (如工作电压很低可略去) (参阅图 1-2b)	在 100~150keV 条件下注硼 剂量为 $6 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{13}$ 离子/cm ² (根据电路的工作电压范围来确定具体的注入剂量)
去胶	除去用来阻挡注入的光刻胶
场氧化 (参阅图 1-2c)	温度 950℃~1050℃,水气氧化6~15h,氧化层厚 1.0~1.7μm
去除氮化硅	去掉氮化硅上生长的二氧化硅,再用等离子腐蚀机除去氮化硅
栅氧化	除去有源区上的二氧化硅 生长栅极氧化层 ——40~70nm 干氧,温度 900~1000℃(通 HCl) 测栅氧厚度 测氧化层击穿电压 TDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown)
光刻 1.1	耗尽型器件区域光刻,采用光刻 1a ~1e 工艺流程并检查 CD
耗尽型注入 (参阅图 1-2d)	在 150~200keV 条件下注入砷 剂量: $5 \times 10^{11} \sim 2 \times 10^{12}$ 离子/cm ² 测量杂质分布
去胶	除去用来阻挡离子注入的光刻胶
光刻 1.2	增强型器件区域光刻。采用光刻1a ~1e 的工艺流程并检查CD
增强型注入 (参阅图 1-2e)	在 30~50keV 条件下注入硼 剂量: $1 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{11}$ 离子 /cm ² 测量杂质分布
去胶	除去阻挡离子注入的光刻胶
光刻 2 (参阅图 1-2f)	硅和多晶硅间(掩埋的)接触孔光刻。按光刻 1 的全部工艺流程进行,但在腐蚀 SiO ₂ 前须进行坚膜(表5-1)。腐蚀后去胶,检查硅片并测量CD
调整 Q _f	在干N ₂ 或氩气中退火 30min,温度在 900~1000℃
长多晶硅前的清洗	擦洗硅片表面以除去一切颗粒
淀积多晶硅	用 LPCVD 方法,厚度为0.4~0.6μm
光刻 3 (参阅图 1-2g)	光刻栅极,按光刻1a ~1e 工艺流程进行,但用等离子刻蚀多晶硅。刻蚀后去胶,检查硅片,测量CD
源漏(S/D)扩散或注入 (参阅图1-2h)	根据实际情况可采用热扩散法,也可采用离子注入法 热扩散 A1 腐蚀 S/D 区的栅氧化层 A2 预淀积前的清洗 A3 淀积 N 型掺杂剂(磷或砷),测量薄层阻 ρ _s A4 用10:1HF,除去玻璃化层 A5 N 型掺杂剂的再扩散和氧化,测量 ρ _s 和结深 x 离子注入