

多晶硅薄膜及其 在集成电路中的应用

王阳元 T. I. 卡明斯 编著

科学出版社

多晶硅薄膜 及其在集成电路中的应用

王阳元 T. I. 卡明斯 编著

科学出版社

1988

内 容 简 介

本书系统地介绍了多晶硅薄膜的性质及其在集成电路中的应用。全书共八章,前五章主要介绍多晶硅薄膜的基本性质,包括多晶硅薄膜的生长动力学、电学性质、多晶硅薄膜的氧化、杂质在多晶硅薄膜中的扩散和多晶硅薄膜的离子注入掺杂等特性。第六、七两章分别讨论多晶硅薄膜在 MOS 和双极型集成电路中的应用,最后一章则介绍在绝缘衬底上生长单晶硅的技术以及在无闩锁效应的 CMOS 集成电路和三维立体集成电路中的应用。

本书可供从事半导体器件及集成电路研制和设计的科技人员阅读参考,也可作为微电子学专业高年级学生及研究生的学习参考书。

多晶硅薄膜 及其在集成电路中的应用

王阳元 T. I. 卡明斯 编著

责任编辑 魏 玲

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

*

1988 年 8 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1988 年 8 月第一次印刷 印张: 16 3/4

平 1—1,500 插页: 精 2

印数: 精 1—940 字数: 438,000

(平) ISBN 7-03-000308-X/TN·13

(精) ISBN 7-03-000557-O/TN·36

定 价: 平 装 7.50 元
布 脊 精 装 8.60 元

前 言

追溯起来,写《多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用》一书,最早是出自我的老师,谢希德教授的建议。谢先生认为,虽然多晶硅薄膜已被广泛应用于半导体器件和集成电路中,但是人们对它的基本性质、原理和特征,例如它为什么有这样的电学性质,起因何在等等还都不大了解,至于杂质在多晶硅中的扩散和氧化规律以及它与单晶硅中的规律有什么不同,也并不十分明白,所以,很需要写一本书把它讲讲清楚。谢先生将这个建议告诉了我的老同学——当时在电子工业部负责学术刊物编辑出版工作的郑文灏高级工程师。由于当时我正好在做一些多晶硅薄膜物理方面的研究工作,于是郑文灏同志就把这个写书任务转交给我,希望我能负责。同时,我的许多老同学,其中包括朱恩均、卢文豪、嵇光大高级工程师等也都表示大力支持,郑文灏、卢文豪等同志还为此收集了不少材料。

在写作的准备过程中,我们发现,美国惠普公司的 PALO ALTO 集成电路实验室的 T. I. 卡明斯 (T. I. Kamins) 博士,十几年来对多晶硅薄膜物理进行了多方面的研究,发表了大量论文。其时正好我被北京大学选派,作为与美国加州伯克利大学 (U. C. Berkeley) 的交流教师,去那里工作一年多时间,而 T. I. 卡明斯博士也恰巧是从伯克利获得博士学位的,并与伯克利大学仍有合作研究的项目,机遇的巧合和共同的兴趣使我们不仅认识了,并且进行了多次十分有益的讨论,最终导致我们合作写这本书。我们选取了这样的合作方式:首先由我用英文写出该书的基本内容,由 T. I. 卡明斯进行补充和修改,然后由我执笔,用中文编写全书。在编写过程中,我又增加了一些新的内容。由于时间关系,第五、第六章及第七章,我们只共同讨论了主要内容。

本书的编写工作,如果从 1981 年落实时算起,已有五个年头了。一方面,这当然是由于我“杂事”太多,因而书稿的编写经常处于停停打打的状态,另一方面,更为本质的原因则是因为多晶硅薄膜的物理机制比单晶硅复杂得多,虽然它的应用已经十分广泛和成熟,但是对机理的理解还是很不充分的,一些理论解说也只是停留在唯象理论的基础上,许多问题还有待于去探索,因此书稿的编写常常被拖下来,就是现在写成的东西中也肯定会有不少片面和不恰当的地方,错误之处也在所难免,还望同行的朋友们批评指正。

本书共分八章,前五章主要论述多晶硅的基本性质,后三章主要讲应用。多晶硅的淀积方法,原则上讲可以有多种,但是在集成电路中实际应用的主要是化学汽相淀积 (CVD),特别是低压化学汽相淀积 (LPCVD),因此我们在第一章中重点论述这个方面。这一章涉及了许多化学知识,写起来颇费力气,幸好,吉林大学半导体化学教研室的刘明登副教授参加了第一章初稿的修改工作,他丰富的化学知识弥补了我在这方面的不足,因此,这一章是我们合作的成果。第二、三、四章分别阐述了多晶硅的电学性质、杂质在多晶硅中的扩散和离子注入掺杂,以及多晶硅氧化等几个方面。第五章主要讨论多晶硅薄膜的光学性质,本来,多晶硅光电池是多晶硅薄膜在光电方面最重要的应用,按理说应当用较多的篇幅来阐述它,但考虑到光电池本身是一个很大的领域,不能简单地把它包括在集成电路领域内,而这本书的字数也总得有一个限制,所以我们就没有包括这方面的内容。对于光学性质也只是讨论了一些与集成电路应用有关的参数。因而相比之下,这一章显得有些单薄。第六和第七章分别讨论了多晶硅薄膜在 MOS 集成电路和双极集成电路中的应用。应用是在不断发展着的,新的设计思想、电路结构和应用领域仍在不断开拓,所以本书中谈到的只能认为是一些方面的例举,意在“抛砖引玉”,希望能对读者在设计 and 应用方面有所启发。在绝缘衬底上生长单晶硅 (SOI) 的技术,是近年发展起来的制备无闩锁效应的 CMOS 电路和三维立体集成电路的新技术。利用多晶硅束加工再结晶是实现 SOI 的有效途径之一,在第

八章中,我们专门讨论了这个问题。应当感谢 C. I. 德劳利 (C. I. Drowley) 博士,他将刚刚完成的“多层结构中多晶硅激光熔化模型”的博士论文送给了我,使我们在写这一章时有了更多的宝贵的参考资料。

编写本书的目的,正如谢希德教授所提议的,是想把集成电路中多晶硅薄膜的机理和特点阐述清楚,“感觉到了的东西,我们不能立刻理解它,只有理解了的东西才能更深刻地感觉它”。如果这本书能在一定程度上实现这个目的,有助于在微电子工业、科研和教育战线上工作的广大科技人员加深对多晶硅薄膜的理解,从而提高使用和开创的自觉性,那么我们这点微薄的劳动就得到了最丰富、最有意义的报偿。

在我国,从整体上讲,多晶硅的研究工作也与集成电路的其它领域一样,还比较薄弱,但是从个别的课题上讲也不乏有突出的工作,因而在编写这本书的过程中,我总是想尽可能地将我国科学工作者的成果总结进去,为此,我也得到了许多同行朋友的热情帮助和支持;在本书的写作过程中,我曾有机会几次去美国及日本访问和讲学,在美国加州伯克利大学、北卡罗里纳州立大学、惠普公司及麻省 Lowell 大学和日本名古屋大学等,我都曾报告了有关多晶硅薄膜方面的工作,并得到了许多美国和日本同行朋友的鼓励和支持。在这里,我向所有支持和帮助过我的同行朋友们表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,北京大学微电子学研究所的韩汝琦、武国英、吉力久、张利春、张国炳副教授和陈贤、倪学文、莫帮燮、宁宝俊等同志以及清华大学微电子学研究所的余志平副教授都曾分别帮助审阅了有关各章的初稿,特别是韩汝琦副教授,在出国前的紧张准备时期,还抽出时间帮助我审阅了前五章的初稿,并提出了许多宝贵意见。另外,我的两位研究生陶江、佟深也参加了个别章节和部分附录初稿的撰写工作,帮助作了不少编辑整理工作。在这里,我向他们致以诚挚的谢意。更使人感动的是,基本定稿后,谭长华和许铭真高级工程师,又花了很多时间对全书进行了严

格认真的审核,我向他们表示深深的感谢。最后我要着重提到,清华大学李志坚教授在百忙之中对本书进行了最终审定,使这本旷日持久的书得以最后完成,我谨向他致以衷心的感谢。

王阳元

1986年6月于北京大学

目 录

绪论.....	1
第一章 多晶硅薄膜的淀积.....	5
1.1 多晶硅薄膜的淀积方法和设备	5
1.2 多晶硅薄膜淀积的动力学	8
1.2.1 化学汽相淀积动力学的一般考虑	8
1.2.2 常压化学汽相淀积多晶硅薄膜的动力学	17
1.2.3 低压化学汽相淀积多晶硅薄膜的动力学	21
1.3 多晶硅薄膜的结构与形貌	27
1.3.1 成核理论	27
1.3.2 多晶硅薄膜淀积的成核	31
1.3.3 淀积条件对多晶硅薄膜形貌的影响	36
1.3.4 多晶硅薄膜的优选晶向	39
1.3.5 多晶硅薄膜的稳定性	42
1.4 掺杂对多晶硅薄膜淀积的影响	45
1.4.1 掺杂对多晶硅薄膜淀积率的影响	46
1.4.2 掺杂对多晶硅薄膜淀积率影响的解释	48
1.5 晶粒再结晶生长机构及掺杂的影响	51
1.5.1 晶粒再结晶生长机构	51
1.5.2 掺杂对晶粒生长的影响	56
1.6 掺氧半绝缘多晶硅薄膜	61
1.6.1 掺氧半绝缘多晶硅薄膜的淀积	61
1.6.2 掺氧半绝缘多晶硅薄膜的结构	64
1.6.3 掺氧半绝缘多晶硅薄膜的物理化学性质与氧含量的 关系	66
参考文献	69
第二章 多晶硅薄膜的电学性质.....	71
2.1 多晶硅薄膜电学性质的基本特征	71

2.2 晶粒间界陷阱模型	75
2.2.1 晶粒间界陷阱模型的基本假设	75
2.2.2 肖特基热发射电流	77
2.2.3 电导率	79
2.2.4 载流子浓度	96
2.2.5 迁移率	99
2.3 晶粒间界的杂质分凝	106
2.3.1 杂质在晶粒间界的分凝现象	106
2.3.2 早期的晶粒间界杂质分凝模型	109
2.3.3 晶粒间界杂质分凝的计算	112
2.4 高掺杂时的修正	119
2.4.1 迁移率对退火温度的依赖	121
2.4.2 多晶硅薄膜电导模型的修正	122
2.4.3 高掺杂多晶硅薄膜电阻率和伏-安特性的计算	126
2.4.4 高掺杂多晶硅薄膜电阻率的理论计算与实验的比 较	131
2.4.5 高掺杂多晶硅薄膜载流子迁移率的理论计算及其与实 验的比较	136
2.5 甚高掺杂时的修正——固体溶解度和激活率的影响	139
2.6 多晶硅薄膜的激光退火及其对多晶硅薄膜电学性能的影响	146
2.6.1 扫描连续波激光器退火和它对多晶硅薄膜结构和电学 性能的影响	146
2.6.2 脉冲激光退火和它对多晶硅薄膜晶粒结构的影响	151
2.6.3 激光退火后电阻率的热稳定性	152
2.7 附录: 多晶硅薄膜的霍尔迁移率	156
2.7.1 简化模型	156
2.7.2 实测电阻率 ρ^* 的等效电路计算	158
2.7.3 实测霍尔系数的等效电路计算	159
2.7.4 多晶硅薄膜的电阻率	161
2.7.5 多晶硅薄膜的迁移率	162
参考文献	163
第三章 杂质在多晶硅薄膜中的扩散和多晶硅薄膜的离子注 入掺杂	166

3.1 杂质在多晶硅薄膜中的扩散模式	166
3.1.1 杂质在多晶硅薄膜中的三种扩散模式	166
3.1.2 各类模式下杂质扩散的浓度分布	169
3.2 增强扩散的实验观察	175
3.2.1 杂质沿晶粒间界的纵向扩散	175
3.2.2 杂质沿晶粒间界的横向扩散	180
3.3 多晶硅薄膜中的杂质扩散系数的实验测定	183
3.3.1 砷在多晶硅薄膜中的扩散系数	183
3.3.2 磷在多晶硅薄膜中的扩散系数	191
3.3.3 硼在多晶硅薄膜中的扩散系数	193
3.4 多晶硅薄膜的离子注入及其退火特性	198
3.4.1 多晶硅薄膜中离子注入的射程分布	198
3.4.2 离子注入多晶硅薄膜的退火特性	202
3.5 附录	206
3.5.1 B类扩散模式杂质分布的数学分析表达式	206
3.5.2 A类扩散模式杂质分布的数学分析表达式	211
参考文献	213
第四章 多晶硅薄膜的热氧化	215
4.1 多晶硅薄膜氧化的基本特征	216
4.1.1 多晶硅薄膜氧化的规律和特征阶段	216
4.1.2 晶粒间界和加速氧化	221
4.2 多晶硅薄膜氧化的应力模型	224
4.2.1 晶粒间界增强氧化产生的压应力对氧化线性率常数 B/A的影响	224
4.2.2 多晶硅薄膜的优选晶向和氧化速率	228
4.2.3 二氧化硅的粘滞流效应和多晶硅薄膜氧化特征阶 段的消失	229
4.3 掺杂增强氧化	235
4.3.1 掺杂增强氧化的实验现象	237
4.3.2 重磷掺杂多晶硅薄膜氧化的特征阶段	244
4.3.3 掺杂增强氧化的物理原因	246
4.3.4 晶粒间界对掺杂增强氧化的影响	251
4.3.5 多晶硅薄膜厚度对掺杂增强氧化的影响	257

4.4 多晶硅薄膜氧化中的杂质再分布	257
4.4.1 掺磷多晶硅薄膜氧化时的杂质分凝	257
4.4.2 掺砷多晶硅薄膜氧化时的杂质再分布	259
4.5 氧化增强扩散	262
4.6 多晶硅氧化层的高电导率和多晶硅/氧化层界面对电导率的 影响	269
4.6.1 多晶硅二氧化硅的高电导率现象	269
4.6.2 多晶硅二氧化硅的高电导现象与多晶硅/二氧化硅界 面的粗糙性	272
4.7 多晶硅薄膜激光退火对多晶硅二氧化硅层漏电流的影响 ...	276
4.8 附录	279
参考文献	284
第五章 多晶硅薄膜的光学性质	287
5.1 多晶硅薄膜的折射率和吸收系数	287
5.1.1 反射率和透射率的理论计算	287
5.1.2 多晶硅薄膜折射率的计算	290
5.1.3 多晶硅薄膜折射率和吸收系数的实验测定	293
5.2 多晶硅薄膜的光电导	298
5.2.1 光照对晶粒间界势垒的影响	298
5.2.2 晶粒间界处复合电流的计算	301
5.2.3 多晶硅薄膜的光电导	303
5.3 晶粒间界陷阱对少数载流子寿命的影响	309
5.3.1 过剩载流子的复合速度	310
5.3.2 少数载流子的寿命	312
参考文献	314
第六章 多晶硅栅和多晶硅薄膜在 MOS 大规模集成电路中 的应用	316
6.1 多晶硅栅	316
6.1.1 多晶硅栅的自对准	316
6.1.2 多晶硅栅对 MOS 晶体管开启电压的影响	324
6.1.3 多晶硅栅与 MOS 器件的稳定性	330
6.1.4 多晶硅栅自对准技术与功耗和集成度	331
6.2 硅栅等平面 N 阱 CMOS 电路工艺示例	331

6.3	多晶硅薄膜在 MOS 集成电路中的典型应用	339
6.3.1	多晶硅薄膜在 MOS 动态随机存储器中的应用	339
6.3.2	多晶硅薄膜在非挥发性存储器中的应用	349
6.3.3	多晶硅薄膜在电荷耦合器件中的应用	353
6.3.4	高阻多晶硅薄膜在静态 MOS 随机存储器中的应用 ...	354
6.4	用多晶硅薄膜做栅和互连材料的局限性以及硅化物的应用...	
		357
6.4.1	多晶硅栅和互连的局限性	357
6.4.2	难熔金属硅化物	359
6.4.3	多晶硅/硅化物复合栅结构	364
6.5	多晶硅/硅化物复合栅和互连工艺	365
6.5.1	硅化物的淀积	365
6.5.2	硅化物的形成和电学性质	371
6.5.3	多晶硅/硅化物复合栅中厚度关系的考虑	374
6.5.4	硅化物的刻蚀	375
6.5.5	硅化物的氧化	383
6.6	自对准多晶硅/硅化物复合栅工艺	396
6.6.1	自对准多晶硅/硅化物复合栅工艺特点	396
6.6.2	自对准多晶硅/硅化物复合栅工艺应注意的问题	399
	参考文献	400
第七章	多晶硅发射极和多晶硅薄膜在双极集成电路中的应	
	用	404
7.1	多晶硅发射极自对准和多晶硅发射结晶体管	404
7.1.1	多晶硅发射极自对准工艺和多晶硅发射极晶体管 ...	404
7.1.2	多晶硅发射结晶体管	411
7.2	多晶硅发射极理论	414
7.2.1	两种理论模型	414
7.2.2	多晶硅发射极晶体管电流放大系数的理论计算	417
7.3	多晶硅发射极和多晶硅工艺在双极集成电路中的几种典型	
	应用	433
7.3.1	多晶硅自对准工艺	434
7.3.2	发射极-基极和基极-集电极自对准的集成电路	436
7.3.3	采用基极-集电极自对准工艺的亚毫秒电路	438

7.3.4	多晶硅超自对准工艺高速集成电路	440
7.3.5	多晶硅绝缘隔离和同步外延	441
7.4	半绝缘多晶硅-硅异质结晶体管	444
7.4.1	半绝缘多晶硅-硅异质结晶体管的结构	445
7.4.2	NPN 半绝缘多晶硅-硅异质结晶体管的工艺和特性	447
7.5	半绝缘多晶硅薄膜钝化	450
7.5.1	半绝缘多晶硅薄膜的钝化作用	452
7.5.2	半绝缘多晶硅钝化膜的应用	453
	参考文献	455
第八章	多晶硅的再结晶和三维集成电路	459
8.1	引言	459
8.2	绝缘衬底上多晶硅薄膜的再结晶	462
8.2.1	连续氩离子激光的加工条件	462
8.2.2	电子束(连续波)加工条件	471
8.2.3	再结晶膜晶粒结构与激光束形状(温度梯度)的关系	475
8.2.4	有籽晶区的“横向外延”再结晶技术	478
8.2.5	表面覆盖层和选择退火技术	480
8.2.6	其它多晶硅再结晶加工技术	487
8.3	晶粒间界对 MOS 场效应晶体管性能的影响	490
8.3.1	垂直于沟道电流方向的晶粒间界对 MOS 场效应晶体管性能的影响	491
8.3.2	平行于沟道电流方向的晶粒间界对 MOS 场效应晶体管性能的影响	497
8.4	绝缘层上的硅薄膜的典型应用	498
8.4.1	无闩锁效应的 CMOS/SOI 电路	498
8.4.2	MOS/SOI 技术在 MOS 随机存储器中的应用	506
8.4.3	三维立体集成 CMOS 电路	508
8.4.4	薄膜晶体管 and 它在平板显示电路中的应用	517
	参考文献	520

绪 论

作为制备单晶硅的原材料，“多晶硅”这一名词早已被人们所熟知，许多冶金学家和化学家对它进行过不少研究。但是在本书中，我们所说的“多晶硅薄膜”却不是用于制备单晶硅的原材料，所研究和关心的也不是“如何提纯”之类的问题，这里，我们所讨论的多晶硅薄膜是构成集成电路的一个有机组成部分。

在一定意义上讲，可以认为集成电路的制造过程就是将各种图形（pattern）转移（transfer）到各种薄膜上去的过程，因此对薄膜的研究自然就构成了集成电路研究的重要领域。而多晶硅薄膜在集成电路中恰是应用最广泛，因而也是最重要的薄膜之一。

象一切科学技术的发展过程一样，多晶硅薄膜的发展也是由应用“触发”的。随着六十年代初在硅表面性质的控制和硅-二氧化硅系统的研究方面所获得的突破性进展，金属-氧化物-半导体（MOS）场效应晶体管和集成电路逐步走向大规模生产，成为集成电路中发展最迅速的一个分支。作为初期生产的P沟道铝栅 MOS场效应晶体管，它的速度比较慢，集成度也比较低，要求的电源电压又比较高，不易与5V的双极集成电路相兼容。这些弱点都不能满足应用的需要，因此大量的研究工作集中在如何提高它的工作速度，提高集成度，降低电源电压和降低功耗上，这些努力表现在下列几个方面：

- (1) 选用迁移率更高的衬底材料；
- (2) 寻找新的自对准工艺，减少栅-漏-栅-源覆盖，减小寄生电容特别是栅-漏覆盖电容；
- (3) 缩短沟道长度；
- (4) 寻找新的栅极材料，降低工作电压等等。

十分明显，室温下硅的电子迁移率比空穴迁移率高三倍多，而

在当时的加工精度 ($8-10\mu\text{m}$) 条件下, MOS 场效应晶体管的最高工作频率是直接正比于沟道区的载流子迁移率的, 这就是为什么在六十年代末、七十年代初 N 沟道 MOS 场效应晶体管获得了较大发展的原因。与此相适应, 采用多晶硅薄膜替代金属铝作为 MOS 场效应晶体管的栅极材料, 利用多晶硅和其下的 SiO_2 栅氧化层对源、漏扩散杂质的掩蔽作用可以实现源、漏、栅的自对准, 从而可有效地减小栅-漏、栅-源寄生电容。由于采用了自对准技术, 省略了一次栅的套刻, 因而在同样光刻设备条件下, 可以制备出更短沟道的 MOS 场效应晶体管。同时, 对于 P 沟道 MOS 器件, 由于掺杂多晶硅栅极和 N 型硅衬底的功函数差 ϕ_{ms} 比铝与 N 型硅的功函数差小, 因而使 MOS 场效应晶体管的阈值电压降低, 从而可有效的提高器件速度, 降低功耗, 提高集成度。此外采用高掺杂多晶硅薄膜作为栅极材料还可同时作为集成电路的内部互连引线, 从而大大提高了集成电路设计的灵活性, 减少了器件的工艺层次。此后的研究工作又表明, 采用硅栅替代铝栅还可提高器件的可靠性。所有这一切, 都使多晶硅薄膜工艺在集成电路工艺中特别是在 MOS 集成电路工艺中得到了极为广泛的应用, 并相应地发展出了一整套硅栅工艺。可以毫不夸张地说, 硅栅工艺和 N 沟道技术是六十年代末、七十年代初集成电路制造工艺中的一个重要革新, 十多年来, 它一直是 MOS 集成电路的主流工艺。

追溯起来, 用多晶硅薄膜作为自对准绝缘栅场效应晶体管的栅极材料, 最早是由 R. W. Bower 和 H. G. Dill 1966 年在美国华盛顿特区举行的国际电子器件会议上提出来的。不久, 贝尔实验室的 J. C. Sarace, R. E. Kerwin, D. L. Kleip, R. Edwards 也发表了类似的论文, 此后, 在 1968 年的国际电子器件会议上, 最早研究成功硅平面晶体管和集成电路的 Fairchild 公司的 Palo Alto R&D 实验室的 F. Faggin, T. Klein 和 L. Vadasz 报告了他们将多晶硅薄膜成功地用于绝缘栅场效应晶体管集成电路中的重要成果。接下来的发展是极为迅速的。1969 年出现了 256 位硅栅 PMOS 随机存储器, 1971 年出现了 1024 位硅栅 NMOS 随机存储

器, 1974 年就开发出了 4K 位硅栅 N 沟道 MOS 随机存储器, 1976 年又有了双层多晶硅的 16K 位硅栅 N 沟道 MOS 随机存储器, 1979 年发展出了 64K 位硅栅 NMOS 随机存储器, 到 1982 和 1984 年, 256K 位和 1M 位的双层和三层多晶硅 MOS 随机存储器已分别投产和开发出来。

随着集成电路向甚大规模集成电路 (ULSI) 发展, 当加工工艺的特征尺寸小于 $2\mu\text{m}$ 时, 单纯的多晶硅栅和多晶硅互连已显示出了某些局限性, 它的过高的电阻率所引起的时间延迟已成为提高存储器电路速度的主要限制, 因而需要用难熔金属硅化物来替代它。但是, 经过长时期发展的硅栅技术, 以其优良的界面特性和器件可靠性使难熔金属硅化物栅仍要与硅栅技术相结合, 即所谓多晶硅/硅化物复合栅 (polyside)。何况当前多晶硅薄膜的发展早已越出了栅极材料和互连材料的领域。目前不仅在 MOS 器件中, 而且在双极集成电路、微波器件和各种特殊功能的半导体器件中都广泛地应用了多晶硅薄膜, 层次已由单层发展到双层、三层和多层, 应用领域也已从栅极材料和互连引线材料发展到绝缘隔离、掺杂扩散源、多晶硅发射极、掺氧多晶硅-硅异质结、大面积显示驱动集成电路、太阳能电池、各种光电器件和三维立体集成电路等各个方面, 用一句文学语言来描述, 那就是已经“无处不飞花”了。

只有掌握了事物发展的客观规律才能从“必然”走向“自由”。多晶硅应用的发展要求对它的基本性质有更深刻、更本质的认识。因此, 随着多晶硅薄膜在集成电路中日益广泛的应用, 对多晶硅薄膜物理的研究也日趋深入。除了研究多晶硅淀积的各种方法及其对淀积薄膜的物理化学性质的影响以外, 还涉及到多晶硅氧化、杂质在多晶硅中的扩散、多晶硅的离子注入与退火、多晶硅的光学参数等基本性质的研究。反之, 应用领域的开拓, 也有赖于对多晶硅物理化学特性的掌握。事实上, 多晶硅薄膜在集成电路中应用的各个方面都是利用了多晶硅薄膜的种种特性。

除了应用高掺杂多晶硅薄膜作为栅极材料和互连材料以外, 多晶硅薄膜的典型应用还有以下几个方面:

(1) 由于多晶硅薄膜能热生长出性能良好的多晶硅 SiO_2 绝缘层,并且具有良好的 Si/SiO_2 (多晶硅)界面特性和既可以被绝缘材料包围而漏电又很小的特性,因此可用来做电荷存储元件和单层、多层互连导线。

(2) 由于多晶硅薄膜氧化速率依赖于掺杂浓度,并且当氧化温度低于 900°C 时,高掺杂多晶硅的氧化速率远大于轻掺杂单晶硅衬底的氧化速率,因而可用于 MOS 集成电路中差值氧化工艺,以简化工艺流程。

(3) 由于多晶硅薄膜的电阻率随着掺杂浓度的改变可以改变几个量级,而未掺杂或轻掺杂多晶硅薄膜又有极高的电阻率,所以可将轻掺杂多晶硅用作 MOS 静态存储器的负载电阻,以缩小电路单元面积。

(4) 由于杂质在多晶硅中的扩散系数远大于在单晶硅中的扩散系数,所以可将多晶硅薄膜用于器件隔离。

(5) 利用上述的杂质在多晶硅中的扩散特性和掺杂多晶硅对铝/硅接触中重组现象的抑制作用,可将掺杂多晶硅薄膜用作掺杂扩散源和浅结欧姆接触层。

(6) 利用多晶硅与半导体的界面特性和富氧多晶硅禁带宽度大于 1.12eV 的特性,可用多晶硅薄膜双极晶体管的发射极,以提高晶体管发射极的注入效率。

(7) 由于掺氧多晶硅具有的半绝缘性 (SIPOS),所以可用于器件钝化和隔离。等等。

以上七个方面只不过是一些典型应用,一个聪明的电路设计者或工艺设计者,可以利用多晶硅薄膜的各种性能设计出多种性能优良、功能各异的半导体器件和集成电路来。因此,可以相信,多晶硅薄膜的研究及其在半导体器件和集成电路中的应用,将随着微电子技术的日益进步而不断发展。