

纳米光刻技术的现状和未来*

陈献忠 姚汉民[†] 陈旭南 李展 罗先刚

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室 成都 610209)

摘要 纳米技术是 21 世纪信息科学的一项关键技术, 纳米结构制作是纳米技术的重要组成部分. 纳米光刻技术是制作纳米结构的基础, 具有重要的应用前景. 文章对光学光刻技术进行了概述, 介绍了几种纳米光刻技术的新途径、发展现状和关键问题, 最后讨论了纳米光刻技术的应用前景.

关键词 纳米技术, 纳米光刻, 纳米结构制作, 应用前景

THE PRESENT AND FUTURE OF NANOLITHOGRAPHY

CHEN Xian-Zhong YAO Han-Min[†] CHEN Xu-Nan LI Zhan LUO Xian-Gang

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract Nanotechnology will play a key role in information science in the 21st century. The fabrication of nanostructures, an important part of nanotechnology, is based upon nanolithography which will be widely employed in the future. We shall first briefly review optical lithography, then describe the development and key issues of several new methods of nanolithography. Prospective applications of nanolithography are discussed at the end.

Key words nanotechnology, nanolithography, nanostructure, applied perspective

1 引言

“一尺之棰, 日取其半, 永世不竭”这是我国古代流传下来的朴素的物质可以无穷分割的思想. 科学技术的发展使人们认识世界的思路不断地拓宽, 不仅向地球、月亮、星际、太空方向探索, 也向着微观世界进行了孜孜不倦的研究. 诺贝尔奖获得者理查德·费恩曼在 1959 年曾说过: “如果有一天可以按人的意志安排一个个原子, 将会出现什么奇迹?”这个梦想在今天已有可能成为现实, 并形成了一门崭新的科学技术——纳米技术, 成为面向 21 世纪的研究热点^[1-5]. 纳米电子学、纳米材料、纳米机械、纳米生物学共同组成了纳米高技术群体, 其出现标志着高新技术进入了一个崭新的发展阶段. 早在 1974 年, 日本精密机械学会等联合举办的国际生产工程技术会议(ICPE)上已论及纳米技术的概念, 但加工精度的最终目标并不明确. 基于加工技术的进步和提高加工精度的可能性, 又因固体物质结构的极限尺寸——原子间距为 0.1—0.3nm, 加工精度界限应为纳米级(1×10^{-9} m). 若要求加工精度为 1nm, 必然要求

亚纳米级精度的测量和控制技术, 因此纳米技术至少是包括材料、加工、测量和控制技术的统一体. 1986 年获得诺贝尔物理学奖的扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)的发明, 实现了人类亲眼看到微观原子世界真面目的愿望, 它是观察研究纳米材料的有力手段之一. STM 具有非常高的空间分辨率, 横向分辨率达到 0.1nm, 纵向可达到 0.01nm, 可直接观察到物质的原子结构, 所以, STM 广泛地用于纳米材料的研究. 借助于扫描隧道显微镜和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM), 物理学家把化学和分子生物学的处理方法结合起来, 开辟了从专用集成电路到微型机电系统, 到专用集成型仪器, 再到纳米技术的批量加工工具技术.

纳米科技是 20 世纪 90 年代初才逐步发展起来的, 是现代物理(介观物理、量子力学和混沌物理等)和先进工程技术(计算机、微电子和扫描隧道显微镜

* 中国科学院知识创新工程项目(批准号:A2K0009), 微细加工光学技术国家重点实验室开放基金课题(批准号:KFS4)资助项目
2002-05-09 收到初稿, 2002-07-09 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: yhm@ioe.ac.cn

等技术)相结合的一门前沿科技领域。

白春礼院士在谈到纳米时代时说过,纳米时代是否到来的重要标志是纳米器件本身的研制水平和应用程度^[1,2]。纳米结构制作是纳米器件研制的前提,成为研究微观量子世界的重要基础之一,其制作技术已成为当前世界科学研究急需解决的问题。美、日、德等发达国家对此十分重视^[5],纷纷投入了大量的人力、物力进行研究开发。1991年3月22日,美国国家关键技术委员会向美国总统提交了《美国国家关键技术》报告,将纳米技术列为政府重点支持的22项关键技术之一,美国国家基金会将纳米技术列为优先支持的关键技术,康奈尔等多所大学设立了纳米技术研究开发机构;日本将纳米技术列为优先高科技探索研究项目之一,投资2亿美元进行研究开发,筑波大学交叉学科研究中心将纳米技术列为两个主要发展方向之一。目前纳米图形制作的主要途径有两个:一是采用现代化学技术,由单个原子聚积而成。另一是采用光刻手段在物体上制作纳米量级图形,但这需要大幅度提高现有光刻的分辨率。光刻技术的不断更新和新的光刻技术的涌现,使纳米光刻技术可以制作小于100nm线宽图形,并朝着制作几十个纳米,乃至几个纳米特征图形的方向发展。通常采用的方法有电子束、离子束、X射线、深紫外加波前工程^[6-11]、干涉光刻^[12]、原子光刻^[13-15]等。本文从光学光刻技术谈起,介绍纳米光刻技术的新途径、存在问题、发展趋势及应用前景。

2 光学光刻技术

在过去的三十多年里,以集成电路为核心的微电子技术迅速发展,高密度、高速度和超高频器件不断出现,促进了以计算机、网络技术、移动通信技术、多媒体传播等为代表的信息技术的发展。尤其是近十年,按照摩尔规律,单位面积硅片上的晶体管集成度以每三年翻四番的速度增长,能够把集成电路的集成度越做越高完全得益于微细加工技术的不断进步,特别是光学光刻技术的不断进步。

2.1 光刻成像系统像质评价的几个重要指标

(1)分辨率 $R = \frac{k_1 \lambda}{NA}$,表示能分辨的最小线宽,能分辨的线宽越小,分辨率越高。

(2)焦深 $DOF = \frac{k_2 \lambda}{(NA)^2}$,表示一定工艺条件下,能刻出最小线宽时像面偏离理想焦面的范围。焦深

越大,对图形的制作越有利。

(3)对比度 $CON = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$,是评价成像图形质量的重要指标。对比度越高,光刻出来的微细图形越好。

上述指标由系统的工作波长 λ ,数值孔径NA,工艺因子 k_1, k_2 ,像差,照明条件,掩模图形和系统的光学传递特性等因素决定。

2.2 光学光刻的发展概况

从20世纪60年代初期的 $20\mu\text{m}$ 到目前的 $0.25\mu\text{m}$ 以下的特征尺寸,光学曝光技术经历了从接触式曝光、接近式曝光、扫描投影式曝光到目前普遍采用的分步重复投影式曝光技术。光学光刻与电子束光刻和X射线光刻相比,具有生产率高、易实现高的对准和套刻精度、掩模制作相对简单、工艺条件容易掌握及良好的继承性等优点,在微电子工业中一直处于主力地位。特别是近年来,采用更大的数值孔径的光刻物镜和进一步缩短曝光波长并结合各种分辨率增强技术,使光学光刻极限分辨率的预言不断被打破。2000年3月,AMD公司、Intel公司相继推出主频为1GHz的Athlon、Pentium III微处理器均已采用 $0.18\mu\text{m}$ 钢连线工艺。

由瑞利(Rayleigh)分辨率公式: $R = k_1 \lambda / NA$,分辨率的提高可通过增大光刻物镜的数值孔径NA和缩短曝光波长 λ 来实现。目前最先进的光刻物镜的数值孔径NA已经达到0.8,曝光波长已从g线(436nm)、i线(365nm)缩短到深紫外(DUV)的准分子激光KrF(248nm)以及真空紫外(VUV)的ArF(193nm)、F₂(157nm)等。然而,波长的减小和数值孔径的进一步增大将使焦深和视场范围迅速缩小,影响工艺因子 k_1 ,使高分辨率的优点不能充分利用,面临着必须克服焦深缩短所带来的问题。

目前,曝光波长为248nm(KrF)、193nm(ArF)的准分子激光光刻已经成为主流光刻技术。157nm(F₂)光刻作为小于 $0.10\mu\text{m}$ 的光刻技术仍在研究之中。其难度之一是镜头的光学材料和加工工艺问题:熔石英和CaF₂,LiF是用于准分子激光步进扫描光刻机镜头和掩模基片的选用材料。其中熔石英具有易加工和稳定性高的特点,但在193nm和157nm波长具有很大的吸收损失,在高强度准分子激光照射后易产生光损伤;而CaF₂由于是单晶材料,不存在光子碰撞引起的光损伤问题,但其加工难以达到要求的光洁度。难度之二是高平均功率、长寿命的ArF和F₂激光器制作困难。目前,F₂激光器已取得重大突

破.难度之三是光致抗蚀剂的开发.现已研制出与 248nm 及 193nm 波长匹配的光致抗蚀剂,但与 157nm 波长相匹配的光致抗蚀剂还需做大量的工作.

波长的缩短和数值孔径的增大,虽然可以提高分辨率,但同时因有焦深 $DOF = k_2 \lambda / (NA)^2$,使焦深急剧减小(见表 1).

表 1 光学光刻的发展进程

年代	NA	k_1	λ/nm	R/nm	曝光面积/ $\text{mm} \times \text{mm}$	$DOF/\mu\text{m}$
1990	0.50	0.70	365	500	20 × 20	1.5
1995	0.60	0.60	248	250	22 × 22	1.0
1999	0.70	0.50	248	180	26 × 34*	0.6
2002	0.70	0.45	248/193	150/130	26 × 34*	0.5
2005	0.75	0.40	248/193	130/100	26 × 34**	0.4
2008	0.80	0.35	193/157	80/70	26 × 34**	0.3
2012	0.80	0.35	157	50		0.3

* 1 维扫描 ** 2 维扫描

因此光学光刻面临的一个主要问题是如何利用现有工艺和设备进行分辨率和焦深这两个矛盾参数的选择,而且带来新光源、抗蚀剂、掩模、工艺、透镜材料与工艺等诸多问题需要解决,并且也存在发展极限.除了不断增大数值孔径和缩短曝光波长之外,工艺系数 k_1 的不断减小也是提高光刻分辨率的一个十分重要的因素.从 1990 年至今的 10 多年中,工艺系数 k_1 的值从 0.70 减小到 0.40,而且在今后的 10 年中,还将进一步减小到 0.35 左右,据称其极限为 0.2,这将成为今后一段时期光学光刻继续发展的一项重要措施.

光学投影光刻的一个发展趋势是混合匹配曝光技术,将 365nm、248nm 及 193nm 投影光刻机进行匹配曝光,由高档的步进机完成图形 CD 层曝光,用较低档次的步进机完成其他层曝光,从而达到既降低生产费用、提高生产效率,又实现对超微细图形曝光的目的.

3 纳米光刻技术

3.1 电子束光刻

电子束光刻具有极高的分辨率,甚至可以达到原子量级.由电子束曝光制作的最小尺寸可以达到 10—20nm.英国剑桥大学微电子中心利用 100kV 电子束曝光机制作出 1—2nm 的单电子器件.电子束光刻由于是无掩模直写型的,因此具有一定的灵活性,可直接制作各种图形.电子束曝光机主要有三种:高斯电子束、矩形电子束、变形电子束.由于电子束是扫描成像型的,因此它的生产率极低,虽然现在已开始采用单元投影、成形光刻斑和限角散射电子束投影光刻(SCALPEL)等技术来提高生产率,但还

远未达到光学光刻所能达到的 40 到 100 片/小时的生产率.为了弥补电子束光刻的不足,目前正在研究光学光刻与电子束光刻的混合匹配曝光技术,即电路的大部分工艺由光学光刻完成,超精细图形由电子束光刻完成,结合两者的优势,弥补不足.正由于这些特性,目前电子束光刻一般用于制作高精度掩模.

3.2 X 射线光刻

X 射线光刻早在 20 世纪 70 年代初期就已经出现,由于其波长很短,所以可获得极高的分辨率.X 射线光刻的焦深容易控制,对于 0.13 μm 的光刻分辨率,其焦深也可达 7 μm .X 射线曝光的视场远远大于光学光刻,可达 50mm × 50mm 以上,而且可方便地应用单层工艺,工艺简单.因此,X 射线光刻是未来替代光学光刻的首选技术.不过,X 射线光刻也有一些关键技术问题尚需解决,如 X 射线聚焦、掩模制作和 X 射线点光源等.因此,X 射线光刻目前还很难动摇光学光刻的地位.

3.3 离子束光刻

离子束曝光技术的研究起源于 20 世纪 70 年代,自从 80 年代液态金属离子源出现之后,离子束曝光技术才真正得以发展.由于离子质量比电子大,所以散射少得多,因此不易产生类似电子束光刻的那种邻近效应,而且具有比电子束光刻更高的分辨率.不过,离子束光刻尚处于发展阶段,需要解决抗蚀剂的曝光深度、掩模制作、高能离子束源及离子束的聚焦等问题,距离实用化还有一段路要走.

3.4 深紫外加波前工程

要想在 193nm 曝光波长下实现 100nm 线宽以下的图形,必须结合波前工程技术.目前波前工程技术主要有 (1) 改变照明条件,采用离轴照明^[10]方法,

通过改变照明函数调制成像系统的传递函数,提高图形的对比度和焦深。(2)对成像掩模^[6]进行调制,常用的方法是利用相位调制的相移掩模或利用振幅相位同时调制的衰减相移掩模。基本原理是:在高度集中的光掩模中,所有相邻的透明区域上相间隔地增加(或减少)一层透明介质,使透过这些相移层的光与相邻透明区透过的光产生相位差,利用光的相干性,抵消部分的衍射扩展效应,改变空间光强分布,使更多的能量从低频分配到高频上,弥补投影物镜的通低频阻高频的缺点,增大空间图像的反差,改善像质,使分辨率和焦深增大。(3)改变系统的传递频谱,基本原理是直接调制系统的传递函数,通过设置相移滤波器^[7-10]或振幅滤波器来降低物体的低频成分,弥补由于成像镜头数值孔径有限而损失的高频成分,从而提高分辨率和焦深。(4)多焦面曝光技术,离轴照明技术对结点图形的分辨率和焦深无改进作用,在原有掩模不变的情况下,采用多焦面曝光改进结点图形的分辨率和焦深是较为可行的方法。(5)临近效应校正^[11],在掩模上预先补偿,以便校正硅片上图形的畸变。(6)综合成像,以上几种波前工程技术使分辨率在一定程度上得到了提高,若将上述技术结合起来,可使分辨率进一步提高。

3.5 157nm 光刻、126nm 光刻和极紫外光刻

157nm 曝光可将传统光刻技术延伸到 100nm 以下,甚至可以制作低于 50nm 的尺寸。德国的 Carl Zeiss 公司、美国的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室、SVGL 公司、日本的尼康公司、荷兰的 ASML 公司正在开展这方面的研究。1999 年 9 月,在美国加利福尼亚州召开了光掩模技术会议,将 126nm 光刻作为 157nm 光刻技术的下一代产品。Carl Zeiss 公司、劳伦斯·利弗莫尔国家实验室在进行这方面的研究。极紫外光刻技术(EUVL)是有望突破 100nm 以下特征尺寸的新光刻技术之一。用波长范围为 11—14nm 的光,经过周期性多层膜反射镜,照射到反射掩模上,反射出的 EUV 光再经过投影系统,将掩模图形形成在硅片的光刻胶上。该技术利用短波长曝光,可以在很小的数值孔径下获得线宽小于 100nm 的图形,焦深足够长,满足实际生产的需要。劳伦斯·利弗莫尔国家实验室、NTT 公司、Canon 公司、Nikon 公司、俄罗斯别捷列夫物理研究所等在 EUVL 光刻领域做了很多卓有成效的工作。

3.6 干涉光刻技术

激光干涉光刻技术^[13]具有高分辨率(尺寸极限为四分之一波长)、大视场、不用掩模、系统相对简

单、成本低的特点,可以用于产生多种疏密结构和尺寸的光栅、孔、锥、柱、点等周期性图形阵列。

激光干涉光刻技术采用激光束干涉方法产生周期性图形:一维双光束单曝光产生线/间比为 1 的稠密光栅图形;在 X、Y 方向上各进行一次单曝光,产生稠密孔阵图形;采用一维变周期双光束双曝光,产生稀疏线阵图形;在 X、Y 方向各进行一次一维变周期双光束双曝光,则产生稀疏孔阵图形等。采用多光束的不同组合方法曝光可产生所需要的多种周期性结构图形,而任意形状的周期性图形的产生则需大量次数的曝光,实际上是难以实现的。而任意结构的图形产生可用成像干涉光刻技术,是一种基于掩模式干涉光刻技术。

3.7 原子光刻

在深紫外、极紫外、X 射线、离子束投影、扫描探针和电子束光刻等技术中,光源的电磁辐射系统及光学系统很复杂、昂贵,许多技术还十分不完善。电子束光刻技术虽然可以制作出 15nm 量级的结构图形,但速度慢、效率低、成本高、风险大。所以,到目前为止,科学工作者还都在积极寻求一种真正实用的方法。

近年来,随着现代物理学的发展,科学家们在原子光学理论和实验方面取得了可喜的成就^[16-19],激光场和磁场用于冷却和捕获原子的技术日益完善,为原子光学在实际中应用奠定了基础。原子光刻正是将原子光学这一基础性研究成果移用于高技术发展的一个典型例证。近年来,作为原子光学领域的一个重要组成部分,原子光刻的研究工作受到很大重视。由激光冷却原子技术所得到的准直度很好的钠、铝、铬等原子束,经激光驻波场所构成的原子透镜像列阵聚焦并沉积在硅片等基底上得到纳米图形。由于热原子束中原子的德布罗意波长约为 0.1nm 量级,其衍射极限比常规光刻中所用紫外光的衍射极限小得多,因此,原子光刻技术在纳米器件加工、纳米材料制作等领域具有重要的应用前景。

1992 年,在科技杂志上最早见到“原子光刻(atom lithography)”这个词。原子光刻是一种用原子实现刻印的新方法。其基本原理是利用激光梯度场对原子的作用力改变原子束流在传播过程中的密度分布,使原子按一定规律沉积在基底上(或使基底上的特殊膜层“曝光”),在基板上形成纳米级的条纹、点阵或人们所需的特定图案。原子光刻技术制作纳米图形的方案有两种:第一种是采用金属原子束,用共振光压使原子束高度准直化和形成空间强度分

布后,直接沉积在基板上.图1是用光驻波场操纵铬原子制作纳米结构的原理图和用原子力显微镜观测到的铬原子堆积线条(见文献[14]).另一种是采用亚稳态惰性气体原子束,用光抽运作用使其形成空间强度分布,再使亚稳原子破坏基板上的特殊膜层,最终用化学腐蚀方法在基板上刻印成形.原子光刻技术与光学光刻技术有本质的不同,它不需要昂贵的光学成像镜头,具有分辨率高、不受电荷影响、可并行制作图形、效率高和无临近效应等优点.虽然原子光刻技术问世不久,但已显现出勃勃生机.若使原子光刻真正进入应用阶段,还有很多困难需要克服,但我们坚信,若干年后一定会出现全新的面貌.

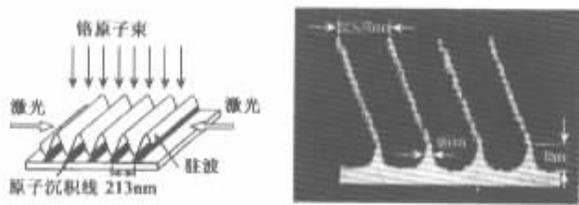


图1 铬原子在驻波场中的聚焦原理图和沉积的线条结构

4 纳米光刻技术的前景展望

纳米技术在国际上早已抛头露面,它使人类在改造自然方面进入了一个新的层次,即进入到原子、分子级的纳米层次.十几年前发展起来的纳米科技已成为倍受人们关注、最为活跃的前沿学科领域.正像产业革命、抗菌素及微电子技术的出现和应用所产生的巨大影响一样,纳米科技的发展将带来一场工业革命,成为21世纪经济增长的新动力.

纳米技术的核心是按人们的意志直接操纵单个原子、分子或原子团、分子团,制造具有特定功能的产品.美国Stanford大学的K. Eric Drexler曾预测,在2010年到2020年间可能实现1个原子储存1位计算机信息.据英国New Scientist杂志报道,日本日立公司1993年12月份宣布,已制成在室温下工作的单原子存储芯片,而且是一种非丢失性存储器.和现有的存储芯片相比,同样存储1bit信息,新存储器的功耗只是前者的百万分之一,面积仅为前者的万分之一.纳米光刻技术可用于纳米材料(如量子点、量子线、光子带宽材料)制作、纳米器件(如微电子器件、微芯片、特殊金属光栅等)加工、纳米长度测量(可置于显微镜中)、纳米物质的物理特性研究等方面.在原子光刻中,对原子束进行调制的理论和技术还可用于对DNA链和病毒进行处理等,在生物工程

中具有重要的应用前景.纳米光刻技术在信息、材料、生物、医疗等方面导致人类认识和改造世界能力的重大突破,从而给国民经济和国家安全带来深远的影响.

参 考 文 献

- [1] 白春礼.物理,2002,31(2):65[Bai C L. Wul(Physics),2002,31(2):65(in Chinese)]
- [2] 朱彤.科学世界,2001(2):34[Zhu T. World of Science,2001(2):34(in Chinese)]
- [3] 李志坚.院士论坛,1999,20(3):29[Li Z J. Academician Forum,1999,20(3):29(in Chinese)]
- [4] 沈能珏,孙同年,余声明等.现代电子材料技术.北京:国防工业出版社,2000.214—217[Sheng N J, Sun T N, Yu S M et al. Technologies of Modern Electronic Materials. Beijing:State Defense Industry Press,2000.214—217(in Chinese)]
- [5] 杨国光.近代光学测试技术.杭州:浙江大学出版社,1997.575—597[Yang G G. Modern Optical Testing Technologies. Hangzhou:Zhejiang University Press,1997.575—597(in Chinese)]
- [6] Levenson. IEEE Transaction on Electron Devices,1982,29(12):1828
- [7] Hiroshi F, Tsuneo T, Shinji O. J. Vac. Sci. Technol. B,1991,9(6):3113
- [8] Brueck S R J, Chen X L. SPIE,1999,3679:715
- [9] Von R. Binau, Owen G, Pease R F W. J. Vac. Sci. Technol. B,1991,10:3047
- [10] Horiuchi T, Takeuchi Y, Matsuo S et al. IEEE IEDM,1993,93:657
- [11] 杜惊雷.光学光刻中的邻近效应研究.四川大学博士学位论文,1999[Du J L. Investigation on proximity effect in optical lithography. Sichuan University Doctoral Dissertation,1999(in Chinese)]
- [12] Brueck S R J. Microlithography World,1998,7(1):2
- [13] Drodofsky U, Stuhler J, Brezger B et al. Microelectronic Engineering,1997,35(4):285
- [14] McClelland J J, Anderson W R, Celotta R J. SPIE,1997,2995:90
- [15] 罗先刚.原子力光刻技术探索研究.中国科学院光电技术研究所博士学位论文,2001[Luo X G. Study on atom lithography. Doctoral Dissertation, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences,2001(in Chinese)]
- [16] Philips W, Metcalf H. Phys. Rev. Lett.,1982,48(9):596
- [17] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E et al. Phys. Rev. Lett.,1985,55(1):48
- [18] Monroe C, Swann W, Robinson H et al. Phys. Rev. Lett.,1990,65(13):1571
- [19] Gan J H, Li Y M, Chen X Z et al. Phys. Lett.,1996,13(11):321

作者简介

陈献忠,男,1974年11月生,山东费县人,博士生.从事纳米加工技术和微电子光刻技术研究.

姚汉民,男,1944年11月生,研究员,博士生导师.微细加工光学技术国家重点实验室主任,中国科学院光电技术研究所所长.

陈旭南,男,1944年生,研究员,浙江大学光学仪器系毕业,博士生导师.