

微电子学丛书

多晶硅薄膜及其
在集成电路中的应用
(第二版)

王阳元 T.I. 卡明斯 赵宝璞等 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书第一版出版于1988年,由于集成电路技术的迅速发展及多晶硅薄膜应用领域的不断拓宽,原书近半数内容已与当今的技术发展不相适应。这次修订作了大幅度的增删,其结构也由原来的八章变为十二章,修改与补充的内容都是原书写作10年来涌现出的新科技成果。

本书内容可分为前后两部分,前六章重点阐述多晶硅薄膜的基本性质及工艺机理,如,多晶硅薄膜的电学性质、光学性质,杂质在多晶硅薄膜中的扩散,多晶硅薄膜的离子注入掺杂、氧化、淀积,以及多晶硅/硅化物薄膜等;本书后六章重点介绍应用,包括多晶硅薄膜在MOS集成电路和双极集成电路中的应用,在微电子机械系统中的应用,以及在显示器件及三维集成电路中的应用。

本书可供从事半导体器件、集成电路研制和设计的科技人员参考,也可作为理工科高等学校微电子、半导体、应用物理专业高年级学生及研究生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用/王阳元等编著. -2版.
-北京:科学出版社,2000.

(微电子学丛书/王阳元主编)

ISBN 7-03-008035-1

I. 多… II. 王… III. ①多晶硅薄膜 ②集成电路 IV. TN405

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第66026号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1988年8月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2001年1月第 二 版 印张:22 7/8

2001年1月第二次印刷 字数:591 000

印数:2441—4440

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《微电子学丛书》编委会

顾问：黄 昆 林兰英 谢希德 王守武 王守觉
童志鹏 李志坚 姜均露 王寿云

主 编：王阳元

编 委（以姓氏笔画为序）：

马俊如	万 群	王芹生	王永文	王阳元
王忠烈	仇玉林	白 丁	许居衍	许振嘉
汤小川	李佑斌	陈星弼	陈 贤	严晓浪
张义门	张利春	张 敏	郑敏政	宗祥福
洪先龙	俞忠钰	钱佩信	唐璞山	徐元森
徐雅文	徐筱棣	黄 敞	梁春广	梁骏吾
韩汝琦	熊和生	魏 玲	魏道政	

秘 书：赵宝瑛

《微电子学丛书》序

微电子学是源于并脱胎于固体物理和无线电电子学的一门新兴的边缘性技术学科。历史地说,1948年晶体管的发明、1958年采用硅平面工艺的集成电路的诞生和1971年微处理器的出现是微电子学发展史上的几个重要里程碑。经过46年的发展,微电子产业已成为战略性的基础产业,微电子科学技术已成为现代科学技术的关键技术基础。据统计,现在世界上GNP的65%与微电子技术有关。二次大战后,美国正是抓住了以微电子技术为基础的电子信息技术,使其经济起飞的。日本和亚洲一些国家和地区也都是抓住了这一点而使其经济振兴。按预测,一直到2020年,世界集成电路产业的产值仍将以年增长率13%的速度增长;技术上也仍保持着集成度年增长率为46%的速度继续发展。到2000年以微电子为基础的电子信息产业将成为世界第一大产业。因此,微电子科学技术乃是20世纪下半叶直到21世纪上半叶科学技术竞争的焦点。谁掌握了微电子技术,谁就掌握了主动权。当前,微电子产业规模和技术水平已成为衡量一个国家综合实力的主要标志。日本有人提出,把半导体工业总产值占工农业总产值的0.5%作为进入信息社会的标志是不无道理的。

当前,我国微电子产业和科学技术的发展水平远不能适应国民经济和国防建设发展的需要。我国集成电路的市场份额只占世界集成电路市场的0.33%,与我国社会主义大国地位极不相称。国内市场的占有率,无论是品种还是数量,也只占20%左右。我国微电子产业和科学技术的落后面貌已成为我国四个现代化建设的制约因素。党和国家的领导已把发展微电子作为一项战略措施放到了突出的地位。在这样的形势下,编写出一套高质量的、反映世界微电子学发展前沿和我国微电子科学技术成果的丛书,必将

促进我国微电子产业建设和科学技术的发展。

这套丛书不同于一般的通俗读物和科普读物,也不同于大学教材,它是一套反映微电子学主要研究领域里学科发展前沿问题的著作,以满足微电子学领域里的研究部门、教育部门和产业部门的需要,成为工作在第一线科技人员的参考书。当然它也可成为大学生和研究生的教学参考书。我们要求每本著作都要具有科学性、先进性和实践性,而整套丛书又要有系统性。我们计划在“八五”期间开始出版,到2000年前要出20来本,2000年后还要继续搞下去,使其成为跨世纪的出版物。这项工作的意义不亚于建一个工厂,建一个研究所。

倡议编写这套丛书的是国防科工委微电子专业组、全国 IC-CAD 专家委员会和 ICCAT 专家委员会的部分专家们,他们的倡议得到了全国各有关单位微电子专家的支持和赞同,从而形成了一个报告。这个报告得到当时任机械电子工业部电子科学研究所所长童志鹏教授的批准。因此,当我们庆贺微电子丛书开始出版的时候,要特别感谢童志鹏教授的睿智。编写丛书的倡议还得到了国家计委科技司,国防科工委科技委、预研局、四局,国家科委基础研究高技术司,原机械电子工业部微电子与基础产品司和科学出版社等单位有关领导的支持,使出版这套丛书的愿望得以实现。在此,我们谨向上述领导部门表示由衷的谢意。

1991年8月2日至8月3日在北戴河召开了第一次丛书编委会,讨论并制订了出版计划,经过近三年的努力,丛书终于与读者见面了。我们以喜悦的心情,迎接它的诞生。

我们要感谢老一辈的科学家、我们的老师和有关领导部门的负责人,他们应聘担任丛书编委会的顾问,这对于保证丛书的学术质量将是十分重要的。我们相信,在他们的关心、支持和指导下,丛书的出版必将能达到预期的目的。

担任本丛书编委的都是一批活跃在微电子领域科研、生产和教育单位的中青年科技专家,我们团结在一起,互相切磋、共同探索,必能攀登一个又一个科学高峰。

“书山有路勤为径，学海无涯苦作舟”。愿为丛书的出版而耕耘不息。

我们期望得到同行们的更多指正，更多支持。

王阳元

1994 年 5 月于北京大学

第二版前言

我总是怀着喜悦的心情写“前言”的,因为这意味着一本新的著作即将诞生。“著书立说”往往需要承受寒窗的煎熬,但却令人陶醉,它不仅是我们科技工作者生活的一个重要组成部分,而且是我们生命意义的体现。著书立说的过程本身就是一个创造与奉献的过程,它是对某一领域科学研究的总结,也是奉献给读者的劳动结晶。因此书写前言往往就是在叙述“战士”的情怀。

修订《多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用》有多种理由:首先是在原书出版以后,广大读者给予了充分鼓励与支持,不仅被国内外有关大学选为研究生教材,而且成为包括香港和台湾在内的许多研究所和工厂科技人员的参考书。我们总是不断地收到对这本书的索求,因而需要组织再版。

其次,也是更为本质的原因,是因为集成电路的发展是如此之迅速,令人瞠目。集成度几乎每年翻一翻,新的电路层出不穷。当年——原书写作的 80 年代初,上兆位存储器刚刚投入生产,而今天市场的骄子已被 64 兆位(64Mbit)存储器所取代,1Gbit DRAM 不久将推向市场,1982 年我将自对准多晶硅/硅化物复合栅结构写入原书的时候,它还是国际学术会议上的热门话题,而今天已被广泛用于加工尺寸为 $0.25\text{--}0.13\mu\text{m}$ 亚微米集成电路的大生产中了。同时多晶硅发射极双极集成电路的 f_t ,今天追求已非昔日的吉赫[兹]量级,而是几十吉赫(GHz),相应地多晶硅薄膜的应用也在不断扩展与深入。一个很有意思的事情是,当年用的静态存储器中的多晶硅负载我还专门用了一小节去介绍,如今随着 SRAM 向高密度化和低功耗化的发展,高阻多晶硅负载已不完全适应需要了,更多的是采用多晶硅薄膜 PMOS 晶体管了。同样,多晶硅-硅化物复合栅的刻蚀当年我也曾费了不少笔墨去描述,而今天多晶

硅-硅化物刻蚀或互连都“自对准”地完成了,复合栅的刻蚀问题实际上简化为多晶硅的刻蚀了.我们不得不对全书进行修改,以适合微电子科学技术的迅速发展.

再次是随着集成技术的发展和渗透到各个领域,多晶硅薄膜的应用领域也不断拓展.集成微电子机械(MEMS)和集成传感器,集成显示器件和灵巧功率集成电路(SMART POWER IC)都已成为迅速崛起的领域,而多晶硅薄膜在这些领域中的应用也与日俱增.因此,我们有必要增加一些章节加以介绍.

这次修订,改动量很大,超过了45%,章数也由原来的八章增加到了十二章.修改和补充的内容都是原书写作以后10年来新涌现的科技成果,以体现本书的科学性、实践性和先进性.在第一章中增加了多晶硅化学汽相淀积的计算机模拟.在第四章中增加了多晶硅薄膜氧化的计算机模拟和工程近似方程.为了适应多晶硅/硅化物复合结构的发展,我们把它从原第六章中分离出来,增加了多晶硅刻蚀和加大了自对准多晶硅/硅化物复合栅结构等内容,构成了新的第六章.原第六章、第七章和第八章的相当部分内容,特别是典型应用都是重写的,分别形成了第七章、第八章和第十二章.第九章多晶硅薄膜在集成灵巧功率集成电路中的应用,第十章在微电子机械系统(MEMS)中的应用和第十一章在集成显示器件中的应用都是新写的.

这次修订得到了一批同事和我的学生们的协助和支持.第九章是特邀电子科技大学李肇基教授撰写和陈星弼院士审阅的,第十一章是特邀北京大学韩汝琦教授和刘晓彦副教授撰写的,他们都是相关领域有多年科学研究积累的专家.除在这儿要特别予以说明外,我谨向他们致以深深的感谢.李志宏博士协助我撰写了第十章;张兴博士协助我修改了第十二章的典型应用、第六章的自对准多晶硅/硅化物复合栅结构工艺,补充了第七章SOI/CMOS例举等部分;马平西博士协助我修改了第八章有关理论部分和典型应用;倪学文教授帮助我补充了我们自行开发的多晶硅发射极超高速电路工艺举例;王阳博士协助我修改了第七章的典型应用,并

在第十章初稿撰写中帮助我作了大量工作且收集了许多宝贵的资料;徐立博士帮助我补充了多晶硅刻蚀和多晶硅/硅化物局域互连等有关部分.王季陶教授增补了他自己的研究成果——CVD 三维计算机模拟.由于他们的参与,大大丰富了本书的内容,我谨向上述博士们和教授们致以诚挚的谢意.

T. I. Kamins 博士特别从美国来信表示他很高兴看到书的修订和有新的章节增加.但由于研究工作内容变化,这次修改工作就由我来负责进行了.

最后我要特别感谢赵宝瑛教授,他辛勤地帮助进行全书的修订工作,不仅放弃了难得的暑假与寒假,而且还在紧张的科研和教学工作之外又增加了很多工作量,整整为此忙碌了两年多时间,我理所当然地认为这本修订稿是我们两人共同的成果.

王阳元

2000 年春于北京大学

第一版前言

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、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够的,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和应用方面有所启发.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、北卡罗来纳州立大学、惠普公司及马萨诸塞州 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、王国英、吉力久、张利春、张国炳副教授和陈贤、倪学文、莫帮燹、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,我向它们表示深深的感谢.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	(9)
1.2.1 化学汽相淀积动力学的一般考虑	(9)
1.2.2 常压化学汽相淀积多晶硅薄膜的动力学	(16)
1.2.3 低压化学汽相淀积多晶硅薄膜的动力学	(22)
1.3 多晶硅薄膜的结构与形貌	(30)
1.3.1 成核理论	(30)
1.3.2 多晶硅薄膜淀积的成核	(34)
1.3.3 淀积条件对多晶硅薄膜形貌的影响	(39)
1.3.4 多晶硅薄膜的优选晶向	(42)
1.3.5 多晶硅薄膜的稳定性	(44)
1.4 掺杂对多晶硅薄膜淀积的影响	(48)
1.4.1 掺杂对多晶硅薄膜淀积率的影响	(48)
1.4.2 掺杂对多晶硅薄膜淀积率影响的解释	(51)
1.5 晶粒再结晶生长机构及掺杂对其的影响	(53)
1.5.1 晶粒再结晶生长机构	(53)
1.5.2 掺杂对晶粒生长的影响	(58)
1.6 掺氧半绝缘多晶硅薄膜	(63)
1.6.1 掺氧半绝缘多晶硅薄膜的淀积	(63)
1.6.2 掺氧半绝缘多晶硅薄膜的结构	(66)
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	(69)
参考文献	(71)

第二章	多晶硅薄膜的电学性质	(74)
2.1	多晶硅薄膜电学性质的基本特征	(74)
2.2	晶粒间界陷阱模型	(78)
2.2.1	晶粒间界陷阱模型的基本假设	(78)
2.2.2	肖特基热发射电流	(80)
2.2.3	电导率	(82)
2.2.4	载流子浓度	(99)
2.2.5	迁移率	(102)
2.3	晶粒间界的杂质分凝	(109)
2.3.1	杂质在晶粒间界的分凝现象	(109)
2.3.2	早期的晶粒间界杂质分凝模型	(113)
2.3.3	晶粒间界杂质分凝的计算	(115)
2.4	高掺杂时的修正	(123)
2.4.1	迁移率对退火温度的依赖	(125)
2.4.2	多晶硅薄膜电导模型的修正	(126)
2.4.3	高掺杂多晶硅薄膜电阻率和伏-安特性的计算	(129)
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	(134)
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	(140)
2.5	甚高掺杂时的修正——固体溶解度和激活率的影响	(142)
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	(150)
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	(150)
2.6.2	脉冲激光退火和它对多晶硅薄膜晶粒结构的影响	(155)
2.6.3	激光退火后电阻率的热稳定性	(156)
2.7	附录:多晶硅薄膜的霍尔迁移率	(160)
2.7.1	简化模型	(160)

2.7.2	实测电阻率 ρ^* 的等效电路计算	(162)
2.7.3	实测霍尔系数的等效电路计算	(164)
2.7.4	多晶硅薄膜的电阻率	(166)
2.7.5	多晶硅薄膜的迁移率	(167)
	参考文献	(168)
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	(170)
3.1	杂质在多晶硅薄膜中的扩散模式	(170)
3.1.1	杂质在多晶硅薄膜中的三种扩散模式	(170)
3.1.2	各类模式下杂质扩散的浓度分布	(173)
3.2	增强扩散的实验观察	(178)
3.2.1	杂质沿晶粒间界的纵向扩散	(178)
3.2.2	杂质沿晶粒间界的横向扩散	(182)
3.3	多晶硅薄膜中的杂质扩散系数的实验测定	(185)
3.3.1	砷在多晶硅薄膜中的扩散系数	(186)
3.3.2	磷在多晶硅薄膜中的扩散系数	(194)
3.3.3	硼在多晶硅薄膜中的扩散系数	(195)
3.4	多晶硅薄膜的离子注入及其退火特性	(200)
3.4.1	多晶硅薄膜中离子注入的射程分布	(200)
3.4.2	离子注入多晶硅薄膜的退火特性	(204)
3.5	附录	(208)
3.5.1	B类扩散模式杂质分布的数学分析表达式	(208)
3.5.2	A类扩散模式杂质分布的数学分析表达式	(213)
	参考文献	(215)
第四章 多晶硅薄膜的热氧化		
4.1	多晶硅薄膜氧化的基本特征	(219)
4.1.1	多晶硅薄膜氧化的规律和特征阶段	(219)
4.1.2	晶粒间界和加速氧化	(222)
4.2	多晶硅薄膜氧化的应力模型	(225)
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	(225)
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	(228)
4.2.4 氧化动力学的计算机模拟及其工程近似方程	(231)
4.3 掺杂增强氧化	(233)
4.3.1 掺杂增强氧化的实验现象	(233)
4.3.2 重磷掺杂多晶硅薄膜氧化的特征阶段	(242)
4.3.3 掺杂增强氧化的物理原因	(243)
4.3.4 晶粒间界对掺杂增强氧化的影响	(248)
4.3.5 多晶硅薄膜厚度对掺杂增强氧化的影响	(252)
4.4 多晶硅薄膜氧化中的杂质再分布	(253)
4.4.1 掺磷多晶硅薄膜氧化时的杂质分凝	(253)
4.4.2 掺砷多晶硅薄膜氧化时的杂质再分布	(256)
4.5 氧化增强扩散	(258)
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	(264)
4.6.1 多晶硅二氧化硅的高电导率现象	(264)
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	(267)
4.7 多晶硅薄膜激光退火对多晶硅 SiO_2 层漏电流的影响	(270)
4.8 附录	(273)
参考文献	(276)
第五章 多晶硅薄膜的光学性质	(279)
5.1 多晶硅薄膜的折射率和吸收系数	(279)
5.1.1 反射率和透射率的理论计算	(279)
5.1.2 多晶硅薄膜折射率的计算	(283)
5.1.3 多晶硅薄膜折射率和吸收系数的实验测定	(285)