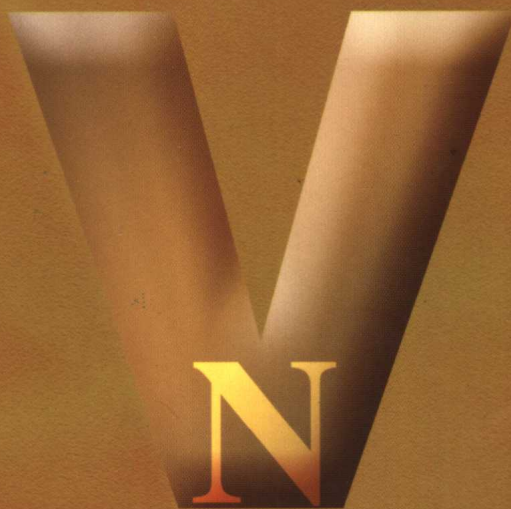


电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著

DIANZISHU BAOGUANG
WEINA JIAGONG JISHU

电子束曝光微纳 加工技术

顾文琪 主编



北京工业大学出版社

电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著

电子束曝光微纳加工技术

顾文琪 主编

顾文琪 王理明 薛虹 方光荣 著
张福安 刘祖京 黄经筒 杨忠山

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电子束曝光微纳加工技术/顾文琪主编. —北京:
北京工业大学出版社, 2004.7

ISBN 7-5639-1300-9

I. 电... II. 顾... III. 电子束-曝光-研究
IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 009177 号

电子束曝光微纳加工技术

顾文琪 主编

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

787mm×1092mm 16开本 20.25印张 512千字

印数: 1~2000册

ISBN 7-5639-1300-9/T·215

定价: 50.00元

作者介绍



顾文琪，1941年生，中国科学院电工研究所研究员，博导。曾任中国科学院电工研究所微细加工研究室主任、副所长，中国科学院高技术局局长、综合计划局局长。

1967年中国科学院电工研究所研究生毕业，专业为电火花加工物理基础。毕业后留所工作，从事微细加工技术研究，创建该所微细加工研究室。1980年曾在联邦德国亚琛工业大学从事亚微米曝光技术研究2年，后又作为特聘专家在香港从事电子束制版技术研究3年。长期研究电子束曝光技术和相关设备开发，先后主持并完成国家攻关项目2项，中国科学院重大科研项目3项，其中有微米级可变矩形电子束曝光机、 $0.1\ \mu\text{m}$ 扫描电子束曝光机和缩小投影成像电子束曝光实验系统。目前正在主持中国科学院创新工程重大项目——纳米级电子束曝光系统实用化研究。在国内外发表论文40多篇。

内 容 提 要

本书系统地介绍了电子束曝光技术的发展历史和原理、系统的组成和分类、应用和发展前景，同时，详细介绍了多种先进的电子束曝光机的性能和技术指标，电子光学柱、精密工件台等分部件和掩模版制作、电子束直刻等关键技术。全书共分10章，第一章为电子束曝光技术概论；第二章为电子束曝光机中的电子光学系统；第三章为工件台及激光干涉仪精密定位；第四章为图形发生器；第五章为检测、对准和校正技术；第六章为电子束曝光机的计算机控制技术和数据转换；第七章为电子束曝光制图工艺；第八章为真空控制系统；第九章为国内外几种电子束曝光机的介绍；第十章为电子束曝光技术的应用和发展前景。

本书可以作为微电子专业领域的科技人员和从事微电子、微光学、微机械等微纳加工技术领域的科技人员的技术参考书，同时还可作为高等院校专业教师、研究生的参考用书。

序 言


微纳加工是制作微米尺寸量级和纳米尺寸量级微小结构的加工技术的总称。微纳加工技术是半导体微电子产业发展的重要基础。半导体微电子产业的发展借助于微纳加工技术的进步，而半导体微电子产业的需求又促进了微纳加工技术的发展。与半导体微电子产业相关的微纳加工技术主要有图形光刻、材料刻蚀、薄膜生成、离子注入和粘结互连等技术。其中图形光刻技术是微电子制造技术发展的主要驱动者。在大直径晶片上不断提高曝光图形分辨率和套刻精度，促成了集成电路集成度的提高和成本的下降。

当前光学光刻仍然是图形光刻的主流技术。但随着器件尺寸进入纳米范围 ($< 100 \text{ nm}$)，电子束、软 X 线等下一代曝光技术将发挥越来越重要的作用。其中，电子束曝光将是生成器件图形、制作掩模版的主要手段，也是纳米尺寸器件研究和制作的主要手段。

本书的作者顾文琪研究员和他的同事们长期从事电子束曝光技术研究和装备的研制，积累了丰富的经验。本书介绍了电子束曝光技术的原理、系统、应用和发展前景，同时，详细介绍了电子光学柱、精密工件台等分部件和关键技术。我相信本书对从事微纳加工技术研究和装备制造的科研人员、工程技术人员是十分有益的，同时也可以作为高等院校有关专业的参考书。

纳米科技是当今的研究热点。无论是纳米电子学、纳米材料科学，还是纳米生物学，都离不开纳米加工设备和纳米测试分析设备。工欲善其事，必先利其器。希望方方面面都来重视纳米加工设备和纳米测试分析设备的研究，并逐步实现产业化，以满足我国高速、持续发展高科技的广泛需求。

中国科学院院士
中国工程院院士



2003年4月11日

前 言

按照 Moore 定律的发展规律, 芯片的集成度每 18 个月增加一倍, 每三年推出新一代产品, 其器件尺寸比上一代缩小 70%。在过去 10 年中, 器件尺寸已推进到深亚微米阶段, 在今后 10 年中将进一步推进到纳米阶段。无论在微米、亚微米阶段, 还是在纳米阶段, 电子束曝光技术一直发挥着关键性的作用。首先, 它被用于制作半导体器件生产所需要的掩模版。目前只有电子束曝光与激光光刻能直接生成掩模版图形, 而大约 90% 的掩模版是利用电子束曝光技术制作的。其次, 它还用于图形直写, 直接制作新器件和用于应用物理实验研究。特别在纳米量级的器件研究中, 电子束直刻已成为不可或缺的手段。

电子束曝光技术是在电子显微镜的基础上发展起来的, 其研究和发展始于 20 世纪 60 年代初。1960 年, 由联邦德国杜平根大学的 G. Mollenstedt 和 R. Speidel 首次提出利用电子显微镜在薄膜上制作高分辨率图形。1964 年英国剑桥大学的 A.N. Broers 发表了利用电子束制作 $1\ \mu\text{m}$ 线条的技术。1965 年 T.H.P. Chang 在剑桥大学研制成功世界上第一台飞点扫描电子束曝光机, 并由剑桥仪器公司作为商品投入市场。1970 年法国汤姆逊半导体公司 (Thomson CSF) 首先成功地将激光干涉定位系统应用于电子束曝光系统, 组成了一台完善的电子束曝光机。20 世纪 70 至 80 年代人们研究开发了一系列新技术, 如成形电子束、可变矩形电子束、光栅扫描曝光技术等。一批高性能的电子束曝光机被相继推上市场。由于电子束曝光技术具有极高的分辨率和灵活性, 它在亚微米和纳米器件的研制和生产中发挥着重要作用。又由于电子束曝光制作周期短, 版图易修改等原因, 在掩模版制作方面, 电子束曝光技术一直处于“霸主”地位。

随着纳米量级器件时代的逼近, 下一代光刻技术 (NGL) 成为研究热点, 有可能成为 NGL 技术的有电子束直写 (EBDW)、电子束投影 (EPL)、离子束投影 (IPL)、X 射线曝光 (XRL) 和极紫外曝光 (EUVL) 等光刻技术。EBDW 是目前惟一成熟的 NGL 技术。EPL 已进入产业化前期阶段, 可望于今后 3~5 年进入生产线, 并成为 21 世纪纳米器件生产的主流光刻技术。

我国在电子束曝光技术开发方面起步并不晚, 1964 年中国科学院科学仪器厂、电工研究所等单位首先开发了电子束加工机, 该机既可以完成电子束热加工, 也可以进行电子束曝光。此后, 中国科学院电工研究所、信息产业部 48 研究所、哈尔滨工业大学和山东大学等单位一直在研究电子束曝光技术, 并开发了多种电子束曝光机。

中国科学院电工研究所是我国电子束曝光技术的主要研究单位, 从 20 世纪

70年代开始，该所长期坚持此项研究工作，先后完成了多种类型的电子束曝光系统，如：1:1投影电子束曝光系统；DJ-2可变矩形电子束曝光系统；DY-5亚微米电子束曝光系统；DY-7 0.1微米电子束曝光系统以及纳米级缩小投影成像电子束曝光原理装置。本文作者即为该所长期从事此项研究的几位研究人员。

本书系统地介绍了电子束曝光技术的发展历史及原理、系统的组成和分类、重要分系统及关键技术、重要的应用和发展前景。同时还介绍了多种先进的电子束曝光机的性能和技术指标。本书可以作为从事微电子专用设备研究和开发的科技人员和从事微电子、微光学、微机械等微纳加工技术领域的科技人员的技术参考书，同时还可以作为高等院校相应专业的教师、研究生的参考书。

本书共十章。各章由有关方面专家分头撰写，具体分工如下：第一章和第十章顾文琪，第二章王理明，第三章薛虹，第四章和第八章方光荣，第五章张福安，第六章刘祖京，第七章黄经筒，第九章顾文琪、张福安、薛虹、杨忠山。顾文琪对全书进行了校阅和修改。

由于作者水平有限，书中有不妥和错误之处，恳请读者给予批评指正。

作者

2004.4.1

目 录

前言

第一章 电子束曝光技术概论	(1)
第一节 微纳加工与曝光技术	(1)
一、微纳加工推进微电子技术发展.....	(1)
二、曝光技术及其分类.....	(2)
三、传统光学曝光技术.....	(3)
四、电子束曝光技术.....	(5)
五、离子束曝光技术.....	(7)
六、X 射线曝光技术.....	(9)
七、极紫外曝光技术.....	(10)
八、小结.....	(10)
第二节 电子束曝光技术的发展历史及原理	(11)
一、电子束曝光技术的发展历史.....	(11)
二、电子束曝光技术的原理.....	(13)
三、电子束曝光技术的特点.....	(14)
第三节 不同类型的电子束曝光系统	(15)
一、电子束曝光系统的分类.....	(15)
二、基于 SEM 的扫描电子束曝光系统.....	(17)
三、高斯束斑矢量扫描系统.....	(18)
四、高斯束斑光栅扫描系统.....	(19)
五、成形电子束曝光系统.....	(21)
六、投影电子束曝光系统.....	(22)
七、其他电子束曝光技术研究.....	(23)
参考文献	(24)
第二章 电子束曝光机中的电子光学系统	(26)
第一节 概述	(26)
第二节 电子光学基础	(29)
一、关于旋转轴对称的静电场和静磁场.....	(29)
二、电子在静电场和静磁场中的运动.....	(36)
三、旋转轴对称静电场和静磁场的旁轴电子光学性能.....	(43)
第三节 电子束曝光机的透镜	(46)
一、静电透镜.....	(47)
二、磁透镜.....	(50)
三、电子透镜的工作原理.....	(54)

第四节	电子束曝光机的电子枪	(56)
一、	电子枪概述	(56)
二、	阴极	(58)
三、	栅极和阴极加热电流对电子束的影响	(60)
四、	电子枪的亮度	(62)
第五节	电子光柱的对中系统	(62)
一、	对中系统概述	(62)
二、	电子枪的对中	(63)
三、	透镜的对中	(64)
第六节	电子束曝光机的偏转扫描系统	(64)
一、	功能及系统构成	(64)
二、	电路设计	(65)
三、	偏转器	(66)
第七节	束闸及其控制	(72)
第八节	电子光学系统的像差	(72)
一、	球差	(74)
二、	彗差	(75)
三、	场曲和像散	(75)
四、	畸变	(76)
五、	色差	(77)
第九节	电子束曝光机聚焦成像和偏转系统的设计计算	(78)
一、	概述	(78)
二、	聚焦成像系统的设计计算	(79)
三、	偏转器的设计计算	(88)
四、	小结	(91)
五、	附录(物镜前双偏转设计实例)	(91)
参考文献	(94)
第三章	工件台及激光干涉仪精密定位	(96)
第一节	精密工件台技术的发展概况	(96)
第二节	激光干涉仪测量系统	(96)
一、	概述	(96)
二、	激光干涉仪测量系统	(97)
第三节	双频激光干涉仪产品介绍	(110)
一、	Agilent 10897B 高分辨率 VME 总线激光轴板	(110)
二、	ZYGO 激光干涉仪测量系统	(111)
三、	HP5501A 激光干涉仪测量系统	(113)
四、	激光干涉仪的应用	(117)
第四节	测量误差分析及激光干涉仪的安装与调整	(120)
一、	测量误差分析	(120)

二、激光干涉仪的安装	(122)
三、激光干涉仪的调整	(124)
第五节 精密工件台	(126)
一、工件台的性能要求及组成	(126)
二、工件台的结构形式及其特点	(127)
三、X-Y 工件台材料	(133)
四、精密工件台的导轨系统	(135)
五、工件台基座	(136)
六、真空箱体	(137)
七、磁性流体密封	(138)
第六节 微动工件台	(139)
一、微位移机构的分类及应用	(140)
二、压电-电致伸缩器件	(140)
三、采用压电器件的微动工件台	(142)
四、微动工件台的设计要求	(144)
第七节 自动输片系统	(144)
一、自动输片系统的组成	(144)
二、EeBES-40A 光栅扫描电子束曝光机的输片装置	(145)
第八节 工件台的驱动与控制	(147)
一、工件台的驱动方式	(147)
二、驱动源	(147)
三、矢量扫描电子束曝光机工件台的控制	(147)
四、光栅扫描曝光机工件台的控制	(148)
五、X-Y- θ 工件台伺服控制	(150)
参考文献	(151)
第四章 图形发生器	(152)
第一节 扫描圆形电子束曝光机的图形发生器	(152)
第二节 可变矩形电子束曝光机的图形发生器	(154)
第三节 光栅扫描电子束曝光机的图形发生器	(156)
第四节 以 DSP 为基础的新型图形发生器	(157)
第五节 图形发生器的执行部件	(159)
参考文献	(162)
第五章 检测、对准和校正技术	(163)
第一节 检测、对准和校正技术的意义和作用	(163)
第二节 电子与固体的相互作用	(164)
一、常用的弹性散射物理模型	(165)
二、常用的非弹性散射物理模型	(166)
第三节 电子束曝光机常用的几种信号及检测器	(168)
一、入射电子信号	(169)

二、二次电子信号	(169)
三、背散射电子信号	(171)
第四节 检测对准校正原理及方法	(176)
一、检测对准校正的原理和方法	(176)
二、拼接精度和套刻精度检测方法	(183)
第五节 影响电子束曝光机精度的因素及分析方法	(185)
一、电子束曝光机的曝光图形位置精度的要素	(185)
二、影响系统曝光图形精度的因素及解决方法	(185)
参考文献	(187)
第六章 电子束曝光机的计算机控制技术及数据转换	(188)
第一节 电子束曝光技术的控制要求	(188)
一、受控制量的类型	(189)
二、稳定性	(189)
三、用于可变成形电子束曝光系统的高速数据传送技术	(189)
第二节 计算机控制系统	(190)
一、电子束曝光机的组成	(190)
二、对控制计算机的基本要求及计算机的抗干扰性	(191)
三、计算机控制系统的组成	(192)
四、软件	(192)
五、受控对象与控制计算机间的接口技术	(196)
第三节 国内外电子束曝光图形数据的处理和格式转换概况	(199)
一、国外概况	(199)
二、国内概况	(201)
第四节 数据格式转换软件解析	(201)
一、数据格式转换	(202)
二、常用数据格式	(202)
三、数据格式转换软件简介	(202)
第五节 数据格式转换系统的需求和设计举例	(204)
一、问题的提出	(204)
二、系统需求	(205)
三、系统设计	(205)
四、算法设计	(207)
参考文献	(213)
第七章 电子束曝光制图工艺	(214)
第一节 电子束曝光制图的特点	(215)
一、电子束扫描曝光的特点	(215)
二、电子束 1:1 投影曝光的特点	(219)
三、电子束缩小投影曝光的特点	(221)
第二节 电子束曝光制图的抗蚀剂	(224)

一、抗蚀剂的特点	(224)
二、对抗蚀剂性能的要求	(225)
第三节 电子束曝光制图工艺	(228)
一、曝光图像的设计和图像数据的转换	(228)
二、曝光基片的制备	(229)
三、抗蚀剂膜层的制备	(229)
四、电子光学柱的调整、曝光参数的设置和曝光	(230)
五、曝光后的显影、定影和后烘烤处理	(231)
第四节 多层抗蚀剂曝光刻蚀工艺	(233)
参考文献	(236)
第八章 真空控制系统	(237)
第一节 真空的度量单位	(237)
第二节 真空区域分类	(238)
第三节 真空泵分类	(239)
一、机械泵	(239)
二、涡轮分子真空泵	(240)
三、油扩散真空泵	(241)
四、溅射式离子泵	(242)
第四节 真空测量及真空规	(243)
一、皮喇尼真空规	(244)
二、冷阴极电离规	(245)
第五节 电子束曝光机的真空系统	(246)
参考文献	(249)
第九章 国内外几种电子束曝光机介绍	(250)
第一节 矢量扫描圆形电子束曝光机	(250)
一、日本 JEOL 公司 JBX-6000FS 电子束曝光机	(251)
二、国产 DY-7 深亚微米电子束曝光机	(254)
第二节 光栅扫描电子束曝光机	(257)
一、光栅扫描电子束曝光机的优点	(257)
二、EeBES-40A 光栅扫描电子束曝光机	(260)
三、MEBES5500 光栅扫描电子束曝光机	(269)
第三节 成形电子束曝光机	(271)
一、成形电子束曝光机的工作原理	(271)
二、先进的可变矩形电子束曝光机	(272)
三、可变矩形电子束曝光机制作掩模的过程	(278)
第四节 缩小投影电子束曝光系统	(286)
一、概述	(286)
二、几种系统介绍	(287)
第五节 由 SEM 改装的电子束曝光系统	(294)

一、SEM 改装时的一般问题概述·····	(294)
二、SEM 改装机简介·····	(295)
参考文献·····	(297)
第十章 电子束曝光技术的应用和发展前景·····	(298)
第一节 掩模制造·····	(298)
一、电子束曝光机制作掩模的工艺流程·····	(298)
二、适用于掩模版制作的商业型电子束曝光系统·····	(299)
三、特种掩模的制备·····	(300)
第二节 电子束直接光刻·····	(300)
一、EBDW 典型工艺流程·····	(300)
二、EBDW 特点·····	(301)
三、适用于 EBDW 的曝光系统·····	(301)
四、EBDW 与新器件研制·····	(302)
第三节 电子束曝光与微机电系统·····	(304)
一、微机电系统概述·····	(304)
二、MEMS 加工工艺·····	(304)
第四节 电子束曝光技术的其他应用·····	(306)
一、三维图形制作·····	(306)
二、电子束曝光技术制作全息图形·····	(306)
三、电子束诱导表面淀积技术·····	(307)
第五节 电子束曝光技术的发展前景·····	(308)
一、与提高分辨率相关的研究·····	(308)
二、与提高生产率相关的研究·····	(309)
三、开发专用化电子束曝光系统·····	(309)
四、研究下一代纳米级规模生产用电子束曝光系统·····	(310)
参考文献·····	(310)

第一章 电子束曝光技术概论

第一节 微纳加工与曝光技术

一、微纳加工推进微电子技术发展

微纳加工是制造微米尺寸量级和纳米尺寸量级微小结构的加工技术的总称。目前，对微纳加工还没有公认的一致的定量性定义。一般认为，微米级加工是指制作 $0.1\ \mu\text{m}$ ($100\ \text{nm}$) ~ $100\ \mu\text{m}$ 尺寸的微小结构的加工，其中 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ ，就是通常所说的亚微米和深亚微米范围。纳米级加工是指制作 $1\sim 100\ \text{nm}$ ($0.1\ \mu\text{m}$) 尺寸的微小结构的加工。大于 $100\ \mu\text{m}$ ($0.1\ \text{mm}$) 的加工已是传统的精密加工了。

微纳加工技术就其加工性质和加工方法来分类，大致可分为：材料分离加工，如分解、蒸发、溅射、切削、破碎等；材料接合加工，如蒸镀、淀积、掺入、生长、熔接、粘结等；变形加工，如塑性变形、流体变形等。

近几十年来，微纳加工技术得到了快速发展，这些发展与半导体微电子产业的发展密切相关。可以说，半导体微电子产业的发展借助于微纳加工技术的发展，同时又推动微纳加工技术向更细更精发展。

众所周知，半导体、微电子产业的发展基本上遵循着 Moore 定律的发展规律，芯片的集成度每 18 个月增加一倍，每 3 年推出新一代产品，其器件尺寸比上一代缩小 70%。根据美国半导体产业协会 (SIA) 预测， $100\ \text{nm}$ 孤立线条的 MPU (微处理器) 首批产品已在 2003 年上市， $100\ \text{nm}$ 密集线条 DRAM (动态随机存储器) 首批产品将在 2006 年上市。到 2012 年 MPU 的栅条线宽可达 $35\ \text{nm}$ ，时钟频率 $10\ \text{GHz}$ ，集成度为 14 亿个晶体管。图 1-1 表示了器件尺寸和集成度的发展趋势。

在过去的 10 年中，半导体微电子产业将微纳加工技术推进到了深亚微米阶段。在今后的 10 年中将进一步推进到纳米阶段，在此期间，与半导体微电子产业相关的微纳加工技术将得到飞速发展，如图形曝光 (光刻) 技术、材料刻蚀技术、薄膜生成技术、离子注入技术和粘结互连技术等。

在与半导体微电子产业相关的这些微纳加工技术中，图形曝光技术是微电子制造技术发展的主要驱动者。在大直径晶片上不断提高曝光图形的分辨率和套刻精度，促成了集成电路集成度的提高和成本的下降。在某种意义上说，图形曝光技术决定了半导体器件和集成电路的性能和生产成本。

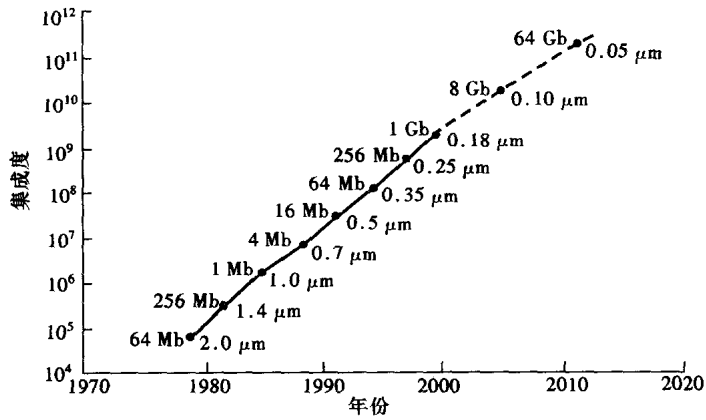


图 1-1 器件尺寸和集成度发展趋势

二、曝光技术及其分类

在半导体器件和集成电路制造中，需要在晶片上形成所要求的图形，这些图形是由曝光工艺来完成的。图形的最小特征尺寸往往决定了半导体器件和集成电路的电气特性和生产成本，因此，曝光工艺就成为半导体器件和集成电路制造的关键技术。

所谓曝光，就是在涂有感光胶的晶片上，形成感光胶图形。这种工艺可以通过将掩模上的图形转移到晶片上来完成（图 1-2a），也可以由光束、电子束和离子束直接描画在晶片上（图 1-2b）。

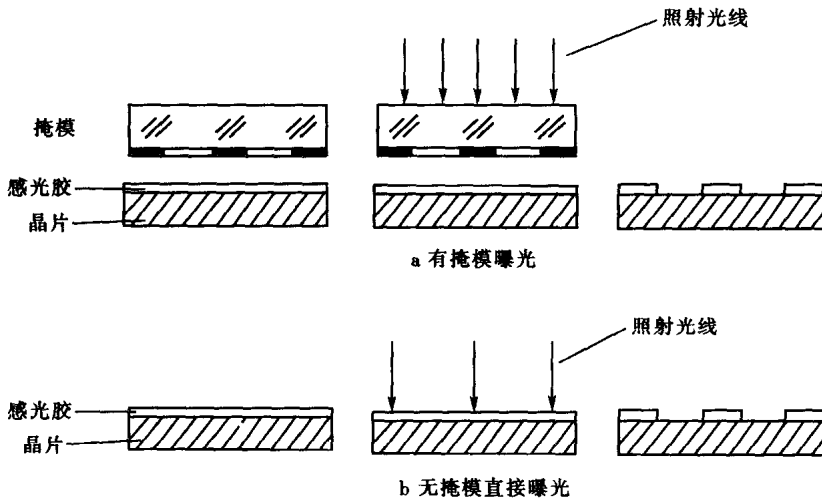


图 1-2 曝光工艺示意图

感光胶亦称抗蚀剂，其材料一般都是有机聚合物，它有正性和负性之分。正性感光胶受到辐照的部分，材料分子发生降解反应，因此在显影溶液中这部分材料容易溶解掉。反之，负性感光胶受到辐照的部分，材料分子发生交联反应，使这部分材料在显影溶液中不容易溶解掉。曝光工艺的目的就是在晶片或掩模上形成正感光胶或负感光胶的胶层图形。

曝光工艺的特性可以用三个参数来表征，即分辨率、对准精度和生产率。分辨率通常是指满足指定精度要求的感光胶图形的最小特征尺寸；对准精度是指在同一晶片上本次曝光的图形与上次曝光的图形的相对位置精度；生产率是指每小时能完成曝光的晶片数，也就是曝光工艺的效率。

曝光工艺可以分成传统光学曝光、电子束投影（EPL）、离子束投影（IPL）、X射线曝光（XRL）和极紫外曝光（EUDW）等光刻技术。

除了上述曝光方法以外，研究人员还提出了一些特殊的图形制作方法，如模版直接压印法（imprint lithography）、软式刻印法（soft lithography）、近场光刻法（near-field lithography）和探针邻近光刻法（proximity probe lithography）等。这些方法均可以形成微纳米图形，但它们仍处于实验室探索阶段，尚不具备生产性。

三、传统光学曝光技术

传统光学曝光是指以紫外光（ $\lambda \approx 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ）或者超紫外光（VUV）来实现的曝光工艺。有两种基本的传统光学曝光方式：阴影式曝光（shadow printing）和投影式曝光（projection printing）。

在阴影式曝光技术中，掩模直接与晶片接触实现曝光的，叫接触式曝光；掩模与晶片保持一间隙实现曝光的，叫接近式曝光。接触式曝光技术比较简单，能获得较高分辨率（约 $1 \mu\text{m}$ ），但掩模与晶片间容易夹入灰尘颗粒，造成掩模的永久性损伤，从而造成晶片缺陷，降低成品率。接近式曝光不会带来灰尘颗粒损伤，但掩模和晶片间的间隙（一般为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ ）能导致光衍射误差，从而降低分辨率。接触式和接近式阴影曝光的原理示意图如图 1-3 所示。

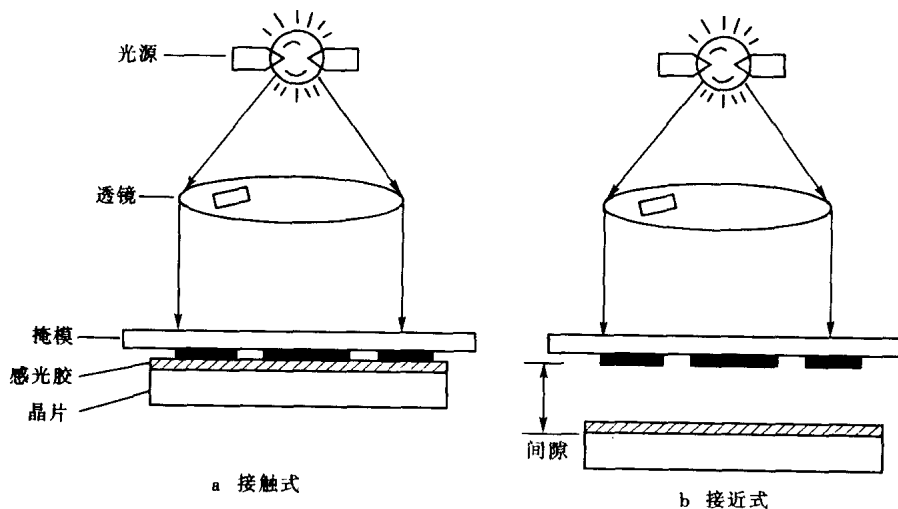


图 1-3 阴影式曝光

由阴影式曝光得到的最细线宽 L_{\min} 大致可用下式表示：

$$L_{\min} = k (\lambda \cdot g)^{1/2} \quad (1-1)$$

式中， k 是工艺材料系数， λ 是照射光的波长， g 是掩模与晶片之间的间隙，此间隙包括了