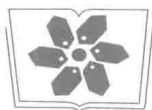


超大规模集成电路先进光刻 理论与应用

韦亚一 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

超大规模集成电路 先进光刻理论与应用

韦亚一 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

光刻技术是所有微纳器件制造的核心技术。特别是在集成电路制造中,正是由于光刻技术的不断提高才使得摩尔定律(器件集成度每两年左右翻一番)得以继续。本书覆盖现代光刻技术的主要方面,包括设备、材料、仿真(计算光刻)和工艺,内容直接取材于国际先进集成电路制造技术,为了保证先进性,特别侧重于32nm节点以下的技术。书中引用了很多工艺实例,这些实例都是经过生产实际验证的,希望能对读者有所启发。

本书可供高等院校的高年级本科生和研究生、集成电路设计和制造人员、微纳器件研发和制造工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

超大规模集成电路先进光刻理论与应用/韦亚一著. —北京:科学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-03-048268-6

I. ①超… II. ①韦… III. ①超大规模集成电路—光刻系统—研究 IV. ①TN305.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第100705号

责任编辑:王 哲 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

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

*

2016年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:36 插页:20

字数:780000

定价:260.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

集成电路(芯片)(integrated circuit)是现代日常生活中不可缺少的。手机、电脑,以及所有日常家电中都有芯片在默默地工作。正是由于芯片功能的升级,才使得手机实现了 3G 和 4G 功能;平板电脑可以集成全球定位系统(global positioning system, GPS)、数字相机、网络电视等多项功能,音频/视频处理芯片及通信等嵌入式芯片是不可或缺的幕后功臣。光刻是集成电路制造中的关键技术,也是所有微纳器件制备过程中必不可少的一道工艺。正是由于光刻设备、材料和工艺的发展,才使得集成电路上的器件越做越小,芯片的集成度越来越高,单个晶体管的平均造价越来越低。

光刻(photolithography)是利用光化学反应原理把事先制备在掩模版(简称掩模, mask)上的图形转印到一个衬底(substrate)上的过程。光刻于 20 世纪 60~70 年代开始被应用于电子工业,电路板上的复杂线路就是用光刻技术做出来的。那时的光刻基本上都是接触式曝光(contact exposure),即:曝光时,掩模与涂了光刻胶(photo-resist)的衬底是相接触的。从 80 年代开始,投影式曝光(projection exposure)被广泛应用于集成电路制造中。掩模作为一个光学元件嵌入在光学系统中,曝光光线透过掩模版,经过投影光学系统(projection optics)投射在衬底表面;掩模不需要与衬底直接接触(这种掩模又有了一个新的英文名称“reticle”)。从此,光刻技术的发展就和集成电路技术节点(technology node)的推进(摩尔定律)密不可分。一方面,光刻技术的发展为生产更高集成度的芯片提供了技术保证;另一方面,市场对新技术节点器件的期望又促进了光刻技术的快速发展和产业化。

本书作者长期从事半导体光刻工艺、材料和专用设备研究。在国外先后参与和领导过 10~180nm 多个技术节点的光刻设备、工艺和材料的研究及其产业化。在本书中,作者把国外光刻研究和产业化的最新结果进行归纳、总结,系统性地介绍给国内同行,其中包括作者多年来研究先进光刻工艺的经验 and 体会。根据这些经验和体会,作者首次系统地提出一个先进光刻工艺研发的方法论,即:光刻技术的研发进入了一个以计算光刻为中心的时代;光刻技术研发的进度是以计算光刻和邻近效应修正(optical proximity correction, OPC)学习循环(learning cycle)来引导和驱动的。这一方法论的贯彻可以把光刻技术的各个方面有效地协调整合起来,缩短光刻工艺的研发周期。现代光刻工艺的研发是一个系统工程,它需要其他工艺单元的支持和协调一致的动作。

本书覆盖现代光刻技术的各个方面,包括设备、材料、仿真(计算光刻)和工艺。第 1 章是概述,对光刻技术涉及的各个方面进行简要介绍,目的是为以后各章内容的展开奠定基础。读者在看完这一章后,可以有选择地阅读随后的章节。对于只希望了解光刻技术一般知识的读者,这一章的内容也就够了。第 2~3 章介绍设备部分,包括

匀胶显影机(track)和光刻机(scanner)及其应用。匀胶显影机和光刻机是光刻的核心设备,它们协同合作完成晶圆的涂胶、曝光、烘烤和显影工艺。这两章的内容包括设备的内部结构、功能单元、工作原理以及使用方法。作为集成电路制造的核心设备,匀胶显影机和光刻机在进厂时必须完成验收,在日常使用中其性能必须受到严格的监控,以保证符合技术指标的要求。按照业界通行的规范,这两章对验收和监控的技术指标(specification)及其方法都进行了介绍。第4章介绍光刻工艺中使用的材料,包括光刻胶、抗反射涂层(anti-reflection coating)、抗水涂层(topcoat)和使用旋涂工艺的硬掩模(spin on hard mask)等。这些材料都是有机聚合物,该章介绍它们的分子结构、使用方法、功能以及必须达到的性能指标。第5章介绍掩模版及其管理,包括各种类型掩模的结构和工作原理、作为一个光学元件掩模对成像质量的影响、掩模发展的技术路线图、设计图形在掩模上的摆放。掩模是晶圆上所有图形的来源,对其进行质量控制尤为重要,为此,该章还介绍了掩模上缺陷的种类、检测和修补的方法,以及如何有效地管理掩模版。第6章介绍对准(alignment)和套刻误差(overlay)控制。现代集成电路工艺对套刻误差的要求已经在纳米量级,如何控制套刻误差是光刻中公认的技术难点。套刻误差的控制是由三个部分来协同完成的:光刻机的对准系统、套刻误差的测量系统、模型计算和修正反馈系统;该章对这些部分逐一加以讨论,分析误差的来源,针对性地提出解决方案。第7章介绍光学邻近效应修正与计算光刻(computational lithography)。193nm 浸没式光刻机的投影透镜停留在 1.35NA,无法进一步增大,光刻分辨率的进一步提高完全依赖于所谓的分辨率增强技术(resolution enhancement technology, RET),包括光源优化(illumination optimization)、邻近效应修正、添加辅助图形(assistant features)等,这些都必须依靠仿真计算来找到解决方案。该章按照仿真技术发展的顺序,系统介绍基于经验的光学邻近效应修正(rules-based OPC)、基于模型的光学邻近效应修正(model-based OPC)、亚分辨率的辅助图形(sub-resolution assistant features)、光源-掩模协同优化技术(source-mask co-optimizations)和反演光刻技术(inverse lithography technology)。第8章介绍如何根据产品的要求设置光刻工艺。作为一个工艺单元,光刻是为工艺集成服务的。该章介绍如何对一个特定的光刻层做工艺参数的设置、优化;对工艺的稳定性(process stability)进行日常监测(daily monitoring),并及时解决出现的技术问题。

光刻工艺完成后,对不符合要求的晶圆,可以将其表面的光刻胶去掉,清洗干净,重新进行光刻,即晶圆返工(rework)。第9章专门讨论晶圆返工与光刻材料清洗工艺,包括各种晶圆返工的方法、返工对晶圆衬底的不良影响、如何通过分析返工率(rework rate)发现光刻工艺中的问题。第10章介绍双重和多重曝光技术(double and multiple patterning)。目前最先进的 1.35NA 的 193nm 浸没式光刻机能够提供 36~40nm 的半周期(half-pitch)分辨率,能满足 28nm 逻辑技术节点的要求。小于这个尺寸,就需要双重或多重曝光技术,即把原来一层光刻的图形拆分(pattern split)到两个或多个掩模上,拆分后图形对光刻分辨率的要求大大下降。用多次光刻和刻蚀来实现原来一层设计的

图形。该章介绍各种方式的多重曝光以及掩模图形拆分技术，包括两次曝光(double exposure)、光刻-刻蚀-光刻-刻蚀(litho-etch-litho-etch)、光刻-冻结-光刻-刻蚀(litho-freeze-litho-etch)和自对准的双重/多重成像技术(self-aligned double/multiple patterning)。同时对多重图形拆分中的问题进行了重点讨论。第 11 章介绍极紫外光刻技术(extreme ultra-violet, EUV)。极紫外光刻的波长是 13.5nm，这么短的波长可以提供极高的分辨率。然而，极紫外光刻技术仍然处于研发阶段，目前的产能还不能满足量产的需要。该章首先介绍极紫外光刻的基本原理，包括光学系统的设计、反射式掩模版的结构、极紫外光刻胶的性能；然后讨论光学模型的特殊之处，及其对光源优化和掩模修正的影响；最后对其使用现状进行评估。

现代光刻技术起源于国外，很多专业词汇目前尚没有确定的汉语译法。同一个英文词汇，中国大陆和台湾地区、新加坡的译法都不一致。例如，“mask”在台湾通常被称为“光罩”，而大陆则称为“掩模版”或“掩模”。为了避免混淆，作者专门编写了一个中英文专业词汇对照表，供读者参考，也希望借这个对照表来规范英文光刻专业词汇的译法。国内的集成电路生产厂是和国际接轨的，即使是在做内部工作汇报时，工程师也习惯使用英文词汇。为此，本书在容易引起歧义的关键词汇旁边附上英文，以便于读者参照。有些英文词汇已经在业界得到了广泛应用，有其特定的含义，翻译成中文则显得很啰嗦。例如，“footing”和“scumming”是指由于显影不充分导致光刻胶图形底部宽大的现象。对这一类英文词汇，本书直接使用而不做翻译。

光刻是一门实用技术，在进行技术讨论时，无法回避具体的设备和材料。目前光刻工艺中所使用的主流设备和材料非常集中：光刻机由荷兰 ASML、日本 Nikon 和 Canon 公司垄断；匀胶显影设备由日本 TEL 和 Sokudo 把持；光刻胶由日本 JSR、TOK、ShinEtsu 等公司垄断。本书尽量抽取共性的技术来讨论，然而，太抽象的话又不符合读者的需要，不能有效地指导实际工作。解决的办法是，作者在书中提供了很多实例分析，这些实例使用的是最主流的设备 and 材料。集成电路生产和研发人员可以直接对照这些实例来调整自己的光刻工艺。光刻又是一门交叉学科，其内容涉及微电子学、光学、光化学、高分子材料和物理学。光刻设备还涉及机械设计、光机电一体化和自动控制。显然，本书无法涵盖所有这些学科。作者以集成电路制造中的光刻工艺为主线，对涉及的内容进行一些介绍。鉴于作者的专业方向所限，对有些学科内容的描述可能不够严谨，请读者谅解。

光刻技术的发展速度是惊人的，这种快速发展的动力来源于社会对高性能芯片的追求。然而，任何一种新型光刻技术必须首先得到业界大多数的认可后，才可能被应用于新产品的研发，这是集成电路光刻技术研发的一个特征。因为光刻设备和材料都非常昂贵，没有业界的共识，任何一项新技术都无法得到设备、材料和软件供应商足够的支持。一旦研发失败，就意味着一个技术节点产品的延误。光刻界通常的做法是互相做比对，即所谓的“benchmarking”，尽量使自己的技术路线与业界保持一致。国际光学工程学会(society of photo-optical instrumentation engineers, SPIE)每年一度的先

进光刻会议(SPIE advanced lithography conference)为这种技术交流提供了一个理想的平台。技术人员在这个会议上互相交流研究成果,达成共识。本书中的许多内容都是来自于这个会议的文集。

光刻是一门综合技术,是光学、化学、微电子制造、电路设计等各类学科的交集,同时,它又是一门较为边缘化的技术,其应用范围专而精。目前国内针对光刻的专门著作比较少,尤其是融合了目前主流光刻工艺以及计算光刻等内容的专著,鲜有问世。一面是当前国内集成电路设计和制造蓬勃发展的现状,一面是光刻类技术专著的匮乏,由此,笔者萌生了结合自己多年业界经验,写一本专门针对光刻领域,供广大集成电路制造从业人员以及光刻研究人员研读的综合光刻论著的想法。这正是作者撰写本书的初衷,希望能借此普及和推广国内集成电路从业人员对光刻技术的认知,同时为我国集成电路的发展略尽绵薄之力。

本专著得以顺利完成,首先要感谢中共中央组织部“千人计划”(海外高层次人才引进计划)。正是在“千人计划”的召唤下,作者于2013年回国工作,参与到国内集成电路的研究中,也有了机缘来撰写这本专著。其次要感谢国家02科技重大专项“超大规模集成电路制造技术及成套工艺”。“02专项”为我国集成电路制造技术的跨越式发展做出了令人瞩目的贡献,也为我回国的工作提供了一个非常理想的平台。正是在“02专项”的资助下,我的光刻技术研究得以继续,并被国内集成电路企业大量采用。

特别感谢中国科学院微电子研究所的叶甜春研究员,“02专项”的组长和技术总师,本书的成文和出版离不开他对先进光刻工艺重要性的肯定和对研发工作的支持。感谢沈阳芯源微电子设备有限公司的宗润福研究员、武汉新芯集成电路制造有限公司的杨士宁博士、北京东方晶源微电子科技有限公司的俞宗强博士对作者工作的支持,没有他们的帮助,本书就不可能这么快与读者见面。感谢中国科学院微电子研究所的赵超研究员、朱慧珑研究员、闫江研究员、王文武研究员、李俊峰研究员、谢玲研究员和殷华湘研究员,跟你们在工作中良好的互动和合作,为本书提供了灵感和素材。

在准备书稿的过程中,作者的朋友、同事和学生都给予了很多帮助。粟雅娟参与了版图设计部分的讨论;郭沫然帮助整理了参考文献;董立松帮助编辑了书中的公式;段英丽、苏晓菁、陈颖、刘艳松、宋之洋帮助绘制了图表和曲线;于丽贤帮助编辑了化学反应式;张利斌帮助调研了多重曝光技术;孟令款参与了刻蚀内容的讨论;陈文辉、赵利俊、何建芳、马乐校对了部分文稿。在此一并表示感谢。

韦亚一

2016年5月于北京

目 录

前言

第 1 章 光刻技术概述	1
1.1 半导体技术节点	1
1.2 集成电路的结构和光刻层	3
1.3 光刻工艺	4
1.4 曝光系统的分辨率和聚焦深度	6
1.4.1 分辨率	6
1.4.2 聚焦深度	9
1.4.3 调制传递函数	11
1.5 对设计的修正和版图数据流程	12
1.6 光刻工艺的评价标准	14
1.7 去胶返工	15
1.8 光刻工艺中缺陷的检测	16
1.8.1 旋涂后光刻薄膜中缺陷的检测	16
1.8.2 曝光后图形的缺陷检测	18
1.9 光刻工艺的成本	18
1.10 现代光刻工艺研发各部分的职责和协作	20
1.10.1 晶圆厂光刻内部的分工以及各单位之间的交叉和牵制	20
1.10.2 先导光刻工艺研发的模式	22
1.10.3 光刻与刻蚀的关系	23
参考文献	24
第 2 章 匀胶显影机及其应用	26
2.1 匀胶显影机的结构	26
2.2 匀胶显影流程的控制程序	28
2.3 匀胶显影机内的主要工艺单元	29
2.3.1 晶圆表面增粘处理	29
2.3.2 光刻胶旋涂单元	31
2.3.3 烘烤和冷却	36
2.3.4 边缘曝光	39
2.3.5 显影单元	40

2.4	清洗工艺单元	45
2.4.1	去离子水冲洗	46
2.4.2	晶圆背面清洗	47
2.5	匀胶显影机中的子系统	49
2.5.1	化学液体输送系统	49
2.5.2	匀胶显影机中的微环境和气流控制	57
2.5.3	废液收集系统	58
2.5.4	数据库系统	59
2.6	匀胶显影机性能的监测	59
2.6.1	胶厚的监测	59
2.6.2	旋涂后胶膜上颗粒的监测	60
2.6.3	显影后图形缺陷的监测	62
2.6.4	热盘温度的监测	64
2.7	集成于匀胶显影机中的在线测量单元	65
2.7.1	胶厚测量单元	66
2.7.2	胶膜缺陷的检测	67
2.7.3	使用高速相机原位监测工艺单元内的动态	68
2.8	匀胶显影机中的闭环工艺修正	68
2.9	匀胶显影设备安装后的接收测试	70
2.9.1	颗粒测试	70
2.9.2	增粘单元的验收	71
2.9.3	旋涂均匀性和稳定性的验收	71
2.9.4	显影的均匀性和稳定性测试	72
2.9.5	系统可靠性测试	72
2.9.6	产能测试	72
2.9.7	对机械手的要求	74
2.10	匀胶显影机的使用维护	74
	参考文献	75
第3章	光刻机及其应用	78
3.1	投影式光刻机的工作原理	79
3.1.1	步进-扫描式曝光	79
3.1.2	光刻机曝光的流程	80
3.1.3	曝光工作文件的设定	81
3.1.4	双工件台介绍	82
3.2	光刻机的光源及光路设计	83

3.2.1	光刻机的光源	83
3.2.2	投影光路的设计	86
3.2.3	193nm 浸没式光刻机	89
3.3	光照条件	90
3.3.1	在轴与离轴照明	90
3.3.2	光刻机中的照明方式及其定义	92
3.3.3	光照条件的设置和衍射光学元件	95
3.3.4	像素化和可编程的光照	96
3.3.5	偏振照明	97
3.4	成像系统中的问题	102
3.4.1	波前畸变的 Zernike 描述	103
3.4.2	对成像波前的修正	108
3.4.3	投影透镜的热效应	109
3.4.4	掩模版形状修正	111
3.4.5	掩模热效应的修正	111
3.4.6	曝光剂量修正	113
3.5	聚焦系统	115
3.5.1	表面水平传感系统	115
3.5.2	晶圆边缘区域的聚焦	117
3.5.3	气压表面测量系统	118
3.5.4	聚焦误差的来源与聚焦稳定性的监控	119
3.6	光刻机的对准系统	120
3.6.1	掩模的预对准和定位	120
3.6.2	晶圆的预对准和定位	121
3.6.3	掩模工件台与晶圆工件台之间的对准	122
3.6.4	掩模与晶圆的对准	123
3.6.5	对准标识的设计	127
3.7	光刻机性能的监控	131
3.7.1	激光输出的带宽和能量的稳定性	131
3.7.2	聚焦的稳定性	131
3.7.3	对准精度的稳定性	132
3.7.4	光刻机停机恢复后的检查	134
3.7.5	与产品相关的测试	134
	参考文献	135
	第 4 章 光刻材料	137

4.1	增粘材料	138
4.2	光刻胶	139
4.2.1	用于 I-线(365nm 波长)和 G-线(436nm 波长)的光刻胶	139
4.2.2	用于 248nm 波长的光刻胶	141
4.2.3	用于 193nm 波长的光刻胶	144
4.2.4	用于 193nm 浸没式光刻的化学放大胶	145
4.2.5	193nm 光刻胶的负显影工艺	155
4.2.6	光刻胶发展的方向	157
4.2.7	光刻胶溶剂的选取	162
4.3	光刻胶性能的评估	164
4.3.1	敏感性与对比度	165
4.3.2	光学常数与吸收系数	168
4.3.3	光刻胶的 Dill 参数	169
4.3.4	柯西系数	170
4.3.5	光刻胶抗刻蚀或抗离子注入的能力	171
4.3.6	光刻胶的分辨率	176
4.3.7	光刻胶图形的粗糙度	177
4.3.8	光刻胶的分辨率、敏感性及其图形边缘粗糙度之间的关系	183
4.3.9	改善光刻胶图形边缘粗糙度的工艺	185
4.3.10	光刻胶旋涂的厚度曲线	185
4.3.11	Fab 对光刻胶的评估	186
4.4	抗反射涂层	188
4.4.1	光线在界面处的反射理论	189
4.4.2	底部抗反射涂层	191
4.4.3	顶部抗反射涂层	196
4.4.4	可以显影的底部抗反射涂层	197
4.4.5	旋涂的含 Si 抗反射涂层	202
4.4.6	碳涂层	205
4.5	用于 193nm 浸没式光刻的抗水涂层	209
4.5.1	抗水涂层材料的分子结构	210
4.5.2	浸出测试和表面接触角	211
4.5.3	与光刻胶的兼容性	212
4.6	有机溶剂和显影液	213
4.7	晶圆厂光刻材料的管理和规格要求	217
4.7.1	光刻材料的供应链	217
4.7.2	材料需求的预报和订购	217

4.7.3	光刻材料在匀胶显影机上的配置	217
4.7.4	光刻材料供应商必须定期提供给 Fab 的数据	218
4.7.5	材料的变更	220
	参考文献	220
第 5 章	掩模版及其管理	225
5.1	倍缩式掩模的结构	225
5.2	掩模保护膜	227
5.2.1	掩模保护膜的功能	227
5.2.2	保护膜的材质	228
5.2.3	蒙贴保护膜对掩模翘曲度的影响	229
5.2.4	保护膜厚度对掩模成像性能的影响	230
5.3	掩模版的种类	232
5.3.1	双极型掩模版	232
5.3.2	相移掩模	234
5.3.3	交替相移掩模	238
5.4	掩模的其他技术问题	242
5.4.1	衍射效率及掩模三维效应(M3D)	242
5.4.2	交替相移掩模上孔径之间光强的差别	243
5.4.3	交替相移掩模用于光学测量	244
5.4.4	掩模版导致的双折射效应	246
5.5	掩模发展的技术路线	248
5.6	掩模图形数据的准备	249
5.7	掩模的制备和质量控制	253
5.7.1	掩模基板	254
5.7.2	掩模上图形的曝光	256
5.7.3	掩模版刻蚀工艺	257
5.7.4	掩模的规格参数	259
5.7.5	掩模缺陷的检查和修补	261
5.8	掩模的缺陷及其清洗和检测方法	263
5.8.1	掩模缺陷的分类和处理办法	263
5.8.2	清洗掩模的方法	268
5.8.3	掩模缺陷检测的方法	270
5.8.4	测试掩模的设计	273
5.8.5	掩模缺陷对成像影响的仿真评估	274
5.9	晶圆厂对掩模的管理	276

5.9.1	晶圆厂与掩模厂的合作	276
5.9.2	掩模管理系统	276
	参考文献	281
第 6 章	对准和套刻误差控制	285
6.1	光刻机的对准操作	287
6.1.1	对准标识在晶圆上的分布	288
6.1.2	曝光区域网格的测定	289
6.1.3	曝光区域网格的修正	289
6.1.4	光刻机的对准操作	291
6.2	套刻误差测量	293
6.2.1	套刻误差测量设备	293
6.2.2	套刻误差测量的过程	294
6.2.3	常用的套刻标识	296
6.2.4	曝光区域拼接标识	299
6.2.5	基于衍射的套刻误差测量	300
6.3	套刻误差测量结果的分析模型与修正反馈	303
6.3.1	测量结果	303
6.3.2	套刻误差的分析模型	304
6.3.3	对每一个曝光区域进行独立修正	308
6.4	先进工艺修正的设置	310
6.5	导致套刻误差的主要原因	311
6.5.1	曝光时掩模加热变形对套刻误差的影响	313
6.5.2	负显影工艺中晶圆的热效应对套刻误差的影响	314
6.5.3	化学研磨对套刻误差的影响	315
6.5.4	厚胶工艺对套刻误差的影响	315
6.5.5	掩模之间的对准偏差对晶圆上套刻误差的影响	316
6.6	产品的对准和套刻测量链	316
6.6.1	曝光时的对准和套刻误差测量方案	316
6.6.2	对准与套刻测量不一致导致的问题	318
6.6.3	单一机器的套刻误差与不同机器之间的套刻误差	321
	参考文献	323
第 7 章	光学邻近效应修正与计算光刻	325
7.1	光学模型	325
7.1.1	薄掩模近似	326
7.1.2	考虑掩模的三维效应	328

7.1.3	光学模型的发展方向	330
7.2	光刻胶中光化学反应和显影模型	331
7.3	光照条件的选取与优化	333
7.3.1	分辨率增强技术	333
7.3.2	光源-掩模协同优化	338
7.4	光学邻近效应修正(OPC)	343
7.4.1	基于经验的光学邻近效应修正	344
7.4.2	基于模型的光学邻近效应修正	347
7.4.3	与光刻工艺窗口相关联的邻近效应修正(PWOPC)	357
7.4.4	刻蚀对 OPC 的影响	358
7.4.5	考虑衬底三维效应的 OPC 模型	359
7.4.6	考虑光刻胶三维效应的 OPC 模型	360
7.5	曝光辅助图形	360
7.5.1	禁止周期	360
7.5.2	辅助图形的放置	362
7.5.3	基于经验的辅助图形	363
7.5.4	基于模型的辅助图形	366
7.6	反演光刻技术	368
7.7	坏点(hot spot)的发现和排除	368
7.8	版图设计规则的优化	370
7.8.1	设计规则优化原理及流程	370
7.8.2	设计规则优化实例	371
7.8.3	设计和工艺的协同优化(DTCO)	373
7.9	先导光刻工艺的研发模式	374
7.9.1	光学邻近效应修正学习循环	374
7.9.2	光刻仿真软件与 OPC 软件的区别	375
7.9.3	掩模制备工艺对 OPC 的限制	375
	参考文献	376
第 8 章	光刻工艺的设定与监控	379
8.1	工艺标准手册	379
8.2	测量方法的改进	382
8.2.1	散射仪测量图形的形貌	382
8.2.2	混合测量方法	383
8.2.3	为控制而设计测量图形的概念	384
8.3	光刻工艺窗口的确定	385

8.3.1	FEM 数据分析	385
8.3.2	晶圆内与晶圆之间线宽的稳定性	390
8.3.3	光刻胶的损失与切片检查	392
8.3.4	光刻工艺窗口的进一步确认	393
8.3.5	工艺窗口的再验证	394
8.3.6	工艺窗口中其他关键图形的行为	395
8.4	工艺假设与设计手册	396
8.5	使用 FEM 晶圆提高良率	398
8.6	掩模误差增强因子	404
8.6.1	掩模误差增强因子(MEEF)的定义与测量	404
8.6.2	减少 MEEF 的措施	406
8.6.3	掩模成像时的线性	406
8.7	光刻工艺的匹配	408
8.7.1	光刻机之间光照条件的匹配	408
8.7.2	掩模之间的匹配	412
8.7.3	光刻胶之间的匹配	413
8.8	工艺监控的设置与工艺能力的评估	413
8.8.1	工艺监控的设置	413
8.8.2	工艺能力指数 C_p 和 C_{pk}	414
8.9	自动工艺控制的设置	415
8.9.1	线宽的控制	416
8.9.2	晶圆内线宽均匀性的控制	418
8.9.3	套刻误差的控制	419
8.10	检查晶圆上的坏点	420
	参考文献	420
第 9 章	晶圆返工与光刻胶的清除	423
9.1	晶圆返工的传统工艺	423
9.2	三层光刻材料(resist/SiARC/SOC)的返工工艺	424
9.2.1	“干/湿”工艺	425
9.2.2	去除空白晶圆上的 SiARC 或 SOC	427
9.2.3	三层材料中只去除光刻胶	429
9.2.4	工艺失败后晶圆返工的分流处理	430
9.3	后道(BEOL)低介电常数材料上光刻层的返工	430
9.3.1	双大马士革工艺流程	431
9.3.2	返工导致 SiO_2 (TEOS) 损失	432

9.3.3	高偏置功率的等离子体会导致衬底受伤	433
9.4	光刻返工原因的分析	433
9.4.1	返工常见原因的分类	435
9.4.2	快速热处理和激光退火导致晶圆变形	436
9.5	晶圆返工的管理	437
9.6	离子注入后光刻胶的清除	438
9.6.1	技术难点	438
9.6.2	“干/湿”法去除光刻胶	439
9.6.3	“湿”法去除光刻胶	440
9.6.4	一些新进展	440
	参考文献	441
第 10 章	双重和多重光刻技术	443
10.1	双重曝光技术	443
10.1.1	X/Y 双极照明的双重曝光	444
10.1.2	使用反演计算设计双重曝光	445
10.2	固化第一次图形的双重曝光 (LFLE) 工艺	447
10.2.1	形成表面保护层的固化技术	447
10.2.2	使用高温交联光刻胶的固化技术	449
10.2.3	通孔的合包与分包	450
10.2.4	其他的固化方案	451
10.3	双重光刻 (LELE) 工艺	451
10.3.1	双沟槽光刻技术	451
10.3.2	使用负显影实现双沟槽	454
10.3.3	双线条光刻技术	456
10.3.4	含 Si 的光刻胶用于双线条工艺	458
10.3.5	双线条工艺中 SiARC 作为硬掩模层	458
10.3.6	“LE+Cut”工艺	460
10.3.7	光刻机对准偏差和分辨率对 LELE 工艺的影响	461
10.4	三重光刻技术 (LELELE)	463
10.5	自对准双重成像技术 (SADP)	464
10.5.1	a-C 做 “mandrel” /SiN 或 SiO ₂ 做 “spacer” /SiO ₂ 或 SiN 做硬掩模	468
10.5.2	光刻胶图形做 “mandrel” /SiO ₂ 做 “spacer” /a-C 做硬掩模	469
10.5.3	SiO ₂ 做 “mandrel” /TiN 做 “spacer” /SiN 做硬掩模	471
10.5.4	自对准技术在 NAND 器件中的应用	472
10.5.5	自对准的重复使用 (SAQP, SAOP)	473

10.5.6	SADP 和 LE 结合实现三重成像	476
10.5.7	自对准实现三重图形叠加	477
10.5.8	“SAMP+Cut”工艺	478
10.6	掩模图形的拆分	480
10.6.1	适用于 LELE 工艺的图形拆分	480
10.6.2	适用于 LELELE 工艺的图形拆分	484
10.6.3	适用于 SADP 的图形拆分	486
10.7	双重显影技术	489
	参考文献	490
第 11 章	极紫外 (EUV) 光刻技术	494
11.1	极紫外光刻机	495
11.1.1	EUV 反射镜	495
11.1.2	EUV 光刻机的曝光系统	497
11.1.3	光照条件的设置	498
11.1.4	EUV 光刻机研发进展及技术路线	499
11.1.5	更大数值孔径 EUV 光刻机的技术挑战	500
11.2	极紫外光源	502
11.2.1	EUV 光源的结构	502
11.2.2	光源输出功率与产能的关系	504
11.2.3	波段外的辐射	505
11.3	EUV 掩模版	507
11.3.1	EUV 掩模缺陷的控制	510
11.3.2	EUV 掩模的清洗	512
11.3.3	EUV 掩模保护膜的研发	514
11.3.4	EUV 空间像显微镜	516
11.3.5	EUV 相移掩模	517
11.4	极紫外光刻胶	519
11.4.1	光刻胶的放气检测	519
11.4.2	EUV 胶的分辨率、图形边缘粗糙度和敏感性	521
11.4.3	吸收频谱外辐射的表面层材料	526
11.4.4	底层材料	526
11.5	计算光刻在 EUV 中的应用	528
11.5.1	EUV 光源与掩模的协同优化	529
11.5.2	OPC 方法在 EUV 与 DUV 中的区别	532
11.6	极紫外光刻用于量产的分析	535