

纳米光刻技术*

罗先刚 姚汉民 严佩英 陈旭南 冯伯儒

(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 纳米科学技术将成为新世纪信息时代的核心.纳米量级结构作为研究微观量子世界的重要基础之一,其制作技术是整个纳米技术的核心基础,已成为当前世界科学研究急需解决的问题.文章针对目前的科技发展情况,介绍了几种纳米光刻技术的实现新途径、发展现状和关键问题.详细阐述了波前工程、电子束光刻、离子束光刻、X射线光刻、原子光刻、干涉光刻、极紫外光刻以及157 nm光刻的原理和实现难点.作为下一代各种光刻技术,它们都有望实现纳米量级的图形,但各种技术可实现的分辨力极限有所不同.50 nm以上分辨力可以用193 nm光刻结合波前工程和干涉光刻实现.50 nm左右的分辨力可用极紫外光刻、157 nm光刻和126 nm光刻实现.而电子束光刻、离子束光刻、X射线光刻、原子光刻则可望实现几个纳米的分辨力.但是这些技术的完善还有待于诸如光学系统、抗蚀剂、精密控制等等相关技术的成熟.文章还讨论了纳米光刻技术的应用前景.

关键词 纳米光刻,波前工程,电子束光刻,离子束光刻,X射线光刻,原子光刻,干涉光刻,极紫外光刻,157 nm光刻,126 nm光刻

NANOLITHOGRAPHY TECHNOLOGY

LUO Xian-Gang YAO Han-Min YAN Pei-Ying CHEN Xu-Nan FENG Bo-Ru

(State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication; Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Abstract Nanoscale science and technology will become a key issue of the new information century. Nanoscale structures provide an important foundation for studying the microscopic quantum world, thus their fabrication is a task that needs to be addressed urgently. The methods and key issues of several nanolithography technologies are reviewed, with detailed discussions on wavefront engineering and lithographies based on e-beams, ion-beams, X-rays, atoms and interferometry, as well as extreme UV(EUV), 157 nm and 126 nm wavelength lithographies. As next generation lithographies, they all can be used to fabricate nanoscale patterns, but each has its resolution limit. Resolution above 50 nm can be realized using 193 nm lithography combined with wavefront engineering or interferometric lithography. For 50 nm or so resolutions, EUV, 157 nm or 126 nm lithography can be used whereas e-beam, ion-beam, X-ray, or atom lithography can be used to fabricate structures of several nanometers. However, these technologies can only be perfected after other problems relating to the optical system, resist compound and precision control are solved. Future prospects are finally discussed.

Key words nanolithography, wavefront engineering, e-beam lithography, ion-beam lithography, X-ray lithography, atom lithography, interferometric lithography, EUV lithography, 157 nm and 126 nm lithography

1 引言

纳米技术(nanoscale technology)是一门在0.1—100 nm尺度空间内,研究电子、原子、分子运动规律和特性的崭新高技术学科.它的最终目标是人类按照自己的意志直接操纵单个原子,制造具有

特定功能的产品.其中纳米制造学是纳米技术的关键基础,它贯穿整个纳米科学.随着信息高速公路和全球通信技术的高度发展,超高频纳米器件的出现,微细加工技术已经可以制作小于100 nm线宽的图

* 国家自然科学基金资助项目
1999-11-09 收到初稿,2000-02-01 修回

形,并朝着制作出几十个纳米,乃至几个纳米特征图形的方向发展.美国、日本、德国等发达国家对纳米加工技术十分重视,纷纷投入了大量的人力物力进行研究开发.目前制作纳米图形有两个途径:一是采用现代化学技术,主要有原子层外延、等离子体增强化学气相沉积、有机金属化学气相沉积、分子束外延等;另一是采用光刻手段,在物体上制作出纳米量级图形,但这需要大幅度提高现有光刻技术的分辨力.通常采用的方法有离子束、电子束、极紫外、X射线、深紫外加波前工程、干涉光刻、扫描探针显微技术、用原子力显微镜修改结构、原子光刻.本文介绍几种主要的纳米光刻技术的实现方式和现状.

2 纳米光刻技术方法及现状

2.1 深紫外加波前工程^[1]

在193nm曝光波长下,要实现100nm以下线宽图形,必须结合波前工程技术.现有的波前工程技术主要有以下几种.

2.1.1 改变照明条件

通常采用离轴照明,主要方法有:四极照明、环形照明、新型照明、相位光栅照明以及偏振光照明等.主要原理是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.在离轴照明条件下,光经过掩模衍射后,通过投影物镜成像时,掩模图形的1级衍射光与0级光参与成像,弥补系统通低频阻高频的不足,从而改变传递函数.

2.1.2 对成像掩模进行调制

常用的办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.其基本原理是:在高度集成的光掩模中,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,使分辨力和焦深增大.相移掩模种类较多,如弱衰减型(attenuating PSM)、周边相移型(edge shifters PSM)、周期交替Levenson型、多位相值台阶型、带辅助图形型等等.无论哪种类型,相移层的厚度均可表示成 $d = \frac{\lambda}{2(n-1)}$,其中 λ 为曝光波长, n 为相移层折射率.

2.1.3 改变系统传递频谱

其主要原理是直接调制系统的传递函数,通过

设置相移滤波器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,从而提高分辨力和焦深.与离轴照明技术的区别是,它对系统传输的最高空间频率不能提高,只能通过使较低频率信号的能量衰减,来增大图像反差,达到提高分辨力增大焦深的目的.光瞳滤波也有一些局限性有待于进一步克服:(1)对不同的掩模图形仅有一种最优的滤波器相匹配,这要求滤波器在光瞳面上易于取放,这给投影物镜的设计增添了新的难度,在目前的投影物镜中难以达到,这大大限制了它的实用性;(2)光在滤波器上的吸收和反射引起的热量问题有待解决;(3)滤波器的材料和相移器的制造还需作大量研究.

2.1.4 对像进行多次处理

该技术也称为多焦面曝光技术.其内容包括:先在某个特殊的焦面上对硅片进行部分曝光;然后,不改变硅片水平位置,仅沿轴向移动硅片到另外的焦面上,对剩余部分曝光,空间像的最终结果是理想焦面上及理想焦面外光强的平均.此技术对结点(contacts)效果很好,焦面间距离在1.5—2.0倍 $\frac{\lambda}{(NA)^2}$ 之间时焦深最大.在离轴照明技术中,对结点图形的分辨力和焦深无改进作用,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力和焦深是较为可行的办法.多焦面曝光方法也存在一些缺点:过程复杂,生产率低,仅对结点图形有利,对线/空图形效果差.

2.1.5 邻近效应校正(物体预补偿、硅片预处理)

在掩模上预先补偿,以便校正硅片上图形的畸变.现有方法较多,由于掩模制作的难度较大,成本较高.

2.1.6 系统像差对分辨力影响

成像系统的振幅脉冲响应函数 h_s 是反映系统成像特征的量,通过改变 h_s ,可以影响离焦、球差、彗差、像散、场曲和畸变等,从而改变系统频率传递函数,可提高系统光刻图形的质量.为此国外一些研究人员开始结合分辨力增强技术研究像差对分辨力的影响.

2.1.7 综合成像

前面提出的分辨力增强技术在一定程度上都起作用,但若将上述技术结合起来,可使分辨力进一步提高.目前出现了将离轴照明、相移掩模、光瞳滤波以及多焦面曝光技术结合起来的研究热潮.

由于现有光学曝光技术具有成熟的工艺技术巨

大的产业支持,用分辨力增强的波前工程技术结合 248nm、193nm 光刻技术,很有希望实现低于 100nm 线宽图形的制作。

2.2 157nm 光刻^[2]

作为 193nm 光刻的下一代技术,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。目前在德国 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 公司都在积极开展这方面的研究。

随着 157nm 的激光器的商用化和对 157nm 波长吸收小的 CaF_2 的获得,该技术被提上研究日程。波长为 157nm 的激光器功率可与波长为 193nm、248nm 的激光器功率相比拟,其自然宽度仅为 10—15 μm ,小于 193nm 激光器的自然宽度,为 157nm 光刻提供了可靠的光源。此外, CaF_2 对 157nm 的吸收系数仅为 0.004cm^{-1} 。这些成果为 157nm 光刻提供了必要的技术条件。目前,对 157nm 低损失薄膜还需作大量研究。最近研究表明,最佳反射膜的反射系数达 97%—98%。157nm 掩模的制作方案采用 CaF_2 或 MgF_2 ,其温度、应力参数还须作具体研究,157nm 光刻掩模的修补和制作技术还有一些难点需要克服。抗蚀剂的研究是很重要的一个方面,表面成像抗蚀剂可用于 157nm 光刻,化学放大抗蚀剂也有可能用于光刻。目前还没寻求到 157nm 波长传输充分的高折射率材料。尽管如此,157nm 光刻是一种实现 100nm 以下线宽图形的可能方案之一。目前,SVGL 公司已具备获得质量和数量都能满足需要的 CaF_2 分束器的能力,正在鉴定德国镜片商 SCHOTT 公司成为其首家 157nm 技术中所使用的 CaF_2 材料的来源。预计在 2000 年第 4 季度,157nm 光刻技术将以微扫描机首次出现。

2.3 126nm 光刻

1999 年 9 月,在美国加利福尼亚州蒙特雷召开的光掩模技术会议上,专门讨论了光学光刻的前景,将 126nm 光刻作为 157nm 光刻技术的下一代产品。目前德国 Carl Zeiss 公司、美国的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室正在秘密开展这方面的研究。

2.4 极紫外光刻^[3]

极紫外光刻(EUVL)技术是有望突破 100nm 以下特征尺寸的 5 种新光刻技术之一。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。

自 1986 年 NTT 公司报道软 X 射线缩小投影曝光方法以来,国际光刻技术学术界在如何实现更高分辨力方面一直存在两种观点:一种认为应继续挖掘光学投影光刻的潜力;另一种则认为应研究新型的软 X 射线缩小投影曝光方法。尽管光学投影光刻因有良好的继承性而使前一种观点一度占据上风,但因软 X 射线波长短,实现相同的分辨力可采用小得多的数值孔径,焦深容限大为改善,因而同样受到了高度重视。虽然目前软 X 射线投影式光刻离实用还有一段距离,但最终取代光学投影式光刻的统治地位是不可避免的。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室在推荐增强美国竞争力、保持美国集成电路技术领先地位而制定的“跳步战略”中,把软 X 射线光刻列为重要发展项目。其目的是在研究和生产上跳过硬 X 射线接近式光刻直接跨入软 X 射线投影式光刻,计划在 10 年内投资 5 亿美元使软 X 射线投影式光刻技术商品化,这标志着软 X 射线投影式光刻将成为新一代光刻设备主流。该项研究于 1991 年得到美国能源部支持,参加研究工作的有 Lawrence Livermore, Sandia, Lawrence Berkeley 3 个国家实验室和 8 家公司(AT&T、Ultratech Steppe、Intel、AMD、KAL Instruments 等),到 1996 年美国能源部停止资助,改由公司联合资助并将软 X 射线改为极紫外光刻(EUVL)。其目标是研究开发 EUV 光刻所必需的关键技术,获得 100nm 以下的特征图形。NTT 公司、Canon 公司、Nikon 公司、俄罗斯列别捷夫物理研究所等也在 EUVL 光刻领域做了很多卓有成效的工作,在多层膜的理论 and 制造上获得了较大的进展,Mo/Be 多层膜反射率可达 69.4%。在光源、抗蚀剂等方面也获得了突破,得到了高能等离子体 EUV 光源和顶层表面成像抗蚀剂。他们用投影式的方法大都曝出了 0.15 μm 的线条,达到 30—50nm 的套刻精度,部分还开展了 0.1 μm 以下分辨力的研究。如贝尔研究所已成功研制成 0.05 μm 图形。在 420 MPa 的压缩力作用下,在 13.4nm 的波长处,Mo/Si 反射率可达 67.4%,67.5%。在 330 MPa 的张力下,在 11.4nm 的波长处,Mo/Be 反射率可达 69.4%,70.2%。改变 Mo/Si 的比例,可减小应力,但是反射率下降。变化基底应力,可减小 10% 的应力,反射率仅下降 2%。采用后沉积退火法,可减小 75% 的应力,反射率仅下降 1.3%,但在沉积过程中加热没有实际优点。缓冲层

法采用非温度缓冲层技术来补偿应力效应.用多晶硅和 Mo/Be 作缓冲层可基本消除薄膜应力,而反射率仅损失 1%.

从目前情况来看,极紫外光刻极有可能在最近两年达到实用,投入生产.

2.5 电子束光刻⁴¹

以电子束作为集成电路光刻手段的研究几乎是与光学曝光同时开始的.光学曝光的分辨力和焦深主要受到光源波长和透镜数值孔径的限制.而电子束的辐射波长则可以通过增大能量来大大缩短.因此电子束曝光的分辨力远远超过光学光刻分辨力.光学光刻目前所达到的分辨力用电子束在 10 多年以前就已经达到了.电子束曝光利用电磁场将电子束聚焦成微细束,辐照在电子抗蚀剂上.由于电子束可方便地由电磁场偏转扫描,复杂的电路可直接写在硅片上而无需使用掩模版.由电子束曝光制作的最小器件尺寸可达 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.由于电子束采用把电路图形一个像素一个像素地扫描曝光到硅片上,速度极慢,无法适应大工业批量生产的需要.尽管如此,电子束曝光却是制作光学掩模版的主要工具.

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.电子束曝光的焦点在于如何提高曝光速度.方法之一是采用新型六硼化镧阴极和热场致发射阴极,以提高阴极发射电流密度,可以在同样曝光剂量下减少曝光时间.另外一个方法是研制新型电子抗蚀剂.其中最引人注目的是 1999 年以来出现的化学放大电子抗蚀剂.初期的电子抗蚀剂的灵敏度为 100—500 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$,而目前的化学放大电子抗蚀剂的灵敏度为 1—5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.当然这类新型电子抗蚀剂还存在热稳定性差以及存放期效应等问题,还须进一步研究.目前化学放大电子抗蚀剂还无法普遍应用于电子束曝光工艺中.

电子束曝光技术发展的一个新方向是采用扫描隧道显微镜作为曝光手段,可实现原子级分辨力.当然这方面的研究还处于初步阶段,真正实现能适用于纳米加工的电子束曝光技术还需作大量的研究工作.由于电子质量极轻,在感光胶中的散射范围很大,这些散射电子会影响邻近电路图形的曝光质量,因而邻近效应很难控制.邻近效应直接与电路图形的形状及密度有关,如何克服邻近效应一直是电子束曝光技术中的一个重要研究课题.为了提高生产率和减小邻近效应,目前正在广泛研究限定角度投

影电子束光刻技术.

2.6 X射线光刻⁵¹

光学曝光所能达到的极限分辨力与工作波长成正比,与透镜的数值孔径成反比.目前,曝光波长的进一步缩短和数值孔径的增大都受材料、光刻工艺等因素的限制,因而必须寻求新的技术方案.由于 X 射线的波长很短,能满足超大规模集成电路发展的需要,近年来得到了广泛的重视.

X 射线可用高能电子束轰击不同的金属靶材料产生,也可用激光等离子体方法获得,即用超短脉冲激光辐照铜或铁表面,使铜或铁原子变成等离子体,当等离子体态还原为基态时,会产生 X 射线.但最有效的 X 射线源是高能同步辐射加速器所产生的同步辐射.用于超大规模集成电路光刻的 X 射线波长通常在 1—100nm 之间.其中 10—14nm 波段称为极紫外,上面已有详细论述.目前,通常采用 10nm 以下的曝光波长.

X 射线曝光过程与光学曝光过程类似,都是将掩模版上的图形转移到硅表面的光刻胶上.由于到目前为止还无法对 X 射线聚焦,采用的曝光系统基本都是近贴式和 1:1 投影式.X 射线曝光所用的掩模版与光学掩模版不一样,X 射线掩模版是由氮化硅或碳化硅等轻元素材料做成 1—5 μm 厚的薄膜底版,然后在上面根据电路图形要求,沉积 0.4—0.7 μm 厚的重金属层(通常为金或钨),作为吸收层.感光胶上的曝光区与非曝光区是由掩模版上两种材料对 X 射线的不同吸收系数来决定的.由于 X 射线目前是 1:1 式,即要制作 80nm 的线条,掩模上的图形尺寸也必须是 80nm,而且掩模本身仅为几个微米厚的薄膜,这使掩模的制作具有相当大的难度.同时还有掩模版使用过程中的受热变形问题.这些是 X 射线光刻技术必须解决的难关.

2.7 离子束光刻⁶¹

用离子束进行抗蚀剂的曝光始于 80 年代液态金属离子源的出现.最简单的液态金属离子源是一根金属(钨或钼)针,在针尖端附有镓或金硅合金,通过加热使其熔化,然后通过加外场使液态金属表面产生场致离子发射.由于离子是从一个在外电场作用下形成的极小的液体尖端发射的,其发射面积仅有几个纳米,因而可以较容易地利用离子光学系统将发射的离子聚焦成微细离子束,进行高分辨率离子束曝光.

离子束曝光技术具有一些电子束无法比拟的优点.与电子相比,最轻的离子也要比电子重近 2000

倍.因此离子在感光胶中散射范围极小,邻近效应几乎为零.此外,由于离子质量重,在同样的能量下,感光胶对离子的灵敏度要比对电子高数百倍.这些优点使离子束更适合于作为光刻工具.但聚焦离子束方法也存在一些局限性.首先,液态金属离子源发射的离子具有较大的能量分散,而聚焦离子束系统所采用的静电透镜有较大的色差系数.由于色差的影响,无法将离子束聚焦成电子束一样细,因而其分辨率比电子束曝光低.其次,由于离子质量重,在感光胶中的曝光深度有限,例如,能量为70kV的镓离子在感光胶中的曝光深度小于 $0.1\mu\text{m}$,从金硅合金离子源发射的能量为200kV的硅离子,其曝光深度也不过为 $0.5\mu\text{m}$.相比之下,20kV能量的电子束可曝光 $1\mu\text{m}$ 以上的感光胶,有限的曝光深度大大限制了离子束曝光的应用范围.

离子束曝光在集成电路工业中主要用于光学掩模的修补和集成电路芯片的修复.在光学掩模版的制造过程中,难免会产生一些缺陷,如多余的烙斑或不必要的透光斑,利用聚焦离子束溅射能力可将多余的烙斑去掉,在离子束扫描过程中同时通入某种化学气体,则可把碳或钨沉积到透光斑缺陷上.用离子束还可切断芯片上的某一组连线或接通某一组连线,从而可在芯片上纠正设计错误,提高芯片利用率.目前,美国、日本等国家已有投影式离子束光刻机.现在正在研究利用离子束投影制作小于100nm的图形.离子束投影光刻采用泛光照明模板和光学静电投影将掩模图形微缩,并聚焦在涂有抗蚀剂的片子上.欧洲应用微电子开发项目支持的奥地利离子微制造系统有限公司和美国先进光刻集团公司是从事离子束投影光刻研究的主要公司.

离子束投影光刻的主要优点有:

(1)可采用分布重复投影结构,可利用光学抗蚀剂(G线、I线或DUV的抗蚀剂)进行立体曝光,对抗蚀剂厚度或基底材料不敏感.

(2)可与光学光刻混合使用.

(3)焦深大,使用极小的NA就足以使离子光学镜头实现 $25\text{mm}\times 37\text{mm}$ 的整片芯片曝光,衍射效应可忽略.

(4)在离子束投影中,静电镜头能够对改变线形焦点特性进行电子学方面的调整,并能结合延时反馈控制环或图形锁定装置进行调整,克服电子漂移和其他束流的紊乱,稳定复印图形,可通过调节电场控制放大倍率和焦面.

(5)离子的积存能量具有有效性和局部性,因此

离子束产生的邻近效应微不足道,产生的热量可以忽略.离子在抗蚀剂材料里减弱了散射现象,对曝光抗蚀剂来说,离子仅需要电子剂量的1%—10%.离子一般停留在抗蚀剂里面,对敏感的衬底结构损伤小.

离子束光刻的主要缺点有:(1)离子束需要在真空下工作,硅片和掩模操作不方便;(2)离子束是带电粒子,由于空间电荷使图形的清晰程度和图形位置精度受限;(3)离子束可使下层基底受损;上述这些缺点与其优点相比,可以忽略.

离子束光刻面临的技术挑战是:(1)硅薄膜掩模技术需要进一步发展;(2)为了满足生产需要,离子源寿命需延长;(3)套刻技术还须进一步研究;(4)产量和成本要求还需作出指标要求.

2.8 干涉光刻^[7]

干涉光刻技术是利用干涉效应以接近最终极限的分辨率曝光周期性图形的技术.当光束的2个相干平面波以2倍的 θ 角相交时,便会形成一种间距

$P = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$ 的明暗相间的干涉条纹.单个的明暗条纹

尺寸约为 $\frac{\lambda}{4\sin\theta}$,由于几何上平面波夹角 θ 可能为

90° ,因此用光学方法曝光可以产生的密集图形的最小极限尺寸为 $\frac{\lambda}{4}$.对CD图形的产生基本上无限制,

所限制的仅仅是明暗条纹的间距P.用i线光束对独立线条曝光,已经证实可得到50nm的图形.采用193nm光源曝光时,CD尺寸为50nm以下.其分辨率的限制并非来自光学系统,而是来自抗蚀剂的机械特性.干涉光刻技术可生产出大面积小特征尺寸的能力,它放宽了传统光刻中的许多约束,但增加了多次曝光的复杂性.

目前提出的影像干涉光刻技术是用一种光学装置所收集的大量空间频率信息来代替干涉光刻技术中的单独平面波.通过离轴照明技术将掩模产生的空间高频信号转换成物镜可以接收的空间低频信号,然后再由镜头后面的干涉光学系统,将这些低频空间信息在硅片平面转换回原始频率.有些曝光图形需要足够范围的空间频率来实现正确的图形.目前,新墨西哥大学和Sandia国家实验室正在开展这方面的研究工作.

2.9 原子光刻

原子既不带电,也不能穿透物质,必须寻求新的操纵原理和方法.原子比电子、中子重,总角动量和磁矩比电子、中子的大.原子可以是玻色子也可是费

米子,可以通过激光、静电场或磁场改变原子的内部结构,还可利用微细掩模、菲涅耳波片等物体改变原子的运动轨迹.用激光照射原子,使原子吸收或激发光子,从而改变原子的运动.在梯度光场作用下,形成具有稳定平衡点的光场分布,原子在偏离平衡点的任一位置上均受到一个回复力.在陷阱中,受量子特性的影响,捕获力具有不稳定性,导致速度变化,形成热源,使原子加热,导致原子在陷阱中停留时间有限.主要的技术途径有以下三种:基于微细掩模的原子光刻其线宽可达 $\sqrt{\lambda_{ab} D}$;基于捕获原理(磁场、激光)的最小线宽为 λ_{ab}/B ;基于湮灭原理的极限分辨力 $\ll 10\text{nm}$.

影响纳米图形质量的主要因素有:

(1) 原子束的发散角:纵向速度引起类似于色差的扩散,横向速度引起类似于球差的扩散,由于德布罗意波长引起的衍射也将使原子扩散;

(2) 原子与梯度场的作用时间;

(3) 基底与驻波场之间的距离;

(4) 激光强度大小:高强度 SW 中,调谐 δ ,当 $\delta > 0$ 时,原子速度变慢, $\delta < 0$ 时,原子速度变快;低强度 SW 中,调谐 δ ,当 $\delta > 0$ 时,原子速度变快, $\delta < 0$ 时,原子速度变慢;中等强度 SW 中,调谐对速度的影响复杂,取决于激光调谐、激光强度和原子速度;

(5) 激光束剖面形状;

(6) 激光的调谐频率;

(7) 激光梯度场的空间分布.

为了得到理想的光刻图形,必须对上述影响图形质量的主要因素进行仔细调节.

当然,还有一些技术也可实现低于 100nm 尺寸的图形.如用原子力显微镜修改结构,形成单原子构成的纳米图形;利用扫描探针显微技术可实现几个纳米的图形,等等.但总的来说,所有这些技术还需要做大量的工作才能完善.

3 我国纳米光刻技术研究现状

在 1999 年度自然科学基金指南中,将极紫外光刻的研究列为重点项目.中国科学院长春光学精密机械研究所在极紫外关键单元技术的反射膜技术等方面做了大量工作.中国科学院光电技术研究所微细加工国家重点实验室设计成功极紫外成像光学系统.微细加工国家重点实验室纳米技术小组还瞄准纳米光刻技术的前沿,结合我国实际初步开展了原

子光刻^[1]、波前工程技术结合 193nm 光刻、干涉光刻技术等研究,在实验室实现低于 100nm 的图形.目前正在准备开展以下研究工作:

(1) 进一步改进原子光刻参数控制纳米图形的面形,制作特殊光学元件;

(2) 移动基底制作 3 维任意图形;

(3) 结合刻蚀技术制作纳米器件和具有各种磁、光、电特性的纳米材料;

(4) 利用不同的原子交替沉积,并行制作新材料;

(5) 结合全息技术制作纳米图形;

(6) 结合菲涅耳波片制作纳米图形;

(7) 结合磁场制作纳米图形.

国内还有其他一些单位也在开展这方面的工作,但总的投入经费较少,力度还远远不够.为了抢占 21 世纪信息科学的制高点,有关方面还须引起重视,加大投入,组织精干力量进行科技攻关.

4 纳米图形加工技术的应用前景

前面介绍的各种技术都有希望实现低于 100nm 的线宽图形,最终哪一种技术将得到广泛应用,除了技术方面的因素外,经济也是一个决定性的因素.纳米光刻技术的应用较广泛,其中包括纳米器件(微电子器件、量子器件)、纳米材料(低维量子点、量子线材料、光子带宽材料)、纳米长度测量标准(可置于显微镜中)、光学光栅制作、新型传感器、纳米电子技术,以及纳米机器人等.在纳米光刻技术完善后,可以制作纳米级硬件,今后可广泛应用于信息科学和生命科学中.

纳米光刻技术不仅为进入纳米量级图形加工提供新方法,而且为下一步实用技术研究开发,物质到达纳米量级领域的量子效应等材料物理性能研究,以及相关技术领域研究提供技术基础,开辟了从宏观到微观纳米图形制作的新途径.对制造微芯片、特殊金属光栅、量子器件等高新技术向更高密度、更高速度、更高分辨率和超微细化发展,促进国防科技水平和信息科学的进步,以及捕获和控制原子,处理诸如 DNA 链和病毒等,促进医学和生命科学的进步,都具有重大而深远的意义.

参 考 文 献

- [1] Bruning J H. Solid State Technology, 1998, 41(11): 59
- [2] Bloomstein T M et al. J. Vac. Sci. Technol., 1998, B16(6): 3154

(下转第 350 页)