

现代微加工技术与核靶制备*

王珏

(同济大学波耳固体物理研究所, 上海, 200092)

现代微加工技术是制备具有微米、亚微米甚至纳米结构器件的重要手段。文章介绍了现代微加工工艺中的薄膜技术、图形技术以及刻蚀技术, 根据核靶技术的发展, 阐明了现代微加工技术在核靶制备领域的广阔应用前景。

关键词 微加工 薄膜技术 图形技术 刻蚀技术 核靶制备

传统意义上的核靶通常是具有一定厚度的自支撑膜, 靶制备一般仅由薄膜淀积技术及相应的脱膜工艺构成^[1-3]。近年来, 随着强激光领域研究的迅速发展, 为传统的核靶制备增加了许多新的研究内容^[4], 对于各种构型复杂的靶的需求, 大大促进了核靶制备技术的发展。如何在薄膜制备的基础上, 采用全新的加工技术以达到具有特殊构型的靶的设计要求, 是迫切需要解决的问题。

现代微加工技术是解决上述问题的重要途径。在微电子学的推动下迅速发展起来的现代微加工技术, 能使得微结构尺寸从微米进入亚微米, 甚至纳米范围^[5,6]。本文针对这几个方面, 结合核靶制备, 对现代微加工技术的内容进行了全面的介绍, 同时阐明该技术在核靶制备领域中广阔的应用前景。

1 现代微加工中的薄膜技术

薄膜生长在现代微加工中占有重要地位。微结构器件一般是薄膜的或是表面型的。作为器件加工的第一步, 是在基片表面生长薄膜, 而且在器件加工的全过程中, 可能用不同的方法生长不同的薄膜, 包括不同材料、不同厚度、结晶或非结晶、单层或多层结构等, 但从薄膜的形成过程来看, 主要可分为淀积膜、外延膜及表面改性3个方面。淀积膜与基片之间有明显的界面, 制备方法有真空蒸镀、溅射淀积、电离团束淀积、电镀和涂覆等。外延膜和基片之间有相同或非常接近的晶格结构, 而膜层的晶格通常是基片晶格的延伸, 外延技术通常有气相外延(VPE), 也称化学气相沉积(CVD); 液相外延(LPE); 分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)等。它们是目前超晶格、量子阱制备的重要手段。表面改性是通过基片的表面化学反应, 或其他过程如扩散、离子注入和离子交换等在基片表面形成化学组成、材料结构

* 国家高技术惯性约束聚变领域基金资助课题

收稿日期: 1995-07-23

和性能参数与基片体内有明显差别的膜层,其特点是整体性好,但不易获得突变的界面,往往存在一定厚度的过渡区。

薄膜技术是核靶制备的基本手段,由于过去对核靶的要求往往局限于厚度、密度、均匀性等方面,因此仅薄膜淀积技术在制备各种自支撑靶过程中得到广泛应用。随着掺杂靶、多层平面薄靶等研制工作的深入,扩散、离子注入等表面改性技术亦将在核靶制备中得到更多应用,其中在 Al 衰减膜表面形成均匀、稳定的氧化层,这是表面改性技术应用的简单一例^[7]。此外以气凝胶作为基体,利用化学气相渗透等方法,可制备新型掺杂靶,实现纳米颗粒的均匀掺杂,并且观察到由于量子限制效应导致的光致发光现象^[8]。

2 现代微加工中的图形技术

通过薄膜淀积作为器件在一维方向上的尺寸控制,目前已经能够精确到 1 nm 或更小,但在其他二维的尺寸控制方面还不能达到同样的精度,因此设法减小图形尺寸和提高精度成为现代微加工中图形技术要解决的关键问题。

一般来说,图形是由抗蚀剂涂层的曝光和显影形成的,曝光可以采用可见光、X 射线、电子束和离子束等不同的源,光刻技术的分类及特征也根据曝光源的不同分为光学光刻、X 射线光刻、电子束光刻和离子束光刻等。

光学光刻是目前用得最多的光刻技术,若采用紫外光作为曝光光源时(g 线 463 nm),可得 1 μm 的分辨率, $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的套准精度和每小时曝光 100 片的产出率,这种光刻系统在 IBM、INTEL 等大公司得到了广泛应用。但要进一步提高分辨率则受限于可见光的衍射,因而需要采用波长更短的光源。

利用软 X 射线(0.4—5.0 nm)作曝光源,可以避免常规光刻中遇到的衍射问题,图形线宽最终可达数十 nm,但由于缺乏实用的 X 射线透镜和反射镜,不易得到使 X 射线准直、聚焦和偏转的光学系统,导致目前 X 射线的聚焦均在 50 nm 以上,因而 X 射线曝光尚不能用于制版或投影转印,只能是接近转印,这就影响了分辨率的提高。目前 X 射线光刻机的分辨率约为 0.35 μm 。

电子束用于曝光与 X 射线相比,不仅波长更短(0.1—0.001 nm),而且能用电场或磁场对其偏转和速度调制作精确控制。另外,还可以对到达抗蚀剂表面的电子能量及剂量在相当大的范围进行调节。因此电子束可以在计算机控制下直接产生图形,也可以通过特殊掩模将图形转印。电子束曝光分平行曝光和扫描曝光。前者是把组成图形的所有像素在同一时刻曝光,后者是依次对各像素分别曝光。平行曝光的投影系统通常具有高的产出率,并且装置没有扫描系统那样复杂,但要通过掩模才能获得图形。扫描曝光是通过计算机控制一束或多束电子产生图形,修正畸变和邻近效应误差以及对准基片位置。全部图形信息储存在磁盘中,这种电子束曝光扫描系统既用来制作掩模,也可以把图形直接描绘在基片上,这种方法已成为电子束曝光的主流。虽然目前电子束的束斑可接近 10 nm,但在实际加工过程中所能达到的分辨率(约 0.1 μm)则受限于散射电子的射程。

离子束光刻在现代微加工技术中变得越来越重要,因为离子的质量大,即使能量很低时也没有波长限制,而且离子的尺寸与构成固体晶格的原子相近,与电子束相比,离子受到晶格阻挡,其受散射的射程比电子小得多。因此与 X 射线和电子束相比,离子束图形系统的分辨率为最高,可达到 10 nm 以下。离子束曝光装置与电子束相仿,也有平行和扫描辐射 2 种模式。

采用大面积离子源的离子束投影光刻系统和离子束接近式光刻系统就是属于第一类。采用液态金属离子源形成的微聚焦离子束构成的高强度扫描离子系统则属于第二类,它除了能用于抗蚀剂曝光外,还可作为材料淀积和刻蚀、改变表面的电和机械特性等,并且所有这些加工可以不用掩模直接完成,能充分发挥离子束的固有特长,因而近年来一直受到优先研究和发展的^[10]。目前聚焦离子束直径只有几个 nm,可以用来产生 10 nm 线宽的图形。

综上所述,可以针对不同的微结构,采用相应的图形技术。由于传统的核靶往往对其图形没有特殊的要求,因此图形技术在核靶制备中亦很少使用。近年来对一些特殊构型靶的需求,使得现代微加工中的图形技术亦受到重视。这方面的一个典型的例子是表面起伏状平面膜靶的研制。对于这样的靶,现代精密机械加工亦是无能为力的,仅利用薄膜技术又形成不了这样特殊的结构,而利用全息干涉光刻法则是获得这种图形的有效手段之一^[11]。

3 现代微加工中的刻蚀技术

通过现代微加工中的图形技术在基片表面形成的抗蚀剂图形,仅仅作为对基片加工的样板,并不是器件的最终结构,进一步将抗蚀剂的图形精确地转移到基片或基片表面上的薄膜的过程通常称为刻蚀。广义的刻蚀还包括在基片表面均匀地去除若干原子层,以使表面清洁以及从基片上清除抗蚀剂(去胶)等过程。

把抗蚀剂图形传递给基片可通过二种不同的工艺途径——减法工艺和加法工艺。减法工艺过程为先淀积一层薄膜,然后在上面涂覆抗蚀剂经光刻形成图形,最后通过刻蚀去除没有被抗蚀剂保护的部分薄膜;而加法工艺过程则是先在基片上涂覆抗蚀剂经光刻形成图形,然后再淀积薄膜,一部分薄膜淀积在基片表面,淀积在抗蚀剂表面的薄膜将随着抗蚀剂的去除而一起被清除。

薄膜刻蚀可看成是薄膜淀积的逆过程,一般可以通过化学反应、物理过程或二者结合的过程来实现。化学刻蚀是通过化学活性的分子、离子或基团与薄膜原子反应生成可溶性或挥发性物质而被去除。单纯的物理刻蚀则是薄膜在荷能粒子的轰击下其表面的原子被溅射出来。

通常根据刻蚀是液相过程或是气相过程又把刻蚀分为湿法和干法。湿法刻蚀长期以来得到广泛应用,技术成熟,它是利用某种溶液对掩膜和基片不起作用而能溶解所需刻蚀的薄膜材料来实现的,这种方法使用的设备简单,费用低,容易实现。不过湿法刻蚀一般情况下表现为各向同性,引起明显的钻蚀,这是限制分辨率提高的主要因素。在半导体生产中通常只用于 3 μm 以上的器件。

干法刻蚀包括等离子体刻蚀、溅射刻蚀、反应离子刻蚀、离子束刻蚀和反应离子束刻蚀,与湿法刻蚀不同的是在气相状态下进行的。等离子体刻蚀是利用稀薄气体辉光放电产生的等离子体所引起的化学反应,一般都无方向性,因而象湿法刻蚀一样存在严重的钻蚀,限制了分辨率(2—3 μm)的提高,但其刻蚀速率快,可以获得较大的刻蚀选择比。溅射刻蚀是由气体放电形成的正离子在阴极偏压作用下直接轰击样品表面所引起的,这种刻蚀有明显的方向性,不会产生钻蚀,可以加工亚微米图形,但由于溅射刻蚀是纯物理过程,对不同材料的选择性差,而且一般刻蚀速率较低。反应离子刻蚀是采用含卤化物的气体代替惰性气体 Ar 的溅射刻蚀,这种刻蚀过程是离子轰击的物理效应与活性粒子的化学效应的相互增强,因而兼有等离子体刻蚀和溅射刻蚀两者的优点,不仅刻蚀速率高,而且具有良好的方向性和选择比,分辨率高(< 1 μm),目前在超大规模集成电路的制造中得到广泛应用。离子束刻蚀则是在离子源部分由气

体放电产生的被电场加速后以高速离子束的形式轰击基片表面,通常离子束具有良好的平行性,可以通过倾斜样品台来控制入射角度,增强离子能量可以提高刻蚀速率,刻蚀方向性很强,可获得非常高的分辨率($<1\ \mu\text{m}$),不足之处是选择性低并容易造成损伤。反应离子束刻蚀则是用等离子刻蚀和反应离子刻蚀用的工作气体代替离子束源的惰性气体,因此它兼有离子束刻蚀和等离子体刻蚀的优点,分辨率优于 $0.1\ \mu\text{m}$,但由于离子源装置相当复杂及维护离子源的困难,反应离子束刻蚀的应用受到一定限制。

目前无论是湿法刻蚀还是干法刻蚀中的离子束刻蚀均已在状态方程靶的研制中得到应用^[12]。在表面起伏状平面靶的研制过程中,利用LDJ-2A型 Ar^+ 离子束刻蚀机,通过改变离子束的入射角,调整横向刻蚀与纵向刻蚀速率,在玻璃基片上能获得具有起伏状分布的表面形貌。相信现代微加工中的刻蚀技术将在新的构型复杂的核靶研制工作中得到广泛应用。

4 结束语

现代微加工技术不仅在集成电路方面取得了明显的成就,而且在集成光学、光电子学、材料科学等诸多领域显示了广泛的应用前景。该技术几乎与现有的机械加工技术方式完全不同,它利用具有一定能量的粒子束或射线,包括电子束、离子束、原子或分子束、激光束和X射线等与固体表面产生的物理和化学过程,从而实现微结构图形的发生、转印和刻蚀、以及单层或多层薄膜的淀积或外延生长、整片或局部的材料化学成分和微观结构的改变。因此薄膜技术、图形技术和刻蚀技术的有机结合为获得各种功能微结构器件奠定了基础。对该技术的全面了解将为研制各种复杂结构的核靶提供新的途径。值得一提的是,由于现代微加工技术中所使用的许多庞大复杂设备价格都较为昂贵,需要专人操作,而且一个单位不可能购置全部相关设备,对于靶制备来说,又往往需要多种工艺技术的有机组合,因此相互间的广泛合作、取长补短显得尤为重要,这样才能充分发挥现有仪器设备的作用,推动我国核靶技术的发展。

参 考 文 献

- 1 中国原子能科学研究院核物理研究所编.第一届全国核靶会议文集.中国核物理学会第一届全国核靶会议.北京香山.1981年11月.
- 2 中科院上海原子核研究所编.第二届全国核靶会议文集.中国核物理学会第二届全国核靶会议.江苏扬州.1984年10月.
- 3 中科院近代物理研究所编.第三届全国核靶会议文集.中国核物理学会第三届核靶会议.兰州.1989年9月.
- 4 中国工程物理研究院核物理与化学研究所编.第四届全国核靶会议文集.中国核物理学会第四届全国核靶会议.四川绵阳.1992年6月.
- 5 Reed MA, Kirk WP(ed). Nanostructure Physics and Fabrication. Academic Press, Inc. 1990.
- 6 Thong J(ed). Microdevices: Physics and Fabrication Technologies, New York: Plenum, 1993.
- 7 杜杰,王珏,杜保旗,等.用于软X射线激光实验的铝衰减膜的测量.强激光与粒子束,1993,5(1):81.
- 8 沈军.结构可控的纳米多孔材料硅气凝胶的研制[博士论文].上海:同济大学,1995.
- 9 Zhu Lei, Li Yufen, Wang Jue, et al. Intense Visible Light Emission from Fullerene-doped Silica Aerogel. J Appl Phys, 1995, 77(6):2801.
- 10 Orloff J. Focused Ion Beams. Scientific American, 1991, 265(4):74.

- 11 陈建荣,王珏,陈玲燕,等.平面调制靶的表面起伏图形研制.强激光与粒子束(在排印中).
- 12 腾永华,何锦涛,雷建华.平面激光靶的制备.第四届全国核靶会议论文集.四川绵阳.中国工程物理研究院核物理与化学研究所.1992,70.

ADVANCED MICROFABRICATION TECHNOLOGY AND NUCLEAR TARGET PREPARATION

Wang Jue

(Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai, 200092)

ABSTRACT

Advanced microfabrication technologies are important methods for the fabrication of devices with structures in micron scales. The technologies include thin film process, pattern process and etching process. According to the development of nuclear target technology, the paper gives an overview of the advanced microfabrication technologies and indicates the possible application of the technologies in the fields of nuclear target preparation.

Key words Microfabrication Thin film Pattern process Etching process Nuclear target

薄膜的发展与表面微结构

Evolution of Thin-Film and Surface Microstructure (Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 22)

编者:Thompson, C. V 和 Tsao, J. Y. 等。1991 年美国材料研究学会出版。

材料研究学会(MRS)“薄膜的发展与表面微结构”讨论会于 1990 年 11 月 26 日—12 月 1 日在美国马萨诸塞州的波士顿召开,这次讨论会旨在汇集表面科学与材料科学界研究人员讨论他们共同关心的问题——薄膜生长和外延。本书是这次会议的论文集,并做为“材料研究学会会议丛书”第 202 号。本文集收载论文 100 余篇,分为 9 个部分:一、取向关系和成核:多相边界的原子结构、Pu 在 Cu(100)上涂盖层的分子动态学研究;二、粗化与凝聚:硅团的粗化现象;三、薄膜:多晶膜微结构演变的模拟、铈薄膜微结构的表面能量效应;四、原地衍射与其它诊断学:表面与界面的 X 射线衍射、原子结构与形态学;五、半导体表面:同质外延的总体研究;六、非半导体表面:纯金表面的离子束损坏、Cu-Ag 合金表面融合间隙的二维相迁移;七、外延中的应变与错合调节:III-V 化合物外延层的不对称张弛;八、结晶:陶瓷中的纤维晶粒的离子感生结晶与生长;九、界面反应:合金半导体衬底的薄膜反应。