

双光束超分辨光刻技术的发展和未来

谢大乐^{1,2}, 艾星星³, 甘棕松^{1,2*}

1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074
2. 华中科技大学信息存储系统教育部重点实验室, 武汉 430074
3. 黄冈师范学院化学化工学院, 黄冈 438000

摘要 近年来,随着芯片制造工艺的不断提高,光刻技术发展面临着一些难题,这些难题也影响着芯片行业发展及摩尔定律的持续性。然而,当前主流的极紫外光刻技术已经接近制造极限,需要更先进的技术来突破技术瓶颈。综述了基于双光束超分辨技术的光刻技术概念,并分析了其优势和潜力,同时提出了该技术面临的挑战和可能的解决方案,指出这种新型光刻技术有望在微纳制造领域扮演重要的角色。

关键词 芯片制造;光刻技术;双光束;超分辨

芯片是现代电子产品的核心组成部分,扮演着极为重要的角色^[1-3]。从智能手机、平板电脑到笔记本电脑、服务器,再到车载电子、工业自动化设备等领域,芯片都是关键的控制中心,为各种设备提供基础的计算、存储、通信和控制功能^[4]。随着信息技术的快速发展和智能化程度的提高,芯片在现代社会中的应用领域不断扩大。芯片的发展也推动了人类社会的不断进步。例如,在智能手机领域,芯片的发展推动了智能手机不断提升的计算和图像处理性能,实现了更为流畅的用户体验^[5]。在车载电子领域,芯片的应用使得汽车具备了更多的安全和智能功能,提高了驾驶的舒适性和便利性。在

工业自动化设备领域,芯片的应用使得生产流程更为智能化和自动化,提高了生产效率和质量。可以说,芯片在现代社会中扮演着不可替代的角色,为各种应用领域提供了强大的支撑和动力。然而,芯片的制造过程非常复杂和困难,需要高难度的技术和设备支持。芯片的设计和制造涉及到材料科学、化学、物理、机械等多个学科领域,需要高精度和高质量的设备和材料来实现。特别是芯片的制造需要使用先进的纳米制造工艺,如光刻、化学蚀刻、沉积、离子注入等,每个步骤都需要高精度的设备支持。另外,芯片制造还需要大量的资金和人力投入,从设计到制造、测试、封装等各个环节都需要经

收稿日期:2023-06-09;修回日期:2024-03-15

基金项目:国家重点研发计划专项(2021YFB2802000)

作者简介:谢大乐,博士研究生,研究方向为光学工程,电子信箱:dlxie@hust.edu.cn;甘棕松(通信作者),教授,研究方向为光学工程、计算机软件与理论,电子信箱:ganzongsong@hust.edu.cn

引用格式:谢大乐,艾星星,甘棕松.双光束超分辨光刻技术的发展和未来[J].科技导报,2024,42(8):21-28;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.00884

过复杂的流程和检测。由于芯片制造需要高技术密集性和巨大的资金投入,目前芯片行业主要由少数几家巨头企业垄断,对中小企业和新创公司来说,要进入芯片行业面临着极高的门槛和风险。

光刻技术作为微电子工业中的关键技术之一,在芯片制造的不同阶段都发挥着重要作用^[6]。随着半导体工艺的不断发展和进步,光刻技术也在不断演变和完善。光刻技术是集成电路技术的核心,每一次推进都会导致电子信息产业的一次革命^[7]。随着现代科技的快速发展,芯片在现代社会中扮演着越来越重要的角色,而光刻机是制造芯片的核心设备之一。一方面,在芯片制造的过程中,光刻机能够通过光学技术将芯片设计图案转移到光刻胶上,从而实现微电子器件的存储器、处理器、传感器等功能。光刻机能够实现的精度和分辨率决定芯片制造的质量和性能。因此,光刻机对于现代科技和社会的发展具有重要的意义。另一方面,随着芯片尺寸的不断缩小和精细程度的不断提高,其制造工艺也面临着越来越多的困境,需要光刻技术的发展而有所突破。

1 芯片制造面临的困境

芯片越来越小,已经逐渐到达制造工艺的极限。目前主要有2个问题困扰着工业界,一是芯片制造的理论极限(摩尔定律)将要达到,二是芯片制造设备极紫外(extreme ultra-violet, EUV)光刻机的研发难度越来越大。

1.1 摩尔定律的瓶颈

摩尔定律的终结问题是目前光刻机面临的主要挑战之一。摩尔定律是一个经验法则:每18~24个月,芯片上集成的晶体管数量会翻倍,而芯片的大小会缩小一半。然而,随着芯片制造工艺的不断发展,芯片已经接近制造极限^[8-10]。摩尔定律的极限主要来源于量子效应,当芯片尺寸缩小到10 nm左右的时候,栅氧化层仅有10个原子厚,会产生量子隧穿效应,导致晶体管严重漏电,进而导致电子产品的寿命缩短。目前,芯片制造技术已经能够实现最小线宽尺寸在2 nm左右的制程工艺,但是这

种工艺还处于研究和实验阶段,尚未在商业化生产中得到广泛应用。当前,主流的商业化芯片制造工艺一般能够实现7 nm、5 nm、3 nm等级的微细线宽制造。尽管现代芯片的制造技术已经达到了如此高的精度,但是由于制造难度增加,以及成本和复杂度的逐步上升,实现更小的线宽尺寸仍然具有相当的挑战性。

1.2 EUV光刻机的制造极限及高昂造价

光刻机能够实现的精度和分辨率决定芯片制造的质量和性能^[11]。随着芯片的单位存储密度的提升,对光刻机的光源要求越来越高,随着所用光源改进和工艺创新,光刻机经历了5代产品发展,每次改进和创新都显著提升了光刻机所能实现的最小工艺节点^[12]。光刻机的技术迭代历程及分辨率的变化如表1所示。

表1 光刻机技术迭代历程及分辨率变化

光刻机分类	名称	光源波长/nm	分辨率/nm
第一代光刻机	接触式	438	250~800
第二代光刻机	接近式	365	250~800
第三代光刻机	扫描投影式	248	130~180
第四代光刻机	步进扫描投影式	193	65~130
	浸入步进式		
第五代光刻机	EUV	13.5	3~7

接触式光刻机是第1代光刻机,其工作原理是将掩模(mask)和光刻胶(photoresist)直接接触,通过紫外线曝光、显影等步骤,将掩模上的图案转移至光刻胶上,形成所需的图案结构。需要注意的是,接触式光刻机的分辨率受到掩模和光刻胶接触力的限制,而且在多次使用中,掩模和光刻胶的磨损会影响其精度和稳定性。因此,现代已经发展到非接触式光刻机,其分辨率和稳定性都有了很大的提升。第2代接近式光刻机是一种非接触式光刻机,其工作原理是通过控制光刻胶与掩模之间的距离和光的入射角度,将掩模上的图案结构转移到光刻胶上,形成所需的图案结构。相对于第1代接触式光刻机,第2代接近式光刻机分辨率、重复精度、生产效率更高,但是成本也较高,对掩模和光刻胶的要求更高,且易受震动和环境干扰的影响。第3

代扫描投影式光刻机(KrF)是一种基于投影方式的光刻机,采用248 nm的KrF准分子激光光源,工作原理是使用一个透镜将掩模上的微观图案投射到光刻胶上,通过对光的控制和透镜的移动,可以形成所需的微观结构。第3代扫描投影式光刻机相对于第2代接近式光刻机,可以使用更高质量的透镜和更精细的光控制技术,把光刻技术推进到深亚微米及百纳米级,从而进一步提高了分辨率。其缺点是成本较高,对光学系统的要求更高,易受环境干扰的影响。第4代光刻机分为步进扫描投影式光刻机和浸入步进式光刻机(ArF),原理和前几代光刻机相似,都是利用EUV光源照射光刻胶,并通过透镜将芯片图案投影到芯片表面上。第4代步进扫描投影式光刻机的工作原理是将芯片图案分成许多小的区域,逐个区域进行处理。光源照射到一个小的区域,通过透镜将图案投影到光刻胶上。然后,逐渐移动透镜和芯片,以处理整个芯片图案。其采用193 nm的ArF准分子激光光源,可以实现光刻过程中掩模和硅片的同步移动。同时,该技术还能将掩模图像投影到硅片上,进行分步重复曝光,从而将芯片的最小工艺节点提升一个台阶,将工艺推进至130~180 nm。但是第4代步进式扫描投影光刻机需要高度精确的控制系统和运动控制,因此复杂性非常高。后期为了进一步提升分辨率,引入了浸没式光刻技术形成浸入步进式光刻机,即将某种液体充满在投影物镜与硅片之间增加系统的数值孔径,可以将193 nm光刻延伸到45 nm节点以下。第5代EUV光刻机使用EUV光源(波长为13.5 nm)来照射光刻胶,通过透镜将图案缩小到芯片表面上,工艺可以推进至3~7 nm,并且通过多个光学元件将图案投影到光刻胶上,然后,逐渐移动光学元件和芯片,以处理整个芯片图案。与以往的光刻机相比,EUV光刻机具有更高的分辨率、更快的处理速度和更低的制造成本。但是EUV光刻机的缺点是EUV光源的波长很短,因此需要使用非常精确的光学元件来将光线投影到光刻胶上。这些光学元件容易受到强光的损坏,因此需要定期更换。EUV光刻机对环境要求非常高,需要在真空中运行,增加了维护和操作成本^[3]。值得注

意的是,由于制造高分辨光刻机的工艺越来越复杂,目前第5代EUV光刻机的生产厂家仅有荷兰的阿斯麦尔公司,用于生产7 nm工艺的EUV光刻机零件达10万多个,这些零件的加工方来自于世界各地^[4]。

现在市场上使用的光刻机主要是EUV光刻机,其是一种高端精密仪器,要达到高精度、高速度、高重复性等要求,需要使用高品质的精密机械零件和高性能的光学元件。这些光学元件的成本和制造难度都比较高,因此EUV光刻机的制造成本也相应较高。另外,EUV光刻机具有很高的技术含量,需要使用先进的光学技术和精密的控制系统,同时也需要采用复杂的电子和机械设计来实现高分辨率和高稳定性的光刻图案处理。这些技术的研发和应用也需要耗费大量的资金和人力,这也是EUV光刻机造价高的原因之一。总之,光刻机是制造微电子芯片的重要设备之一,但是其发展也面临着一系列的难题。摩尔定律的终结、分辨率和刻蚀速度的瓶颈、制造成本和时间的增加,以及芯片设计的复杂性和精度要求的提高等问题,都需要通过新技术的引入和工艺的改进来解决。

2 双光束超分辨光刻技术的原理及优势

双光束光刻技术与传统的光刻技术相比具有显著优势。电子束光刻(electronic-beam lithography, EBL)可以实现低于100 nm的分辨率,这是由于电子束的衍射表现出极短的德布罗意波长^[15-17](图1(a))。然而其对光学器件的要求很高,不是一种经济的光刻方法。基于高数值孔径物镜聚焦的光束光刻(optical beam lithography, OBL)技术是三维纳米加工的一种有效途径(图1(b))^[18]。然而,光的衍射特性导致无法在光束光刻技术系统中实现亚衍射或纳米分辨率。即使是应用聚合光抑制策略,由于缺乏大的双光子吸收截面、高机械强度和足够光抑制功能的光树脂,也无法实现与电子束光刻相媲美的特征尺寸和分辨率的制造^[19]。与单光束光刻技术相比,双光束光刻技术利用空心圆形

状的抑制光束来抑制空心圆环处写入光引发的光聚合,从而减小了特征尺寸并提高了分辨率(图1(c))^[20]。虽然写入光束和抑制光束都会导致光斑尺寸大小会有衍射极限,但双光束光刻技术制造的特征尺寸和分辨率可以打破双聚焦光束衍射光斑尺寸的限制。实际上,只要能够开发出合适的光树脂,就可以远远超过衍射极限。

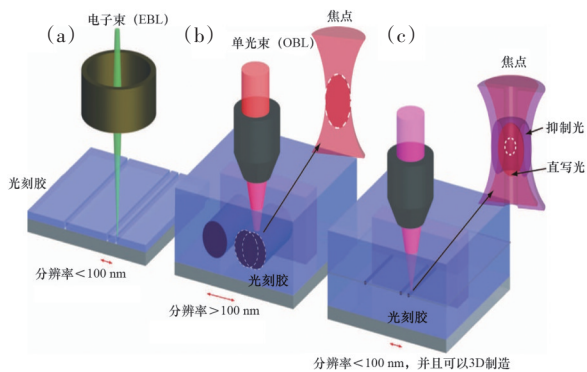


图1 电子束光刻(a)、单光束光刻(b)、双光束光刻(c)技术的比较

双光束超分辨率光刻技术原理来源于受激辐射损耗显微成像技术(stimulated emission depletion, STED)^[21-22],其基本原理如图2所示。首先,第2束激发光将艾里斑内的荧光分子从基态 S_0 激发至第一激发态的较高振动态 S_1^* ,然而处于较高振动态的电子会通过振动弛豫跃迁至第一激发态的最低振动态 S_1 。随后,第2束损耗光,将艾里斑周边处于

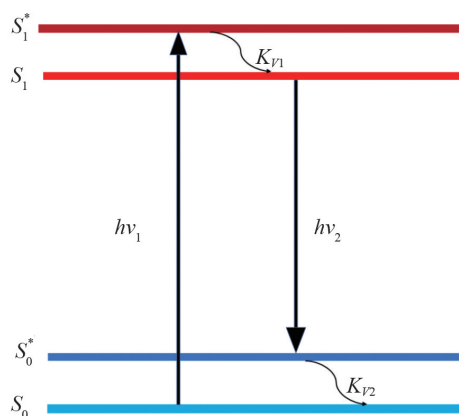


图2 受激辐射显微成像技术超分辨成像原理

激发态的荧光分子淬灭激发,从而跃迁至基态的较高振动态 S_0^* ,随后通过振动弛豫回到基态最低振动态 S_0 。由于受激吸收和受激辐射存在平等的竞争关系,即受激吸收过程 $S_0^* \rightarrow S_1$ 和受激辐射过程 $S_1 \rightarrow S_0^*$ 的概率是相同的,但是由于振动弛豫的速率要远大于荧光辐射速率,因此,处于 S_0^* 振动态的电子迅速跃迁回 S_0 而避免出现二次激发,从 $S_1 \rightarrow S_0^*$ 的受激辐射过程就占绝对优势。这样,就只有艾里斑中心处于最低激发态 S_1 的荧光分子能通过自发荧光辐射的过程跃迁至基态 S_0 而自发辐射发射荧光。

理论上,由于STED损耗光为环状且其中心强度为零,因此环状损耗光越强,则由第1束激发光激发的荧光分子所占的区域就越小,其横向分辨率就越高。在保证激发光聚焦光斑中心处荧光光强不变的情况下,荧光材料在激发光作用下荧光强度分布的半高宽会显著缩窄,从而提高基于荧光强度分布测量的成像分辨率。受此启发,将2束不同波长的光通过光路合束,再通过投影物镜最终作用于特制的光刻胶材料,也可以产生与使用短波长光源时相同甚至更好的光刻分辨率效果,从而大幅度降低研制难度。要实现这一点首先需要选择2种不同波长的光(图3),一束激发光作用和EUV光刻机的光源作用一致,目的都是让光刻胶产生聚合;另一束光是损耗光,是通过相位调制所产生的空心光,作用是将激发光产生的外围光斑的引发剂淬灭回基态,使得外围单体不发生聚合反应,这样就只有2束光聚焦光斑的中心区域发生聚合,因而能够实现超分辨的写入效果。2束光需要通过双色镜进行合束,双色镜在不改变原有第1束光的路径的前提下,同时可以让第2束光耦合到原有第1束光的光路中来,并一同进入到光刻投影物镜。选择2

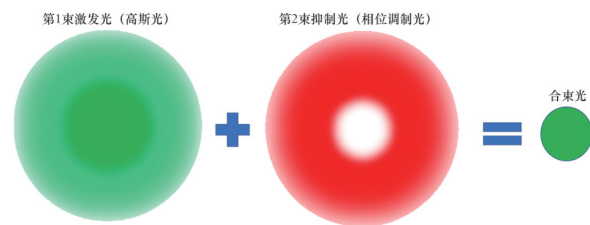


图3 双光束光刻示意

束光的波长时差距尽可能大,避免产生交叉激发的现象。

双光束光刻技术需要配置特制的光刻胶以对2束光产生不同的响应,对于第1束激发光而言,作用是让光刻胶产生聚合,并且光强和聚合程度成正比。光刻胶对第2束光的响应要求是在激发光光强不为零的情况下,才对第2束光有抑制曝光作用。因此即便第2束光的光强较强,激发光光强为0时,光刻胶也不响应,此时单体不发生聚合。同时,在第1束光光强不为0的情况下,第2束光光强越强,光刻胶的曝光程度越低。光刻胶材料要想实现2束光的不同响应,关键在于引发剂的选择。因为引发剂是决定单体聚合程度的重要因素,一般情况下引发剂在光的作用下发生激发进而产生激发态中间体(自由基),其再与单体作用发生聚合反应进而产生树脂固体,显影后得到目标图案,这一过程和EUV光刻机的光刻胶作用机理是一致的,且光刻胶的曝光程度与光强成正比,因为光强越强,激发产生的自由基数量越多。但是双光束超分辨光刻技术的第2束光的作用是将激发态的引发剂分子通过受激辐射的方式,使其跃迁回更低的能级,从而丧失和单体的反应能力。另外,激发波长应选在所用引发剂材料激发谱的峰值波长附近,以保证较好的吸收;抑制光波长应选在所用引发剂材料激发谱的长波拖尾处,以避免损耗光对样品的二次激发。同时受激辐射使得处于高能态的分子跃迁到低能态,其跃迁的速度与产生受激辐射效果的第2束光的光强成正比,第2束光光强越强,理论上高能态分子跃迁回低能态的比例越高。

值得一提的是,双光束超分辨光刻技术作为对传统紫外光刻技术的改良,继承了后者的大部分基础设施,实现了技术上的平滑过渡。这种技术通过引入额外的长波光源和光路,对现有的短波长光源进行波长调整,而核心的微缩投影曝光技术保持不变。这样,在不牺牲已有工业光刻经验的前提下,能够以较低成本对产线设备进行升级和替换。在具体实施上,双光束超分辨光刻技术要么通过改变现有光源的波长并添加新的光路,要么在现有紫外光刻机上直接增加新的光路。新加入的光路在完

成投影曝光图案的调制之后,与第1束光合束,对传统单光束光刻机不造成任何影响。因此,这项技术能够充分利用现有的光刻资源。EUV光刻机的优势是具有更高的光刻分辨、生产效率高、光刻工艺简单。但是,EUV光刻机也存在许多问题,例如耗能巨大、能量利用率低、光学系统设计与制造复杂,以及将要到达摩尔定律的极限等。双光束光刻技术在特制的光刻胶中可以得到9 nm的分辨率,虽然不及EUV光刻机3~7 nm的分辨率,但是设备的搭建简易,光源为可见光,并且由于EUV光刻机的技术被封锁,因此,对双光束超分辨技术的掌握是十分有必要的。

在合束环节,长波光源的引入只需添加一个特殊的双色镜,它能够使第1束光不受影响地通过,同时引导第2束光耦合进入第1束光的光路,共同进入光刻投影物镜。此方法确保了与现有紫外光刻技术的完全兼容性,避免因技术颠覆带来的高昂成本问题,从而为工业界接受该技术提供坚实的基础。因此,在产能、分辨率和套刻精度方面,双光束超分辨光刻技术水平与现有的EUV光刻机持平,展现出其作为技术升级路径的可行性和优势。

3 双光束超分辨光刻技术的问题与挑战

一方面,2束光束的对准是双光束超分辨光刻技术取得超分辨光刻效果的关键,对准涉及到2个方面。一是如何确保2束光的中心完全重合。双光束超分辨光刻技术采用第2束光的核心目的是对第1束光产生的衍射边缘进行修正。在一般情况下,将2束光各自产生的光斑对准的关键是其相对位置是否对齐。可以通过调整光学系统中的双色镜,使得第2束光的位置相对第1束光的位置发生改变,并最终完全对齐。在这个过程中,精确测量每个光斑的位置光强分布,并通过光学系统来调整两者的相对位置是完全可行的。二是光刻设备随着时间的推移难以长时间保持对准。在理想状态下,2个光斑的相对位置是不会发生变化的。然而,光刻设备在受到外界环境,例如振动、温度改变

等多因素的影响时,相对位置可能会发生一定程度的偏移,导致2束光分离。为了解决这一问题,光刻设备的各光学元件的位置移动和形状改变程度必须降到最低,确保双光束产生相应的抑制效果。

另一方面,需要配置合适的光刻胶以响应双光束超分辨设备。双光束光刻胶一般是短波长光发生聚合反应,而长波长的光对光刻胶不响应,并且抑制短波长光的聚合作用,这使得在可见光区域,当用来对第1束光衍射边缘进行修正的第2束光的波长选择更长波长时,这个要求能够较为容易地满足。同时通过受激辐射的方法来增加能量去向通道,也能够确保光刻胶对第2束光响应必须是第1束光光强不为0的情况。然而,双光束超分辨光刻技术要达到较高的分辨率,要求第2束光的作用效果要很强。但是,如果第2束光的光强很强,会导致胶体出现光学非线性效应(容易产生气泡),这种由于强光所导致的问题目前已经被笔者所在的团队解决。但是目前还未探究第1束光是紫外光波长的情况,一旦研制成功,双光束光刻技术可以完美地与EUV光刻机结合,达到更高的分辨率。

4 双光束超分辨光刻设备研发进展

甘棕松课题组一直致力于将双光束超分辨原理进行应用和成果转化。2013年,本课题组在使用双光束超分辨激光直写设备成功得到了9 nm的线宽,并且线中心间距可以达到52 nm,研究为这项技术真正突破衍射极限提供了关键依据^[20],研究成果被《Nature Nanotechnology》《Nature Materials》等期刊专题评论,“该方法使得(激光制造)的特征尺寸和分辨率突破了光的衍射极限”,并且被多种期刊引用,成为高被引文章^[23-24]。2016年,双光束光刻设备在三维结构制造方面也取得了重大突破^[25]。2019年,团队对双光束超分辨光刻设备对提升光存储的容量和密度进行研究,并取得较好成果^[26]。2022年,对投影式双光束超分辨光刻技术进行了概述^[27]。团队目前专注于双光束超分辨直写光刻设备方面的研究及成果转化,双光束超分辨直写光刻设备示意如图4所示。

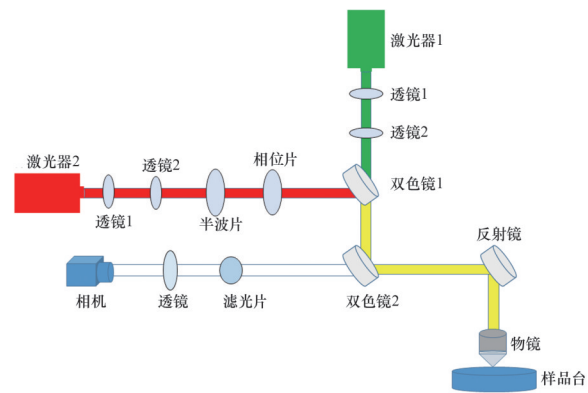


图4 双光束激光直写设备示意

双光束超分辨光刻技术的优势主要如下。双光束超分辨光刻技术使用的光源是可见光,可选择的范围很广。在达到同等分辨率的前提下,与EUV光刻机相比,避免了EUV光源的使用,可以大幅度降低光源的研制难度。同时,双光束超分辨光刻技术的制造成本较低,只在现有的光刻设备基础上新增1条光路。新增的光路不会影响原有光束路径,只有在2条光路合束后才会产生分辨效果。在调制好投影曝光图案之后,与第1束光合束之前,对原有单光束光刻机是没有影响的。因此,双光束超分辨光刻技术的改造成本很低,极有利于产品的市场化。对于双光束超分辨激光直写设备中的激光器的选择,自飞秒激光器研发以来,其就以优异的三维制造能力和制造分辨率而被人所熟知。飞秒激光器的作用机理是双光子吸收,目前飞秒激光器已经实现国产化,设备中的第1束光通常由飞秒激光或者连续激光器产生。而第2束抑制光则由连续激光器产生。一方面,是因为第2束光不能对光刻胶产生聚合,因此光强不宜太强。另一方面,是因为连续激光的价格相对于飞秒激光更低。团队自行设计了双色镜和滤波片,并委托国内镀膜商进行了加工。还自行研制了机械光开关,开关寿命可以达到3亿次以上。零部件国产化程度的提升,大大降低了整机造价。

为了能让双光束超分辨设备系统可以集成一体化,团队已经研发出一套可以将激光器、移动台、光谱仪等设备集成在一起的系统,大大提高了工作

效率。团队现有专门研发光刻胶材料的研发人员,除了可使用1束飞秒激光和1束连续激光实现双光束超分辨直写光刻外,光刻胶还允许2束都是连续激光实现超分辨直写光刻三维制造。同时光刻胶材料性能稳定,无需特殊处理即可使用。另外,对设备进行了精简化组装,缩小了占地面积,增加了防震性能,大大提升了整个系统的稳定性,整套双光束激光直写设备包括激光器、防震装置、电脑、移动台等零配件,并且大部分零配件都可以自行生产。设备还预留了空间可以增加其他功能,例如,加入了可以进行微区光谱仪进行光谱测试。双光束超分辨设备系统从软件到硬件基本都可以自行研发,实现国产化。

5 结论

双光束超分辨光刻技术避免了EUV光的使用,可以在不影响分辨率的情况下大幅度降低研发难度,这为下一代光刻机技术指出了一条新道路。虽然双光束超分辨激光直写设备已经实现国产化,但是并不能真正应用于芯片制造,目前的用户主要集中在科研单位,并没有实现真正的市场化,并且激光直写设备的最大问题就是制造速度太慢,因此,希望尽快制造出基于阴阳文互补掩模版的投影式双光束超分辨光刻设备来提高曝光速度。综上所述,要完成第6代双光束超分辨光刻设备的研制和国产化,还需要继续努力。

参考文献(References)

- [1] Li L T, Jing B, Hu J X, et al. Study on chip reliability modeling based on mutually dependent competing failure of solder joints in different failure modes[J]. IEEE Access, 2020, 8: 204695–204708.
- [2] Wang J Y, Chen X Y, Liu H, et al. A method for manufacturing flexible microfluidic chip based on soluble material[J]. Journal of Nanomaterials, 2021, 2021: 1280338.
- [3] Rodríguez-Ruiz I, Teychené S, Van Pham N, et al. Broadcasting photonic lab on a chip concept through a low cost manufacturing approach[J]. Talanta, 2017, 170: 180–184.
- [4] Wang J, Long Y. On-chip silicon photonic signaling and processing: A review[J]. Science Bulletin, 2018, 63(19): 1267–1310.
- [5] Jin Z A, Li Y J, Yang Z, et al. Real-time indoor positioning based on BLE beacons and pedestrian dead reckoning for smartphones[J]. Applied Sciences, 2023, 13(7): 4415.
- [6] Kruit P, Ren Y. Multi-beam scanning electron microscope design[J]. Microscopy and Microanalysis, 2016, 22(S3): 574–575.
- [7] Li L, Liu X, Pal S, et al. Extreme ultraviolet resist materials for sub-7 nm patterning[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(16): 4855–4866.
- [8] Wan L. High χ polystyrene-b-polycarbonate for next generation lithography[J]. Science China Chemistry, 2017, 60(6): 679–680.
- [9] Khan H N, Hounshell D A, Fuchs E R H. Science and research policy at the end of Moore's law[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1): 14–21.
- [10] Zheng D Z, Xiang S Y, Guo X X, et al. Experimental demonstration of coherent photonic neural computing based on a Fabry-Perot laser with a saturable absorber[J]. Photonics Research, 2022, 11(1): 65.
- [11] 袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57–64.
- [12] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922031.
- [13] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.
- [14] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 25–44.
- [15] Pan L, Park Y, Xiong Y, et al. Maskless plasmonic lithography at 22 nm resolution[J]. Scientific Reports, 2011, 1: 175.
- [16] Saifullah M S M, Asbahi M, Neo D C J, et al. Patterning at the resolution limit of commercial electron beam lithography[J]. Nano Letters, 2022, 22(18): 7432–7440.
- [17] Wang Y K, Yuan J D, Chen J P, et al. A single-component molecular glass resist based on tetraphenylsilane derivatives for electron beam lithography[J]. ACS Omega, 2023, 8(13): 12173–12182.
- [18] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697–698.

- [19] Cao Y Y, Gan Z S, Jia B H, et al. High-photosensitive resin for super-resolution direct-laser-writing based on photoinhibited polymerization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19486–19494.
- [20] Gan Z S, Cao Y Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2061.
- [21] Hein B, Willig K I, Hell S W. Stimulated emission depletion (STED) nanoscopy of a fluorescent protein-labeled organelle inside a living cell[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(38): 14271–14276.
- [22] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: Stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(11): 780–782.
- [23] Wen X W, Zhang B Y, Wang W P, et al. 3D-printed silica with nanoscale resolution[J]. *Nature Materials*, 2021, 20(11): 1506–1511.
- [24] Liu T Q, Tao P P, Wang X L, et al. Ultrahigh-printing-speed photoresists for additive manufacturing[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(1): 51–57.
- [25] Gan Z S, Turner M D, Gu M. Biomimetic gyroid nanostructures exceeding their natural origins[J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1600084.
- [26] 骆志军, 刘亚男, 陈梦林, 等. 面向产业化应用的双光束超分辨数据存储技术[J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 94–100.
- [27] 骆志军, 刘紫玉, 王舒虹, 等. 下一代光刻机技术的探索: 第六代双光束超分辨光刻机概念、技术和未来[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922028.

Development and future of dual-beam super-resolution lithographic technology

XIE Dale^{1,2}, AI Xingxing³, GAN Zongsong^{1,2*}

1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. Key Laboratory of Education Ministry for Information Storage Systems, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China

Abstract In recent years, with continuous improvement of chip manufacturing technology, the development of lithography technology is facing some difficulties, which also affect the development of chip industry and the sustainability of Moore's Law. However, current mainstream extreme ultraviolet lithography technology is close to the manufacturing limit, and more advanced technology is needed to break through the technical bottleneck. In this paper, the concept of lithography based on dual-beam super-resolution technology is reviewed, and its advantages and potential are analyzed. At the same time, the challenges and possible solutions of this technology are proposed. This new lithography technology is expected to play an important role in the field of micro-nano manufacturing.

Keywords chip manufacturing; lithography technology; double beam; super-resolution ●



(责任编辑 王微)