

四川 大 学

博 士 学 位 论 文

题 目 单层 SiN_x 衰减型相移掩膜研究

作 者 张奇志 完成日期 2001 年 3 月 16 日

培 养 单 位 四川大学物理系

指 导 教 师 王植恒 教授

专 业 光 学

研 究 方 向 衍 射 光 学

授予学位日期 年 月 日

四川大学博士学位论文

单层 SiN_x 衰减型相移掩膜研究

张奇志

二〇〇一年三月于四川大学

Ph.D. Dissertation of Sichuan University

**Study of SiN_x Single-layer
Attenuated Phase-Shifting Masks**

Qizhi Zhang

March, 2001 · Sichuan University

摘 要

衰减相移掩膜技术是光学光刻中的重要波前工程技术,是拓展光学光刻分辨极限、提高光学光刻质量的主要手段,一直是国际上的研究热点。本文以信息光学为基础,围绕单层衰减型相移掩膜的性能及其薄膜制备工艺展开研究。本文工作对扩展光学光刻设备的适用范围、提高光学光刻质量以及实际制作单层衰减型相移掩膜具有重要的理论指导意义和实用价值。

编制出光学光刻系统的成像模拟软件,系统分析了单层衰减型相移掩膜对图形分辨率和对比度的改善情况以及透过率对图形对比度和线宽的影响。单层衰减型相移掩膜对各种线宽的图形的对比度都有显著的提高。为得到高的对比度且不破坏像面图形,单层衰减型相移掩膜的透过率应控制在 20% 以内。透过率大小对像面图形的线宽有影响,要得到理想线宽,需将透过率控制在特定值。

单层衰减型相移掩膜的大部分性能由衰减相移膜层的性能决定,制备高质量的衰减相移薄膜是制作单层衰减型相移掩膜的关键和难点。本文论证了氮化硅是制作性能优良的衰减相移薄膜的理想材料,设计和搭建了一套平行平板电容耦合型等离子体增强化学气相沉积(PECVD)设备,沉积出光学参数可连续变化的高质量氮化硅薄膜,用光度测量法和 X 射线光电子能谱法(XPS)测算出薄膜的复折射率和厚度以及硅氮原子比,建立了一套用于单层衰减相移掩膜的氮化硅薄膜的完整 PECVD 制备工艺体系。沉积出满足单层衰减相移掩膜性能要求的氮化硅薄膜。

关键词: 光学光刻, 相移掩膜, 衰减相移掩膜, 氮化硅, PECVD, 复折射率

ABSTRACT

The using of attenuated phase-shifting masks (Att.PSM) is an important technology of the Wave-front Engineering used in optical lithography. It can expand the limits of resolving power of optical lithography system and improves the imaging qualities of optical lithography system. More attentions were paid on the investigation of the attenuated phase-shifting masks in recent years. In this dissertation, the characteristics of single-layered attenuated phase-shifting masks (SAtt.PSM) and the deposition technics of the films using in SAtt.PSMs had been studied. The works in this dissertation make directive significance for expanding the applying range of the optical lithography systems and improving the imaging qualities in optical lithography, and also make applied worthiness for the fabrications of the SAtt.PSMs.

Simulation software of the optical lithography systems was programmed. The improvements of image resolution and contrast by using SAtt.PSMs were studied roundly with the simulation software. The influences of transmittance of SAtt.PSMs on the width of image lines were discussed. The SAtt.PSMs made great improvements of the contrasts of images in any size. In order to get high image contrasts without the image structures being destroyed, the transmittance of SAtt.PSM should be lower than 20%. The transmittance of SAtt.PSM had influence on the width of image line. It must be a specific value to get the line width which is perfectly consistent with that designed.

The most properties of SAtt.PSM are determined by the properties of its attenuated phase-shifting layer. Depositing attenuated phase-shifting layer with high qualities is the key and difficulty of fabrication of SAtt.PSM. In this dissertation, silicon nitride was demonstrated to be suitable material to fabricate SAtt.PSMs with good qualities. An equipment of plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) with two parallel flat electrodes was designed and constructed. It had deposited silicon nitride films with high qualities and the optical parameters varying continuously according to the proportion of reaction gases. The complex refractive index and thickness of the silicon nitride films were measured by luminosity method. The Si/N atom ratios of the silicon nitride films were measured by XPS. A PECVD technics system to fabricate silicon nitride films using for SAtt.PSM was constituted. The deposited silicon nitride films satisfied the requirements of SAtt.PSM.

Key words: optical lithography, phase-shifting mask, attenuated phase-shifting mask, silicon nitride film, PECVD, complex refractive index

目 录

第一章 前 言.....	1
§ 1.1 光刻技术发展概况.....	1
§ 1.1.1 光学光刻技术的发展.....	2
§ 1.1.2 光学光刻中的波前工程.....	4
§ 1.1.3 其它光刻技术的发展.....	7
§ 1.1.4 21 世纪的光学光刻技术与半导体制作工艺.....	9
§ 1.2 研究意义和国内外概况.....	10
§ 1.3 本文的主要内容.....	11
参考文献.....	13
第二章 相移掩膜改善光刻质量的机理.....	18
§ 2.1 相移掩膜改善光刻质量基本原理.....	18
§ 2.1.1 振幅相消叠加的实现.....	18
§ 2.1.2 带宽与对比度.....	20
§ 2.1.3 相干性的影响——相干分解法.....	23
§ 2.2 相移掩膜的发展和种类.....	25
§ 2.2.1 相移掩膜的实用化进程.....	25
§ 2.2.2 PSM 的种类.....	28
§ 2.3 光刻中的部分相干成像理论.....	31
§ 2.3.1 全光源积分法.....	31
§ 2.3.2 照明互强度法.....	33
§ 2.3.3 四维线性系统法.....	34
§ 2.4 相移掩膜的部分相干成像模拟方法.....	35
§ 2.4.1 透射交叉系数的计算.....	36
§ 2.4.2 掩膜图形的尺寸.....	40
§ 2.4.3 软件编制.....	40
§ 2.5 小结.....	42

参考文献.....	43
-----------	----

第三章 单层衰减型相移掩膜性能研究.....	46
§ 3.1 概述.....	46
§ 3.2 掩膜性能要求.....	48
§ 3.2.1 光学性能及轮廓控制.....	48
§ 3.2.2 其它性能.....	52
§ 3.3 单层衰减型相移掩膜性能研究.....	55
§ 3.3.1 对系统分辨率的影响.....	56
§ 3.3.2 像面对比度的提高.....	58
§ 3.3.3 透过率对成像质量的影响.....	63
§ 3.4 小结.....	65
参考文献.....	66

第四章 单层 SiN_x 衰减型相移掩膜的成膜技术研究.....	68
§ 4.1 单层衰减型相移掩膜的制作难点.....	68
§ 4.2 膜层材料的选择.....	70
§ 4.2.1 $n-k$ 曲线.....	70
§ 4.2.2 膜层材料的选择原则.....	71
§ 4.2.3 SiN_x 作膜层材料.....	71
§ 4.3 PECVD 成膜技术.....	73
§ 4.3.1 PECVD 的特点.....	74
§ 4.3.2 等离子体性质及沉积反应.....	75
§ 4.3.3 常用 PECVD 装置.....	77
§ 4.4 实验装置和工艺参数控制.....	79
§ 4.5 工艺参数对膜层光学性质的影响.....	84
§ 4.5.1 折射率.....	84
§ 4.5.2 薄膜中的 Si/N 比.....	85
§ 4.5.3 薄膜生长速率.....	86

§ 4.5.4 用于 SAtt.PSM 的 SiN_x 薄膜生长参数选择.....	87
§ 4.6 薄膜厚度的实时监控.....	89
§ 4.7 小结.....	90
参考文献.....	91
第五章 SiN_x 薄膜的参数测量.....	93
§ 5.1 吸收薄膜参数的光度测量法.....	93
§ 5.2 由测量物理量计算 n 、 k 、 d 参数的方法.....	98
§ 5.3 测量结果及分析.....	99
§ 5.3.1 SiN_x 薄膜的光学参数和厚度.....	100
§ 5.3.2 SiN_x 薄膜的 Si/N 比.....	107
§ 5.4 小结.....	111
参考文献.....	112
第六章 总结.....	114
致谢.....	116
附录 1: 攻读博士学位期间撰写的论文.....	117
附录 2: 攻读博士学位期间承担的科研项目.....	119

第一章 前言

在二十世纪中叶，微电子技术领域发生了它的第二次革命：集成电路取代了传统的导线连接电路^[1]。这次变革对人类社会发展的深远影响是空前的，它对以信息技术为基础的知识经济的诞生和发展起到了巨大的推动作用，成为人类社会开始进入信息时代的里程碑。在其后至今的几十年里，特别是近十几年来，以计算机和互联网为龙头的信息产业对现代经济、国防和社会产生了巨大的影响^[1]。

从每块芯片只有几十个器件的第一片集成电路到大规模集成电路，再到现在每个芯片上可包含近亿个器件的超大规模集成电路，集成电路的增长过程遵从一个被称之为摩尔定律的规律，即集成度每 3 年提高 4 倍。这一增长速度导致半导体市场在过去 30 年中以平均每年约 15% 的速度持续增长^[2,3]。

§ 1.1 光刻技术发展概况

集成电路之所以能飞速发展，光刻技术的支持起到了极为关键的作用，可以说光刻技术的不断进步是集成电路能得到持续发展的内在动力^[1]。光刻技术的发展状况代表着集成电路的制作水平，每个新一代集成电路的出现，总是以光刻所获得的线宽为主要技术标志，因为它直接决定了单个器件的物理尺寸和集成度。

光刻技术的不断发展从三个方面为集成电路技术的持续进步提供了保证^[1]：

- 1) 大面积均匀曝光，在同一块硅片上同时做出大量器件和芯片，保证了批量化的生产水平；
- 2) 图形线宽不断缩小，使集成度不断提高，生产成本持续下降；
- 3) 线宽的缩小，器件的运行速度越来越快，使集成电路的性能不断提高。

光刻技术伴随第一代集成电路而诞生，先后出现了光学光刻、X射线光刻、电子束光刻和离子束光刻^[4-6]，其中光学光刻是应用最早、使用时间最长和生产效率最高的一种光刻技术，至今仍是主要的光刻方法。

§ 1.1.1 光学光刻技术的发展

光学光刻是最先应用于集成电路制造的光刻技术，其发展经历了接触式曝光、接近式曝光和投影曝光三个阶段。

接触式曝光是早期采用的光学光刻方法，始于 50 年代末。接触式曝光将掩膜和覆盖了抗蚀剂的工件紧贴在一起，光从掩膜侧入射完成图形由掩膜到抗蚀剂的转移过程。从衍射理论分析，掩膜到抗蚀剂的距离越近，衍射效应对所得抗蚀剂图形的影响就越小。当集成电路的最小线宽较大时，接触式曝光可以使抗蚀剂图形与掩膜图形的尺寸差异很小，并且对抗蚀剂层的厚度和平整度要求也不高。但接触式曝光有一个明显的缺点，由于掩膜与抗蚀剂表面紧密接触，极易损伤胶膜和玷污掩模板，在批量生产中会对光刻图形质量产生严重的影响，加大掩膜清洗频率，同时也会缩短掩模的使用寿命。另外，随着图形最小线宽的减小，掩膜后的衍射效应急剧增大，将对抗蚀剂的厚度和平整度提出严格的要求^[7]。

接近式曝光技术是在接触式曝光的基础上发展而来的，从某种程度上可以说它是接触式曝光的一种改良技术。接近式曝光的掩模与加工基片表面的抗蚀剂保持几十微米的距离，从而解决了接触式曝光中对抗蚀剂表面的损伤和对掩模的污染问题。但问题的解决是以牺牲抗蚀剂图形的质量为代价的，因为距离的加大意味着衍射效应负面影响的增大。在较大的加工线宽下，这种代价很不明显，抗蚀剂损伤和掩膜污染因素的消除，的确使光刻质量得到改善。但随着集成电路集成度的日益增长，接近式曝光技术的局限性便显露出来。

投影曝光是利用光学成像系统，将掩膜图形成像在抗蚀剂上从而完成图形转移过程的光学光刻技术。投影曝光不仅做到了掩膜与加工基片的分离，而且大大提高了抗蚀剂图形的质量，使集成电路加工更方便快捷。投影曝光步进机从 80 年代开始便得到了广泛应用，对微电子行业的进步起到

了强大的促进作用。与接近和接触式曝光技术相比, 投影曝光技术具有以下一些优点^[8-9]:

- 1) 掩模与加工基片是非接触的, 不存在掩模与基片表面接触不好而产生的光散射问题, 也不存在污损抗蚀剂胶面和掩模板的可能;
- 2) 消除了接近式光刻因掩模线度过小产生的光衍射效应, 有助于光刻图形质量的提高;
- 3) 掩模尺寸可比实际光刻线条尺寸大数倍, 降低了掩模加工的难度;
- 4) 光能集中, 曝光时间短, 可提高图像对比度, 有利于精细线条成像;
- 5) 对准精度高, 芯片生产速度和成品率高;
- 6) 设备及加工成本相对较低, 利于工业化生产。

投影曝光技术自出现以来, 一直是光刻的主流技术。目前国内的主要光刻设备仍然是 365nm 的 I 线投影曝光机。国际上 ArF-193nm 的投影曝光机已投入 0.18 线宽集成电路的商业生产, 如 Intel 公司 1999 年秋季推出的 0.18 μm 的 PIII 微处理芯片。

投影曝光系统的图形分辨率受成像系统理论分辨极限的制约。任何一个成像系统都是衍射受限系统, 投影曝光系统也不例外。当加工线条的最小线宽小于瑞利判据所确定的理论分辨极限时, 由于图形高频成份的过多损失, 将造成像面图形的不可分辨。即使在接近理论分辨极限的情况下, 由于同样的原因, 也会使图形的边缘对比度下降, 导致图形质量降低^[10]。这将极大地限制投影光学光刻技术在亚微米集成电路制作中的应用。

为突破现有分辨率极限, 拓展投影曝光技术的适用范围, 许多改进方法被相继提出。最直接和有效的方法是加大成像系统的数值孔径和缩短曝光波长, 根据瑞利公式, 成像系统的理论分辨极限与波长成正比, 而与其数值孔径成反比, 因此这两种措施都会使系统的分辨极限得到提升。减小工作波长是提高分辨率的最有效途径, 开发新型短波长光源光刻机一直是国际上的研究热点。自 70 年代后期至今, 投影曝光系统工作波长不断下降^[12-17], 商品化曝光机的工作波长从 g 线 463nm、I 线 365nm、KrF248nm 到了现在的 ArF193nm, 而理论研究工作已经在 F2-157nm 展开^[1]。光学光刻系统的数值孔径在 80 年代就由 0.3 提高到了 0.6^[11]。

随着曝光波长的逐渐减小, 光学光刻系统在光源、材料、物理方法等方面遇到了越来越大的困难, 系统成本也越加昂贵, 系统数值孔径的继续增大更是会带来焦深急剧减小的负面影响。如何采用其它有效的方法使现有光刻系统的分辨率得到改善, 成为关注的焦点。

§ 1.1.2 光学光刻中的波前工程

当提高光学光刻分辨率的两条途径——减小曝光波长和增大成像系统数值孔径——遇到极大困难的时候, 相移掩膜等波前工程技术受到了空前的重视^[10, 18-20, 57]。波前工程是基于信息光学基本原理的光学新技术, 采用直接优化光刻图形等方法来突破光刻系统的分辨率极限。如图 1-1 所示, 波前工程主要包括了相移掩膜技术、光学邻近效应校正、照明优化技术、光瞳滤波、自适应光学等几个部分, 前两者也统称为掩膜优化技术。图 1-1 是分辨率小于 $0.2\mu\text{m}$ 的光学光刻系统中的各种优化技术^[18]。

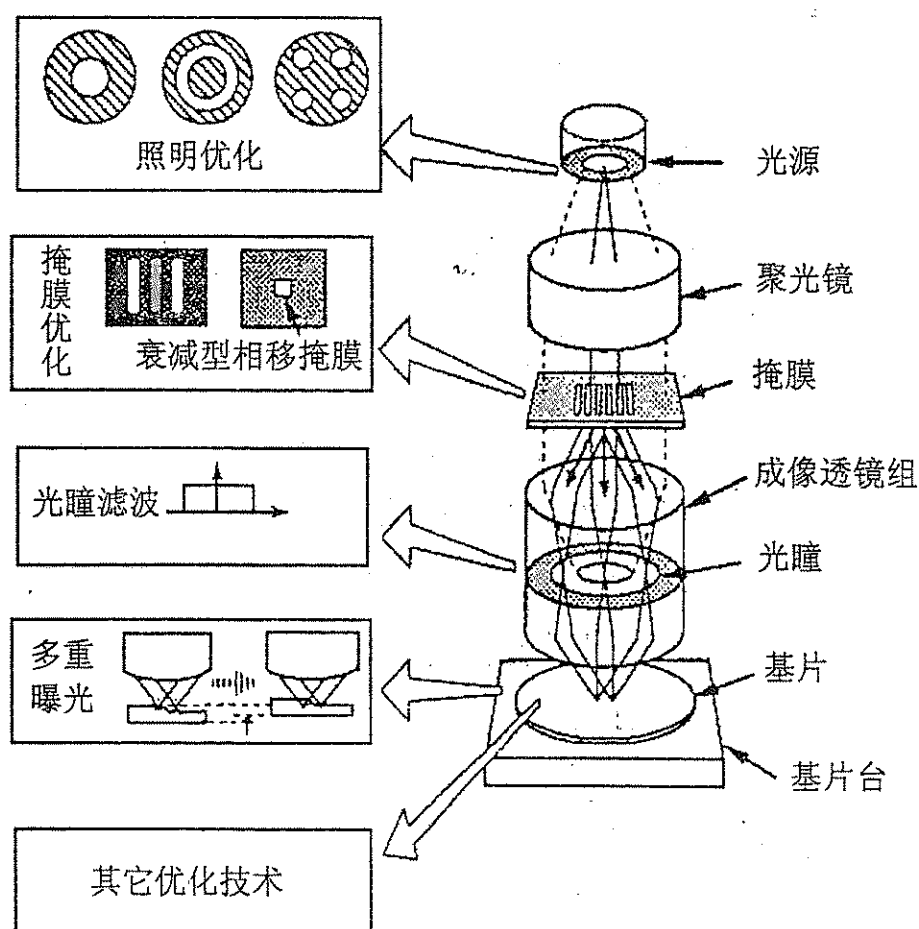


图 1-1 光学光刻系统及各种优化技术

1. 相移掩膜 (PSM) ^[10, 20-65]

1982 年 M. D. Levenson 首次提出相移掩膜 (Phase-shifting Mask, PSM) ^[10, 20]。PSM 通过改变掩膜上的相位分布来影响抗蚀剂上的光强分布,从而达到改善光学光刻投影曝光系统成像质量、提高系统分辨率、改善焦深的目的。PSM 的出现,是光学光刻技术的一次重大进步,它使投影曝光系统再次突破其分辨率极限,继续用于制作线宽更小的超大规模集成电路。在其后的近二十年里,PSM 技术不断地得到改进^[21-51],一直运用于光学光刻系统中。PSM 的主要类型有交替型、亚分辨型、边缘型、衰减型和多台阶型^[39]。其中,衰减型相移掩膜 (Attenuated PSM, Att. PSM) 是通过在常规掩膜的暗区 (不透光的部分) 附加上 180° 的相移,同时赋予该部分较小的透光量即对入射光能量进行一定程度的衰减,从而达到改善图形质量的目的^[49]。Att. PSM 在高分辨率光学光刻系统中被广泛应用。本文后面的章节将对 PSM 及 Att. PSM 作详细介绍。

2. 光学邻近效应校正 (OPC) ^[66-69]

OPE (Optical Proximity Correction) 是指当光刻图形的线宽接近光学光刻系统的分辨极限时,抗蚀剂图形相对于设计图形将发生线宽偏差、线条长度缩短、边角圆化等畸变。采用掩模预畸变等方法,设法消除这种邻近畸变,改善光刻图形质量的波前加工技术就称为 OPC。在亚微米光刻中,光学邻近效应是影响光刻图形质量的重要因素之一,从 70 年代开始人们就致力于 OPC 技术的研究,已经取得了很好的校正效果。

3. 离轴照明 (OAI) ^[18]

照明优化技术主要是指 OAI (Off-Axis Illumination) 技术。1989 年 Mack 等人将光学成像理论中的离轴照明原理引入半导体器件加工的投影光刻中。该技术被认为是最有希望拓展光学光刻分辨力的一种有效方法,并成为国际上广泛研究的热点。离轴照明的基本原理是通过倾斜照明使更多的高频信息参与成像,从而改善空间像的分辨力及焦深。OAI 的主要方法有

“环形照明”、“四极照明”、“二极照明”及其它变形照明技术。

4. 光瞳滤波 (PF) ^[19]

空间滤波技术在光学领域里早已得到广泛应用，其在投影光学光刻中的应用由 H. Fukuda 首先提出。PF (Pupil Filtering) 改善光刻图形质量的基本思想是利用滤波器适当调整零级光与一级光的振幅或位相关系，从而实现波前的优化，提高空间像图形质量。PF 可采用振幅滤波或位相滤波，也可采用复数滤波器。由于不同的掩模图形对应不同的最优滤波函数，这就要求光刻系统的结构适于滤波器的取放，而通常光刻系统的光瞳面都是封闭在投影透镜中的，因此一般需对曝光系统加以改造。

表 1-1 使用各种波前工程技术后分辨极限与波长和数值孔径的关系

波长(nm)	365	365	248	248	193	193
NA CD(um)	0.55	0.7	0.55	0.7	0.55	0.7
0.5	■ □ C					
0.35	■ □ OPC □ PSM ■ WPSM	■ □ C ■ □ OPC	■ □ C			
0.25		□ PSM ■ WPSM	■ □ OPC □ PSM		■ □ C ■ □ OPC	
0.18	■ OAI+ ϕ	■ OAI+ ϕ	■ WPSM	■ □ OPC □ PSM ■ WPSM	□ PSM ■ WPSM	■ C ■ □ OPC □ PSM
0.125			■ OAI+ ϕ			■ WPSM
0.1				■ OAI+ ϕ	■ OAI+ ϕ	■ OAI+ ϕ

注：■ 为暗线条，□ 为亮线条；C 为使用常规技术，OPC 为使用光学邻近校正，PSM 为使用相移掩膜，WPSM 为使用弱相移掩膜（指衰减型），OAI 为使用离轴照明， ϕ 指衰减型或交替型相移掩膜。

表 1-1 是使用各种波前工程技术后, 光学光刻系统的分辨极限与波长和数值孔径的关系列表^[70]。可以看出, 各种波前工程技术的应用使 365nm、248nm 和 193nm 光学光刻系统的最小可分辨线宽分别达到了 0.18 μm 、0.125 μm 和 0.1 μm 以下。在提高光学光刻分辨率、延长现有光学光刻设备寿命等方面, 波前工程技术具有重要的意义和很高的实用价值。

应注意到: 在高分辨率光学光刻系统中, 应用的波前工程技术主要是离轴照明、弱相移掩膜(一般都指衰减型相移掩膜^[70])技术和交替型相移掩膜技术。

§ 1.1.3 其它光刻技术的发展

除了在实际集成电路生产中占据绝对主要地位的光学光刻方法外, 其它一些光刻方法也已研究出来, 主要有极紫外、X 射线、电子束和离子束光刻。由于光学光刻的不断突破, 它们一直处于“候选者”的地位, 并形成竞争态势。这些技术能否在生产中取得应用, 取决于它们的技术成熟程度、设备成本、生产效率等。

1. 极紫外光刻 (EUVL) ^[1, 17]

极紫外光刻用波长为 10-14 纳米的极紫外光作光源。虽然该技术最初被称为软 X 射线光刻, 但实际上更类似于光学光刻。所不同的是由于在材料中的强烈吸收, 其光学系统必须采用反射形式。如果 EUVL 得到应用, 它甚至可能解决 2012 年的 0.05 微米及以后的问题。

2. X 射线光刻 (XRL) ^[5, 71-75]

XRL 光源波长约为 1 纳米。由于易于实现高分辨率曝光, 自从 XRL 技术在 70 年代被发明以来, 就受到人们广泛的重视。欧洲、美国、日本和中国等拥有同步辐射装置的国家相继开展了有关研究, 是所有下一代光刻技术中最为成熟的技术。与光学光刻类似, XRL 也是通过掩膜将图形传递到加工基片的抗蚀剂上。XRL 的主要困难是获得具有良好机械物理特性的掩膜衬底。近年来掩膜技术研究取得较大进展, SiC 目前被认为是最合适的衬底材

料。与 XRL 相关的问题研究已经比较深入, 尽管光学光刻技术的发展和其
它光刻技术的新突破使 XRL 不再是未来“唯一”的候选技术, XRL 仍然是一
种不可忽视的技术方法。

3. 电子束光刻 (EBL) ^[4, 76-78]

EBL 始于 1967 年, 到 70 年代已逐渐达到一定的实用水平。电子束光刻
采用高能电子束对光刻胶进行曝光从而获得结构图形, 由于其德布罗意波
长为 0.004 纳米左右, 电子束光刻不受衍射极限的影响, 可获得接近原子
尺度的分辨率。电子束光刻由于可以获得极高的分辨率并且可以由计算机
控制将图形直接刻在抗蚀剂上, 不但在 VLSI 制作中已成为不可缺少的掩模
制作工具, 也是加工用于特殊目的的器件和结构的主要方法。

目前的电子束曝光机的分辨率已达 0.1 微米以下。EBL 的主要缺点是生
产效率较低, 约为每小时 5—10 个圆片, 远小于目前光学光刻的每小时 50
—100 个圆片的水平。

最近, 美国朗讯公司开发的角度限制散射投影电子束光刻 SCALPEL 技
术令人瞩目, 该技术如同光学光刻那样对掩模图形进行缩小投影, 并采用
特殊滤波技术去除掩模吸收体产生的散射电子, 从而在保证分辨率条件下
提高产出效率。无论未来光刻采用何种技术, EBL 都将是集成电路研究与生
产中不可缺少的基础设施。

4. 离子束光刻 (IBL) ^[6, 79-82]

离子束光刻采用液态原子或气态原子电离后形成的离子通过电磁场加
速及电磁透镜的聚焦或准直后对光刻胶进行曝光。其原理与电子束光刻类
似, 但德布罗意波长更短 (小于 0.0001 纳米), 且有邻近效应小、曝光场
大等优点。离子束光刻主要包括聚焦离子束光刻 (FIBL)、离子投影光刻
(IPL) 等。FIBL 发展最早, 其研究始于 70 年代, 最近的实验研究已获得
10 纳米的分辨率。IBL 的主要缺点是效率低, 很难在生产中作为曝光工具
得到应用, 目前主要用作 VLSI 中的掩模修补工具和特殊器件的修整。

§ 1.1.4 21 世纪的光学光刻技术与半导体制作工艺

各种波前工程技术的应用,使光学光刻系统一再突破根据传统光学理论所预言的分辨极限,光学光刻技术的飞速进步已经超过了人们的想像,其生命力远比早先预料的强大。在上个世纪的最后一年,利用光学光刻的 0.13 μm 加工技术已经成熟。尽管由于其它诸多因素使其投入商业生产的时间还尚未明朗,但已比 1999 年预期的完成时间提前了两年^[1]。

目前,利用光学光刻技术的集成电路生产效率已非常高,每月生产 10 万单位 IC (integrate circuit, 集成电路) 芯片已经是很平常的事,技术改革周期也缩短至三个月。高生产效率已成为半导体工业评价一项加工技术优劣的重要标准。

作为光学光刻的替代者而出现的 X 射线光刻、电子束光刻、离子束光刻等光刻技术,由于技术成熟程度、设备成本、生产效率等因素,在本世纪初还不足以形成商业生产能力。

鉴于以上原因可以推断:在 21 世纪初期,光学光刻将仍然是集成电路制造工业使用的主要光刻技术。

§ 1.2 研究意义和国内外概况

从光学光刻的发展进程中可以看到,相移掩膜技术是波前工程的主要技术之一,特别是在光学光刻系统的分辨率高端,衰减型相移掩膜 (Att. PSM) 和交替型相移掩膜更是占据了三项波前工程技术中的两项^[70]。因此,可以说 Att. PSM 等相移掩膜技术是提高光学光刻质量主要而有效的手段,加强其研究和实验工作对挖掘现有光学光刻设备潜力、促进集成电路加工向更小线宽发展具有非常重要的实际意义。

目前,Att. PSM 已发展出单层^[29-33]、双层^[34-36, 47]和多层^[58]等多种结构类型,采用的膜层材料也有许多种。双层和多层结构的 Att. PSM 用不同材料的薄膜分别对透过率和位相变化进行控制,可以灵活方便地得到具有特定目标参数的相移掩膜,但其缺点是制作过程较为复杂,需进行多次沉积和刻蚀,工序的增加将直接导致掩膜缺陷出现的几率加大。单层结构的

Att. PSM (Single-layer Att. PSM, SAtt. PSM) 仅用一层薄膜同时实现对透过率和位相变化的控制。其非常重要的特点就在于其工业制作过程和常规掩膜一样简单, 可用同样的设备成膜, 只需一次刻蚀处理, 因而具有很好的应用前景。制作单层 Att. PSM 的困难在于其薄膜的制备, 要求薄膜的光学参数搭配适当以获得 180° 相移和指定透过率, 同时薄膜应满足对掩膜膜层的其它性质的要求。因此, 选用适当的成膜材料和合适的膜层生长条件就成为制作高质量单层 Att. PSM 的关键。对单层 Att. PSM 的薄膜制备进行研究, 对制作出高质量的单层 Att. PSM, 提高光学光刻系统的图形质量, 充分挖掘我国现有光学光刻系统的潜力, 都具有十分重要的意义。

国际上对相移掩膜的研究在 90 年代以后发展非常迅猛, 已发展出多种类型的相移掩膜^[38], 并且已成功地应用于微电子制造业中, 在提高光学光刻质量方面取得了良好的效果。Att. PSM 是其中一种重要的类型。对单层结构的 Att. PSM, 由于其特殊的光学性能要求, 目前普遍选取 Cr、Si 等金属的氧化物或氮化物作为膜层材料^[25-37]。其关键技术的研究, 即针对指定光学参数的薄膜生长条件的研究, 国外已有一些报道^[28-33], 但国内的研究报告还很少涉及到这一领域。这使我国在 Att. PSM 的制作及应用方面相对滞后。因此, 进行本论文的研究工作就具有相当的重要性和迫切性。

等离子体增强化学气相沉积 (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 方法是半导体工艺中非常成熟的制膜技术, 主要用于钝化膜的制备。PECVD 的最大特点是可以通过反应气体组份的改变制备出折射率和透过率连续变化的薄膜。以本文的工作为基础, 进而研究将 PECVD 技术用于其它光学薄膜制备的优势和应用前景, 将会是一项很有意义的工作。

§ 1.3 本文主要内容

为拓展光学光刻极限、提高光学光刻质量, 本文以信息光学为基础, 围绕单层衰减型相移掩膜 (SAtt. PSM) 这一波前工程技术展开研究。本文工作得到国家自然科学基金和中科院光电所微细加工光学技术国家重点实验室开放基金的资助。

本文针对国内主流的 I 线曝光机, 自行开发出部分相干成像系统仿真软件, 全面研究 SAtt. PSM 对光刻图形质量的影响, 并选用 SiN_x 作薄膜材料, 以 PECVD 装置为薄膜制备手段, 对 SAtt. PSM 的制作技术进行了研究。全文共分六章:

第一章 前言 通过光刻技术发展概况的回顾, 突出光学光刻技术在集成电路制作中的重要地位, 强调相移掩膜等波前工程技术的应用对拓展光学光刻适用范围的突出贡献, 以此阐明本文研究工作的重要意义和实用价值。

第二章 相移掩膜改善光学光刻质量的机理 弄清相移掩膜改善光学光刻质量的基本原理, 有助于深入理解 SAtt. PSM 的作用, 对研究分析 SAtt. PSM 参数对图形质量的影响有理论指导意义。本章系统地分析相移掩膜通过改变掩膜位相分布从而改善光学光刻分辨率和图形质量的机理, 通过对目前使用的相移掩膜种类、适用范围和特点的简要总结, 阐明本文工作选择 Att. PSM 的原因。部分相干成像理论是分析光学光刻成像系统的理论基础, 本章将建立部分相干成像计算机仿真软件系统, 详细给出模拟软件的实现方法以及程序计算流程, 为研究掩膜优化技术对图形质量的改善作用提供技术手段。

第三章 单层衰减型相移掩膜研究 SAtt. PSM 的优势在于掩膜制作工艺简单且适用范围广。在理论上系统地分析 SAtt. PSM 的性能参数对图形质量的影响, 得到各掩膜参数的允许误差范围, 将有助于预期沉积衰减相移膜层时各工艺参数所需要达到的控制精度以及刻蚀制作 SAtt. PSM 时所需要达到的线宽精度。本章利用部分相干成像理论, 自行编制的光学光刻系统模拟软件, 针对 I 线曝光机, 系统地分析 SAtt. PSM 对图形分辨率和对比度的改善情况以及透过率对图形对比度和线宽的影响。

第四章 单层 SiN_x 衰减型相移掩膜的成膜技术研究 SAtt. PSM 的大部分性能由衰减相移膜层的性能决定, 制作高质量的衰减相移膜层是 SAtt. PSM 的制作难点和关键。本章由衰减相移膜层的性能要求总结出膜层材料的选择原则, 阐明选取 SiN_x 作膜层材料的原因。为沉

积出高质量的 SiN_x 衰减相移薄膜, 本章从各类成膜方法中选择了等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 方法, 自行设计和搭建一套平行平板电容耦合型 PECVD 装置, 成功地解决了高精度反应气体流量控制、高精度基片温度控制以及易燃易爆尾气处理等问题, 沉积出折射率和消光系数可连续变化的 SiN_x 薄膜, 全面分析各成膜参数对薄膜性质的影响。简要讨论 PECVD 成膜工艺中适合采用的薄膜厚度实时监控方法。

第五章 SiN_x 薄膜光学参数的检测 用于制作 SAtt.PSM 的 SiN_x 薄膜是吸收薄膜, 其光学参数和厚度的测量与计算比透明薄膜更复杂。本章详细研究高吸收薄膜 n 、 k 、 d 参数的光度测量方法, 编制利用透射率和反射率反演计算 n 、 k 、 d 参数的计算机程序。测量垂直入射光从薄膜一侧入射的总反射率、从基片一侧入射的总反射率以及总透过率, 利用计算机反演算法计算 SiN_x 薄膜的厚度和 365nm 波长下的复折射率, 得到 3 号 SiN_x 样片的光学参数满足 3% 目标透过率的 SAtt.PSM 的要求。SiN_x 薄膜的光学参数与薄膜中的 Si/N 原子比密切相关, 本章利用 X 射线光电子能谱法 (XPS) 测量 SiN_x 薄膜中的 Si/N 比, 并全面分析 SiN_x 薄膜的光学参数和 Si/N 比与薄膜制备工艺参数的关系, 综合前一章的分析, 得到用于 SAtt.PSM 的 SiN_x 薄膜的 PECVD 完整制备工艺体系。

第六章 总结 对本文工作进行总结。

参考文献

1. 中国科学院, 2000 高科技发展报告, 科学出版社, 2000. 3,
2. M. D. Levenson, Extending optical lithography to the gigabit era, Solid State Technol, 1995, 38(2), 57-66
3. P. Gargini, J. Glaze, and O. Williams, The SLA' s 1997 national technology roadmap for semiconductors, Solid State Technol., 1998, 41(1), 73-76
4. M. Kamp, M. Emmerling, S. Kubn, et al. Nanolithography using a 100KV electron beam lithography system with a Schottky emitter, J. Vac. Sci. Technol, 1999, B17(1), 86-89
5. W. Ehrfeld, and A. Schmidt, Recent developments in deep x-ray lithography, J. Vac. Sci. Technol, 1998, B16(6), 3526-3534

6. G. Gross, Ion projection lithography: next generation technology, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, B16(6), 2136-2138
7. S. Menab, and R. Blaikie, Contrast in the evanescent near field of $\lambda/20$ period gratings for photolithography, *Applied Optics*, 2000, 39(1), 20-25
8. H. Moritz, High-resolution lithography with projection printing, *IEEE Trans. Electron Device*, 1979, ED-26(4), 705-710
9. J. Cuthbert, Optical projection printing, *Solid State Technol.*, 1977, 20(8), 59-69
10. M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson, Improving Resolution in Photolithography with a Phase-Shifting Mask, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1982, ED-29(12), 1828-1836.
11. H. Watanabe, and Y. Todokoro, Phase-shifting lithography: Maskmaking and its application, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1993, B11(6), 2669-2673.
12. P. Silverman, Lithography in the 248-nm era: an IC manufacture's perspective, *Solid State Technol.*, 1995, 38(9), 81-85
13. B. Lin, Deep UV lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1975, 12(6), 1311-1320
14. M. Rothschild, R. Goodman, M. Hartney, et al., Photolithography at 193nm, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, B10(6), 2989-2996
15. J. Canning, Potentials and challenge for lithography beyond 193nm optics, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1997, B15(6), 2109-2111
16. T. Bloomstein, M. Rothschild, et al., Critical issues in 157nm lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, B16(6), 3154-3157
17. C. Gwyn, R. Stulen, et al., Extreme ultraviolet lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, B16(6), 3142-3149
18. R. G. Teracon, Recent Advances in Mask Making Technology at AT&T, *SPIE*, 1995, 2512, 282-291.
19. H. Fukuda, T. Teraswa, and S. Okazaki, Spatial filtering for depth of focus and resolution enhancement in optical lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, B9(6), 3113-3116
20. M. D. Levenson, D. S. Goodman, S. Lindsey, et al., The Phase-Shifting Mask II: Imaging Simulations and Submicrometer Resist Exposures, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1984, ED-31(6), 753-763.
21. H. Watanabe, and Y. Todokoro, Phase-shifting lithography: Maskmaking and its application, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1993, B11(6), 2669-2673.
22. H. Fujita, H. Miyashita, H. Nakamuta, and H. Sano, Direct Phase Measurements in Phase-Shift Masks with a Differential Heterodyne Interferometer, *SPIE*, 1993, 2087, 119-130.
23. K. Koyama, Impact on Mask Technology from the Viewpiont of DRAM Trend, *SPIE*, 1998, 3412, 10-17.
24. D. B. Dove, and T. C. Chieu, Interferometer for phase measurements in phase shift masks, *SPIE*, 1993, 1809, 128-136.
25. N. Ishiwata, T. Kobayashi, S. Asai, and I. Hanyu, Novel Alternating Phase

- Shift Mask with Improved Phase Accuracy, SPIE, 1998, 3236, 243-249.
26. S. Ito, H. Hazama, T. Kamo, H. Miyazaki, H. Sato, K. Hayashi, H. Shigemitsu, and I. Mori, Optimization of optical properties for single-layer halftone masks, SPIE, 1994, 2197, 99-110.
27. T. Haraguchi, T. Matsuo, and S. Takeuchi, Optimization of Compound Films for Attenuated PSM, SPIE, 1998, 3412, 609-612.
28. T. Onodera, T. Matsuo, et al., ZrSiO₄, a new and robust material for attenuated phase-shifting masks in KrF lithography, SPIE, 1999, 3873, 337-343.
29. K. Kawano, M. Asano, S. Tanaka, T. Iwamatsu, H. Sato, and S. Ito, Lithographic performance of SiN_x single-layer halftone mask, SPIE, 1995, 2512, 348-355.
30. Y. S. Yan, C. C. Cheng, C. L. Lin, J. Y. Gan, T. B. Wu, L. C. Tuo, and J. J. Wang, Ta-Si-O absorptive shifter for the attenuated phase-shifting mask, SPIE, 1996, 2793, 155-164.
31. H. Mitsui, H. Sakai, and Y. Yamaguchi, Development of the W/Si Film for the Single-layered Attenuated Phase Shifting Mask for 248nm Lithography, SPIE, 1995, 2512, 343-347.
32. C. C. Cheng, T. B. Wu, and J. Y. Gan, (LaNiO₃)_x(Ta₂O₅)_{1-x} oxide thin films for attenuated phase-shifting mask blank, SPIE, 1996, 2793, 146-154.
33. M. Nakajima, N. Yoshioka, J. Miyazaki, H. Kusunose, K. Hosono, H. Morimoto, W. Wakamiya, K. Murayama, Y. Watakabe, and K. Tsukamoto, Attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of CrO, CrON, MoSiO and MoSiON film, SPIE, 1994, 2197, 111-121.
34. T. Haraguchi, T. Matsuo, S. Takeuchi, Optimization of Zr-Si compound films for attenuated PSM, SPIE, 1998, 3412, 609-612.
35. G. Dao, G. Liu, R. Hainsey, J. Farnsworth, Y. Tokoro, S. Kawada, T. Yamamoto, N. Yoshioka, A. Chiba, and H. Morimoto, 248nm DUV MoSiON Embedded Phase-Shifting Mask for 0.25 Micrometer Lithography, SPIE, 1995, 2512, 319-332.
36. K. Mikami, H. Mohri, H. Miyashita, N. Hayashi, and H. Sano, Development and Evaluation of Chromium-Based Attenuated Phase Shift Masks for DUV Exposure, SPIE, 1995, 2512, 333-342.
37. D. S. O' Grady, and P. B. Wilber, Attenuating Phase-Shift Mask by Thermal Oxidation of Chrome, SPIE, 1994, 2197, 194-200.
38. B. J. Lin, Phase-Shifting and Other Challenges in Optical Mask Technology, SPIE, 1990, 1496, 54-79.
39. H. Kusunose, A. Nakae, J. Miyazaki, N. Yoshioka, H. Morimoto, K. Murayama, and K. Tsukamoto, Phase Measurement System with Transmitted UV Light for Phase-Shifting Mask Inspection, SPIE, 1994, 2254, 294-301.
40. E. Tamechika, S. Matsuo, K. Komatsu, Y. Takeuchi, Y. Mimura, and K. Harada, Investigation of single sideband optical lithography using oblique incidence illumination, J. Vac. Sci. Technol., 1992, B10(6), 3027-3031.

41. K. K. Shih, and D. B. Dove, Thin film materials for the preparation of attenuating phase shift masks, J. Vac. Sci. Technol., 1994, B12(1), 32-36.
42. G. Dao, N. Tam, R. Hainsey, Q. D. Qian, J. Neff, B. N. Esfahani, T. Deeter, H. Fujimoto, and P. Troccolo, New approach of rim phase-shifting mask for high-density circuit layout, J. Vac. Sci. Technol., 1994, B12(6), 3804-3808.
43. T. Terasawa, N. Hasegawa, T. Kurosaki, and T. Tanaka, 0.3-micron optical lithography using a phase-shifting mask, SPIE, 1989, 1088, 25-33.
44. A. Callegari, A. T. Pomerene, H. J. Hovel, and E. D. Babich, Optical properties of hydrogenated amorphous-carbon film for attenuated phase-shift mask applications, J. Vac. Sci. Technol., 1993, B11(6), 2697-2699.
45. Chang Yang, Logic Device Trend: Impact on Mask Technology, SPIE, 1998, 3412, 2-9.
46. H. Hasegawa, T. Higashi, N. Ishiwata, S. Asai, and I. Hanyu, Requirements of Attenuated PSM for 0.18 μ m Gate Patterns, SPIE, 1998, 3412, 496-502.
47. Y. Okamoto, and K. Gyouda, A New Phase Shifting Mask Technology for Quarter Micron Photolithography, SPIE, 1995, 2512, 311-318.
48. S. Peng, Through-focus image balancing of alternating phase-shifting masks, SPIE, 1999, 3873, 328-336
49. B. Lin, The attenuating phase-shifting mask, Solid State Technol., 1992, 35(1), 43-47
50. W. Maurer, C. Friedrich, et al., Proximity effects of alternating phase shift mask, SPIE, 1999, 3873, 344-349
51. C. Spence, M. Plat, et al., Integration of optical proximity correction strategies in strong phase shifters design for poly-gate layers, SPIE, 1999, 3873, 277-287
52. M. Born, E. Wolf, Principles of optics, 5th ed., Oxford, England: Pergamon Press, 1975,
53. B. Lin, Partially coherent imaging in two dimensions and the theoretical limits of projection printing in microfabrication, IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27, 931-938
54. T. Terasawa, N. Hasegawa, et al., Imaging characteristics of multi-phase-shifting and halftone phase-shifting masks, Jpn. J. Appl. Phys. 1991, 30, 2991-2998
55. E. Tamechika, S. Matsuo, et al., Investigation of single sideband optical lithography using oblique incident illumination, J. Vac. Sci. Technol., 1992, B10(6), 3027
56. Y. Iwabuchi, J. Ushioda, et al., Monolayer halftone phase -shifting mask for KrF excimer laser lithography, Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32 5900
57. T. Tersawa, N. Hasegawa, et al., 0.3-micron optical lithography with a phase-shifting mask, SPIE, 1989, 1088, 25-33
58. H. watanabe, H. Takanaka, et al., Transparent phase-shifting mask with

- multistage phase shifter and comb-shaped shifter, SPIE, 1991, 1463, 101-110
59. H. Mitsui, H. Suda, et al., Development of novel W/Si material for the single-layered attenuated phase-shifting mask, SPIE, 1994, 2254, 71-74
60. M. D. Levenson, Extending the lifetime of optical lithography technologies with the wavefront engineering, Jpn. J. Appl. Phys., 1994, 33, 6765-6773
61. Y. Saito, S. Kawada, et al., Attenuated phase-shifting mask blanks with oxide or oxinitride of Cr or MoSi absorptive shifter, SPIE, 1994, 2254, 60-63
62. H. Mohri, et al., Chromium-based attenuated phase shifter for DUV exposure, SPIE, 1994, 2322, 274-298
63. A. Ogura, H. Kawahira, et al., Development of practical attenuated phase-shifting mask, SPIE, 1994, 2254, 275-279
64. C. Pierrat, and J. Demarco, Phase-shifting mask fabrication, SPIE, 1993, 2087, 362
65. Y. Fukushima, et al., Evaluation of performance of attenuated phase-shifting mask using simulation, SPIE, 1996, 2793-21
66. M. parikh, Correction to proximity effects in electron beam lithography I: theory, J. Appl. phys., 1979, 50(6), 4371-4377
67. M. parikh, Correction to proximity effects in electron beam lithography II: implementation, J. Appl. phys., 1979, 50(6), 4378-4382
68. W. Maurer, C. Dolainsky, et al., Process proximity correction using an automated software tool, SPIE, 1998, 3334, 245-253
69. K. Wampler, R. Caldwell, Data-handling issues for OPC, Solid State Technol., 1998, 41(9), 91-98
70. M. D. Levenson, Wavefront engineering from 500nm to 100nm CD, SPIE, 1997, 3051, 2-13
71. J. Silverman, Challenges and process in x-ray lithography, J. Vac. Sci. Technol., 1998, B16(6), 3137-3141
72. B. Bollepalli, M. Khan, and F. Cerrina, Automatic mask generation in x-ray lithography, J. Vac. Sci. Technol., 1997, B15(6), 2238-2242
73. S. Uchiyama, M. Oda, and T. Matsuda, X-ray mask distortion correction technology using pattern displacement simulator, J. Vac. Sci. Technol., 1996, B14(6), 4332-4335
74. M. Oda, S. Uchiyama, et al., X-ray mask fabrication technology for 0.1μm very large scale integrated circuits, J. Vac. Sci. Technol., 1996, B14(6), 4366-4370
75. A. Chen, Overlay modeling for proximity x-ray lithography, J. Vac. Sci. Technol., 1998, B16(6), 3485-3490
76. J. Scoot, 1:1 electron image projector, Solid State Technol., 1977, 29(5), 43-47
77. C. Dix, P. flavin, et al., 0.1μm scale lithography using a conventional electron beam system, J. Vac. Sci. Technol., 1985, B3(1), 131-135

78. C. Rose, L. Wang, et al., Evaluation of a next-generation vector electron beam mask pattern lithography system, SPIE, 1998, 3236, 64-73
79. J. Wasson, J. Torres, et al., Ion absorbing stencil mask coatings for ion beam lithography, J.Vac.Sci.Technol., 1997, B15(6), 2214-2217
80. J. Beckman, T. Chang, et al., Minimum emission current of liquid metal ion source, J.Vac.Sci.Technol., 1997, B15(6), 2332-2336
81. Y. Lee, R. Gough, et al., Development of ion source for ion projection lithography, J.Vac.Sci.Technol., 1996, B14(6), 3947-3950
82. K. Edinger, V. Yun, et al., Development of a high brightness gas field ion source, J.Vac.Sci.Technol., 1997, B15(6), 2365-2368

第二章 相移掩膜改善光刻质量的机理

集成电路的集成度的日益提高,对其关键技术之一的光学光刻技术提出越来越高的要求。提高光学光刻的分辨率和图形质量的迫切需要,使波前工程在光学光刻系统占有越来越重要的地位。相移掩膜技术以改变掩膜上的位相分布为途径,使光学光刻的分辨率和图形质量得到明显改善,成为掩膜优化技术的重要组成部分。本章将系统地分析相移掩膜通过改变掩膜位相分布从而改善光学光刻分辨率和图形质量的机理,通过对目前使用的相移掩膜种类、适用范围和特点的简要总结,阐明本文工作选择衰减型相移掩膜的原因。部分相干成像理论是分析光学光刻成像系统的理论基础,本章将编制出部分相干成像模拟软件,并详细给出模拟软件的实现方法以及程序计算流程。

§2.1 相移掩膜改善光刻质量的基本原理

1982 年 Marc D. Levenson 首次提出了相移掩膜 (Phase-shifting Mask, PSM) 的概念^[1-2],通过改变物面上相位分布来影响像面上的光强分布,从而达到改善光学光刻投影曝光系统成像质量,提高系统分辨率,改善焦深的目的。相移掩膜的出现,是光学光刻技术的一次重大进步,它使投影曝光系统再次突破其分辨率极限,继续用于制作线宽更小的超大规模集成电路。在其后的近二十年里,相移掩膜技术不断地得到改进,一直运用于光学光刻系统中。

§ 2.1.1 振幅相消叠加的实现

在投影曝光系统中,由于光的衍射现象,当照明光通过物面上的透光孔后会扩散到邻近的区域,物面后的光学成像系统尽管能够聚集大部分的光使之参与成像,但成像系统的数值孔径总是有限的,仍然会出现像的扩散^[3]。如果是两个相邻的孔,要能在像面形成的抗蚀剂图形上分辨出两个孔,其间

的光强必须要低于最大光强的某个特定百分比。完全非相干成像时，两孔间的光强只是两孔各自产生的光强的线性叠加。相干成像和部分相干成像时，情况就要复杂得多。

完全相干成像时，两孔各自在像面上产生的光波振幅先进行线性叠加，得到一点的总的振幅后，再平方得到该点的强度。对部分相干成像系统，情况与此有相似之处。物面上两孔在像面产生的振幅的相干叠加会使两孔的像间强度增强，这样就降低了成像系统的分辨率^[4]。图 2-1(a) 显示出投影曝光系统的像面强度分布情况。

要使两像间的光强减小，就必须使两孔产生的振幅在这些点上是相消叠加的。如果两孔的光波传播到像面时，其位相正好相差 180° ，就可以做到这点。如图 2-1(b) 所示，在邻近的孔上覆盖一层厚度为：

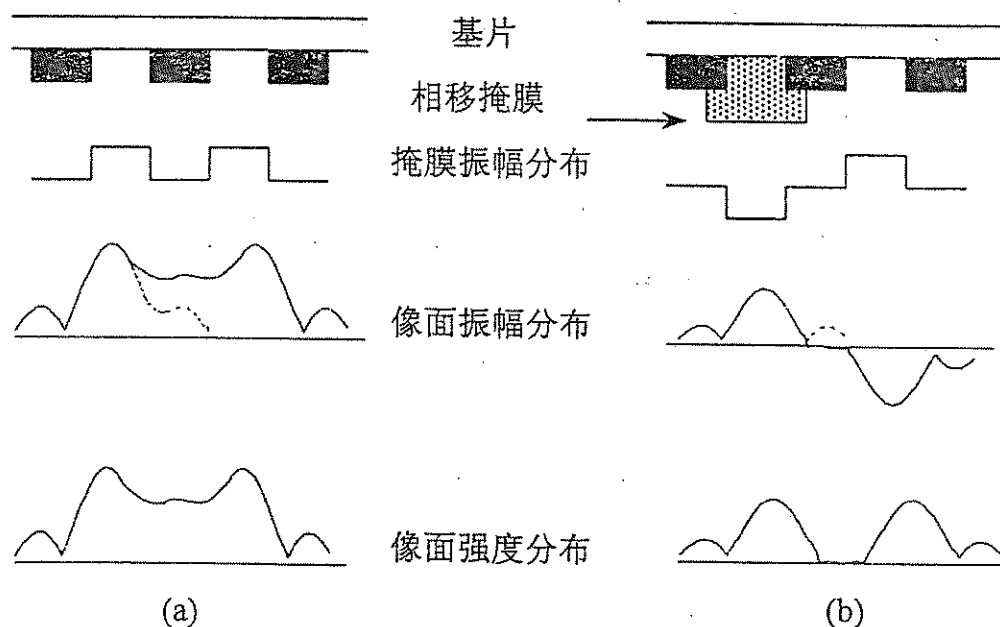


图 2-1 加相移掩膜前后，像面振幅、强度分布的比较

$$d = \lambda / 2(n-1) \quad (2-1-1)$$

薄膜 (n 为膜层折射率, λ 为波长), 使该层薄膜处的透射光波振幅较未覆盖薄膜处的透射光波振幅滞后 180° , 即实现振动位相的反相, 见图 2-2。这种在常规掩膜上附加的改变光波位相的膜层被称为相移层。这样, 从一孔传播到像面的光波就与来自相邻孔的光波相消叠加, 其结果使得两像间的光强下降。在给定的成像系统的物面上放置这种带有相移的透光物体, 将会使像面

上得到更好的对比度，提高系统的分辨率。

注：薄膜有吸收时，其介电常数 ϵ 为复数，按照折射率的严格定义公式 $\tilde{N} = \sqrt{\epsilon\mu}$ ， μ 为磁导率，薄膜的折射率也为复数^[41]，一般可表示为 $\tilde{N} = n + ik$ 。复折射率的实部 n 不再具有通常情况（透明介质）下的折射率定义，既不等于真空中波长与介质中波长的比值，也不满足折射定律。但为叙述方便起见，除特别说明外，本文中仍将复折射率的实部 n 称为折射率。复折射率的虚部 k 为消光系数。

将此种相移现象运用到光学光刻的复杂掩膜图形上，就是所谓的相移掩膜。

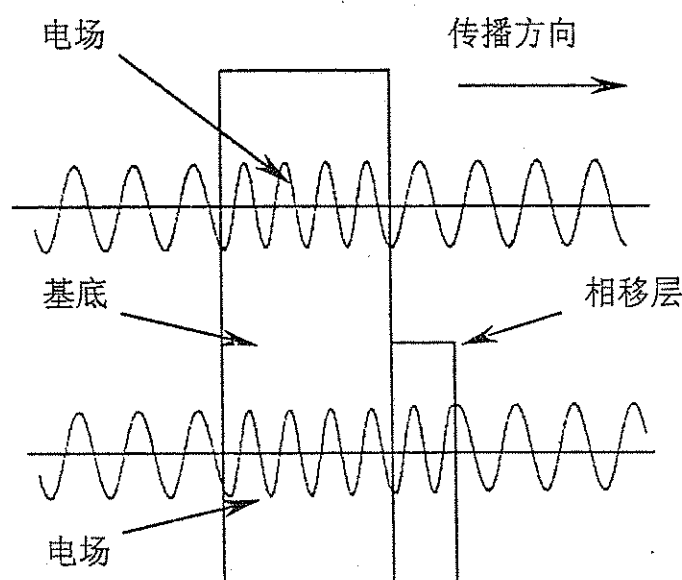


图 2-2 相移层滞后光波位相的示意图

§ 2.1.2 带宽与对比度

对透过型物体，相干成像系统的截止频率为：

$$\nu_c = \frac{\text{N.A.}}{\lambda} \quad (2-1-2)$$

其中，N.A. 为成像系统数值孔径， λ 为波长。系统的调制传递函数在 $\nu > \nu_c$ 时为零。而完全非相干照明时，该成像系统可传输的频率能达到 $2\nu_c$ 。

以一个正弦透过型掩膜来考察对成像带宽的要求。如图 2-3(a) 所示，掩膜的透过率为：

$$T = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\pi\nu_0 x) \quad (2-1-3)$$

易见, 其对比度为 100%。光刚透过掩膜时, 强度的空间频率为 ν_0 。用相干光垂直照明掩膜, 对常规掩膜和相移掩膜, 透射光的振幅分布会出现两种不同的情况。常规掩膜透射光的振幅是正比于 $|\cos 2\pi\nu_0 x|$ 的, 如图 2-3(b) 所示。而同样情况下, 相移掩膜透射光的振幅却是正比于 $\cos \pi\nu_0 x$ 的, 如图 2-3(c) 所示。将二者作傅立叶分析, 得到常规掩膜的傅立叶谱为:

$$E_T(\nu) = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \delta(\nu) + \frac{1}{6} [\delta(\nu - \nu_0) + \delta(\nu + \nu_0)] - \frac{1}{30} [\delta(\nu - 2\nu_0) + \delta(\nu + 2\nu_0)] + \dots \right\} \quad (2-1-4)$$

相移掩膜的傅立叶谱则只有两个频谱分量:

$$E_\phi(\nu) = \frac{1}{2} \{ \delta(\nu - \nu_0/2) + \delta(\nu + \nu_0/2) \} \quad (2-1-5)$$

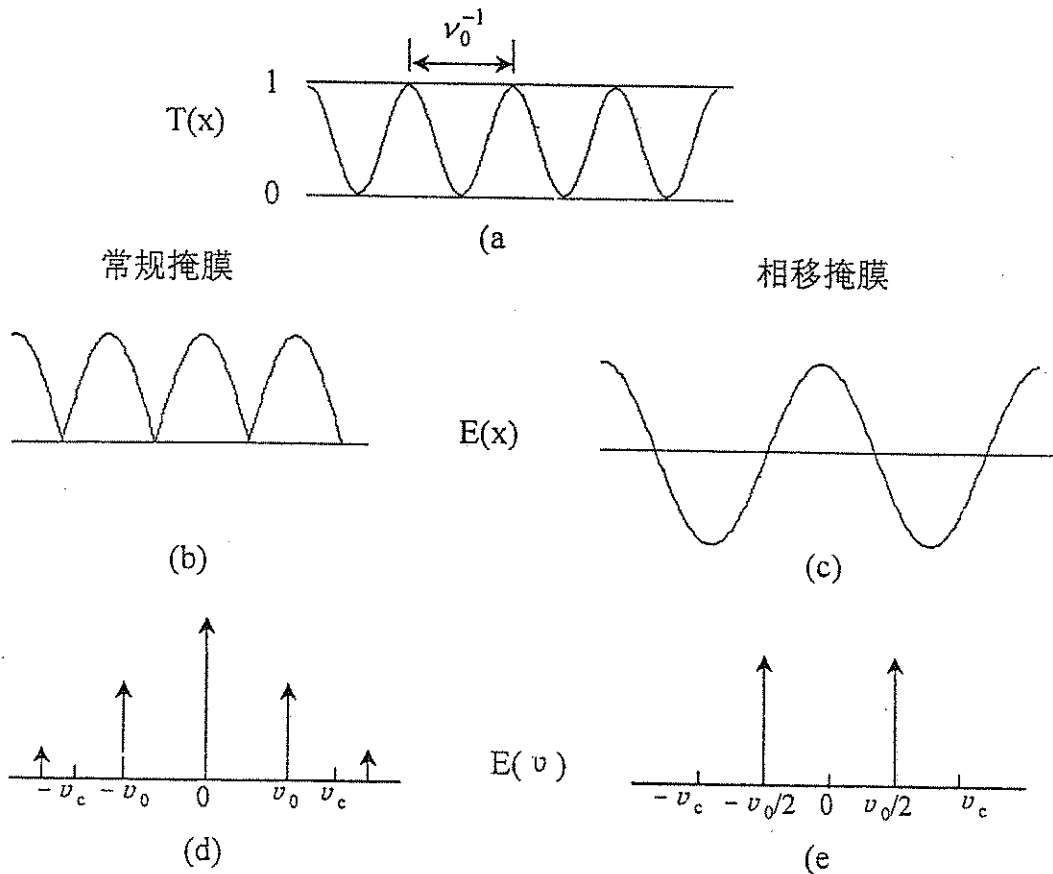


图 2-3 掩膜透射光的振幅和谱

一个光学成像系统只能传输 $\nu < \nu_c$ 的频率分量, 由(2-1-4)、(2-1-5)两式和图 2-3(d)(e)可以看出: 对常规掩膜, 其空间频率 ν_0 必须小于 ν_c 方可被系统所传输; 而对于相移掩膜, 在同样的成像系统中传输, 其空间频率可达到 $\nu_0 = 2\nu_c$ 。换句话说, 对具有相同空间频率 $\nu_0 < \nu_c$ 的两种掩膜, 相移掩膜对空频带宽的要求明显比常规掩膜要小。

引入对比度函数来讨论相移掩膜情形下像的对比度和分辨率。对由(2-1-3)式所确定的正弦型掩膜, 其对比度函数定义为:

$$CF(\nu_0) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2-1-6)$$

像强度的最大值 $I_{\max}$ 出现在 $x=0, 1/\nu_0, 2/\nu_0$ 处, 最小值 $I_{\min}$ 出现在 $x=1/2\nu_0, 3/2\nu_0$ 等处。

相干照明时, 常规掩膜的像面强度分布为:

$$I_T(x) = \frac{16}{\pi^2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\pi \nu_0 x \right]^2 \quad 1/2\nu_c < \nu_0 < \nu_c \quad (2-1-7)$$

相移掩膜的像面强度分布为:

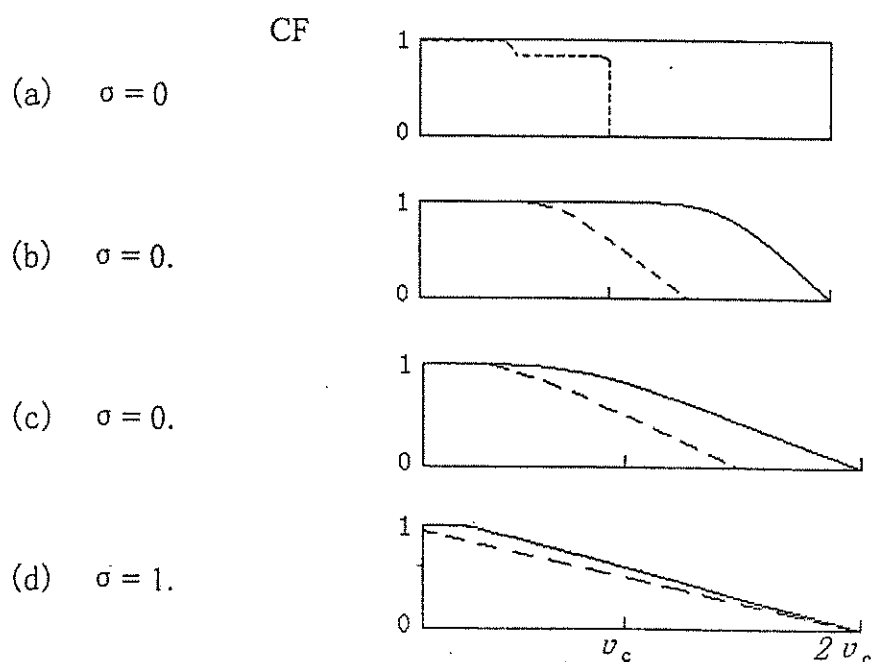


图 2-4 不同非相干系数时的对比度函数。

实线为相移掩膜, 虚线为常规掩膜。

$$I_{\phi}(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\pi\nu_0 x) \quad \nu_0 < \nu_c \quad (2-1-8)$$

由(2-1-7) (2-1-8) 和(2-1-6) 即可算出两种掩膜相应的像面对比度函数 $CF_1(\nu_0)$ 和 $CF_2(\nu_0)$ 。图 2-4(a) 给出了完全相干照明情况下两种掩膜 CF 函数的区别^[1]。相移掩膜由于对空频带宽要求较低, 一直到截止频率 $2\nu_0$ 处都保持了 100% 的对比度。图 2-4(b)-(d) 给出了几种部分相干情况下的结果。无论非相干因子 σ 取何值, 随着空间频率 ν 的增大, 相移掩膜所成像的对比度总是比常规掩膜下降得慢。在 $\sigma=1.0$ 即可近似认为是非相干成像的情形下, 两者的对比度随 ν 的变化趋于一致。

§ 2.1.3 相干性的影响—相干分解法

照明光相干性的减小对物体所成像的影响可用照明光的角谱加以分析。这里设定照明光中的每一平面波分量与其它所有分量是不相干的^[1]。每一平面波分量分别被物体衍射, 衍射波的各傅里叶谱分量之间是相干的^[1, 5-6]。在像面上, 将一给定照明光角谱元产生的各级傅里叶谱分量所决定的电场相加并平方, 得到该角谱元产生的像面强度分布; 然后将各照明光角谱元产生的强度直接叠加, 就得到像面总的强度分布。前一过程是相干叠加, 而后一过程是非相干叠加。

将掩膜面上的照明光场表示为:

$$E_I = \int_{-\infty}^{\infty} E_s(q) e^{i[qx + \phi(q, t)]} dq \quad (2-1-9)$$

式中, $\phi(q, t)$ 为任意值, 照明分布函数为:

$$E_s(q) = \begin{cases} \left(\frac{I_I}{2\sigma\nu_c} \right)^{1/2} & |q| \leq \sigma\nu_c \\ 0 & |q| > \sigma\nu_c \end{cases} \quad (2-1-10)$$

其中, 总入射强度 I_I 为:

$$I_I = \int_{-\infty}^{\infty} |E(q)|^2 dq \quad (2-1-11)$$

掩膜对各照明分量独立作用, 其傅里叶谱分量可由如(2-1-4)、(2-1-5)式的表达式乘上相应的照明分布函数 $E(q)$ 得到。注意式中的 ν 应用 q 代替。

部分相干成像从性质上改变了成像过程。不同 q 值的照明分量的存在, 将使其傅里叶谱分量由相干照明时的位置 ν_i 移动到 $\nu_i + q$ 。这时会有两种情况出现: 一方面, 在相干成像时能被系统完全传输的空频分量, 只有在 q 较小时才能保证仍被系统传输, 在 q 值较大时这些空频分量将被系统截止; 另一方面, 在相干照明时根本不可能被系统所传输的高频分量, 在 q 值较大的照明分量作用下, 由于频移, 则能被系统所传输。

由此可清楚地看到, 当 σ 较小时, 由(2-1-10)式知照明分量的 q 值较小, 从而频移较小, 系统传输的是低空频分量, 与相干照明情况较为近似。当 σ 值较大时, 照明分量中较大 q 值的存在, 使一部分低空频分量被截止, 而一部分在相干照明情况下被截止的高频分量得到传输。这就解释了常规掩膜在部分相干照明下, 其对比度函数 CF 在截止频率 ν_c 之外仍不为零的原因。

将系统响应函数定义为

$$S(\nu') = \begin{cases} 1 & |\nu'| \leq \nu_c \\ 0 & |\nu'| > \nu_c \end{cases} \quad (2-1-12)$$

即系统截止所有 $|\nu'| > \nu_c$ 的空频分量。单位振幅的照明分量在像面上产生的强度分布为:

$$I_q(x) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) E_{\phi,T}(\nu - q) e^{-i(\nu - q)x + \phi(q,x)} d\nu \right|^2 \quad (2-1-13)$$

对正弦掩膜, 式中的 $E_{\phi,T}(\nu - q)$ 分别由(2-1-4)、(2-1-5)式确定。将各照明分量在像面上产生的强度相叠加, 得到总的强度分布为:

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} |E'(q)|^2 I_q(x) dq \quad (2-1-14)$$

比较一下由(2-1-3)式确定的正弦型常规掩膜和相移掩膜在像面上的对比度函数值。设 $\sigma = 0.8$, $\nu_0 = 0.8\nu_c$, 对常规掩膜, 可计算出 $I_{q\max} = 0.82$, $I_{q\min} = 0.15$, 则对比度函数值为:

$$CF_T(0.8\nu_c) = 0.69$$

对相移掩膜, 同样可计算出对比度函数值为:

$$CF_\phi(0.8\nu_c) = 0.86$$

相移掩膜无疑通过改变物面的相位分布达到了提高像面对比度的目的, 从而使部分相干成像系统的分辨率得到提高。

§2.2 相移掩膜的发展和种类

光学光刻由于生产效率高、成本相对较低, 一直是超大规模集成电路制作工艺中不可缺少的一环。光学成像系统由于衍射效应的存在, 其分辨率总是有限的。为不断提高投影曝光机的分辨率极限, 人们一直致力于相关技术的研究工作, 对光学光刻掩膜直接进行优化等波前工程技术占有极其重要的地位^[1-2, 7-9, 16]。相移掩膜技术(PSM)是最主要和最有效掩膜优化技术手段之一。

§ 2.2.1 PSM 的实用化进程

1. 理论和实验

波前工程的倡导者 Marc. D. Levenson 在 1982 年提出了通过改变常规掩膜上的相位分布来提高光刻系统分辨率的方法^[1, 2]。他们在常规掩膜上相邻两通光孔的其中一个上覆盖一层透光膜, 使该孔透过的光场相对于另一孔的光场滞后 180° 的位相。反相位光场的加入使像面上不利的光场叠加得以削弱, 像面的对比度和分辨率从而得到提高。其理论证明, 在非相干因子 $\sigma < 0.3$ 的

部分相干照明下, 系统分辨率几乎提高一倍, 在 $\sigma < 0.7$ 时分辨率也有实质性的提高^[1]。他们在 Mann 4800 10X 型曝光机上对某些特定图形的实验中实际得到了 40% 的分辨率提升, 达到 1000 线/mm。Levenson 的研究还指出, PSM 在提高分辨率的同时只伴随了极小幅度的焦深下降^[2]。

尽管 Levenson 的 PSM 理论指出了提高现有曝光机分辨率的良好途径, 但在 80 年代出现了更高分辨率的新一代曝光机和抗蚀剂, 当时的 PSM 由于结构较常规掩膜复杂, 人们并没有显示出很大的兴趣。一直到 1989 年, 有关 PSM 的研究论文都非常的少^[2, 10, 11]。

80 年代的研究人员将注意力主要集中到提高曝光机分辨率的另外两个途径上, 那就是提高系统的数值孔径 N.A. 和降低曝光波长。当时曝光机的 N.A. 从 0.3 提高到了 0.6^[10]。但制作超大规模集成电路 (Very Large Scale Integration, 简称 VLSI) 不仅要求光刻系统有高的分辨率, 同时还要保证足够的焦深 (DOF), 一般认为约 1.0-1.5 μm 。由瑞利公式知道光学成像系统的分辨率为^[38]:

$$\text{CD} = k_1 \frac{\lambda}{\text{N.A.}} \quad (2-2-1)$$

焦深为:

$$\text{DOF} = \pm k_2 \frac{\lambda}{\text{N.A.}^2} \quad (2-2-2)$$

式中, CD (Critical dimension) 为最小可分辨尺寸, λ 为曝光波长, k_1 和 k_2 使与系统有关的常数, 前者取决于成像技术和加工控制, 后者取决于成像系统的失真度。

由以上两式可知, 成像系统 N.A. 的增大将必然导致 DOF 的减小, 无法同时获得大的 N.A. 和 DOF。所以在 80 年代末, 光学光刻所必需的焦深限制了系统的实用分辨率^[10]。

1989 年, Terasawa 等人指出用 I 线曝光机结合 PSM 技术实现 0.3 μm 光学光刻的可能性^[9], 因为 PSM 可同时提高分辨率和焦深, I 线曝光机的实用分辨率极限可扩展到 0.3 μm 。这时人们的注意力才转向了 PSM。在其后相当长的时间里, 发表了很多 PSM 的研究报告^[10-33]。大多数的应用集中在将 PSM 作

为一种改进曝光机性能的手段上。典型的例子是：分辨率极限为 $0.5\mu\text{m}$ 的 I 线曝光机仅仅将常规掩膜换成 PSM 就能制作出最小结构尺寸为 $0.3\mu\text{m}$ 的图形^[10]。

正因为 PSM 能将现有曝光机的分辨率性能扩展到更先进的曝光机才能实现的加工范围，它便成为改良现有设备非常有效的技术手段。

2. 缺陷检测和修复的实现

以上提到的研究报告都只限于 PSM 的模拟计算和实验结果。尽管已有 PSM 应用于某些半导体制作设备，但要将其实际应用到 VLSI 制造中还有技术困难需要解决。

妨碍 PSM 投入实际 VLSI 应用的主要障碍在于：要将 PSM 做到无缺陷非常困难。

制作能得到高分辨率图形的 PSM 并不十分困难，但在 VLSI 中使用的掩膜必须保证无缺陷。PSM 的制作过程较常规掩膜复杂（主要指透明型 PSM），工艺步骤更多，产生缺陷的可能性就更大。有研究报告指出，掩膜上的相移缺陷和不透光部分的几何缺陷都会对像面图形产生的影响，而前者的影响远比后者的大^[7,12]，也就是说，即使较小的相移缺陷都必须加以检测和修复，以避免在像面上产生不利的强度分布。PSM 的缺陷检测和修复成为无缺陷 PSM 制作的关键问题。

基于这种需要，许多相移缺陷检测和修复的方法被研究出来。Derek B. Dove 等人用干涉方法对掩膜的相移量进行检测^[13]，H. Fujita 等人则使用了微分外差干涉术^[14]，H. Kusunose 等人使用切变干涉显微镜对衰减型 PSM 的缺陷进行了检测^[15]。在缺陷修复方面，由 H. Watanabe 最先于 1992 年提出实现方法：用硅树脂覆盖掩膜，然后用电子束在缺陷处曝光，再对掩膜进行高温强烘，经过这些步骤，相移缺陷基本被修复^[10]。

相移缺陷检测和修复问题的基本解决，使 PSM 在 1996 年终于被实际应用于 VLSI 制造^[16]。直至现在，人们一直在进行这方面的研究工作^[17-18]。

§ 2.2.2 PSM 的种类

PSM 对光学光刻系统性能提升的巨大作用被揭示,特别是其实际应用于 VLSI 制作的瓶颈问题被基本解决以后,PSM 的研究成为了光刻领域的热门主题,适用于不同加工图形的各种 PSM 类型相继被研究出来并投入实际应用。

从 Levenson 提出 PSM 理论至今,PSM 大致可分为以下几大类:交替型 PSM,亚分辨率 PSM,边缘型 PSM,衰减型 PSM (Att. PSM) 和多台阶 PSM。以下对各类相移掩膜作一简单介绍。

1. 交替型 PSM^[1, 18-20]

交替型 PSM 是第一种被提出来的类型,源于 Levenson 关于 PSM 的最早论述^[1]。交替型 PSM 在相间的图形线条上覆盖相移层,使其透过光场的相位滞后 180° , 电场振幅由 1 改变为 -1。反相场的出现使电场的空间频率下降,对成像系统的传递性能要求降低。在相同的成像系统参数下,像面对比度主要是线条的边缘对比度得以提高。交替型 PSM 适用于周期性的密集图形。图 2-5(a) 给出了该类 PSM 的示意图及像面的电场、强度分布。交替型 PSM 最突出的特点是对分辨率和焦深的改善非常明显,但只适用有限的图形种类。

2. 亚分辨率 PSM^[15-16]

亚分辨率 PSM 是在孔或线条的旁边附加相移层,相移层的线宽远小于成像系统的分辨率,因此不会在像面上形成足以使抗蚀剂曝光的强度,但其产生的反相场可以使图形的边缘对比度得到提高。该类型的 PSM 主要适用于独立的孔和线条。见图 2-5(b)。

3. 边缘型 PSM^[7]

交替型和亚分辨率 PSM 都是针对特定掩膜图形的,边缘型 PSM 突破了这些限制,可适用于任何形状的图形,其示意图见图 2-5(c)。边缘型 PSM 的加工简单,无需特别的预处理步骤,只要在制好的常规掩膜膜层一面上覆盖相移膜层,然后从基底一侧进行曝光便可得到。相移发生在光刻图形的边缘,其作用仍然是增强图形的边缘对比度。

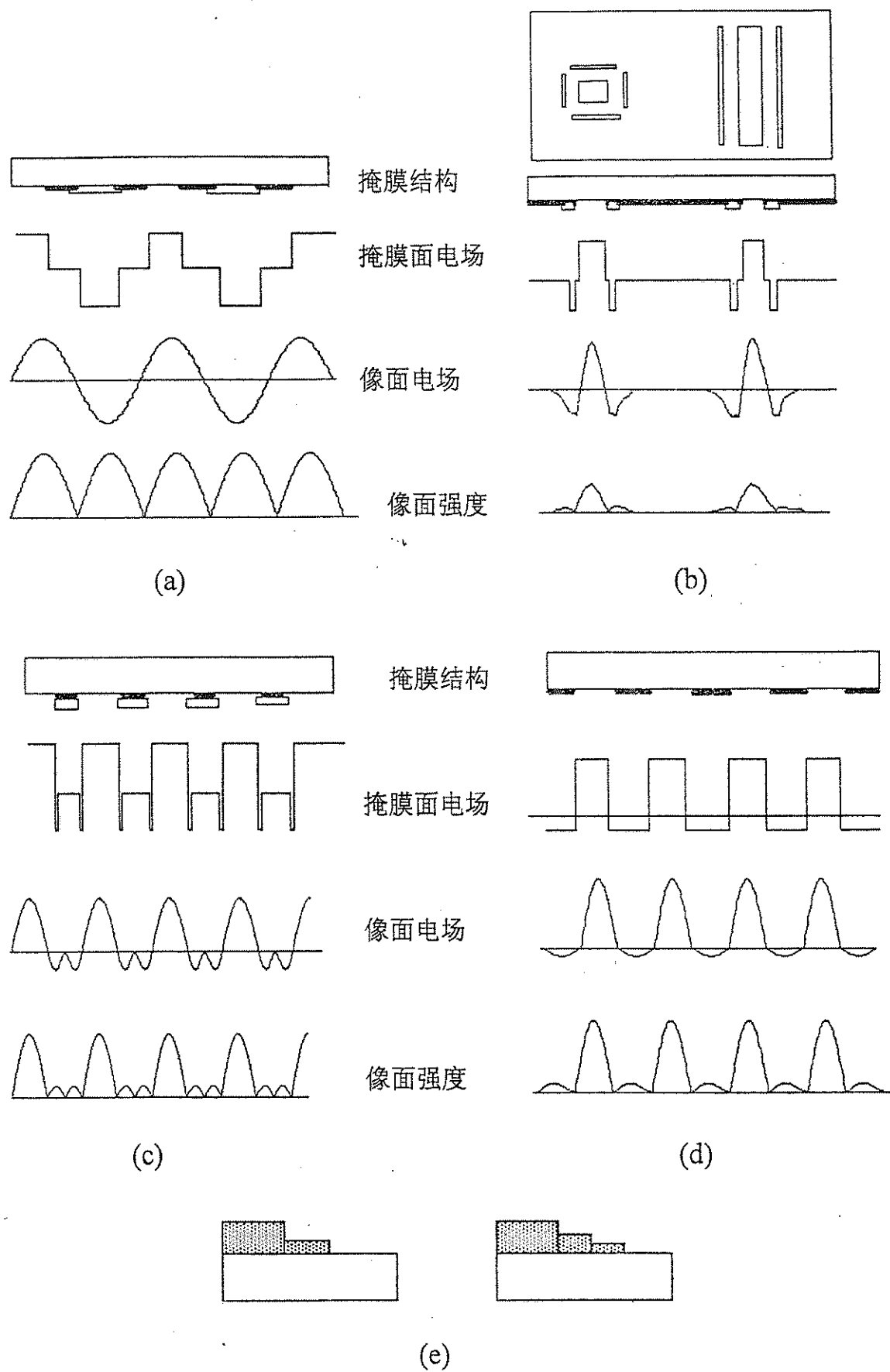


图 2-5 各类型相移掩膜的结构和电场分布

表 2-1 主要相移掩膜类型的适用范围

PSM 类型	周期线条	独立线条	空位	孔	独立块
交替型	Y	N	N	N	N
亚分辨率型	Y	Y	N	Y	N
边缘型	Y	Y	Y	Y	Y
衰减型	Y	Y	Y	Y	Y

注：Y 表示适用，N 表示不适用。

表 2-2 主要相移掩膜类型需要控制的膜层参数

参数	交替型	亚分辨率	边缘型	衰减型
PS 折射率	Y	Y	Y	Y
PS 厚度	Y	Y	Y	Y
PS 横向尺寸	N	N	Y	Y
PS 边缘轮廓	N	N	Y	Y
B. 横向尺寸	N	N	Y	N
B. 边缘轮廓	N	N	Y	N
重复占位	Y	Y	N	N
Att. 折射率	N	N	N	Y
Att. 吸收	N	N	N	Y
Att. 厚度	N	N	N	Y

注：Y 表示需控制，N 表示不需控制；

PS 指相移层，B 指掩膜遮光部分，Att. 指衰减膜层。

4. 衰减型 PSM^[2, 22-33]

B. J. Lin 在 1992 年首次提出了衰减型相移掩膜 (Attenuated PSM, Att.PSM)^[2]，开辟了 PSM 的崭新领域。与其它类型的相移掩膜直接在常规掩膜上附加相移层不同，Att.PSM 在待加工图形的暗区（不透光部分）附加上 180° 的相移，同时赋予该部分较小的透光量即对入射光能量进行一定程度的衰减，由此提供反位相电场在像面上削减不利的光场叠加，达到提高像面对比度的目的，见图 2-5(d)。对暗区部分进行衰减的原因在于避免反相场太强

而破坏像面图形。从后来的发展看, Att. PSM 成为了相移技术中最重要的部分, 一直运用于各种分辨率的光刻系统中^[16, 33]。在后面的章节里还要作详细的介绍。

5. 多台阶 PSM^[34]

PSM 能提高图形边缘的对比度, 但通常在图形边缘形成一条暗带, 它会占据图形边缘一部分的宽度, 减小图形的线宽。为解决这个问题, H. Watanabe 等人提出了多台阶 PSM, 用 PSM 边缘相移的变化来达到减小对线宽的侵蚀^[34]。其示意图见图 2-5(e)。该种 PSM 的加工非常复杂, 随着光学邻近效应校正技术 OPC 的出现, 便没再见到有关的研究报告。

表 2-1、表 2-2 给出了几种主要 PSM 的适用范围和需要控制的参数^[35]。

§ 2.3 光刻中的部分相干成像理论

当前投入实用的光刻投影曝光系统, 一般采用部分相干照明, 因此, 其成像是系统是部分相干成像系统, 应当用部分相干成像理论对其像面上的光强分布进行分析^[36-37]。

部分相干成像理论以范西特-泽尼克定理和霍布金斯成像公式为基础, 能够在任意给定的实验条件下计算出像平面上预期的强度分布, 这样可以增进对照明、物体、成像系统各自单独作用的了解。理论上的预期计算不仅能提高对实验结果的解释能力, 重要的是还能在实施具体的实验之前, 对所设计的照明系统、掩膜特性、成像系统将在像面强度分布上产生何种影响有一个大致的估计, 从而对系统和掩膜的设计起到指导作用。

部分相干成像是互强度而不是光强度的线性系统, 其理论分析和计算方法要比非相干成像系统和完全相干成像系统更为复杂。常用的部分相干成像的计算方法有全光源积分法、照明互强度法和四维线性系统法^[38-40]。

§ 2.3.1 全光源积分法

当物体由准单色空间非相干光源照明时, 分别计算来自光源上每个点的

光在像面上产生的强度，并将来自所有点的对像强度的贡献加权求和，加权因子正比于光源强度分布，从而求出像面上的强度。此方法称为全光源积分法。

如图 2-6 所示的部分相干成像系统，用 $F(\xi, \eta; \alpha, \beta)$ 和 $K(u, v; \alpha, \beta)$ 分别表示照明系统和成像系统的扩散函数， $t_0(\xi, \eta)$ 为物体的振幅透过率， δ_1 是与 (ξ, η) 和 (α, β) 有关的时间延迟， $A_s(\alpha, \beta; t)$ 表示光源上坐标为 (α, β) 的点发出的光随时间变化的相幅矢量，则来自该点的光到达并透过物体形成的随时间变化的相幅矢量振幅为：

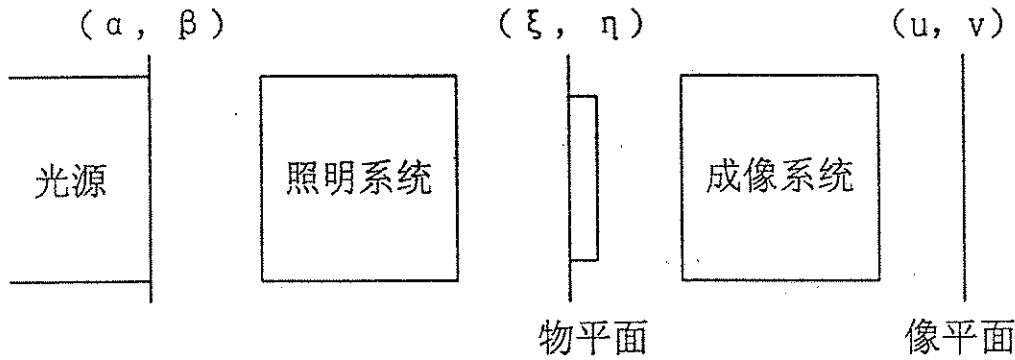


图 2-6 部分相干成像系统

$$A_s(\xi, \eta; \alpha, \beta; t) = F(\xi, \eta; \alpha, \beta) t_0(\xi, \eta) A(\alpha, \beta; t - \delta_1) \quad (2-3-1)$$

由光源点 (α, β) 到达像平面点 (u, v) 处的相幅矢量为：

$$A_i(u, v; \alpha, \beta; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; \xi, \eta) t_0(\xi, \eta) F(\xi, \eta; \alpha, \beta) \quad (2-3-2)$$

$$A_s(\alpha, \beta; t - \delta_1 - \delta_2) d\xi d\eta$$

最后，可得到像面上的强度为^[39]：

$$\begin{aligned} I_i(u, v) = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_s(\alpha, \beta) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; \xi_1, \eta_1) K^*(u, v; \xi_2, \eta_2) \\ & F(\xi_1, \eta_1; \alpha, \beta) F^*(\xi_2, \eta_2; \alpha, \beta) \\ & t_0(\xi_1, \eta_1) t_0^*(\xi_2, \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (2-3-3)$$

其中, $I_s(\alpha, \beta)$ 为光源面上的光强分布。

可以看出, 对全光源进行积分是一种概念简单的计算方法。

§ 2.3.2 照明互强度法

全光源积分法是以非相干准单色光源为前提的, 但根据范西特—泽尼克定理, 任何光场在传播过程中其相干性是不断改善的。因此, 严格地说, 物面照明始终是部分相干照明。计算部分相干成像更一般的方法应当是分析整个系统的互强度传播过程。照明互强度法首先计算从准单色光源发出的光通过照明系统在物面上形成的互强度, 用入射到物面上的照明互强度函数来表示光源的作用, 然后计算出像面上的光强分布。

在准单色条件下, 到达像面点 (u, v) 的相幅矢量为用 $A_i(u, v; t)$ 表示, 入射到物面上的相幅矢量用 $A_0(\xi, \eta; t)$ 表示, 则

$$A_i(u, v; t) = \int \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; \xi, \eta) t_0(\xi, \eta) A_0(\xi, \eta; t - \delta) d\xi d\eta \quad (2-3-4)$$

其中, K 为成像系统的振幅散布函数。则像面强度为:

$$I_i(u, v) = \iiint \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; \xi_1, \eta_1) K^*(u, v; \xi_2, \eta_2) t_0(\xi_1, \eta_1) t_0^*(\xi_2, \eta_2) \\ \langle A_0(\xi_1, \eta_1; t - \delta_1) A_0^*(\xi_2, \eta_2; t - \delta_2) \rangle d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (2-3-5)$$

$\langle \rangle$ 内的积分项是入射到物面上的互强度 $J_0(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2)$, 像面强度的最终表达式为^[39]:

$$I_i(u, v) = \iiint \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; \xi_1, \eta_1) K^*(u, v; \xi_2, \eta_2) t_0(\xi_1, \eta_1) t_0^*(\xi_2, \eta_2) \\ J_0(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (2-3-6)$$

照明互强度法只要求光源是准单色的,并未要求光源是非相干的,因此其适用范围更为广泛。(2-3-6)式中虽然只有四重积分,但 J_0 的计算较为复杂,即使使用非相干光源,计算 J_0 也需二重积分,这样总共仍需六重积分。

§ 2.3.3 四维线性系统法

如果用振幅扩展函数 $K(u, v; \xi, \eta)$ 来描述成像系统, $J_0'(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2)$ 为物面后的互强度,则像与物的互强度关系为:

$$J_i(u_1, v_1; u_2, v_2) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J_0'(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) K(u_1, v_1; \xi_1, \eta_1) K^*(u_2, v_2; \xi_2, \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (2-3-7)$$

由上式不难看出,部分相干成像系统是互强度的四维线性系统。 $K(u_1, v_1; \xi_1, \eta_1) K^*(u_2, v_2; \xi_2, \eta_2)$ 可看成是系统的脉冲响应函数。

当满足条件:

- (1) 物坐标 (ξ, η) 必须已归一化使 (ξ, η) 和 (u, v) 两个坐标系之间的放大率为 1, 即物、像坐标数值相等,物距、像距相等;
- (2) 物坐标轴的指向必须使倒像无需在数学上考虑;
- (3) 振幅扩展函数 K 不含空间变化位相因子。

振幅扩展函数 K 具有空间不变性,即成像系统是一空不变系统。此时, (2-3-7) 式可表示为卷积形式:

$$J_i(u_1, v_1; u_2, v_2) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J_0'(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) K(u_1 - \xi_1, v_1 - \eta_1) K^*(u_2 - \xi_2, v_2 - \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (2-3-8)$$

利用傅里叶变换关系,将上式转换到频域 $\mathfrak{J}$ 、 $\mathfrak{R}$ 中,得到:

$$\mathfrak{J}_i(v_1, v_2, v_3, v_4) = \mathfrak{R}(v_1, v_2) \mathfrak{R}^*(-v_3, -v_4) \mathfrak{J}_0'(v_1, v_2, v_3, v_4) \quad (2-3-9)$$

其中, $\mathfrak{I}_i$ 、 $\mathfrak{I}_0'$ 、 $\mathfrak{R}$ 分别为 J_i 、 J_0' 、 K 的二维傅立叶变换。

如果照明物体的光的互强度 J_0 仅与坐标差有关, 经演算可得到:

$$\mathfrak{I}_0'(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_0(p + \nu_1, q + \nu_2) \Gamma_0^*(p - \nu_3, q - \nu_4) \mathfrak{I}_0(p, q) dp dq \quad (2-3-10)$$

其中, $\mathfrak{I}_0$ 为 J_0 的二维傅立叶变换, * 表示共轭。将上式代入 (2-3-9), 可得到像面的互强度谱, 取 $\nu_1 = \nu_3$, $\nu_2 = \nu_4$, 并进行一系列变换, 可得到像强度的谱为^[3, 39]:

$$\mathcal{I}_i(\nu_u, \nu_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega_1 d\omega_2 \Gamma_0(\omega_1, \omega_2) \Gamma_0^*(\omega_1 - \nu_u, \omega_2 - \nu_v) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dp dq \mathfrak{R}(\omega_1 - p, \omega_2 - q) \mathfrak{R}^*(\omega_1 - p - \nu_u, \omega_2 - q - \nu_v) \mathfrak{I}_0(p, q) \right] \quad (2-3-11)$$

上式中, Γ 代表物体的作用, $\mathfrak{R}$ 代表成像系统的作用, $\mathfrak{I}_0$ 代表照明系统的作用。方括号中的量与物体完全无关, 被称为透射交叉系数, 它完整地描述了从光源到像平面的过程中光学系统的作用。

四维线性系统法为部分相干成像系统提供了一个可行的分析手段。

§ 2.4 相移掩膜的部分相干成像模拟方法

光学光刻系统是部分相干成像系统, 以上节涉及的部分相干成像计算方法为基础, 可对光学光刻系统中的成像过程进行模拟, 从而分析相移掩膜技术对成像质量的影响。这一节将详细阐述本文建立部分相干成像系统仿真模型的方法和程序编制概要。

由 (2-3-11) 式, 将方括号内的透射交叉系数用 TCC 表示, 则有:

$$\mathcal{J}_i(\nu_u, \nu_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_0(\omega_1, \omega_2) \Gamma_0^*(\omega_1 - \nu_u, \omega_2 - \nu_v) TCC(\omega_1, \omega_2, \nu_u, \nu_v) d\omega_1 d\omega_2 \quad (2-4-1)$$

其中, Γ_0 为掩膜透过率函数的频谱, 角标*表示共轭,

$$TCC(\omega_1, \omega_2, \nu_u, \nu_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dp dq \mathfrak{T}_0(p, q) \times \mathfrak{R}(\omega_1 - p, \omega_2 - q) \mathfrak{R}^*(\omega_1 - p - \nu_u, \omega_2 - q - \nu_v) \quad (2-4-2)$$

完成(2-4-1)式的四重积分, 可得到像面强度的频谱, 再对其作二维反傅里叶变换, 即可得像面的强度分布。

为节省计算时间, 空域与频域间的变换均使用快速傅里叶变换 (FFT) 完成。因此, 各被积函数均用矩阵表示, 积分均采用数值积分。掩膜图形为方形, 采样点数为 $N \times N$, ξ 和 η 方向上的采样间距相同。

§ 2.4.1 透射交叉系数的计算

透射交叉系数 TCC 描述了照明系统和成像系统的综合作用, 其被积函数包括物面照明光互强度的频谱 $\mathfrak{T}_0$ 和振幅扩展函数的频谱 $\mathfrak{R}$ 两部分, 要得到(2-4-2)式的积分结果, 必须先得到 $\mathfrak{T}_0$ 和 $\mathfrak{R}$ 的表达式。

1. 物面照明光互强度的频谱

常用的照明有临界照明和柯勒照明两种。这里以临界照明来计算物面照明光的互强度。

临界照明方式是光源通过聚光照明系统成像于物面上, 物面照明的均匀性取决于光源强度的均匀性。由光源到物面可分成三段来计算互强度的传播: 一段为光源到聚光镜前; 二段为聚光镜中的传输; 三段为聚光镜出射面至物面。

(1) 从光源到聚光镜为媒质中的自由传播过程, 假设光源是非相干光源, 由范西特-泽尼克定理可得到聚光镜前的互强度分布 J_1 为^[39]:

$$J_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{x}_2, \tilde{y}_2) = K_1 \iint_{-\infty}^{\infty} I_s(\alpha, \beta) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda z_1} (\Delta \tilde{x} \alpha + \Delta \tilde{y} \beta) \right] d\alpha d\beta \quad (2-4-3)$$

式中, K_1 为与坐标有关的指数因子, $\Delta \tilde{x} = \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1$, $\Delta \tilde{y} = \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1$, 式中的二重积分正好是光源强度 I_s 的二维傅里叶变换。

由空间相干性可得到面积为 A_s 的均匀非相干光源在 z_1 处的相干面积为:

$$A_c = \frac{(\lambda z_1)^2}{A_s} \approx \frac{\lambda^2}{\Omega_s} \quad (2-4-4)$$

Ω_s 为光源对聚光镜中心所张的立体角。在大面积光源近似条件下, A_s 的值很小, 聚光镜上各点可近似看成是彼此独立的。

因此, 从聚光镜后面看, 聚光镜可近似为一个非相干光源。

(2) 聚光镜的作用是引入其本身的光瞳函数和一个二次因子, 在大面积非相干照明的近似下, 聚光镜后面的互强度为^[39]:

$$J_1'(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1; \tilde{x}_2, \tilde{y}_2) = \frac{K_1'}{(\lambda z_1)^2} |P_c(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)|^2 \times I_{*s} \left(\frac{\Delta \tilde{x}}{\lambda z_1}, \frac{\Delta \tilde{y}}{\lambda z_1} \right) \quad (2-4-5)$$

式中的 I_{*s} 为光源强度的空间频谱。

可以看出聚光镜后的光强分布与 $|p_c|^2$ 成正比。

(3) 从聚光镜后到物面, 仍为媒质中的自由传播过程, 再次利用范西特-泽尼克定理, 可得到照明物面的互强度为:

$$J_0(\xi_1, \eta_1; \xi_2, \eta_2) = K_2 \times \iint_{-\infty}^{\infty} |P_c(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)|^2 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda z_2} (\Delta \tilde{\xi}_1 + \Delta \tilde{\eta}_1) \right] d\tilde{x}_1 d\tilde{y}_1 \quad (2-4-6)$$

照明物面的互强度只与光瞳函数的平方有关, 因此, 它将不受聚光镜像差的影响, 这正是许多聚光镜设计中对像差校正要求不高的原因。

将(2-4-6)式作二维傅里叶变换, 忽略常系数并作变量替换, 可得^[39]:

$$\mathfrak{I}_0(p, q) = |P_c(p, q)|^2 \quad (2-4-7)$$

从上面的分析可以看到, 在大面积非相干光源的近似下, 临界照明在物面上产生的互强度直接与聚光镜的光瞳函数相关。

设成像系统的数值孔径为 $NA = n_0 \sin \theta_0$, 照明系统的数值孔径为 $NA' = n_c \sin \theta_c$, 则整个系统的非相干因子 σ 为^[3]:

$$\sigma = \frac{NA'}{NA} = \frac{n_c \sin \theta_c}{n_0 \sin \theta_0} \quad (2-4-8)$$

照明系统的数值孔径与成像系统的数值孔径和非相干因子的关系为:

$$NA' = \sigma NA \quad (2-4-9)$$

由此可得到在 (p, q) 平面上 (2-4-7) 式的具体表达式为^[3]:

$$\mathfrak{I}_0(p, q) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda^2}{\pi \sigma^2 NA^2} \right) I_0 & p^2 + q^2 < \left(\frac{\sigma NA}{\lambda} \right)^2 \\ 0 & p^2 + q^2 > \left(\frac{\sigma NA}{\lambda} \right)^2 \end{cases} \quad (2-4-10)$$

I_0 为光源强度并假定是均匀的, λ 为波长。

2. 振幅扩展函数的计算

将成像系统简化为一个无像差的薄透镜, 物面到像面的互强度传播可用与照明系统类似的三步计算方法得到。忽略常数因子和非空不变的二次位相因子, 可得振幅扩展函数 K 的频谱 $\mathfrak{R}$ 为^[3, 39]:

$$\mathfrak{R}(p, q) = P_i(p, q) = \begin{cases} 1 & p^2 + q^2 < \left(\frac{NA}{M\lambda} \right)^2 \\ 0 & p^2 + q^2 > \left(\frac{NA}{M\lambda} \right)^2 \end{cases} \quad (2-4-11)$$

式中 $P_i(p, q)$ 为成像系统光瞳函数, M 为高斯放大率。

3. 透射交叉系数的积分区域

任何成像系统都是衍射受限系统, 当出射光瞳面上的点位于光瞳面积之

外时, 振幅散布函数 (响应函数) $\mathfrak{R}$ 的值为零, 由 (2-4-2) 式知, 对足够高的频率, 透射交叉系数 TCC 为零。根据 (2-4-11) 和 (2-4-2) 式, 在 (p, q) 平面内, 只有当中心在 $O_1(\omega_1, \omega_2)$ 、 $O_2(\omega_1 - v_u, \omega_2 - v_v)$ 点且半径均为:

$$r = \sqrt{p^2 + q^2} = NA / M\lambda \quad (2-4-12)$$

的两个圆 C_1 、 C_2 有公共区域时, 乘积 $\mathfrak{R} \cdot \mathfrak{R}^*$ 及 TCC 才不为零, 见图 2-7。

再考虑照明系统的影响, 由 (2-4-10) 式, $\mathfrak{I}_0(p, q)$ 只在中心为 $O(0, 0)$ 且半径为 $\sigma NA / \lambda$ 的圆 C 内不为零。所以, 对给定的 ω_1 、 ω_2 、 v_u 、 v_v 值, 在 (p, q) 平面上, 只有在三个圆 C 、 C_1 、 C_2 公共区域内的那些点才对积分有贡献, 对 TCC 的积分计算只需在该公共区域内进行, 如图 2-7 中阴影部分所示。

由式 (2-4-10) 和 (2-4-11), 在积分区域内, 被积函数的值均为常数, 因此 TCC 的积分计算只需算出积分区域的面积后再乘以该常数即可。

三圆的交叠情况很复杂, 本文在计算公共区域面积时, 对各种可能出现的情况分类进行计算, 并按由简到繁的顺序对各类情况进行判别, 尽量做到最大限度地节省计算时间。如, 最简单的情况——某两圆之间无公共区域——为首要判定条件, 只需判断两圆心的距离大于两半径之和就能得到 TCC 为零, 从而得出像面相应频谱点的值为零。

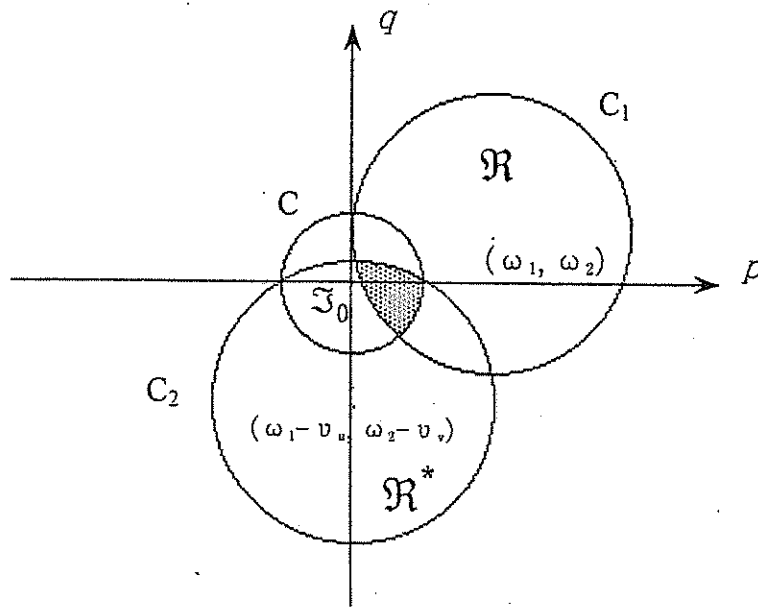


图 2-7 TCC 积分区域示意图

§ 2.4.2 掩膜图形的尺寸

对相移掩膜上结构相同的图形, 其空间频谱随图形尺寸大小的不同而不同。图形尺寸越小, 其空间频谱的高频分量越多。从图 2-7 中可看出, 当 C 和 C_1 的圆心距离大于两圆半径之和时, 两圆无公共区域, TCC 为零。由 (2-4-10) 和 (2-4-11) 式可得到具体表达式为:

$$TCC = 0 \quad \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2} > \frac{\sigma NA}{\lambda} + \frac{NA}{M\lambda} \quad (2-4-13)$$

即满足上式条件的频谱分量将被成像系统截止。掩膜图形的线宽越小, 被截止的高频分量就越多, 像面图形的失真越严重。

在本文实际计算中, 采用 FFT 等数值计算方法, 因此需对掩膜图形进行抽样。此时频谱面上各频谱分量的数值由下述方法确定。

设掩膜图形尺寸为 $\Delta\xi \times \Delta\eta$, 抽样点数为 $N \times N$, 空域抽样间距为 $\delta\xi$ 和 $\delta\eta$, 图形为方形, 由抽样定理得频谱范围 $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_2$ 以及频域抽样点间距 $\delta\omega_1$ 、 $\delta\omega_2$ 为^[42, 43]:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 &= 1/\delta\xi = 1/\delta\eta \\ \delta\omega_1 = \delta\omega_2 &= 1/\Delta\xi = 1/\Delta\eta \end{aligned} \quad (2-4-14)$$

上式确定了掩膜图形 FFT 变换结果矩阵中各元素的频率值。掩膜图形的结构和尺寸以及抽样点数确定之后, $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_2$ 以及 $\delta\omega_1$ 、 $\delta\omega_2$ 就由 (2-4-14) 式唯一确定。对指定的像面频谱点 (ν_u, ν_v) , 由 (2-4-2) 和 (2-4-1) 式便可计算出 TCC 的值以及该频谱点的值。

§ 2.4.3 软件编制

本文的部分相干成像模拟软件包括两部分: 外壳程序和内核计算程序。外壳程序采用 MATLAB 工程数学软件编制, 完成数据输入输出、FFT 计算和绘图功能。内核计算程序由 VC++ 应用软件开发平台编制, 完成核心计算部分——(2-4-1) 式的积分计算, 所有积分均以数值积分方式完成。

图 2-8 是两程序间的数据交换示意图。图 2-9 是计算 (2-4-1) 式积分的程序流程图。

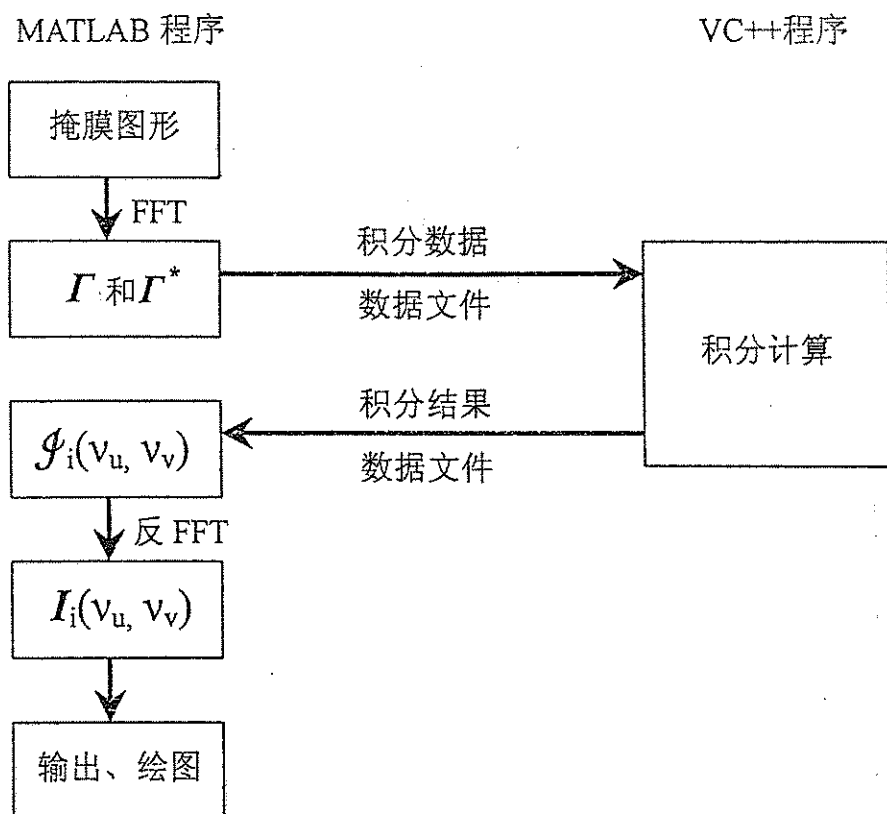


图 2-8 模拟软件构成及数据交换示意图

MATLAB 程序的特点是计算精确高, 但计算速度慢; VC++ 程序的特点则正好相反, 计算精度稍差, 但计算速度很快。本文选用后者进行积分运算以提高计算速度。为避免计算结果出现较大偏差, 本文用 MATLAB 和 VC++ 分别编制了 (2-4-1) 式的计算程序, 在同样的参数设置下对二者的计算情况作了比较。比较结果显示, 在计算精度方面, 二者的计算结果在第 8 位有效数字上出现偏差, 考虑模拟的精度要求, 这种偏差对模拟结果没有影响。而在计算速度方面, VC++ 程序显示出了极大的优势。计算在 PIII600 兼容机上进行, 采样点数为 128×128 , MATLAB 程序用了近 40 分钟完成计算, 而 VC++ 程序只用了 2 分 42 秒便完成计算, 计算速度提高了十多倍。可见, 在保证计算精度的前提下, 使用 VC++ 程序完成部分相干成像模拟程序中的积分运算是很好的选择。

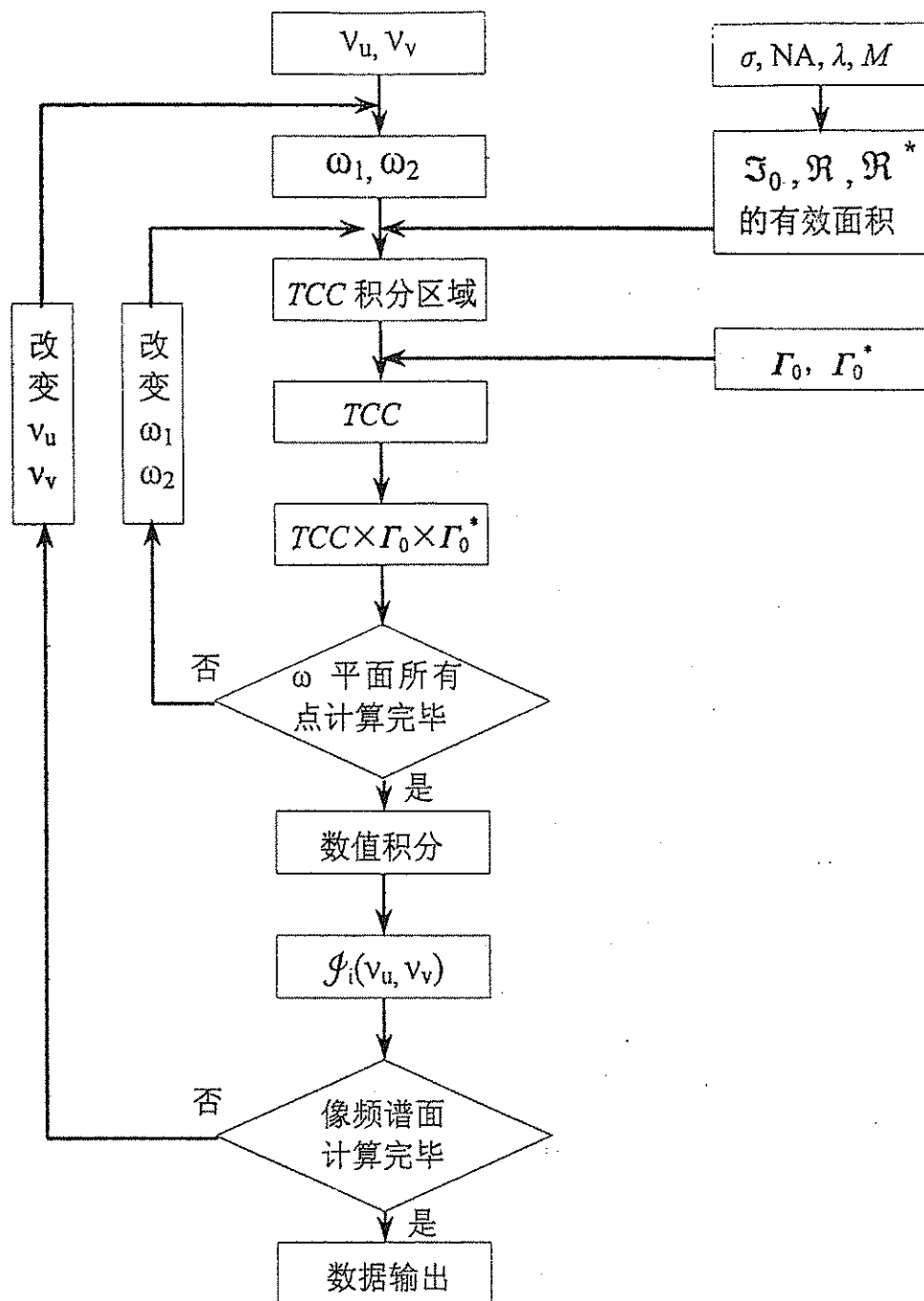


图 2-9 积分计算程序流程图

§ 2.5 小结

相移掩膜 (Phase-shifting Mask, PSM) 通过改变物面 (掩膜) 的位相分布, 实现了相邻图形间暗区光场的相消叠加, 从而提高了像面的分辨率和对比度。从 PSM 理论提出至今, PSM 已发展出交替型、亚分辨型、边缘型、

衰减型和多台阶型。在各类型 PSM 中, 衰减型 PSM 具有广泛的适用范围, 可应用于各种光刻图形。因此, 本论文工作选择了衰减型 PSM。

光学光刻的成像系统是部分相干成像系统, 其成像过程用部分相干成像理论来描述。本章以计算像面强度分布基本理论为基础, 建立了部分相干成像计算机仿真软件系统, 详细给出了模拟软件的实现方法以及程序计算流程, 为研究掩膜优化技术对图形质量的改善作用提供了良好的技术手段。

参考文献

1. M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson, Improving Resolution in Photolithography with a Phase-Shifting Mask, IEEE Trans. Electron Devices, 1982, ED-29(12), 1828-1836.
2. M. D. Levenson, D. S. Goodman, S. Lindsey, P. W. Bayer, and H. A. E. Santini, The Phase-Shifting Mask II: Imaging Simulations and Submicrometer Resist Exposures, IEEE Trans. Electron Devices, 1984, ED-31(6), 753-763.
3. M. Born, E. Wolf, Principles of optics, 5th ed., Oxford, England: Pergamon Press, 1975,
4. J. W. Goodman, Introduction to Fourier optics, San Francisco: McGraw-Hill, 1968
5. Y. C. Pati, T. Kailath, et al., Phase-shifting masks for microlithography: automated design and mask requirements, J. Opt. Soc. Am., 1994, A11(9), 2438-2452
6. Y. C. Pati, Y. T. Wang, et al., Phase-shifting masks: automated design and mask requirements, SPIE, 1994, 2197, 314-327
7. R. G. Teracon, Recent Advances in Mask Making Technology at AT&T, SPIE, 1995, 2512, 282-291.
8. H. Fukuda, T. Teraswa, and S. Okazaki, Spatial filtering for depth of focus and resolution enhancement in optical lithography, J. Vac. Sci. Technol., 1991, B9(6), 3113-3116
9. T. Tersawa, N. Hasegawa, et al., 0.3-micron optical lithography with a phase-shifting mask, SPIE, 1989, 1088, 25-33
10. H. Watanabe, and Y. Todokoro, Phase-shifting lithography: Maskmaking and its application, J. Vac. Sci. Technol., 1993, B11(6), 2669-2673.
11. W. D. Prouty and A. R. Neureuther, SPIE, 1984, 470, 228-232
12. T. Haraguchi, T. Matsuo, and S. Takeuchi, Optimization of Compound Films for Attenuated PSM, SPIE, 1998, 3412, 609-612.
13. D. B. Dove, and T. C. Chieu, Interferometer for phase measurements in phase shift masks, SPIE, 1993, 1809, 128-136.

14. H. Fujita, H. Miyashita, H. Nakamuta, and H. Sano, Direct Phase Measurements in Phase-Shift Masks with a Differential Heterodyne Interferometer, SPIE, 1993, 2087, 119-130.
15. H. Husunose, A. Nakae, J. Miyazaki, N. Yoshioka, H. Morimoto, K. Murayama, and K. Tsukamoto, Phase Measurement System with Transmitted UV Light for Phase-Shifting Mask Inspection, SPIE, 1994, 2254, 294-301.
16. M. D. Levenson, Wavefront engineering from 500nm to 100nm CD, SPIE, 1997, 3051, 2-13.
17. C. H. Wu, D. Wang, et al., High-transmission PSM inspection sensitivity, SPIE, 1999, 3873, 117-126
18. S. Nagashige, K. Hayashi, et al., Detection and repair of multiphase defects on alternating phase-shift mask for DUV, SPIE, 1999, 3873, 127-137
19. N. Ishiwata, T. Kobayashi, S. Asai, and I. Hanyu, Novel Alternating Phase Shift Mask with Improved Phase Accuracy, SPIE, 1998, 3236, 243-249.
20. S. Peng, Through-focus image balancing of alternating phase-shifting masks, SPIE, 1999, 3873, 328-336
21. W. Maurer, C. Friedrich, et al., Proximity effects of alternating phase shift mask, SPIE, 1999, 3873, 344-349
22. K. Kawano, M. Asano, S. Tanaka, T. Iwamatsu, H. Sato, and S. Ito, Lithographic performance of SiN_x single-layer halftone mask, SPIE, 1995, 2512, 348-355.
23. Y. S. Yan, C. C. Cheng, C. L. Lin, J. Y. Gan, T. B. Wu, L. C. Tuo, and J. J. Wang, Ta-Si-O absorptive shifter for the attenuated phase-shifting mask, SPIE, 1996, 2793, 155-164.
24. H. Mitsui, H. Sakai, and Y. Yamaguchi, Development of the W/Si Film for the Single-layered Attenuated Phase Shifting Mask for 248nm Lithography, SPIE, 1995, 2512, 343-347.
25. C. C. Cheng, T. B. Wu, and J. Y. Gan, (LaNiO₃)_x(Ta₂O₅)_{1-x} oxide thin films for attenuated phase-shifting mask blank, SPIE, 1996, 2793, 146-154.
26. M. Nakajima, N. Yoshioka, J. Miyazaki, H. Kusunose, K. Hosono, H. Morimoto, W. Wakamiya, K. Murayama, Y. Watakabe, and K. Tsukamoto, Attenuated phase-shifting mask with a single-layer absorptive shifter of CrO, CrON, MoSiO and MoSiON film, SPIE, 1994, 2197, 111-121.
27. T. Haraguchi, T. Matsuo, S. Takeuchi, Optimization of Zr-Si compound films for attenuated PSM, SPIE, 1998, 3412, 609-612
28. G. Dao, G. Liu, R. Hainsey, J. Farnsworth, Y. Tokoro, S. Kawada, T. Yamamoto, N. Yoshioka, A. Chiba, and H. Morimoto, 248nm DUV MoSiON Embedded Phase-Shifting Mask for 0.25 Micrometer Lithography, SPIE, 1995, 2512, 319-332.
29. K. Mikami, H. Mohri, H. Miyashita, N. Hayashi, and H. Sano, Development and Evaluation of Chromium-Based Attenuated Phase Shift Masks for DUV Exposure, SPIE, 1995, 2512, 333-342.
30. Y. Okamoto, and K. Gyouda, A New Phase Shifting Mask Technology for Quarter Micron Photolithography, SPIE, 1995, 2512, 311-318.

31. H. Watanabe, H. Takanaka, et al., Transparent phase-shifting mask with multistage phase shifter and comb-shaped shifter, SPIE, 1991, 1463, 101-110
32. B. Lin, The attenuating phase-shifting mask, Solid State Technol., 1992, 35(1), 43-47
33. N. Toyama, H. Miyashita, et al., Realization of practical attenuated phase-shift mask with high-transmission KrF excimer laser exposure, SPIE, 1999, 3873, 117-126
34. H. Watanabe, Y. Todokoro, Y. Hirai, and M. Inoue, Transparent phase shifting mask with multistage phase shifter and comb-shaped shifter, SPIE, 1991, 1463, 101-110.
35. B. J. Lin, Phase-Shifting and Other Challenges in Optical Mask Technology, SPIE, 1990, 1496, 54-79.
36. H. Inui, H. Kaneko, K. Tounai, H. Tanabe, and T. Ohta, A Practical 3D Lithography Simulation System, SPIE, 1997, 3051, 522-528.
37. C. A. Mack, Resolution and Depth of Focus in Optical Lithography, SPIE, 1997, 3183, 14-27.
38. J. W. Goodman, Statistical optics, John Wiley & Sons, Inc., 1985
39. 戚康南, 秦克诚, 程路, 统计光学导论, 南开大学出版社, 1987
40. 李继陶 等, 统计光学基础, 四川大学出版社, 1988
41. 王缙石 等, 电动力学简明教程, 四川大学出版社, 1996, p91
42. 朱自强, 王仕璠, 苏显渝, 现代光学教程, 四川大学出版社, 1990
43. 苏显渝, 李继陶, 信息光学, 科学出版社, 1999

第三章 单层衰减型相移掩膜性能研究

相移掩膜的研究从 90 年代初开始成为热点,发展出了多种类型,包括交替型、亚分辨率、边缘型、衰减型和多台阶型^[1-3]。在众多类型中,衰减型相移掩膜以其广泛的适用性和灵活性而显示出应用优势。回顾一下在第二章中提到的相移掩膜之所以没能在理论提出以后就得到迅速发展的原因,一是有其它提高分辨率的途径,一是其加工过程复杂^[4]。相移掩膜技术得到迅猛发展以后,其加工过程较常规掩膜复杂的问题仍然存在。单层衰减型相移掩膜的出现很好地解决了这个问题,其加工工序与常规掩膜一样,无需任何特殊处理。正是这个原因,使单层衰减型相移掩膜有着良好的应用前景。

本章将阐述衰减型相移掩膜的特点、种类和单层衰减型相移掩膜的优势,分析对制作单层衰减型相移掩膜的薄膜的光学性能和其它相关性能的要求,并用自行编制的部分相干成像系统模拟软件,模拟单层衰减型相移掩膜对成像分辨率和图形质量的改善情况。

§ 3.1 概述

衰减型相移掩膜由 B. J. Lin 在 1992 年首次提出^[2],是一种全新类型的相移掩膜。交替型和边缘型等相移掩膜的相移层直接附加在常规掩膜上的特定透光位置,只改变了掩膜面后的电场位相分布。而衰减型相移掩膜的设计思想则有所不同,它将常规掩膜的不透光的部分设计成衰减膜,让一部分的光透过膜层参与成像。在此同时,膜层给透过的电场附加 180° 的相移,用以提供像面上的反位相电场,削减不利的光场叠加,达到提高像面对比度的目的。衰减型相移掩膜不仅象其它类型的相移掩膜一样改变了透过掩膜层的电场位相分布,还略微改变了强度透过率分布。衰减型相移掩膜对入射光强度的衰减程度通常较大,一般透过率小于 20%^[5-15],以避免反相场太强而破坏像面图形,但这也造成其改善像面对比度的效果较透过型相移掩膜略差^[3]。

衰减型相移掩膜至今已发展出多种膜层材料和不同膜层数目的各种类型。一般按照掩膜的层数将其分为：单层^[5-8]、双层和多层^[9-14]。

单层衰减型相移掩膜由 A. Callegari 在 1993 年提出^[15]，它只由一层掩膜构成，如图 3-1(a) 所示。他们实际制作出了以氢化无定形碳为材料的单层掩膜，折射率约 2.0，对 365nm 波长可做到 4—20% 的透过率，对 248nm 波长的透过率则可做到 3—9%，当时可用于 0.25 μ m 的 VLSI 制作工艺。单层衰减型相移掩膜以单一的膜层集 180° 相移和入射光场衰减两种功能于一身^[15]。相移掩膜的制作工艺之所以比常规掩膜复杂，就在于相移掩膜附加了额外的相移层，导致工序的增加。加工次数增多的直接结果是使掩膜缺陷出现的几率增大。单层衰减型相移掩膜的出现，使这一问题得到了很好的解决。只要在基底上沉积出具有 180° 的相移和指定透过率的膜层，甚至无需对针对常规掩膜所作的掩膜图形作任何调整，就可按照制作常规掩膜的工序制作出相移掩膜^[16]。这无疑是该类相移掩膜的巨大进步。

单层衰减型相移掩膜主要特点是：可适用于任何掩膜图形，掩膜制作工艺简单。同时应注意到：由于要在单一膜层上实现衰减和相移两种功能，意味对膜层的光学参数有严格的要求。

双层衰减型相移掩膜是最早出现的衰减型相移掩膜类型，源于 B. J. Lin 的研究工作^[2]。它包含两个膜层，分别实现掩膜的两种功能：一层为相移层，主要实现 180° 的位相改变，一般由对曝光波长透明的材料构成，其厚度占据掩膜厚度的大部分；另一层为吸收层，主要实现对入射光的强度衰减，其针对工作波长的消光系数很大，以便在较薄的膜层内实现指定的透过率控制。将吸收层的厚度压低的目的在于使吸收层产生的相位变化较小，有利于相移和衰减的分别控制，避免在相移层和衰减层中过多地考虑相互的影响。图 3-1(b)(c) 显示了掩膜的构成。

双层衰减型相移掩膜的特点是：相移和衰减由不同的膜层实现，易于控制膜层的沉积参数，但掩膜制作需要两次沉积和两次刻蚀过程。

为简化双层结构的加工程序，H. Mohri 等人曾提出了一种改进方法^[17]。他们在实验中用 CrO 和 CrON 分别作为衰减层和相移层的材料，在沉积完一种膜层后只要改变气体种类就可继续沉积另一种膜层，从而实现连续沉积。CrO

和 CrON 都可用与普通 Cr 膜类似的工艺刻蚀, 连续刻蚀也可实现。这是该方法最大的优点。

三层结构的衰减型相移掩膜较少用到^[17]。与双层结构类似, 衰减和相移分别由不同的膜层控制, 只是相移层被分成两部分, 将衰减层夹在中间, 见图 3-1(d)。其特点是有益于膜层反射率的调制。

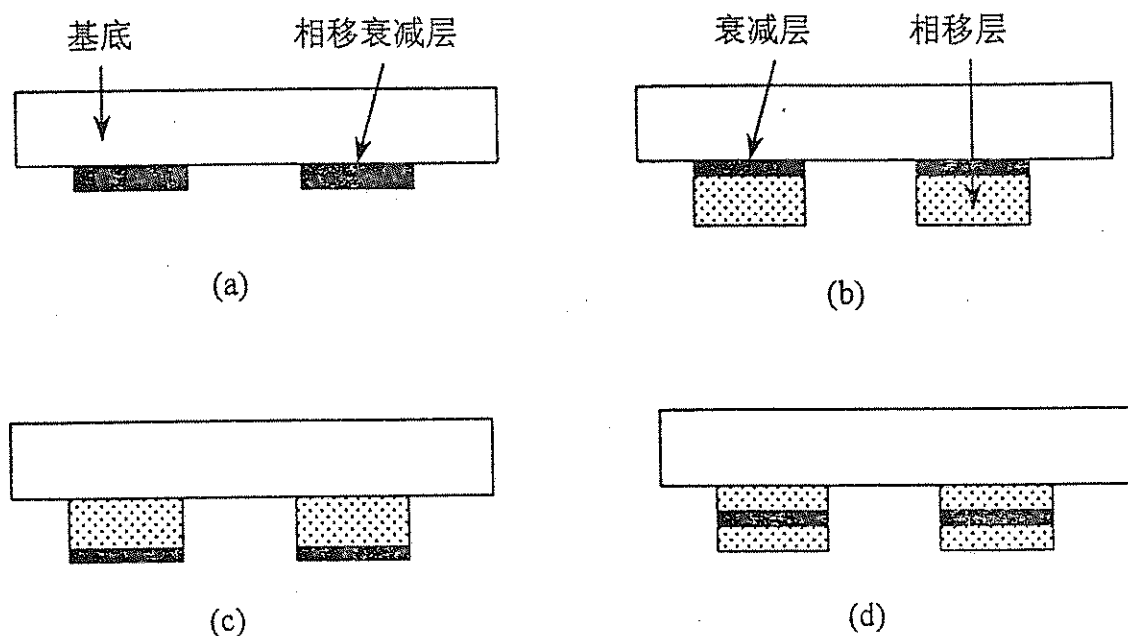


图 3-1 各种衰减型相移掩膜结构示意图

§ 3.2 掩膜性能要求

单层衰减型相移掩膜 (SAtt. PSM) 的特点决定了对膜层的特别性能要求是实现 180° 相移和指定透过率, 这与膜层的折射率 n 、厚度 d 和消光系数 k 有关。作为在 VLSI 制造中应用的相移掩膜的一种, 它还应满足制作工艺对相移掩膜的普遍性能要求, 如掩膜尺寸和轮廓 (见表 3-1)、缺陷的控制、化学稳定性、辐照稳定性和适于检测等^[4-6, 9, 17-18]。

§ 3.2.1 光学性能及轮廓控制

所需光刻图形的最小线宽、掩膜图形的分布特点和光刻系统的工作波长不同, 对掩膜性能的要求尺度也会有所差别。下面以 $0.18\mu\text{m}$ 技术为例来讨

论一下对 SAtt. PSM 膜膜层性能的具体要求^[19]。待制作图形为晶体管栅极, 其最小线宽为 $0.18\mu\text{m}$, 相移要求为 180° , 相移层透过率为 6.3% , 线条间距取 $0.42\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$ 和 $1.0\mu\text{m}$ 三种尺寸, 光刻系统缩小倍率为 $4\times$, 工作波长 248nm , $\text{N.A.}=0.6$, 使用环形离轴照明。

1. 相移量

SAtt. PSM 的相移量由膜层折射率 n 和厚度 d 确定, 二者的偏差都会引起相移量的变化, 这是需要严格控制的两个参数。膜层部分相对于透过部分的相移量为:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \quad (3-2-1)$$

$\lambda=0.365\mu\text{m}$ 为曝光波长。折射率 n 由膜层中的材料组分决定, 厚度 d 由沉积膜时的生长速率和生长时间决定, 二者都与膜层沉积的工艺参数直接相关。膜层的生长参数控制都会有一定的误差, 因此, 膜层的相移量一般不会严格地等于 180° , 而是有一定偏差。图 3-2(a) 给出了良好聚焦情况下, 相移误差与最小线宽变化百分率的关系。从图中可以看出要保证最小线宽的变化不超过 5% , 相移量的误差不能大于 $\pm 4^\circ$ 。

2. 透过率

SAtt. PSM 的透过率由膜层物质的消光系数 k 和厚度 d 决定, 与二者都成反比, 即消光系数越大透过率越小, 在相同的消光系数下厚度越厚透过率越小。消光系数也是由成膜参数控制的。一般膜层的原材料为二至三种, 其中一种材料对工作波长是不透明的, 随着这种材料在膜层组分中所占比例的增大, 膜层的消光系数就会增大。需要膜层有多大的透过率由待刻蚀的图形决定, 以不破坏图形的分布并同时取得最好的增强对比度效果为准, 一般要求在 20% 以下, 透过率小于 10% 的 Att. PSM 最为常用^[5-12, 20-22]。图 3-2(b) 给出了在目标透过率为 6% 情况下透过率误差与最小线宽变化率的关系。容易看出, 线宽的变化与透过率的误差基本是同步的: 透过率偏小, 线宽也偏小; 透过率偏大, 线宽也偏大。在所讨论的 6% 目标透过率下, 要使各种间距情

况下的线宽偏差不大于 5%，透过率偏差应小于 2%^[19]。

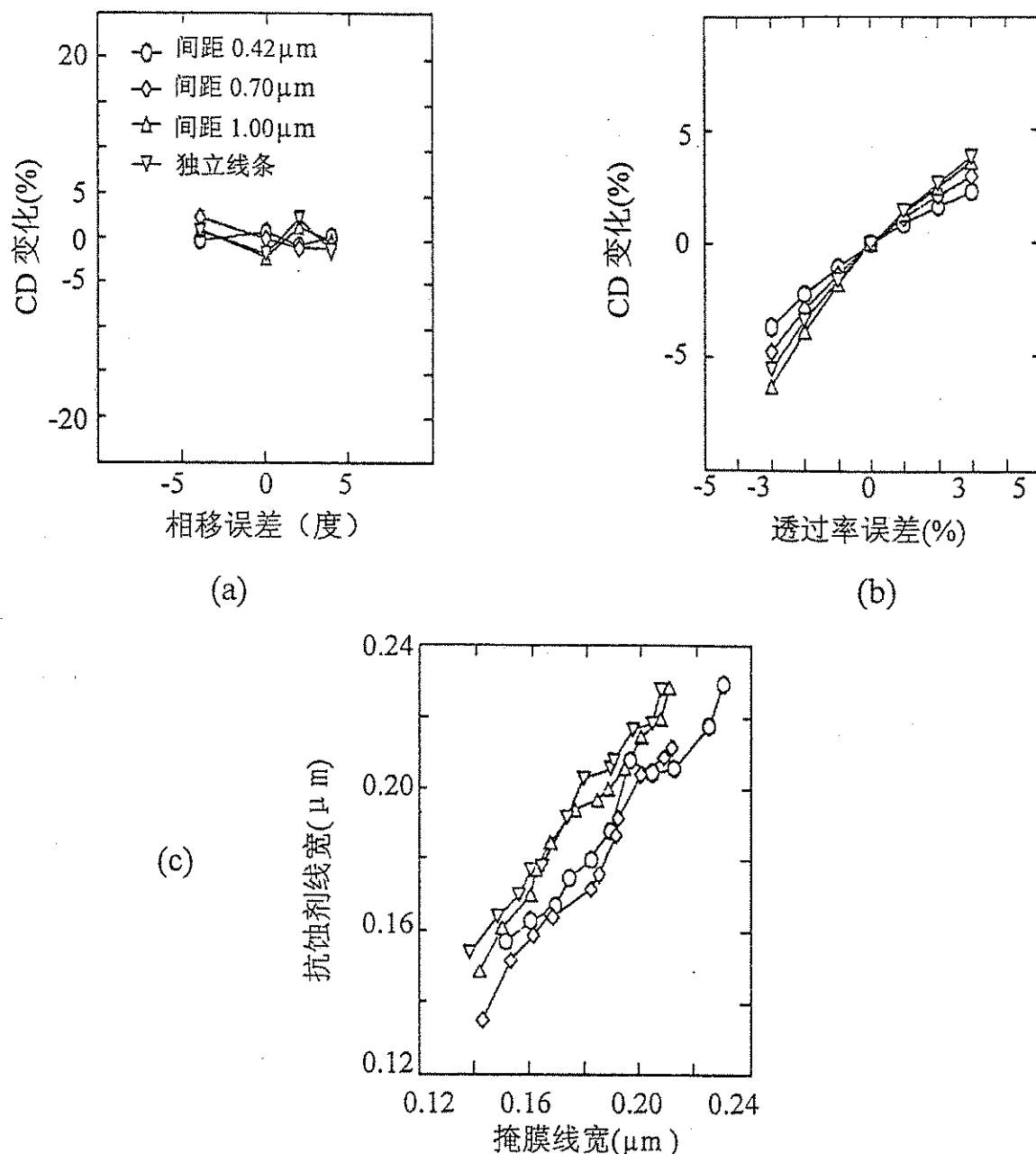


图 3-2 掩膜参数对图形最小线宽 (CD) 的影响

3. 线宽控制

SAtt. PSM 本身的线宽误差由加工掩膜时的工艺误差带来, 它也必然会影响到加工图形的线宽。对单层 Att. PSM 线宽误差的要求除了与待加工图形的线宽要求有关以外, 还与光刻系统的缩小倍率有关。在相同的目标图形线宽要求下, 光刻系统的缩小倍率越大, 对掩膜的线宽误差要求就越严格。图 3-2(C) 显示了在 4X 的缩小倍率时, 掩膜线宽偏差与所成图形线宽偏差的关系。各种

间距对应的曲线斜率大约为 1.2，这样可得到掩膜的线宽偏差大致应在 $-0.3\mu\text{m}$ ~ $+0.3\mu\text{m}$ 之间。

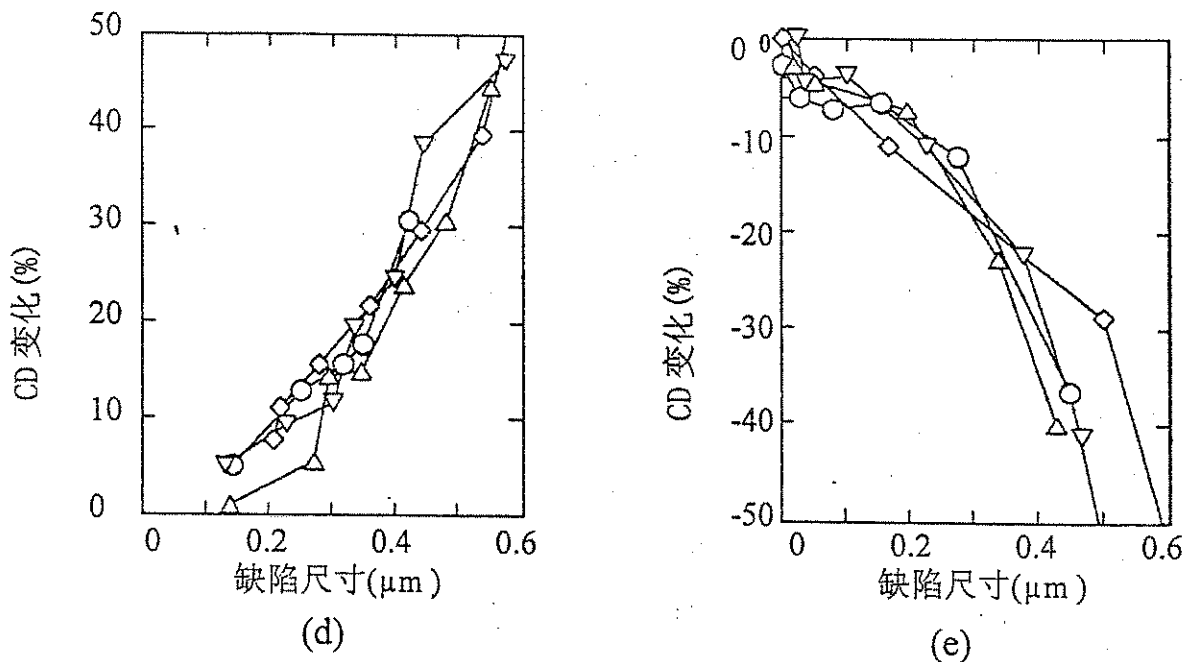


图 3-2 掩膜参数对图形最小线宽 (CD) 的影响

4. 缺陷尺寸

SAtt. PSM 的制作虽然较简单，但仍然不能完全避免缺陷的存在。缺陷主要有突出和侵入两种情况。图 3-2 (d) (e) 分别是突出缺陷和侵入缺陷的尺寸与最小线宽变化率的关系曲线。两种缺陷的尺寸应分布控制在 $0.2\mu\text{m}$ 和 $0.1\mu\text{m}$ 才能使抗蚀剂图形尺寸变化在 5% 以内。

表 3-1 是对 $0.18\mu\text{m}$ 技术对 SAtt. PSM 性能要求小结。

表 3-1 $0.18\mu\text{m}$ 技术对 SAtt. PSM 性能要求

掩膜性能指标	准确度要求 (4X)	允许的 CD 变化
CD 控制	目标值 $\pm 0.03\mu\text{m}$	$0.18\mu\text{m} \pm 5\%$
透过率误差	$6\% \pm 2.0\%$	$0.18\mu\text{m} \pm 5\%$
相移误差	$\leq \pm 4^\circ$	$0.18\mu\text{m} \pm 5\%$
缺陷	突出 $\leq 0.2\mu\text{m}$	$0.18\mu\text{m} \pm 10\%$
	侵入 $\leq 0.1\mu\text{m}$	

注：CD 为最小线宽。

§ 3.2.2 其它性能

1. 化学惰性

构成 SAtt. PSM 膜层的材料要有良好的化学惰性。掩膜都是需要清洗的, SAtt. PSM 也不例外^[6, 18], 常用的清洗液具有强酸性或强碱性, 如 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (1:4)、 $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) 以及 KOH 等, 并且清洗时通常要加热。选择制作 SAtt. PSM 的材料时, 必须考虑最终合成物的化学惰性。评判膜层材料化学耐久性好坏的核心内容是膜层的光学参数, 具体指标为透过率和膜层厚度。在清洗前后, 两个判定指标参数不能有明显的变化。图 3-3 给出的是 W/Si 材料制作的 SAtt. PSM 在使用两种清洗液后膜层厚度和透过率的变化曲线^[6]。图 3-3(a) 的曲线对应的清洗条件为: 清洗液 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (1:4), 加热 120°C , 时间 120min; 图 3-3(b) 的曲线对应的清洗条件为: 清洗液 $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (1:1:5), 室温, 时间 60min。

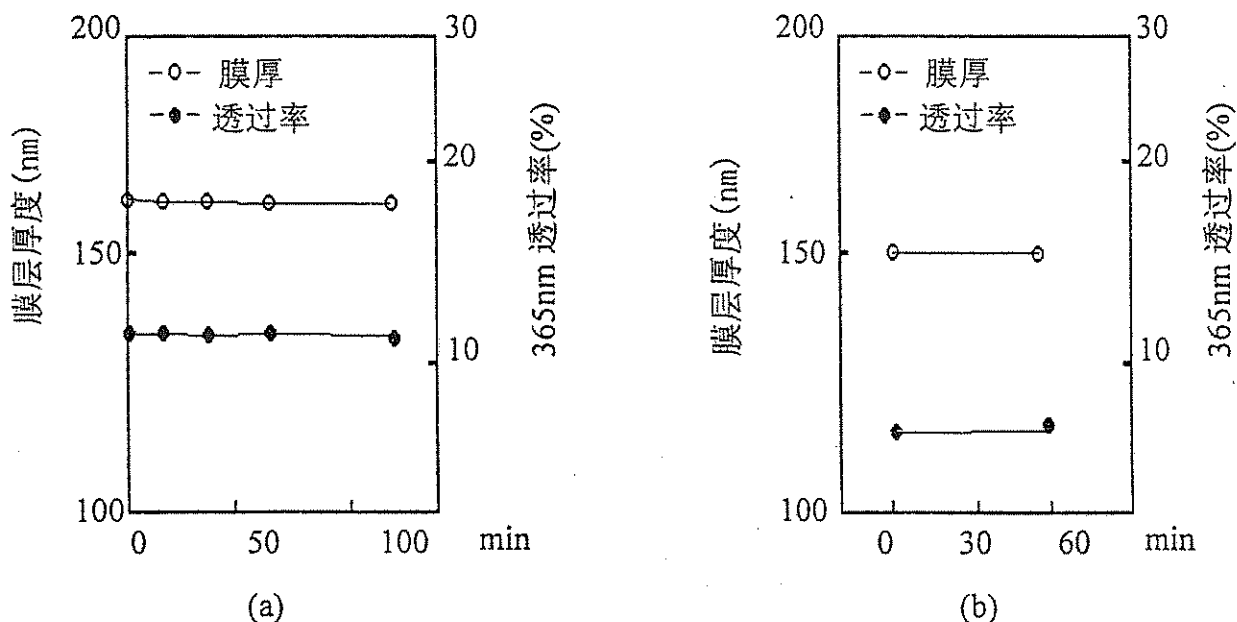


图 3-3 膜层参数随清洗时间的变化

2. 抗辐照性能

目前使用的曝光机工作波长越来越短, 辐照能量也越来越强, 这就要求 SAtt. PSM 必须能抵抗深紫外的大剂量辐照^[5, 7, 17]。膜层材料抗辐照性能的判定

指标仍然是其光学参数的变化, 透过率和膜层折射率在辐照之后不能有较大的改变。本论文工作中制作的 SiN 膜层, 在 248nm 光刻波长的辐照下, 其透过率和折射率都会有所变化。K. Kawano 等人提出一种熟化处理方法^[5], 可解决这类膜层的抗辐照问题。下面以透过率为例加以说明。

这种方法的主要思想是: 先估计出膜层的透过率和折射率的变化量, 在制作掩膜时预先给予补偿, 然后对制得掩膜用工作波长进行双面辐照, 处理后的掩膜在曝光过程中其光学参数将不再发生变化。可将透过率的变化定义为:

$$TCR = \frac{\partial T}{\partial D} \quad (3-2-2)$$

式中 T 为透过率, D 为曝光量, 则总的折射率变化量为:

$$\Delta T = \int_0^{\infty} TCR dD \quad (3-2-3)$$

各曝光量作用下的变化量由实验测到, 得到 T 随 D 变化的曲线后即可得到掩膜最终的实际透过率应为:

$$T_t = T_0 + \Delta T = (1 + \Delta T / T_0) T_0 \quad (3-2-4)$$

按上述方法, 掩膜制成后的透过率 T_0 应当经过处理使其透过率上升 $\Delta T / T_0 \%$, 方能达到目标透过率 T_t 。将掩膜用工作波长作双面辐照直至透过率为 T_t , 处理后的掩膜再用于光刻曝光, 其透过率将不再发生变化。熟化处理较好地防止了某些膜层的光学参数改变, 改善了膜层的抗辐照性能。图 3-4 是 SiN 单层 Att. PSM 在熟化处理前透过率随曝光能量的变化曲线, 曝光波长 248nm。可以看出, 在辐照能量超过 3000 J/cm^2 后, 膜层的透过率几乎不再随能量的增加而继续改变, 因此只需考虑该能量值以下透过率改变量。图 3-5 表示透过率的变化率与曝光能量的关系, 阴影部分即为 (3-2-3) 式的积分面积。图 3-6 是熟化处理后的掩膜透过率随曝光能量的变化曲线, 目标透过率 9.3%, $\Delta T / T_0$ 为 0.326。处理后的掩膜在 3000 J/cm^2 的辐照能量下, 其透过率无任何改变, 熟化处理达到了很好的效果。

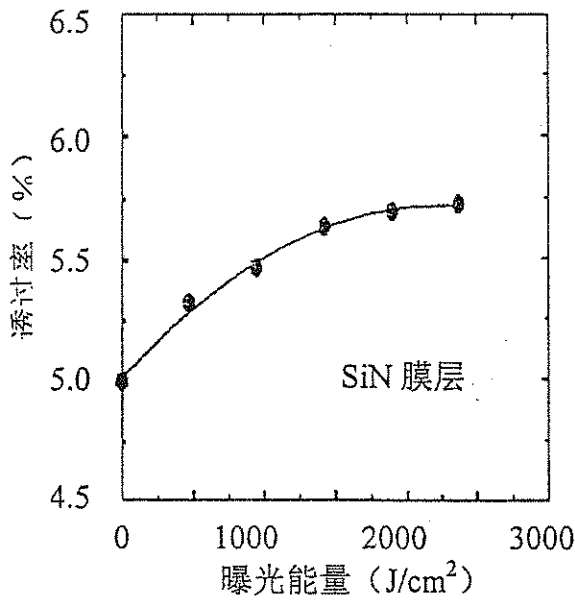


图 3-4 熟化前掩膜透过率随曝光能量的变化

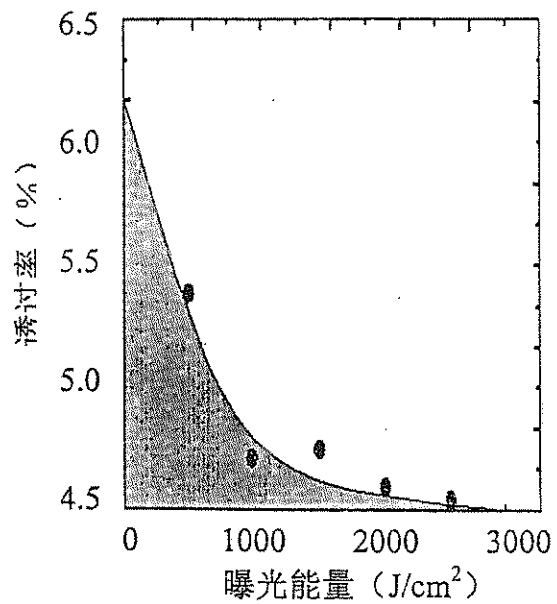


图 3-5 透过率的变化率随曝光能量的变化

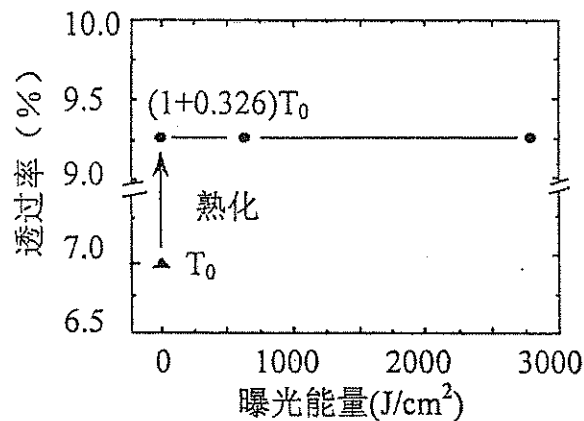


图 3-6 熟化后掩膜透过率随曝光能量的变化曲线

H. Mitsui 采取了退火的方法来提高掩膜的抗辐照能力^[7]。制作的 W/Si 膜层在 350° He 气环境下退火 60min, 在用 KrF-248nm 曝光时, 膜层折射率 n 、厚度 d 和消光系数 k 均不再变化。但退火会造成透过率 T 的变化, 它由退火时消光系数的改变而引起, 此变化量仍需要在制作膜层时预先给予补偿。

3. 可检测性

任何掩膜在制作过程中都会有缺陷出现, SAtt. PSM 的掩膜制作虽然较简单, 但仍然不能做到完全无缺陷。因此再掩膜制作完成后, 需用检测设备对

掩膜的缺陷进行检测。SAtt.PSM 除要进行一般的缺陷指标检测外,还有两项至关重要的指标:180°相移和目标透过率。常用检测设备的工作波长都在可见光波段,如 e 线 546nm 和 Ar 激光 488nm^[7, 17],为得到良好的检测效果,要求制成的掩膜在检测设备的工作波长上不能有太高的透过率。这就意味着相移膜层的透过率有两个指标:一是严格控制的曝光波长下的目标透过率,二是检测波段的透过率上限控制。图 3-7 是 H.Mitsui 制作的针对 248nm 曝光波长的 W/Si 材料 SAtt.PSM 在紫外-可见光波段的透过率曲线^[7],膜层厚度 97.5nm,折射率约 2.1 (对曝光波长)。

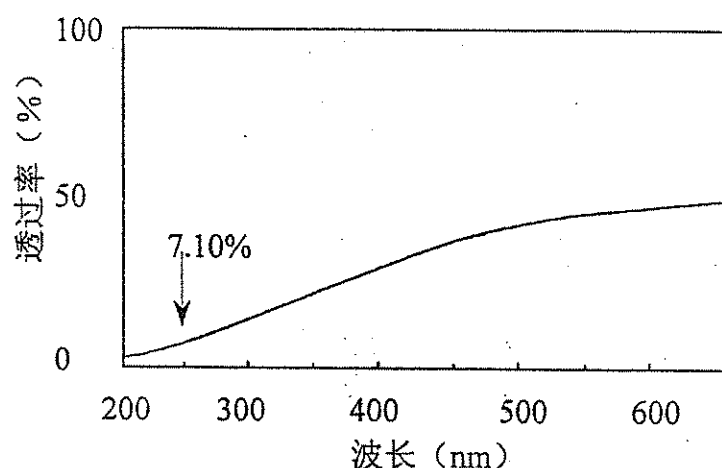


图 3-7 W/Si 材料 SAtt.PSM 的透过率曲线

§3.3 单层衰减型相移掩膜性能研究

正如前面所提到的,衰减型相移掩膜的主要作用是提高像面的对比度,改善系统的焦深。在将掩膜实际运用到 VLSI 之前,必须对掩膜的性能作充分的研究和分析,主要的手段是计算机模拟和实验。对 SAtt.PSM 而言,首先要考察它对像面对比度和系统焦深的改善程度,透过率参数对掩膜作用的影响;其次是各掩膜参数的偏差对像面图形质量的影响,由像面图形的具体要求得到掩膜参数所能允许的误差范围。用于 SAtt.PSM 的膜层既要实现 180°相移又要对入射光进行衰减,制作有相当的难度。通过本文的模拟和实验得到相移和透过率的允许误差范围,将对控制其膜层的制作参数有很好的指导作用。

光学光刻使用的投影曝光系统都是部分相干系统, 使用第二章建立的部分相干成像计算机仿真软件系统, 可对其成像过程进行全面的分析研究。I 线曝光机仍然是目前使用最普遍的曝光机类型, 下面模拟计算所有曝光系统参数都使用 I 线曝光机的参数。曝光系统的数值孔径 $N.A.=0.42$, 工作波长 $\lambda=0.365\text{nm}$, 非相干因子 $\sigma=0.5$, 缩小倍率为 5 倍即高斯放大率为 0.2。分三个部分进行模拟: 对系统分辨率的影响、对比度的提高和透过率的影响。

§ 3.3.1 对系统分辨率的影响

对成像系统像面对比度的改善是 SAtt.PSM 的主要特点之一, 这里用透过率为 6% 的 SAtt.PSM 进行模拟计算。I 线曝光机的最小可分辨线宽为 $0.35\sim0.40\mu\text{m}$ 。图 3-8 是模拟计算所使用的掩膜图形, B—B 线上的线条宽度设计为与最小线宽一致。

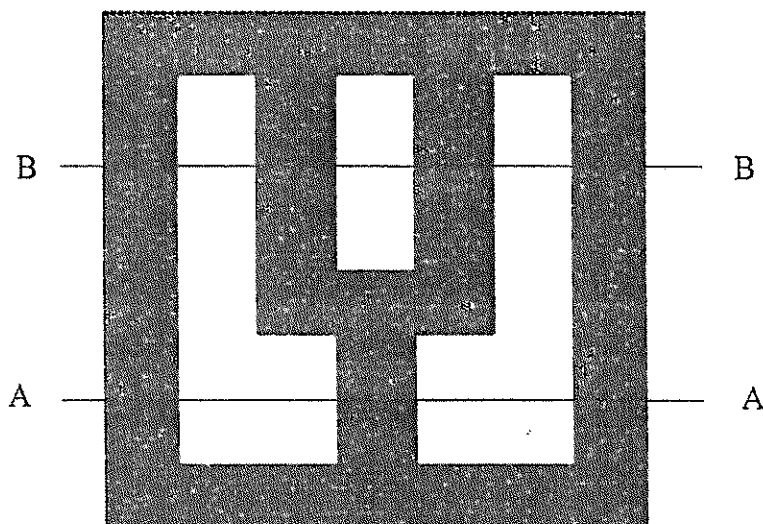


图 3-8 掩膜图形。白色为透光部分。

掩膜为两种: 常规掩膜和单层衰减型相移掩膜, 掩膜图形均与图 3-8 一样。常规掩膜和 SAtt.PSM 的白色区域对入射光的透过率均为 1。常规掩膜的黑色区域为不透光, 而 SAtt.PSM 的黑色区域有很小的强度透过率, 并且伴随有 180° 的位相延迟。模拟时的抽样点阵为 128×128 , 模拟的最小线宽范围从 $0.43\mu\text{m}$ 到 $0.22\mu\text{m}$, 图形的总宽度为 $3.44\mu\text{m}$ 到 $1.76\mu\text{m}$ 。SAtt.PSM 衰减部分的透过率表示为:

$$t(x, y) = \sqrt{T'} e^{-i\pi} \quad (3-3-1)$$

式中 T' 为强度透过率。

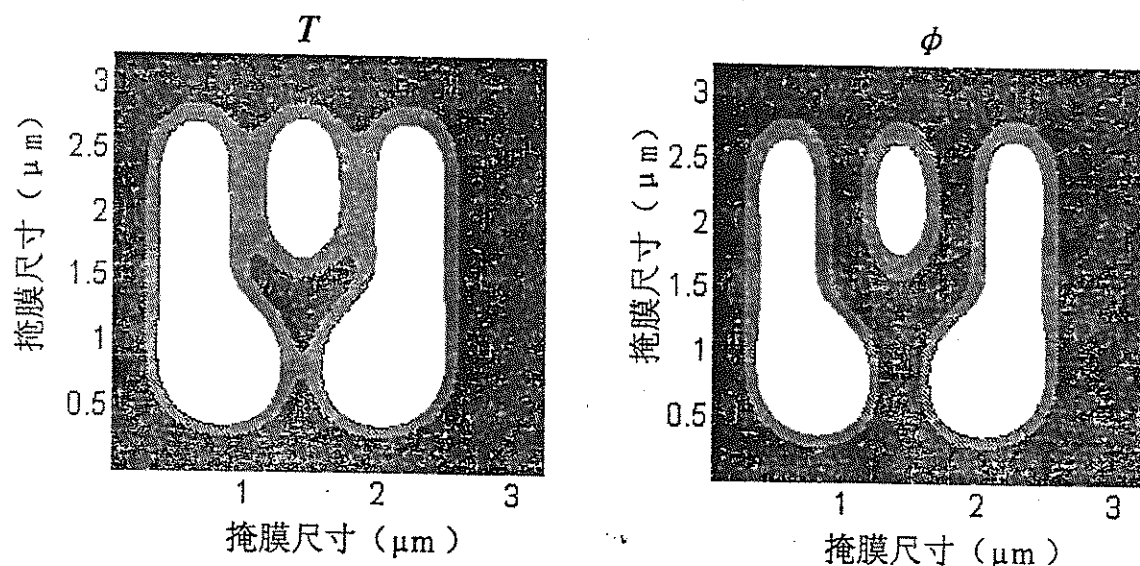


图 3-9 像面强度分布。线条宽度 $0.4\mu\text{m}$ ，
透过率 $T' = 10\%$ ， $\lambda = 0.365\mu\text{m}$ ， $\sigma = 0.5$ ， $\text{NA} = 0.42$

图 3-9 显示了图形线宽为 $0.4\mu\text{m}$ 时的像面强度分布， ϕ 代表 SAtt. PSM 所形成的强度分布，而 T 代表常规相移掩膜形成的强度分布。一般认为面积较大块状图形其像面图形中央点的强度基本保持不变，就以它的像面强度为标准对图形其它区域的强度进行归一化，所以强度用相对强度，即用像面上某一点的强度与大块图形中央点强度之比来表示该点的强度^[22]。图中的黑色区域表示像面强度 $I < 13\%$ ，灰色区域表示 $13\% < I < 25\%$ ，而强度 $I > 25\%$ 的区域用白色表示。当像面的辐照强度 $> 25\%$ 时，可以通过曝光剂量增强等技术手段使该部分的抗蚀剂得到曝光^[22]，所以这里用 25% 的强度线划分出可以形成抗蚀剂图形的区域。从图中可以看出，在接近系统的线宽极限 $0.4\mu\text{m}$ 时，常规掩膜上各线条之间的暗区已出现了较大的强度，尽管此时仍可分辨出线条与空隙，但对比度已经下降到较低的水平。SAtt. PSM 所形成的强度分布就要好得多，由于反相电场的加入，使相邻两条亮线衍射到暗区的电场得到部分衰减，暗区的总强度仍然维持在较低数值，小于 13% 。

§ 3.3.2 像面对比度的提高

像面对比度的高低是成像质量好坏的主要指标之一。将 SAtt. PSM 像面图形的对比度与常规掩膜作比较, 可以考察作为一种掩膜优化技术 SAtt. PSM 对成像质量的改善情况, 从而评价其性能好坏。

对各种线宽情况下对比度的考察在图 3-8 所示的 A—A 和 B—B 两条线上进行。对比度定义为:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3-3-2)$$

式中, $I_{\max}$ 为该考察线上的强度最大值, $I_{\min}$ 为考察线上两条亮线之间暗区的强度最小值。

图 3-10 是像面掩膜图形 A—A、B—B 截面上的截面强度分布, 最小线宽 $0.40\mu\text{m}$ 。(a) 对应常规掩膜在 A—A 截面上的强度分布, 而 (b) 对应常规掩膜在 B—B 截面上的强度分布, (c) 对应 SAtt. PSM 在 A—A 截面上的强度分布, (d) 对应 SAtt. PSM 在 B—B 截面上的强度分布。掩膜的设计最小线宽为 $0.4\mu\text{m}$, 图形总尺寸为 $0.4\mu\text{m} \times 8$ 。

常规掩膜 A—A 截面上的两图形线条线宽为最小线宽的两倍, 且面积较大, 其中心点像面强度为 0.92, 很接近归一化强度; 两邻近线条由于衍射效应, 其光场扩散到暗区, 使暗区强度由 0 上升到 0.14。暗区的强度升幅此时还不算太大, 像面图形对比度可达到 0.74, 得到的抗蚀剂图形完全可以分辨。常规掩膜 B—B 截面上的线条宽度均为最小线宽, 光场的衍射扩展更为明显, 线条间暗区的强度上升到了 0.18, 比 A—A 截面上暗区的最小强度大。同时由于线宽较窄, 线条中央点的强度下降较为厉害, 为 0.49。横截面上最大和最小强度的一降一升, 使线条对比度只有 0.55。

SAtt. PSM 在像面 A—A 截面上的强度最大值为 0.91, 与常规掩膜的对应指标基本一致, 只相差 0.01。而由于相移部分附加的反相电场, 使暗区的不利叠加得以削弱, 暗区强度仅为 0.02, 相消效果非常好。这样 A—A 截面上像面图形对比度达到了 0.99, 这与物面设计图形的对比度 1 相当。在 B—B 截面上, 线条中央点的强度最大值由于与常规掩膜同样的原因, 较 A—A 截面有较大下降, 为 0.41, 该数值比常规掩膜的最大值还低一些。但相移的作用使

该截面的最小值下降到了 0.09, 从而使对比度达到 0.67, 比常规掩膜 0.55 的对比度上升了 20% 以上。

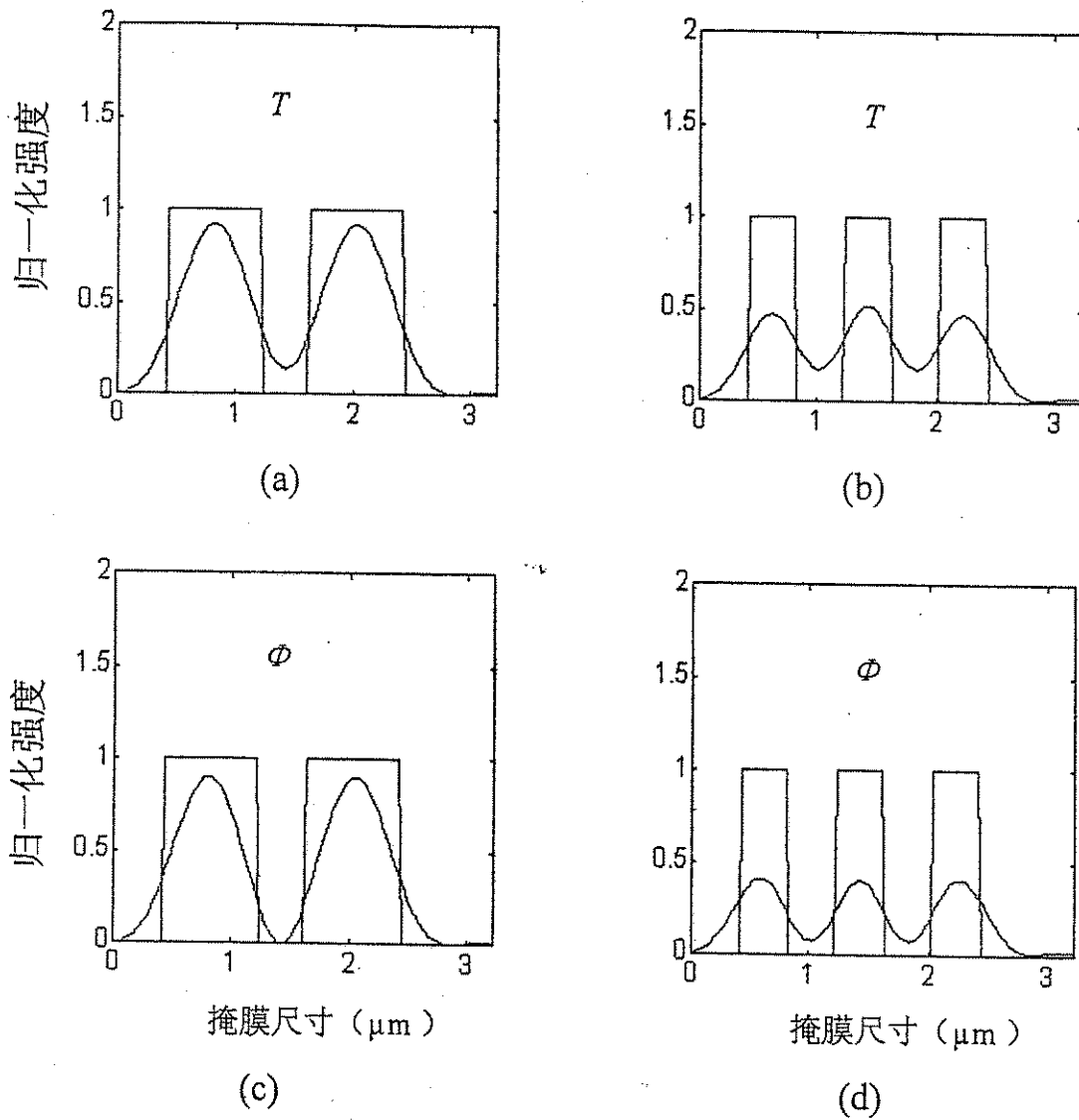


图 3-10 像面 A-A、B-B 线强度分布。线条宽度 $0.40\mu\text{m}$,
透过率 $T' = 10\%$, $\lambda = 0.365\mu\text{m}$, $\sigma = 0.5$, $\text{NA} = 0.42$

图 3-11 是最小线宽为 $0.35\mu\text{m}$ 情况下, 像面 A-A 和 B-B 截面上的强度分布。(a) 和 (b) 对应常规掩膜, (c) 和 (d) 对应 SAtt. PSM; (a)、(c) 对应 A-A 截面, (b)、(d) 对应比 B-B 截面。

线宽的减小使系统分辨两根相邻线条更加困难。常规掩膜 A-A 截面上线条中央点的强度由 $0.40\mu\text{m}$ 时的 0.92 下降到 0.78, 而暗区的最小强度值由 $0.40\mu\text{m}$ 时的 0.14 上升到 0.19, 对比度为 0.61。B-B 截面上的线宽可以说

刚刚超过所模拟的 I 线曝光机的极限线宽, 此时线条中央点的强度仅为 0.38, 暗区的强度则达到 0.22, 对比度只有 0.26。

使用 SAtt.PSM 后, 像面对比度得到改善。A-A 截面上线条中央点的强度最大值为 0.75, 仍然比常规掩膜的小 0.03, 但暗区的强度值由 0.19 骤然下降到 0.08, 暗线条强度的差异使 SAtt.PSM 在该截面上的对比度由常规掩膜的 0.61 上升到 0.87, 提高约 43%。

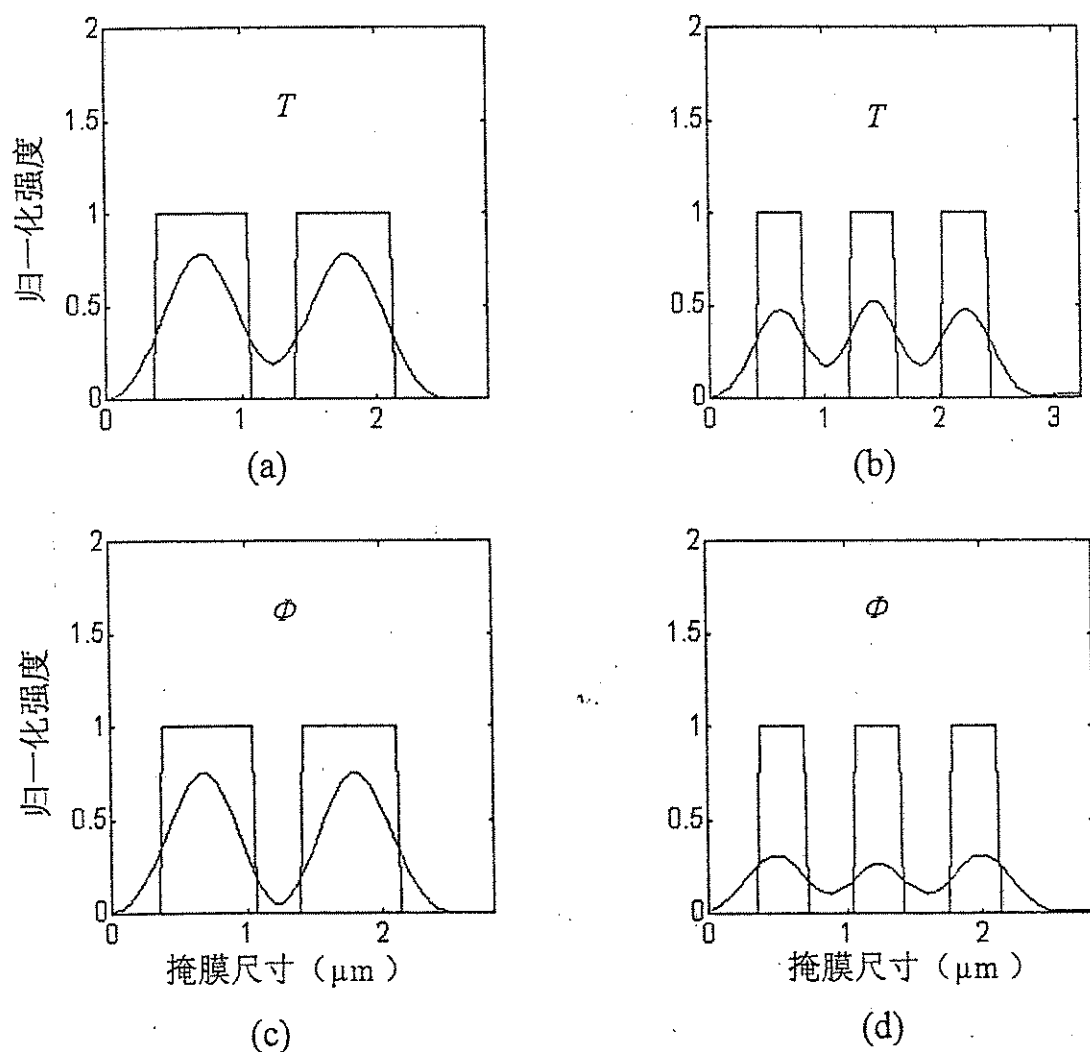


图 3-11 像面 A-A、B-B 线强度分布。线条宽度 $0.35\mu\text{m}$,
透过率 $T' = 10\%$, $\lambda = 0.365\mu\text{m}$, $\sigma = 0.5$, $\text{NA} = 0.42$

B-B 截面上的情况更为明显, 线条中央点和暗区的强度最大和最小值分布为 0.32 和 0.12, 由此得到对比度为 0.51, 较常规掩膜的 0.26 提高了约 96%。这样的提高幅度是极其显著的, SAtt.PSM 将密集线条的像面对比度提