

软 X 射线投影光刻技术

Photoetching Technology of Soft X-ray Projection

王占山 曹健林

(中科院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

一、引言

本世纪八九十年代大规模集成电路芯片的制造技术取得了惊人的发展,由此带来的信息革命冲击着社会的每个角落。大规模集成电路芯片制造技术的关键是光刻技术,它的进步决定着集成电路芯片制造技术的发展。在过去的十几年间,每隔 3~4 年集成电路就更新换代一次,这表现为集成电路中最小刻线宽度的逐渐缩小。在 1995 年,人们已经可以生产出最小线宽达 $0.35\mu\text{m}$ 、容量达 64M 的动态随机存储器。美国半导体协会光刻计划表明,到 2004 年人们将可以生产最小线宽达 $0.13\mu\text{m}$ 、容量达 4G 的动态随机存储器。而现在正在研究的使用波长 248nm(KrF)和波长 193nm(ArF)的准分子激光投影光刻技术,只能生产最小线宽达 $0.25\mu\text{m}$ 的集成电路,使用相移掩模等技术还可以将最小刻线宽度再减到 $0.13\mu\text{m}$,而要生产线宽小于 $0.13\mu\text{m}$ 的集成电路,用现有的光刻技术无法实现,必须采用新的光刻技术,其中包括 X 射线接近式光刻、电子束投影光刻和离子束投影光刻,以及软 X 射线投影光刻等。经过多年的研究,人们逐渐认识到软 X 射线投影光刻技术最有可能成为下一代大规模集成电路的核心技术,并以此发展起下一代大规模集成电路的生产设备。

以美日为代表的集成电路生产设备制造技术的先进国家,不惜重金,从 80 年代中期开始了软 X 射线投影光刻技术的全面研究,到 1988 年日本 NTT 公司率先完成了软 X 射线投影光刻的原理实验。从那以后,以 NTT 公司为代表的日本科学家制做了两代样机,在 $20\times 25\text{mm}^2$ 面积上实现了最小刻线宽度达 $0.15\mu\text{m}$ 的图形制备;以 Sandia 和 Livermore 国家实验室以及 AT&T 公司 Bell 实验室为代表的美国科学家在 1990 年实现了最小刻线宽度达 $0.05\mu\text{m}$ 的图形制备,到 1996 年底已研制了两代软 X 射线投影光刻机原理样机,并用后来研制的缩小倍率为 10x 的样机,成功地在直径为 0.4mm 范围内生产了

晶体管门电路和电容器等器件,实验表明软 X 射线光刻技术完全适于生产大规模集成电路。美国科学家的研究还表明,限制软 X 射线投影光刻技术发展的障碍已逐步得以排除,完全可以发展成新的光刻技术,成为生产下一代大规模集成电路生产设备的核心技术。

二、软 X 射线投影光刻原理及主要组成部分

软 X 射线波段范围是 $1\sim 30\text{nm}$ 。在这一波段,所有物质的折射率都小于 1,且接近于 1,这就是说物质对软 X 射线的折射能力很差,加之任何物质对软 X 射线都能吸收,所以无法制成像可见光波段大量使用的折射透镜。由于物质与软 X 射线相互作用,故而在软 X 射线波段,任何材料的单层膜正入射反射率都远小于 1,因而也无法制成单种材料的正入射反射镜。因此,在这一波段就要采用特殊的多层膜光学元件。

软 X 射线多层膜反射镜是软 X 射线光学重要元件中的一种。从原理上讲,它是晶体应用于硬 X 射线的延伸。它的出现则是光学技术进步的产物。1972 年,美国 IBM 公司的 Spiller 率先提出用交替蒸镀两种材料的多层膜,可以大幅度提高其对软 X 射线的反射率。从那以后,各国科学家都在努力提高软 X 射线多层膜的制备技术。到目前为止,人们已可以在 $11\sim 14\text{nm}$ 波段制成反射率接近 70% 的正入射多层膜反射镜,从而把由多块反射镜组成的高质量光学系统从红外、可见和红外波段拓展到软 X 射线波段,用多层膜反射镜可以发展起高分辨率的光学仪器,如显微镜、望远镜、投影缩小系统、光谱仪等。在这些应用中,还当首推软 X 射线投影光刻技术。目前,正在进行商业开发研究的准分子激光投影光刻机使用的波长为 248 和 193nm,当波长继续缩短时,已无很好的材料可作光学透镜。因此,多层膜技术把光学系统应用的波长跨越了一个量级,把高分辨率光学系统从深紫外过渡到软 X 射线。可以毫不夸张地说,软 X 射线多层膜技术是软 X 射线

光学中一个重要的里程碑,它使得软 X 射线投影光刻成为可能。

软 X 射线投影光刻机主要由软 X 射线源、聚光系统、反射式掩模和载物台、投影光学系统、硅片和载物台组成。

软 X 射线光源有多种,目前采用的主要有同步辐射和激光等离子体光源。和同步辐射相比,激光等离子体具有造价低、易于操作、安全可靠的优点,并可采用两台光源配一套光刻系统,完全避免了采用同步辐射带来的由于仪器设备故障引起的停产。在研究的初期,大都采用同步辐射,这主要是由于同步辐射稳定,并且不像激光等离子体光源会产生对光学元件有害的碎片,但要真正使软 X 射线投影光刻走向生产,必须采用激光等离子体光源,问题的关键是如何使激光等离子体光源产生的有害碎片减到最小以至完全消除。

聚光系统收集由光源发出的软 X 射线,并以合适的光学特性照射到掩模上。其主要的光学性能包括照明区的大小、发散度、均匀性、相干度和照明方向等,这些都是由缩小投影成像系统的要求决定的。

反射式掩模是软 X 射线投影光刻的关键元件之一,它具有大的机械和热稳定性。由于有投影光学系统,其特征尺寸较大,用现有的方法完全可以制造。在软 X 射线投影光刻之前,人们曾将软 X 射线接近式光刻列为下一代集成电路的生产技术。但经过近 30 年的努力,人们很难制备应用于大规模集成电路生产中的线宽小于 $0.1\mu\text{m}$ 的、无应力畸变的透射式掩模。所以到目前为止,人们普遍认为,X 射线接近式光刻只能生产特征尺寸大于 $0.15\mu\text{m}$ 的集成电路芯片。软 X 射线光学特别是多层膜技术的发展,彻底改变了这种局面,人们有可能利用现有的技术加上进一步攻关,将软 X 射线投影光刻发展成一种实用的技术。

多层膜反射镜组成的缩小投影成像系统是软 X 射线投影光刻机的核心。它一般是由 2~4 块多层膜非球面反射镜组成,该系统的成像质量好坏决定了光刻机工作的极限水平。对光刻机来讲,随着其可刻线宽的减小,焦深变短是光刻技术的最严重限制。由于软 X 射线投影光刻采用 $11\sim 14\text{nm}$ 的软 X 射线,在数值孔径 0.1 左右时,就可以得到 $0.1\mu\text{m}$ 的最小刻线宽度,并可获得 $\pm 1\mu\text{m}$ 的焦深,这样的焦深对于大规模生产是必须的。限制该系统质量的因素主要有光学元件的加工、多层膜制备和光学检测与装校技术。

反射式掩模和硅片要有极高的对准精度,对于 $0.1\mu\text{m}$ 的刻线宽度,其对准精度要达 $0.02\mu\text{m}$ 以下,这几乎是现有光学技术的极限,也是软 X 射线投影光刻机能否成功的一大难点。

三、软 X 射线投影光刻的关键技术

正如可见光和紫外光刻机一样,软 X 射线投影光刻机也将集中体现软 X 射线光学和精密机械制造技术的最新成果。要想成功地研制出软 X 射线投影光刻机,必须解决多层膜制备、光学元件的超精密加工和检测、光学系统装校、无污染光源、反射式掩模制备、光刻胶、精密对准及扫描、器件制造等关键技术。

多层膜反射镜是投影光刻得以实现的前提。多层膜的膜厚只有几个纳米,它是光学发展到一定阶段的产物。在投影光刻系统中含有多层膜。为提高系统光的传输效率,在制备多层膜的过程中,应尽量提高多层膜的反射率。目前,Mo/Be 和 Mo/Si 多层膜在 $11\sim 14\text{nm}$ 波段得到了接近 70% 的反射率。多层膜反射软 X 射线具有光谱选择性,在 $11\sim 14\text{nm}$ 波段带宽为 1nm 左右,为了系统而有效地传输软 X 射线,多层膜之间要进行匹配,以使不同多层膜反射峰尽量重合。制备多层膜会在膜层间形成应力,这些应力会导致镜面面形改变,因此要在镀膜过程中消除膜层内应力。同时,有些多层膜是镀在曲面基板上的,不同的入射角要求多层膜膜厚不同,这样要在曲面基板不同位置处有不同的膜厚。这些要求使得制备多层膜更加困难。因此,要想实现软 X 射线投影光刻,必须解决多层膜的高反射率、带宽匹配、应力、曲面基板上膜厚随入射角变化而变化等关键问题。

光学元件超精密加工与检测是投影光刻得以实现的另一大基础。软 X 射线投影光刻所用的光学元件不仅要有较高的面形精度,而且要有较低的表面粗糙度,对于要生产线宽 $0.1\mu\text{m}$ 集成电路的系统来讲,投影光刻物镜的波差的均方根值要小于 1nm ,表面粗糙度均方根值要小于 0.2nm 。这样的精度是极难达到的。经过努力,美国 Tinsley 公司已从 80 年代末能加工面形误差精度达 5nm 的元件发展到现在能加工面形误差精度达 0.6nm 的元件。这是目前世界上最高的光学加工水平。光学检测是光学加工的基础,没有光学检测就无从知道光学加工的好坏。为检测投影光刻机光学元件的面形误差,采用了当今最先进的检测技术如精密干涉测量法、STM 和 AFM 技术等。

软 X 射线投影光刻系统的装校包括两部分内容,首先是光学元件的固定。对软 X 射线投影光刻系统,光学元件固定后的面形误差不应大于固定前的 1.2 倍,这要求机械固定引起的光学元件畸变必须在亚纳米量级。整个系统装校完成后,系统波差的均方根值必须小于 1nm ,为此就必须要用高精度干涉仪调整。调整完成后,系统的性能要能长期保

存。这种光学装校技术是目前光学技术的极限水平。

要想使光刻系统能长期工作,光源不应给光学元件造成任何损伤;而现在采用的激光等离子体光源在不采取特殊措施时会产生许多有害光学元件的碎片。美国科学家通过深入研究,逐步完成了无污染光源的研制。通常情况下,激光等离子体光源是用高强度激光打击固态的金属靶形成的,这时产生的有害碎片较多,这种光源无法采用。通过研究人们发现,让激光打质量受限(mass-limited)的薄膜靶或丝线靶,可以大幅度减少碎片;再在激光打靶的靶室通入氦气以及放置滤光片和消碎片的机械装置,就可以在 6.3×10^5 个激光脉冲打靶后,使多层膜反射镜的反射率降到初始值的68%。要想最后实用,必须发展无污染光源。目前发展的气体喷射激光等离子体光源是让激光打在由喷嘴喷出的高压气体上,产生有用的软X射线,而不产生任何有害的碎片。这种光源研究已取得突破性进展。

多层膜反射掩模的制备是极其重要的。要用缩小倍率为5x的光刻系统生产线宽 $0.1\mu\text{m}$ 的集成电路,多层膜反射掩模的最细线宽为 $0.5\mu\text{m}$,面积大于 $100 \times 100\text{mm}^2$ 。在生产过程中不许有大于 $10^{-1}/\text{cm}^2$ 的缺陷,同时保证多层膜的反射率大于60%。目前已有多种方法研究多层膜反射掩模,已成功地解决了大面积无缺陷掩模的制备。

在软X射线波段,常规光刻胶的吸收系数很大, $1/e$ 的衰减长度不足 $0.2\mu\text{m}$ 。在这样的条件下,采用常规的光刻胶无法满足器件制备过程所需的分辨率、灵敏度、抗刻蚀性能和光刻胶侧壁倾角的要求,因此必须开发新的光刻胶工艺。为适应软X射线投影光刻技术,人们已成功地发展了多层膜光刻胶技术和表面成像技术,解决了使用常规光刻胶过程中出现的问题。

精密对准和扫描技术是软X射线光刻技术实现生产的必备技术。美国科学家采用磁悬浮工作台和莫尔条纹技术成功地解决了高精度的对准。日本科学家也成功地解决了反射式掩模和硅片的同步扫描问题,这为开发软X射线投影光刻机奠定了基础。

要使用软X射线投影光刻生产集成电路,必须使器件生产过程与现有的生产技术相一致。美国科学家用现有的原理装置成功地生产了门电路,结果表明软X射线投影光刻技术已可适合于大批量生产。

四、发展软X射线投影光刻的设想

以集成电路为核心的微电子技术已成为一个国家综合国力的重要体现,是国家高技术水平的重

要标志,是各国竞争的焦点,这种竞争又集中表现在以光刻机为核心的微细加工设备的竞争上。

目前,软X射线投影光刻技术倍受美日两个微细加工设备大国的重视,纷纷投巨资开展相应关键技术的研究及实用光刻机的研制。1995年前,美国主要由Sandia和Livermore国家实验室以及AT&T公司Bell实验室开展这方面的研究,随着研究的深入和软X射线投影光刻技术地位的逐步确定,从1995年开始,美国成立了由美国半导体协会、大规模集成电路生产单位(AT&T公司、Inter公司、AMD公司)、设备制造单位(Ultra Tech Stepper公司、KLA公司、Micron公司)以及光学元件的研制单位(Tropel公司、Tinsley公司、Jamar公司)和Sandia与Livermore国家实验室组成的联合体,共同开展与软X射线投影光刻技术有关的关键技术研究和实用光刻机的研制。他们的研究表明,到目前为止,影响软X射线投影光刻的关键技术均获得重大进展,软X射线投影光刻机的制造是完全可能的。在日本,投影光刻的研究工作则集中在NTT、Nikon和日立三家公司和姬路工业大学,他们的研究也取得了许多重要成果,如NTT公司获得了大面积的曝光区。1997年以后,美日两国的科学家正在朝工业化生产用软X射线投影光刻机研制方向努力,预计到2005年可以接收定单,2007年可用软X射线投影光刻方法生产大规模集成电路。

近年来,软X射线投影光刻的关键技术及系统研究取得了重大进展,对其关键技术和系统研制的方案已经比较清楚;另一方面,软X射线投影光刻技术也综合了当前光学和精密机械多方面的最新成果。为此,必须充分利用现代各种科学研究方法深入开展软X射线投影光刻技术的研究。无论从国家利益还是商业利益考虑,软X射线投影光刻关键单元技术和整套设备都将在相当长的时间内,属于国际前沿的高技术研究,很难从它国全面引进。

为了彻底改变我国微细加工技术的落后面貌,解决相关领域特别是微电子加工领域中严重障碍国家经济建设和科学发展的重大关键技术难题,在我国开展软X射线投影光刻关键单元技术研究和光刻机设备的研制,是十分迫切的,意义重大而深远。与众多新学科比较而言,在软X射线光学技术上我国与国外差距最小。我国在软X射线多层膜技术、光学元件超精加工与检测、软X射线光学系统研制、软X射线光源、软X射线光刻实验方面均已取得了重要进展。这些研究为深入开展软X射线投影光刻提供了技术基础。目前,我国有关部门已对软X射线投影光刻关键技术的研究和设备的研制开始了调研论证,可望在近期得以实施。

(责任编辑 王宏章)