

光刻技术新进展

2003-11-06

一、引言

目前,集成电路已经从 60 年代的每个芯片上仅几十个器件发展到现在的每个芯片上可包含约 10 亿个器件,其增长过程遵从一个我们称之为摩尔定律的规律,即集成度每 3 年提高 4 倍。这一增长速度不仅导致了半导体市场在过去 30 年中以平均每年约 15%的速度增长,而且对现代经济、国防和社会也产生了巨大的影响。集成电路之所以能飞速发展,光刻技术的支持起到了极为关键的作用。因为它直接决定了单个器件的物理尺寸。每个新一代集成电路的出现,总是以光刻所获得的线宽为主要技术标志。光刻技术的不断发展从三个方面为集成电路技术的进步提供了保证:其一是大面积均匀曝光,在同一块硅片上同时作出大量器件和芯片,保证了批量化的生产水平;其二是图形线宽不断缩小,使用权集成度不断提高,生产成本持续下降;其三,由于线宽的缩小,器件的运行速度越来越快,使用权集成电路的性能不断提高。随着集成度的提高,光刻技术所面临的困难也越来越多。

二、当前光刻技术的主要研究领域及进展

1999 年初,0.18 微米工艺的深紫外线(DUV)光刻机已相继投放市场,用于 1G 位 DRAM 生产。根据当前的技术发展情况,光学光刻用于 2003 年前后的 0.13 微米将没有问题。而在 2006 年用到的 0.1 微米特征线宽则有可能是光学光刻的一个技术极限,被称为 0.1 微米难关。如何在光源、材料、物理方法等方面取得突破,攻克这一难关并为 0.07, 0.05 微米工艺开辟道路是光刻技术和相应基础研究领域的共同课题。

在 0.1 微米之后用于替代光学光刻的所谓下一代光刻技术 (N G L) 主要有极紫外、X 射线、电子束的离子束光刻。由于光学光刻的不断突破,它们一直处于“候选者”的地位,并形成竞争态势。这些技术能否在生产中取得应用,取决于它们的技术成熟程度、设备成本、生产效率等。下面我们就各种光刻技术进展情况作进一步介绍。

1. 光学光刻

光学光刻是通过光学系统以投影方法将掩模上的大规模集成电路器件的结构图形“刻”在涂有光刻胶的硅片上,限制光刻所能获得的最小特征尺寸直接与光刻系统所能获得的分辨率直接相关,而减小光源的波长是提高分辨率的最有效途径。因此,开发新型短波光光源光刻机一直是国际上的研究热点。目前,商品化光刻机的光源波长已经从过去的汞灯光源紫外光波段进入到深紫外波段 (DUV), 如用于 0.25 微米技术的 KrF 准分子激光 (波长为 248 纳米) 和用于 0.18 微米技术的 ArF 准分子激光(波长为 193 纳米)。

除此之外,利用光的干涉特性,采用各种波前技术优化工艺参数也是提高光刻分辨率的重要手段。这些技术是运用电磁理论结合光刻实际对曝光成像进行深入的分析所取得的突破。其中有移相掩膜、离轴照明技术、邻近效应校正等。运用这些技术,可在目前的技术水平上获得更高分辨率的光刻图形。如 1999 年初 Canon 公司推出的 FPA-1000ASI 扫描步进机,该机的光源为 193 纳米 ArF,通过采用波前技术,可在 300 毫米硅片上实现 0.13 微米光刻线宽。

光刻技术包括光刻机、掩模、光刻胶等一系列技术,涉及光、机、电、物理、化学、材料等多个研究领域。目前科学家正在探索更短波长的 F2 激光 (波长为 157 纳米) 光刻技术。由于大量的光吸收,获得用于光刻系统的新型光学及掩模衬底材料是该波段技术的主要困难。

2. 极紫外光刻 (EUVL)

极紫外光刻用波长为 10-14 纳米的极紫外光作光源。虽然该技术最初被称为软 X 射线光刻，但实际上更类似于光学光刻。所不同的是由于在材料中的强烈吸收，其光学系统必须采用反射形式。如果 EUVL 得到应用，它甚至可能解决 2012 年的 0.05 微米及以后的问题，对此发展应予以足够重视。

3. X 射线光刻 (XRL)

XRL 光源波长约为 1 纳米。由于易于实现高分辨率曝光，自从 XRL 技术在 70 年代被发明以来，就受到人们广泛的重视。欧洲、美国、日本和中国等拥有同步辐射装置的国家相继开展了有关研究，是所有下一代光刻技术中最为成熟的技术。XRL 的主要困难是获得具有良好机械物理特性的掩膜衬底。近年来掩膜技术研究取得较大进展。SiC 目前被认为是最合适的衬底材料。由于与 XRL 相关的问题的研究已经比较深入，加之光学光刻技术的发展和它光刻技术的新突破，XRL 不再是未来“惟一”的候选技术，美国最近对 XRL 的投入有所减小。尽管如此，XRL 技术仍然是不可忽视的候选技术之一。

4. 电子束光刻 (EBL)

电子束光刻采用高能电子束对光刻胶进行曝光从而获得结构图形，由于其德布罗意波长为 0.004 纳米左右，电子束光刻不受衍射极限的影响，可获得接近原子尺度的分辨率。电子束光刻由于可以获得极高的分辨率并能直接产生图形，不但在 VLSI 制作中已成为不可缺少的掩模制工具，也是加工用于特殊目的的器件和结构的主要方法。

目前的电子束曝光机的分辨率已达 0.1 微米以下。电子束光刻的主要缺点是生产效率较低，经贸部为每小时 5~10 个圆片，远小于目前光学光刻的每小时 50~100 个圆片的水平。最近，美国朗讯公司开发的角度限制散射投影电子束光刻 SCALPEL 技术令人瞩目，该技术如同光学光刻那样对掩模图形进行缩小投影，并采用特殊滤波技术去除掩模吸收体产生的散射电子，从而在保证分辨率条件下提高产出效率，应该指出，无论未来光刻采用何种技术，EBL 都将是集成电路研究与生产不可缺少的基础设施。

5. 离子束光刻 (IBL)

离子束光刻采用液态原子或所态原子电离后形成的离子通过电磁场加速及电磁透镜的聚焦或准直后对光刻胶进行曝光。其原理与电子束光刻类似，但德布罗意波长更短（小于 0.0001 纳米），且有无邻近效应小、曝光场大等优点。离子束光刻主要包括聚焦离子束光刻 (FIBL)、离子投影光刻 (IPL) 等。其中 FIBL 发展最早，最近实验研究中已获得 10 纳米的分辨率。该技术由于效率低，很难在生产中作为曝光工具得到应用，目前主要用作 VLSI 中的掩模修补工具和特殊器件的修整。

由于 FIBL 的缺点，人们发展了具有较高曝光效率的 IPL 技术。欧洲和美国联合了大量企业、大学和研究机构，开展了一个名为 MEDEA 的合作项目，用于解决设备和掩模等方面的问题，进行可行性验证，目前已取得不少进展。

三、光刻技术展望

光学光刻技术仍在发展，可望突破 0.1 纳米难关。后光学时代有多种技术可供选择，未来采用何种技术尚不明朗了。

原作：刘泽文 李志坚

来源：清华大学