

微光刻技术的发展

陈梦真

时代的列车飞速地向文明社会驶去。20年前,我们不可思议的彩电、冰箱、录相机等家用电器现在已进入了家家户户,微型计算机已被广泛应用于工业、农业、科研和管理。随着半导体技术的出现,庞大得象楼房似的计算机被缩小到可放在办公桌上,笨重的电子管收音机变形为掌上之物……,这一切都要归功于微电子器件,而微电子器件的生产则与微光刻技术密切相关。让我们一起来看看微光刻技术吧!

一、器件和电路发展对科学技术发展的要求

微电子技术发展的显著特点是器件几何尺寸日趋微细化,达到亚微米或毫微米量级。电路规模向电子学系统集成化发展,集成度越来越高。MOS 动态随机存取存储器

(DRAM)通常是超大规模集成电路发展的最典型代表。电路集成度每三年增长4倍,芯片面积的增加为1.5到2倍,而线宽则每三年缩小0.7倍,研究水平发展还要快些,1988年初松下公司已研制成16 MBD RAM。它的最细线宽是 $0.5\mu\text{m}$ (约为一根头发丝的二百分之一),在一个 94mm^2 的芯片面积上集成了3500个元件⁽¹⁾。而单个器件的发展,它的尺寸已达到毫微米大小⁽²⁾。现在美国、日本和西欧各国正在大力发展用于100MB以上DRAM,最细线宽 $0.25\mu\text{m}$ 的技术,微光刻技术的发展是关键。随着电路规模不断增长和器件尺寸的微细化,发展先进的微细加工技术愈益重要。

器件尺寸微细化,不仅要求横向尺寸缩小,根据等比例缩小的原理,器件纵向尺寸也要相应缩小,因而在器件结构形成方法、工艺和器件物理等方面都将发生一些根本性变化。原来沿用的工艺方法和器件物理模型的应用将受到种种限制。在器件结构上由于绝缘层和有源区及互连金属层尺寸变小,会引起一些新的效应影响器件和电路性能,如热电子效应,短沟道效应,存贮电容的电容减小引起的软误差(Soft error)问题,互连材料的串联电阻增大对速度的影响等。器件尺寸进一步缩小还可能出现新的量子效应。因此提出了一系列新的研究课题。在工艺方法上,传统的光学光刻方法由于光的干涉和衍射的影响,图形加工的分辨率受到限制,需要探索新的光刻方法来实现高分辨率图形的形成。过去沿用的湿化学腐蚀方法原理上是各向同性的,当线宽与被刻蚀材料厚度或深度可比较时,各向同性过程导致的线宽扩展使可刻蚀的最小线宽受到限制,必须采用新的化学方法和物理方法相结合或纯物理方法来实现高度取向刻蚀过程,达到高分辨率图形形成的要求。随着器件纵向尺寸减小,器件工艺还必须向低温、无缺陷、无损伤、无应力或低应力工艺发展,因

此一门新的超微细物质科学正在形成,限于篇幅本文只讨论有关微光刻技术的问题。

二、光学光刻方法的物理限制

光刻是一种类似普通印相术的半导体工艺。它通常是把光学掩模图形通过对准、成像和显影过程复印到涂有光敏抗蚀剂的半导体片子表面上,然后用适当的刻蚀方法,把图形转换到半导体片子上。其具体方法有以下三种:

1. 接触式光刻。原则上可得到高的复印分辨率,但由于掩模和片子相接触容易产生缺陷,导致器件成品率下降,在大规模集成技术上不宜采用。

2. 接近式光刻。可使掩模和片子保持5—50微米的间隙,以避免上述缺点,但光刻分辨率受波长、间隙大小的限制。其值与波长、间隙大小的开方值成正比。缩短使用光的波长,可以提高分辨率,但紫外光不适于亚微米应用。

3. 投影光刻。把掩模图形用投影方式缩小或1比1地成像在被加工片子表面,经过曝光、显影和刻蚀形成图形。由于通常像场比较小,要用分步重复曝光的方法实现大片的加工。近年来,由于透镜技术、光源技术和光刻胶性能及系统技术的改进,这种方法具有高光刻分辨率、高对准精度、高产率和相对低的成本等优点,使它在超大规模集成电路和高性能器件研制生产中占有主导地位,并在未来相当长时期内起着重要作用。

根据瑞利关系,加工图形分辨率与光的波长成正比,与透镜的数值孔径成反比。随着工艺改进和新技术应用,使用大数值孔径的透镜和远紫外波长的光源,它可以用于亚微米图形加工,但实验研究表明,在此情况下还受到焦深、像场大小和光源波长的种种限制。

另外,光源波长向短波长方向发展是提高光刻分辨率的有效途径,但这将受到光学透镜材料的限制,常规玻璃不能用于波长短于

30 00 Å 的情况,使用石英透镜可以扩展到 2300 Å。而像 CaF 等新材料使用波长可延伸到 1900 Å。

三、新的微光刻技术发展现状和趋势

远紫外光刻。如上所述,光学方法进一步发展受到种种限制、近年来各先进国家在发展之线(365 nm)光源和准分子激光光刻系统方面取得很大进展、之线投影光刻可达到光刻分辨率 0.5 μm 左右,焦深为 1 μm,每小时产率是 5 吋硅片几十片,准分子激光(波长 193 nm 和 249 nm)实验光刻系统的分辨率达到了 0.4 μm,但焦深小于 1 μm,因此远紫外光刻的发展在亚微米应用方面引人注目。

X 线光刻。X 线光刻实际是光学光刻发展的继续、它是一种接近式光刻。X 线光源波长通常是 4—50 Å。X 线一方面有很强的穿透力,另一方面 X 线透过即使很薄的材料也会有一定的吸收,因此 X 线光刻掩模与光学掩模有很大的不同、通常 X 线光刻掩模是由轻元素材料制成的薄膜基体和重元素材料做的吸收体图形构成。掩模制作技术是 X 线光刻广泛应用的关键、目前最广泛研究的有硅、氮化硅、氮化硼和碳化硅掩模,吸收体材料主要有金、钨、钼和铅等。

X 线光刻的结构分辨率可以达到 0.1 μm、主要受 Fresnel 衍射、快速二次电子、掩膜反差和特征 X 线辐射特性诸因素的限制。由于 X 线光刻能实现高分辨率复印和对有机尘粒不敏感,焦深大 (~10 μm),大场区曝光,工艺宽容度大等优点,它在亚微米应用方面受到广泛重视、特别是近年来同步辐射技术的发展为它提供了光的平行性好和光强度大(是普通 X 线光源强度的 10²—10⁴ 倍)的理想 X 线光源,使同步辐射 X 线光刻成为有广阔工业应用前景的亚微米光刻技术而为各发达国家政府和工业界的关注、日本、西欧和美国先后采取“官、产、学”联合研究发展计划进行有关技术开发和应

用研究。九十年代中期的目标是 0.25 μm 技术应用。目前 IBM 等已经应用 X 线光刻进行 0.5 μm 的集成电路研制,而单个器件研制中已使用了毫微米器件结构的制作。但是 X 线光刻的实用化还有待在强 X 线光源、掩模、X 线光刻胶及对准方法等系统技术上取得进一步发展北京正负电子对撞机工程的建设为我国同步辐射 X 线光刻的发展提供极为有利的条件,建设中的同步辐射 X 线光刻实验室将成为亚微米应用的实验设施。

电子束光刻。电子束光刻系统是在扫描电镜技术基础上发展起来的、由高亮度的光源发射的电子经过加速、聚焦形成很细的束,由计算机控制在涂有光刻胶的硅片(或其他半导体)表面进行偏转扫描曝光形成微细图形。放片子的工作应由定位精度为几十埃的激光干涉仪控制移动。电子束斑可以小到 5—10 Å,电子束光刻是主要的高精度和高分辨率的亚微米光刻技术、目前世界上大约 80% 的电子束光刻系统作为图形发生器,用于 1x 和 Nx 的掩模制作。它的优点是速度快、精度高、灵活性大和质量好,电子束制版与 Stepper 光刻系统相结合是目前超大规模集成电路生产的最有效方法、电子束系统的另一重要应用是亚微米图形和器件结构的直接描画、随着器件尺寸微细化,它的应用重要性日益增强、特别是在毫微米光刻方面将为探索性器件开发,有机和生物电子学器件等超微细图形加工发挥重要的作用、电子束光刻的图形分辨率主要受电子在光刻胶和衬底中的散射和背散射现象导致的邻近效应的限制。一般说,小于 2 μm 的图形曝光必需进行邻近效应的修正、尽管对邻近效应本身有很好的理解,它的修正仍没有简单的方法,实际应用中另一问题是效率低,系统复杂,价格贵。

离子束光刻。该系统原理上与电子束系统类似,不过离子光学的应用代替了电子光学、离子束在光

刻胶中横向散射 (<100 Å) 比电子束 (<3 μm) 要小得多,而且只产生很低能量的二次电子其邻近效应可以忽略、实验发现光刻胶对于离子的灵敏度要比电子高二个量级。因此离子束光刻是最有前途的亚微米或毫微米光刻技术。目前离子束光刻还处于实验研究阶段、但近年来,在聚焦离子束扫描和离子束投影系统上都取得可喜的进展。特别是聚焦离子束扫描系统不仅可以进行无掩模图形形成和刻蚀加工,而且可以兼有掺杂和淀积等功能,为离子束技术广泛应用提供可能性。相信随着强离子源技术的进步,离子束技术将成为未来微制造过程的主要技术而大显其身手。

告读者

《现代物理知识》第三期第 10 页刊登了张光华同志的《新学说:磁场空间分布的新概念》一文,引起了许多读者的兴趣,有的读者来信索取资料,有的读者提出一些问题要求解答,也有一些读者作了实验……。以后,张光华同志将撰文介绍一些读者所关心的问题,譬如:为什么长期以来人们对传统的磁场分布理论没有提出怀疑?磁场在工农医诸方面的应用前景又如何?还有,磁场治病这个引人注目的问题……。

我们希望《现代物理知识》给广大读者提供一个讨论新学说、新概念、新思想的园地,我们热切地欢迎朋友们踊跃来稿介绍国内外新动态、新思想,甚至是有争论的问题。也欢迎读者多提宝贵意见,让我们共同努力把《现代物理知识》办成一个宣传、普及现代物理知识的科学大世界。