



国家科学技术学术著作出版基金资助

电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著

聚焦离子束 微纳加工技术

顾文琪 马向国 李文萍 著

WEINA JIAGONG JISHU
JUJIAO LIZISHU

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
国家科学技术学术著作出版基金资助

聚焦离子束微纳加工技术

顾文琪 马向国 李文萍 著

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

聚焦离子束微纳加工技术/顾文琪, 马向国, 李文萍著.
—北京: 北京工业大学出版社, 2006.12
(电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著)
ISBN 7-5639-1690-3

I. 聚... II. ①顾... ②马... ③李... III. 离子
束聚变装置—离子束加工 IV. ①TL632②TN405.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 090178 号

聚焦离子束微纳加工技术

顾文琪 马向国 李文萍 著

*

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

*

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷
787mm × 1092mm 16 开 22.75 印张 421 千字
ISBN 7-5639-1690-3/T · 290
定价: 55.00 元

前 言

电子束、离子束和光子束加工技术是微(米)纳(米)^①加工、半导体集成电路制造领域具有代表性的先进工艺技术。

电子束技术主要应用在光掩模制造和器件的直接光刻(EBDW)方面。迄今为止,集成电路制造业的大部分掩模版都由电子束曝光机制作。电子束曝光机还在直接光刻方面发挥作用,虽然它的生产率低,还不能用于器件的批量生产,但它具有极高的图形分辨率^②,可制作最细线宽 $5\sim 8\text{ nm}$ 的图形,因此在新器件和特种器件研制中得到成功应用。此外,由于电子束投影曝光技术(EPL)的高分辨率和高生产率,近年来它一直受到人们的重视。目前正在进行产业化前期研究,如果获得突破,有望成为21世纪纳米量级器件生产的主流光刻技术。

光子束技术主要应用在半导体集成电路制造的光刻工艺方面。众所周知,光刻工艺在现代半导体集成电路产业中占有龙头地位。可以说,没有先进的光刻工艺的进步,就没有现代半导体集成电路的发展。光学光刻从紫外光源发展到准分子激光光源,它使器件特征尺寸从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 级缩小到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,光学光刻在光刻领域的霸主地位,至今还没有哪一种技术能够替代它。极紫外光刻(EUVL)的开发,有望将光学光刻推进到 30 nm 图形分辨率。光子束技术中的激光光刻机由于其结构相对简单、运行成本低,被用于亚微米器件掩模版的制作,冲破了电子束曝光在制版业的垄断地位。光子束技术中的X射线光刻是下一代光刻(NGL)的候选技术之一。X射线光刻的图形分辨率为 $20\sim 30\text{ nm}$,由于焦深大,可制造高深宽比的图形结构,它在微机械制造和微纳加工领域已率先得到应用,并显示出明显的优越性。

离子束不仅具有高能粒子的特性,而且还具有元素特性,因此,它在半导体集成电路制造业的应用范围更加宽广。与主要用于光刻和掩模版制造的光子束和电子束不同,离子束技术被广泛应用于离子束刻蚀(包括离子溅射刻蚀、等离子刻蚀、反应离子刻蚀等)、离子束沉积、离子束注入、离子束曝光和离子束材料改性等方面。离子束加工的图形分辨率为 $8\sim 10\text{ nm}$,材料剥离厚度和材料沉积厚度均可达到纳米量级。离子束刻蚀、离子束沉积和离子束注入工艺已成为半导体

① 微纳是微米纳米的简称,目前在本行业中通用。

② 分辨率的原文为 resolution,可以译为分辨率,也可以译为分辨力,在本套丛书中两种用法都有。

集成电路制造业的标准生产技术。离子束曝光不存在邻近效应,对感光胶的曝光效率高,可达到极高的图形分辨率($< 10\text{ nm}$),因此,普遍受到人们的重视。离子束曝光可分为扫描离子束曝光和投影离子束曝光(IPL)。IPL既具有极高的图形分辨率,又具有极高的生产率,它也是下一代光刻(NGL)极有应用前景的候选技术之一。

离子束加工是用荷能离子轰击工件表面,实现材料剥离、沉积、注入和改性的工艺。可以把离子束加工分为常规离子束加工和聚焦离子束加工。常规离子束加工是由定向或不定向的离子(或离子束)对工件表面进行面状轰击达到加工目的的,轰击面直径可从几毫米到几十厘米。凡是需要形成图形结构的地方,必须采用掩模遮蔽。聚焦离子束加工是由聚焦状态的离子探针对工件表面进行点状轰击来达到加工目的的,轰击点的直径从几纳米到几微米。它不需要掩模,凡是需要形成图形结构的地方,由计算机控制束扫描器和束闸(束开关)来实现。

聚焦离子束(FIB)技术的快速发展和实用化要归功于液态金属离子源的开发。20世纪70年代初期,美国 Argonne 国家实验室的 V.E.Krohn 和 G.R.Ringo、英国 Cluham 实验室的 R.Clampitt 和美国 Oregon 研究中心的 J.Orloff 和 L.W.Swanson 等人先后开发了不同类型的液态金属离子源,并尝试应用于 FIB 系统。1978年,美国加州休斯研究所的 R.L.Seliger 等人建立了世界上第一台 Ga^+ 液态金属离子源的 FIB 加工系统,开创了 FIB 实用化的先河。该系统的离子束斑直径为 100 nm ,束流密度为 1.5 A/cm^2 ,束亮度达到 $3.3 \times 10^6\text{ A/}(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。到20世纪80年代和90年代,在机理研究、装备研制和应用技术研发方面,FIB技术都取得了长足进步,不同用途、多种结构的商品型 FIB 系统批量投入市场,配备到各类研究实验室,一部分也进入半导体集成电路制造厂。

目前,FIB技术主要应用在:①光掩模的修补;②集成电路的缺陷检测分析和修整;③TEM和STEM的薄片试样制备;④硬盘驱动器薄膜头(TFH)的制造。同时,FIB其他一些重要应用还在开发中,它们是:①扫描离子束显微镜(SIM);②FIB直接注入;③FIB曝光,包括扫描曝光和投影曝光;④多束技术和全真空联机技术;⑤FIB微结构制造(刻蚀、沉积);⑥FIB/SIMS(聚焦离子束/二次离子质谱仪)技术。

FIB技术是当今微(米)纳(米)加工和半导体集成电路制造业十分活跃的研究领域。由于它集材料刻蚀、沉积、注入、改性于一身,有望成为高真空环境下实现器件制造全过程的主要加工手段。

本书系统地介绍了聚焦离子束技术的原理、发展历史、系统分类和组成、重要分系统的设计、重要的应用实例和发展前景。为了使读者有更多的了解,还介绍了国外先进的商品型 FIB 系统的性能指标。本书是电子束、离子束、光子束微

纳加工技术系列专著之一，可以作为从事微纳加工和半导体集成电路制造行业的研究人员和工程技术人员的技术参考书，也可以作为高等院校相应专业教师和研究生的参考书。

本书共分八章：第一章聚焦离子束技术概论；第二章聚焦离子束与固体材料表面的相互作用；第三章聚焦离子源；第四章聚焦离子束装置中的离子光学系统；第五章图形发生器与束闸；第六章精密工件台及其控制；第七章聚焦离子束的应用；第八章国外先进的聚焦离子束装置。第一、二、五、六、七章由顾文琪撰写，第三章由马向国撰写，第四、八章由李文萍撰写。顾文琪对全书进行了校阅和修改。在本书编写过程中得到了中国科学院电工研究所微纳加工研究部谭敏、刘俊标、方光荣、薛虹、韩立、张福安等同志的热忱帮助，在此深表谢意。

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

2006年4月

目 录

前言	I
第一章 聚焦离子束技术概论	1
第一节 集成电路制造中的三束技术	1
一、电子束技术	1
二、光子束技术	2
三、离子束技术	3
第二节 聚焦离子束技术	7
一、常规离子束加工与聚焦离子束加工	8
二、聚焦离子束技术的发展历史	10
三、聚焦离子束系统的分类	12
第三节 聚焦离子束系统组成	15
一、离子源	15
二、离子光学柱	16
三、束描画系统	18
四、X-Y 工件台	19
五、信号采集处理单元	20
参考文献	22
第二章 聚焦离子束与固体材料表面的相互作用	24
第一节 聚焦离子束与固体材料表面的相互作用	24
第二节 离子在固体中的能量损失和射程	25
一、核损失(nuclear losses)	26
二、电子损失(electronic losses)	30
三、电荷交换能量损失	31
四、离子在固体材料中的射程	31
五、沟道效应	32
第三节 聚焦离子束的主要功能	33
一、离子注入	33
二、离子溅射	35
三、材料的化学变化	36
四、离子诱导沉积	36
五、表层损伤	36
六、二次电子、二次离子发射	37

参考文献	37
第三章 聚焦离子源	39
第一节 聚焦离子源概述	39
第二节 几种聚焦离子源的结构及工作原理	40
一、双等离子体离子源	40
二、液态金属离子源(LMIS)	41
三、气态场发射离子源(GFIS)	44
第三节 液态金属离子源	46
一、液态金属离子源的工作机理	46
二、液态金属离子源的主要性能指标	56
三、液态金属离子源发射尖制备的基本工艺要求及原理	58
四、液态金属离子源的结构形式、挂金属工艺及测试	60
第四节 液态金属离子源发射系统的仿真分析	66
一、液态金属离子源发射系统的电场计算	66
二、用 Monte Carlo 法模拟计算液态金属离子源的发射特性	74
第五节 典型液态金属离子源介绍	81
一、镓液态金属离子源	81
二、海绵体电极型液态金属离子源	84
三、液态合金离子源	87
第六节 液态金属离子源测试与实验装置	90
一、液态金属离子源发射尖自动腐蚀设备的开发研制	90
二、液态金属离子源结构	94
三、DL-01 型液态金属离子源测试实验	95
参考文献	97
第四章 聚焦离子束装置中的离子光学系统	101
第一节 概论	101
第二节 轴旋转对称离子光学系统	102
一、轴旋转对称静电场和静磁场的分析研究	102
二、离子在静场中的运动	108
三、电子透镜	110
四、像差理论与分析	125
第三节 非轴旋转对称离子光学系统	137
一、均匀电磁场系统	137
二、电磁多极系统	149
第四节 离子光学系统的参数求解方法	156
一、电磁场的求解方法	156
二、离子轨迹的求解方法	163
三、光学参量的计算	164
四、像差系数的计算	165

第五节 聚焦离子光学系统的优化设计	169
一、设计原则	169
二、离子光学优化算法	170
三、离子束系统设计实例	175
第六节 聚焦离子束光柱体的性能评估	185
一、几何像差平方求和法	186
二、束流密度分布积分法	186
三、光学传递函数法	187
参考文献	193
第五章 图形发生器与束闸	195
第一节 图形发生器概述	195
一、图形发生器的种类	195
二、图形发生器的功能	196
三、商品型图形发生器	197
第二节 DY-2000 通用图形发生器的硬件组成	202
一、主控制器硬件结构	202
二、数模转换器结构	203
三、离子束曝光过程实时显示单元	204
第三节 DY-2000 通用图形发生器的软件系统	205
一、软件总体结构	206
二、数据流动	206
三、主要功能模块介绍	206
第四节 束闸及驱动器	211
一、束闸的设计要求	212
二、束闸的设计计算	212
三、FIB 束闸的设计实例	213
四、束闸驱动器的设计	213
参考文献	214
第六章 精密工件台及其控制	216
第一节 概述	216
一、精密工件台在聚焦离子束加工系统中的作用	216
二、FIB 常用工件台	216
三、激光定位精密工件台的构成	219
第二节 激光与激光干涉仪测量原理	221
一、激光的特性	221
二、激光的产生	225
三、氦氖激光器的工作原理	226
四、氦氖激光器的稳频方法	228
五、两种激光干涉仪的构成	230

第三节 激光定位精密工件台的主要指标与结构	234
一、主要技术指标	234
二、工件台结构组成	235
三、工件台主体的结构	236
四、片库与传输片机械手	239
五、真空箱体和隔振基础	241
第四节 激光定位精密工件台的控制系统	243
一、Agilent 5527 激光干涉测量仪系统组成	244
二、工件台 X、Y 控制系统	245
三、工件表面高度检测系统	247
四、自动传输片系统	248
五、主控计算机接口	248
六、系统软件设计	250
第五节 工件台的位置误差分析	250
一、工件台位置测量误差	251
二、工件台位置修正误差	253
参考文献	254
第七章 聚焦离子束的应用	256
第一节 聚焦离子束 (FIB) 无掩模离子注入	256
一、常规离子注入与 FIB 离子注入	256
二、常规离子注入技术	256
三、FIB 离子注入技术	259
四、FIB 离子注入技术的优缺点	262
第二节 聚焦离子束溅射刻蚀加工 (FIB 铣削)	263
一、溅射产额与影响产额的主要因素	263
二、FIB 辅助气体刻蚀 (GAE)	269
三、集成电路器件剖面制作	270
四、TEM 试样制备	273
五、特种器件和 MEMS 器件制作	275
第三节 FIB 诱导沉积的应用	277
一、FIB 诱导沉积原理	277
二、FIB 诱导沉积产额	279
三、掩模版修理	281
四、集成电路分析与修理	284
五、MEMS 结构制作	285
第四节 离子束曝光	287
一、离子束曝光的分类	287
二、离子束曝光的特点	287
三、掩模离子束曝光	291
四、投影离子束曝光	295

五、扫描离子束曝光	301
六、小结	303
第五节 扫描离子显微镜和二次离子质谱仪	303
一、扫描离子显微镜 (SIM)	304
二、FIB/SIMS 系统	306
参考文献	314
第八章 国外先进的聚焦离子束装置	317
第一节 IOG 25 液态金属离子光学柱	318
一、主要组成部分	319
二、系统性能指标	320
三、可扩展性	321
第二节 FIB - SEM 双束设备	322
一、聚焦离子束 - 电子束设备 Quanta™ 200 3D	322
二、聚焦离子束 - 电子束设备 Nova™ 600 NanoLab	325
第三节 日本精工电子纳米科技有限公司的“三束”显微镜	329
一、“三束”显微镜的工作原理	329
二、SMI 3000TB 系列的性能指标	330
三、SMI 3000TB 系列的典型应用	332
第四节 离子束聚焦投影设备	332
一、PROFIB 原理	333
二、PROFIB 的性能及典型应用	334
第五节 其他常用的聚焦离子束设备	336
一、ZEISS 国际公司的同步双束显微镜 (FIB - SEM) CrossBeam® 系列	336
二、日立公司快速精确制备样品的 FB - 2100	340
三、日本 JEOL 公司的多束形加工设备 JEM - 9310FIB 系统	341
参考文献	344

第一章 聚焦离子束技术概论

第一节 集成电路制造中的三束技术

自从 1958 年美国得克萨斯仪器公司开发出世界上第一块集成电路起, 世界集成电路产业经历了小规模、中规模、大规模、超大规模和特大规模集成电路的发展阶段。目前, 硅片上制作 CMOS 器件的特征尺寸已经有 $0.18 \sim 0.13 \mu\text{m}$, CPU 的速度达到数千兆次每秒, 硅片尺寸达到直径 300 mm。在一些量产试验线上, 已生产特征尺寸 90 nm 的集成电路器件。

集成电路制造业的发展一直遵循着著名的摩尔定律。摩尔定律预测集成电路的集成度每 18 个月提高 1 倍, 其器件特征尺寸每 3 年更新一代, 即缩小到原特征尺寸的 $1/\sqrt{2}$ 。从 20 世纪 60 年代开始到今天, 世界集成电路产业的发展基本上符合摩尔定律的预测规律。

图 1-1 所示为国际半导体协会 (ITRS) 2001 年发布的集成电路工艺技术发展蓝图。从这幅蓝图上不仅可以看出集成电路器件尺寸的缩小和器件密度的提高, 更能看出集成电路制造工艺技术的飞速发展。

集成电路制造工艺技术种类繁多, 包括光刻、刻蚀、氧化、扩散、溅射、键合、封装等。作为代表性的先进工艺技术是电子束、离子束和光子束加工技术, 俗称三束技术。

一、电子束技术

电子束技术主要应用在掩模的制造和器件的直接光刻方面。集成电路产业应用的光掩模中, 除了少量由激光图形发生器制作外, 几乎都是由电子束曝光机制

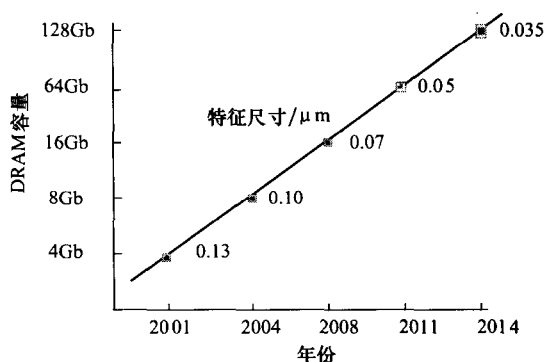


图 1-1 国际半导体协会 (ITRS) 发布的 IC 工艺技术发展蓝图

造的。电子束曝光机还在直接光刻(EBDW)方面发挥作用,虽然它生产率低,还不能用于器件的批量生产,但它具有极高的分辨率,可制作最细线宽 $5\sim 8\text{ nm}$ 的图形,因此在新器件研发中得到较多应用。为了提高电子束曝光机的生产率,美国、日本及欧洲正在研制电子束投影曝光系统(EPL),这类系统在保持电子束曝光高分辨率的同时,将大大提高其生产率。它可以获得最小图形线宽 $35\sim 40\text{ nm}$,每小时能光刻40片8英寸^①的硅片。目前,EPL系统在掩模制造技术、套刻对准技术及实用化方面,还存在一些难题需要攻克,这些难题阻碍了它的商品化进程。上述这些难题如果获得突破,EPL有希望成为21世纪纳米量级器件制造的主流光刻技术。

二、光子束技术

光子束技术主要包括紫外光刻、准分子激光光刻、极紫外光刻(EUVL)、激光图形发生器和X射线光刻等。

紫外光刻采用 405 nm (g线)、 365 nm (i线)的紫外光源,它可以光刻 $0.5\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的器件图形。紫外光刻虽然分辨率不高,但它至今仍然在微电子产业的光刻工艺中扮演着重要角色。

目前准分子激光光刻机已进入集成电路生产线,其中有 248 nm 波长的KrF激光光刻机和 193 nm 波长的ArF准分子激光光刻机。这两种光刻机已经用于 $0.18\sim 0.13\text{ }\mu\text{m}$ 器件的生产线。为了提高光学光刻的图形分辨率,人们在掩模、成像和工艺方面开发了一系列分辨率增强技术(RET),这些技术主要有移相掩模(phase shift mask, PSM)、离轴照明(off-axis illumination, OAI)和光学邻近效应修正(optical proximity correction, OPC)等。分辨率增强技术的应用和浸没透镜技术的开发,可以使 193 nm 准分子激光光刻技术推进到 $65\sim 45\text{ nm}$ 结点。为了应对 90 nm 结点器件的生产, 157 nm 波长的F₂准分子激光光刻机正在开发中,但由于这种光刻机波长极短,光源技术尚不成熟。极紫外光刻(EUVL)作为下一代光刻技术(NGL)受到世界各国的重视。EUVL的光源波长仅 13 nm ,图形分辨率可达到 30 nm 。EUVL技术目前尚处于研究阶段,在光源、掩模和对准技术方面还存在很多难点,但一旦突破,它有可能成为 $35\sim 65\text{ nm}$ 器件批量生产的光刻技术。

激光图形发生器或称激光光刻机由于结构相对于电子束曝光机来说更为简单,无需真空环境,成本相对较低,因此在掩模制造中得到了应用。它能获得的图形最小线宽大约为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。激光束能够气化剥离材料,又可以利用诱导气体实现辅助沉积。它可以沉积金属膜、绝缘膜和半导体膜,因此在掩模版修补、集成

^① 本行业目前仍沿用英制。1英寸等于 25.4 cm 。

电路修整、MOS 晶体管和发光二极管制作以及 MEMS 器件制作中得到了较多应用。

光子束技术中有一种重要的技术就是 X 射线光刻。X 射线光刻技术通常采用 $0.01 \sim 2 \text{ nm}$ 波长的 X 射线。它的优点是光源波长短，衍射效应小，因此可以光刻线条极细的图形，其图形分辨率可在 $20 \sim 30 \text{ nm}$ 。X 射线光刻的另一个优点是焦深大，可以制作高深宽比、侧壁陡直的图形，如图 1-2 和图 1-3 所示。X 射线光刻有较大的曝光窗口，因此有高的生产率。X 射线光刻技术的缺点是光源结构相对庞大，掩模制造和对准技术还存在不少难点。X 射线光刻可以利用电子同步加速器引出的光束，但这种大型固定光源只能用于实验性光刻，不可能用于器件生产线。目前已有多家公司开发了小型专用同步辐射光源，但总体而言，光源的结构还是比较庞大复杂。在过去 20 年中，X 射线光刻技术已经取得了巨大的进步，它在高频高速化合物半导体制造领域、MEMS 技术领域和微纳加工领域已率先得到生产应用。至于能否成为下一代光刻技术(NGL)用于 90 nm 以下集成电路的制造，这要根据它与电子束曝光、离子束曝光及光学光刻的竞争结果而定。

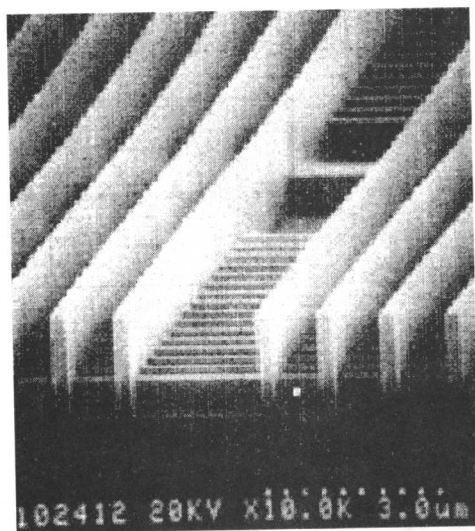


图 1-2 X 射线在 SAL601 抗蚀剂上制作的亚微米图形

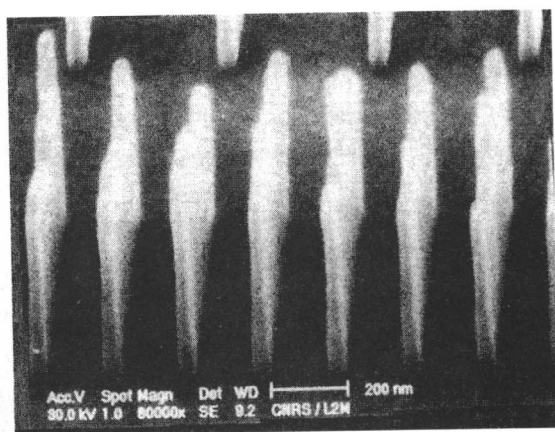


图 1-3 X 射线制作的抗蚀剂图形(线宽 50 nm)

三、离子束技术

离子束技术主要应用在离子束刻蚀、离子束沉积、离子束诱导沉积、离子束注入、离子束曝光和离子束材料改性等方面。离子束不仅具有高能粒子的特性，而且还具有元素特性，因此在集成电路制造、MEMS 技术领域有较宽阔的应用范围。

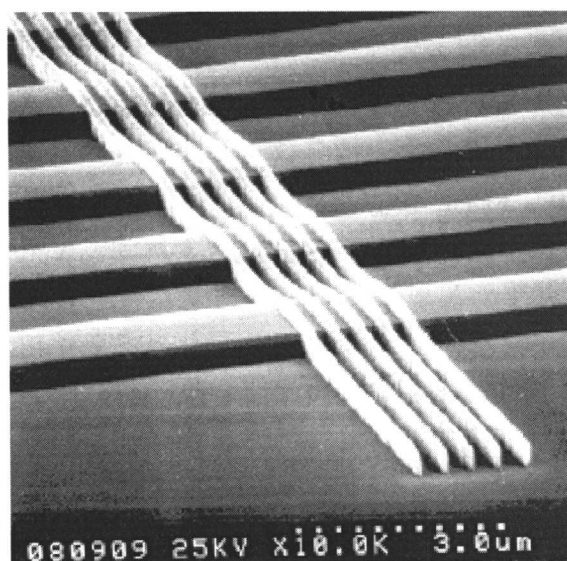


图 1-4 投影离子束曝光制作的 AZ-PMMA 胶图形(线宽 $0.18\ \mu\text{m}$)

离子束曝光不存在邻近效应,对感光胶的曝光效率高,可以达到极高的图形分辨率($< 10\ \text{nm}$)。离子束曝光可以分为扫描离子束曝光和投影离子束曝光两种。扫描离子束曝光技术与扫描电子束曝光技术存在相同的缺点,即生产率低。投影离子束曝光既保持了离子束曝光分辨率高的优点,又大大提高了生产率,是很有前途的下一代光刻技术(NGL)的候选者。图 1-4 所示为投影离子束曝光在 AZ-PMMA 胶上制作的图形,线宽 $0.18\ \mu\text{m}$,间距 $0.4\ \mu\text{m}$,底层有 SiO_2 台阶。图 1-5 所示为聚焦离子束在 PMMA 胶上制作的图形,

线宽 $50\ \text{nm}$, Be^{2+} 聚焦离子束,束能量 $280\ \text{keV}$ 。

离子束刻蚀在集成电路制造中应用十分广泛。离子束刻蚀可以大略分为离子溅射刻蚀、反应离子刻蚀和等离子体刻蚀。离子溅射刻蚀是利用荷能离子轰击工件表面的溅射效应,将工件表面的原子溅射出来。离子溅射刻蚀通常采用惰性元素的离子,以免入射离子与工件材料发生化学反应。离子束溅射刻蚀的优点是:图形分辨率高,可达到 $8\ \text{nm}$;无侧向腐蚀,图形侧壁陡直;可以刻蚀金属、绝缘体、有机物和半导体材料。离子束溅射刻蚀可以分为扫描聚焦离子束刻蚀和掩模离子束刻蚀。掩模离子束刻蚀的掩模层通常是工件上的感光胶图形层。反应离子刻蚀是将一束反应气体的离子束引向工件表面,发生反应后形成一种既易挥发又易靠离子动能而加工的产物,通过反应气体离子束溅射作用达到刻蚀目的。反应离子刻蚀过程既有物理溅射作



图 1-5 Be^{2+} 聚焦离子束在 PMMA 胶上的曝光结果(线宽 $50\ \text{nm}$)

用,又有化学腐蚀作用。等离子体刻蚀是在工作区形成等离子体,以感光胶图形作为掩模,通过离子溅射、化学反应和辅助能量离子(或电子)与模式转换等方式,精确可控地除去工件表面上一定深度的薄膜材料。该过程通常为各向异性且按直线进行,具有刻蚀速率高、均匀性和选择性好的优点。等离子体刻蚀已经居于集成电路制造中刻蚀工艺的主导地位。近年来在等离子体刻蚀基础上又开发了多种高密度等离子体刻蚀技术(ICP/TCP、ECR、HELICON),高密度等离子体刻蚀设备的离子能量独立可调、损伤低、剖面陡直,重复性和可靠性也大大提高,主要应用于深亚微米加工领域。图1-6所示为FIB在石墨层上刻蚀的图形,凹槽边缘宽度为30 nm。

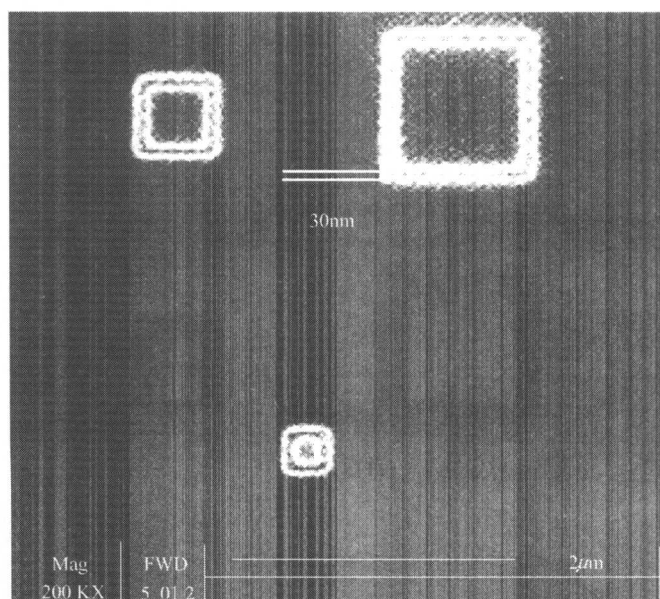


图1-6 FIB在石墨层上刻蚀的纳米图形

离子束溅射沉积技术是通过离子溅射,在工件上形成薄膜的技术。真空室内的气体被电离,电离后的离子在电场作用下轰击阴极靶板,将靶板材料的原子或分子溅射出来,然后沉积在阳极工件表面形成薄膜。离子溅射沉积也叫离子溅射镀膜。这项工艺可以沉积金属膜、合金膜和化合物膜,它不仅在集成电路制造中得到应用,而且在传统机械制造行业中被用来镀覆切削刀具的氮化钛(TiN)硬质膜和传动件上的二硫化钼(MoS_2)润滑膜等。

在离子束入射区域通入金属有机物气体,当离子轰击工件表面时,首先将金属有机物气体分解,将金属留在工件表面,这就是诱导离子沉积。通入的气体叫诱导气体。在聚焦离子束系统上可利用这一工艺直接沉积Pt、W等金属,用于掩模版和集成电路的修整。诱导离子沉积在三维微结构制作中也得到成功应用。

图 1-7 到图 1-10 示出了聚焦离子束刻蚀和沉积技术的一些应用例子。图 1-7 所示为利用 FIB 切断集成电路的多余连接线。我们也可以用 FIB 的沉积功能搭接集成电路缺失的连接线。例如, 利用 FIB 在电路上挖出二条沟槽, 将埋藏在绝缘层下的两条互不导通的金属线连接起来。图 1-8 所示为在硅材料上用 FIB 刻蚀出的微齿轮结构, 齿根圆直径为 $11.02\ \mu\text{m}$, 齿轮厚度为 $1.43\ \mu\text{m}$ 。FIB 技术已成为 MEMS 研究的得力手段。图 1-9 所示为利用 FIB 的沉积和刻蚀功能制备的 TEM 样品, 样品薄层厚度仅 $100\ \text{nm}$ 左右。图 1-10 所示为利用 FIB 沉积金属铂形成电路之间的纳米连接, 纳米连接线线宽为几十纳米, 而线长可达几十微米。

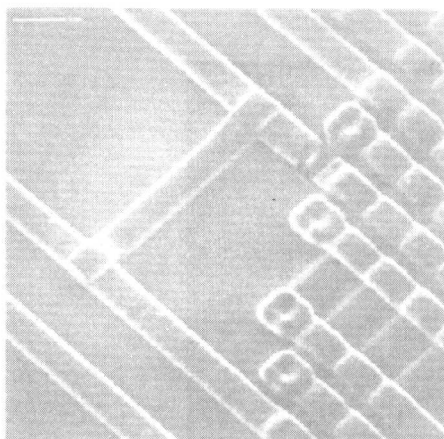


图 1-7 FIB 铣断开集成电路连线

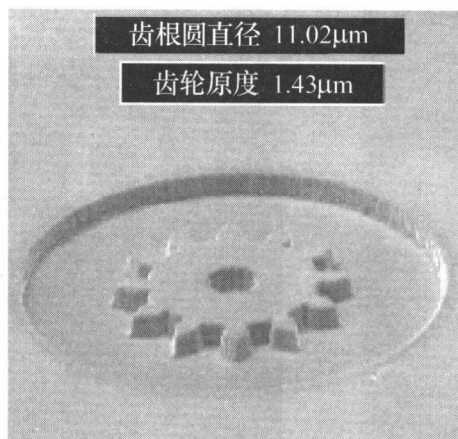


图 1-8 FIB 刻蚀的微齿轮结构

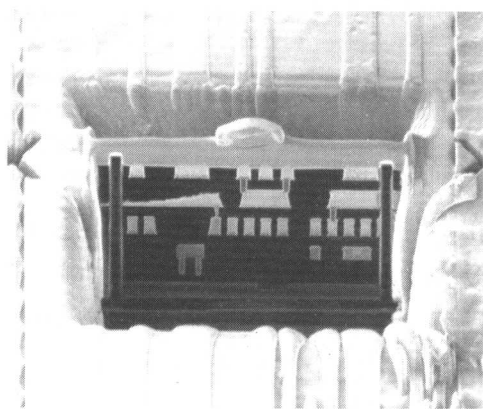


图 1-9 FIB 制作的 TEM 薄膜样品

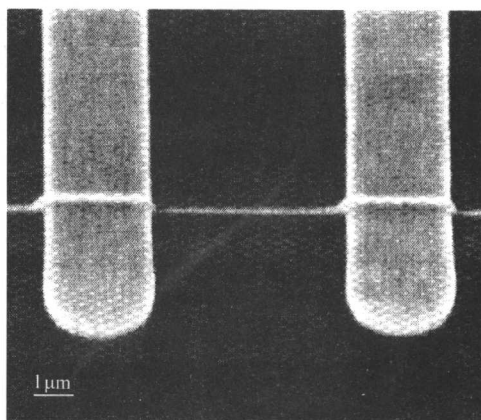


图 1-10 FIB 沉积形成的纳米连接线

离子注入是采用高能离子轰击晶片表面, 使高能离子射入晶片, 入射离子通过与工件中的原子碰撞, 逐渐失去能量, 最后停留在晶片表层。在集成电路制造中应用得最多的是砷、磷、硼离子的注入。磷、硼元素的注入可以代替传统的扩硼、扩磷热加工工艺。离子注入工艺是低温工艺, 它不受热力学限制, 注入浓