

# 激光与光电子学进展

## 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

骆志军<sup>1,2,3</sup>, 刘紫玉<sup>1,2,3</sup>, 王舒虹<sup>1,2,3</sup>, 王端<sup>1,2,3</sup>, 甘棕松<sup>1,2,3\*</sup>, 杜忻瑶<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>华中科技大学信息存储系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>3</sup>深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518057

**摘要** 集成电路的发展至今已有 60 余年,对更为强大性能芯片的追求使得芯片制造技术不断迭代升级。长期以来,基于紫外光源投影曝光光刻的芯片制造方法是大规模集成电路制造的唯一选择。然而,随着极紫外光刻机进入产线应用和不断性能优化,芯片制造已经进入了 7 nm 及以下节点。对于摩尔定律是否可以持续、极紫外光刻能否支撑未来芯片需求等问题,学术界和工业界均未形成一致的意见和具有共识的下一代光刻技术路线。相对基于极紫外投影曝光式的第五代光刻机,本文提出基于双光束超分辨技术的第六代光刻机概念,并从多个角度论述基于双光束超分辨的第六代光刻机技术的优势和潜力,同时也讨论了该技术存在的难点以及可能的解决方法。作为不同于紫外光刻技术路线的一种可替代技术路线,双光束超分辨光刻机技术将极有可能引领未来芯片制造。

**关键词** 光刻机; 双光束; 超分辨; 投影; 芯片制造

中图分类号 TN305

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.0922028

### Exploration to Next Generation of Lithography Technology: Concept, Technique, and Future of the 6<sup>th</sup> Generation of Super-Resolution Lithographic System

Luo Zhijun, Liu Ziyu, Wang Shuhong, Wang Duan, Gan Zongsong\*, Du Xinyao

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Information Storage System Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

<sup>3</sup>Research Institute of Huazhong University of Science and Technology in Shenzhen, Shenzhen 518057, Guangdong, China

**Abstract** Integrated circuit has been invented for more than 60 years, and the pursuit of more powerful performance chips makes the chip manufacturing technology constantly iterate and upgrade. For a long time, chip fabrication methods based on the ultraviolet lithographic projection system have been the only option for large-scale integrated chip fabrication. However, with the extremely ultraviolet lithography applied into the production line and optimized performance, chip manufacturing is advanced to the 7 nm and the following node. Academia and industry

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-04-07; 录用日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61775068)、国家重点研发计划(2021YFB2802000)、深圳市科技创新委员会基金(JCYJ20180507184503128)、武汉市东湖高新区人才经费、华中科技大学学术前沿青年团队资助、华中科技大学科研启动经费

通信作者: \*ganzongsong@hust.edu.cn

are not consensus of whether Moore's law can last and extremely ultraviolet lithography can support the future chip demand. The next generation of lithography technology route is still undiscovered. Compared with the fifth generation lithography based on extreme ultraviolet projection exposure, this paper proposes the concept of the sixth generation lithographic system based on dual-beam super resolution technology, and discusses the advantages and potential of the sixth generation lithographic system based on dual-beam super resolution technology, and also discusses the difficulties and possible solutions. As an alternative technology different from the ultraviolet lithography technology, the dual-beam super resolution lithography will probably lead the future of chip manufacturing.

**Key words** lithography; dual-beam; super resolution; projection; chip manufacturing

## 1 引言

摩尔定律描述芯片中晶体管的容纳数量每过 18~24 个月就翻一倍,对应性能也会显著提升,芯片技术的这种持续进步推动了信息技术长达几十年的繁荣发展。自光刻机被应用到大规模集成电路制造以来,一直都是芯片制造的最核心设备,其地位是不可撼动的。近年来,随着制造高端芯片所使用的光刻机研制难度和价格不断攀升,种类繁多的新型微纳制造技术也不断出现,这使得未来芯片制造是否必须用日趋昂贵的光刻机成为了一个可被讨论的话题。诚然,电子束(直写)光刻机、离子束(直写)光刻机、纳米压印、分子自组装等微纳制造技术在制造特定类型的微纳器件方面具有紫外光源曝光光刻机(以下简称光刻机,其他类型的光刻机冠其全名以与电磁波光源曝光光刻机区别开来)所不具备的优势,但是对于未来大规模集成芯片制造,紫外光源曝光光刻机仍然是必不可少并且不可替代的。

概括起来,对可制造材料丰富的兼容能力、在纳米尺度对器件任意几何构型的支持能力、极低成本和超大规模的制造能力决定了光刻机是芯片制造的不二选择。对于器件而言,决定其性能的因素主要有两个。第一个是该器件所用的材料。比如用铜比用铝通常能够取得更好的器件导电率,用合金比用纯金属通常能够获得更高的硬度或更强的韧性以及抗蚀性。这是由材料本身的禀赋所决定的。第二个是器件单元的空间结构。比如,鳍式场效应晶体管的叉状三维(3D)结构大幅改善了电路控制并减少了漏电流。光刻机通过掩模版,将任意图案投影到光刻胶上,再通过图案转移,就可以实现任意二维(2D)图案在各种不同目标材料上的制造,并通过二维叠层进一步形成准三维器件。此时,只要图案的分辨率不高于光刻工艺所能达到的

最高分辨率,任意几何构型的器件都是能够制造出来的。光刻机的这种能力使得不同构型的器件在材料可选类别上能够进一步得到极大丰富。在材料种类和几何构型几乎可以任意选择的情况下,光刻机就可以按照设计人员的要求,制造出功能极其丰富和强大的器件。这些器件基于其丰富的材料种类和几何构型支撑了其在众多领域的应用。

不同材料、不同几何构型的各种器件,在真正实现大规模应用之前,必须要解决低成本大规模制造的问题。例如,在机械加工领域,高精度机械加工设备是加工高精度零部件的基础。然而,在一般情况下,利用高精度机械加工设备加工一个零部件,其加工价格和用工时间会随着零部件复杂程度和加工精度的提高而显著增加。模具行业通过模具进行产量二次放大,才能够有效地降低高精度零部件制造成本。光刻机通过类似于胶片相机照相的方法,将复杂的图案一次性投影到光刻胶上,从而实现复杂器件的快速制造。英特尔公司所生产的一颗计算机 CPU 的整个设计文件普遍在 10 GB 以上,而荷兰阿斯麦尔(ASML)公司生产的深紫外光刻机可以在 1 h 之内处理 275 片 12 寸硅片,以 Intel Ice Lake 架构的核心为例,单个 12 寸硅片能够切割出约 485 颗核心,即每小时极限能够曝光 13.3 万颗核心。在这样的制造能力下,才能够将一颗 CPU 的成本降低到几十到上千美元。如果按照其他制造方法来计算芯片制造成本,对于计算机 CPU 这样的芯片,其制造价格无疑是大众用户无法承受的。

目前,基于硅基微纳器件的制造工艺及性能已经逐渐达到物理极限,人们开始转向材料上的突破。随着纳米技术和二维材料的发展,一些研究人员提出用石墨烯等材料作为芯片中晶体管的一部分<sup>[1-3]</sup>。这样的研究虽然表明了可以将晶体管栅极长度缩小到 5 nm 以下同时开关门延时缩短到 50 fs 以下<sup>[2]</sup>,但是将这些材料以亿为单位、大尺寸整齐精

确排列,本身存在困难,同时这些材料与其他材料匹配生长及协同使用等也还存在一些关键困难<sup>[4]</sup>。采取其他微纳制造技术虽然可以小规模地制造出基于这些材料的晶体管,但是类似于石墨烯的晶体管芯片只有实现低成本大规模制造,才能够在应用上真正替代硅基芯片。即使在未来研发出了能够匹配碳基器件的半导体工艺,光刻机仍然是其大规模制造的不二选择。

从器件功能而言,集成电路、光芯片、传感器等是信息处理、存储、传输和获取过程中不可缺少的内容,而光刻机是制造集成电路、光芯片、传感器以及分立器件最佳、最强大的工具。光刻机具有丰富多样的性能支持和极高的性价比,从而有能力支持更高效率和更低成本的信息采集、存储、处理和传输,使得基于这四个步骤的信息技术在各个领域发生改变,并最终推动信息技术的迅猛发展。因此,光刻机是目前信息技术产业的根基,同时在可预见的未来,仍然是不可替代的芯片制造核心设备。

## 2 紫外光刻技术路线面临的重大挑战

国际光刻机技术的发展,一直采用不断缩短所用光源波长的紫外光刻技术路线。目前国际性能最先进的极紫外光刻机已经进入工业应用,虽然将芯片制程推进到 7 nm 及以下节点,但是同时这也意味着沿着该技术路线进一步发展将面临两个方面的重大挑战。

第一个重大挑战是紫外光刻机进一步提升性能的研制难度和高昂造价。国际光刻机技术的发展之所以采用不断缩短所用光源波长的紫外光刻技术路线,其物理根源在于光的衍射极限。德国科学家阿贝在 1900 年之前就发现光学系统的最小可区分间距或者最高分辨率存在一个光波长除以两倍数值孔径的公式。量子力学也描述了微观物体存在波粒二象性,物体的波动性使其在遇到障碍时发生衍射现象。光具有波动性,因而将其聚焦于一点所得到的只能是具有一定光强弥散分布的光斑。当用光来进行光刻制造的时候,所制造的两个点或者两条线会因为光斑的光强弥散分布而必须间隔足够的距离,以避免光强弥散分布的空间重叠所带来的重叠区重复曝光问题。如果间隔的距离不够,则会因为重叠区重复曝光而导致最终所制造的两个点或者两条线在物理上粘连(在负胶曝光中)、设

计线条因过曝而解离(在正胶曝光中),这是集成电路制造需要极力避免的。光的能量越高,波长越短,其波动性相对越不明显,其聚焦光斑分布的弥散尺寸也就越小,因而也就使所制造的两个点或者两条线的间隔距离更近,最终也就能够造出密度更高的芯片。

在衍射极限限制之下,芯片要做小做密,就必须采用波长更短的光源。从第一代光刻机到目前最先进的第五代光刻机,光源波长从 436 nm 开始不断缩短,分别经历 365 nm、248 nm、193 nm,到目前第五代光刻机的 13.5 nm,国际紫外光刻技术的发展完美遵循了阿贝衍射极限公式。这种做法的后果就是光刻机越来越难以研制,同时其造价也越来越高。到第四代 193 nm 光刻机的时候,国际上主要就日本尼康、日本佳能、荷兰阿斯麦尔等少数几家企业能够生产。而目前第五代 13.5 nm 极紫外光刻机,国际上仅荷兰阿斯麦尔公司能够生产,而且其售价每台超过 1 亿欧元。第五代 13.5 nm 极紫外光刻机是集美国、德国、日本等多个发达国家技术贡献的产品,在世界范围内尚没有一个国家能够独立制造。研制第五代 13.5 nm 极紫外光刻机,除了面临光源产生难的困难之外,在光束传输的过程中防止极紫外光被传输器件吸收从而衰减能量和在光束精密控制中必须确保光学元件的表面粗糙度显著小于光波长等,都是研发必须解决的关键难题。未来如果要采取更短波长的光源,则需要将光源的波长从 13.5 nm 提升到 X 射线波段。这无疑将进一步大幅度增加光刻机的研制难度和造价。

第二个重大挑战是芯片二维密度无限制提高必然会遇到量子极限。采用极紫外光刻或者更短波长光源光刻所制造出来的芯片,其密度在物理上可以提高到 1 nm 以下,但是在功能上却将遭遇严峻的量子难题。集成电路芯片中,电子的运行在历史上均遵照经典电子学原理。以硅基芯片为例,芯片中两条线上电子的运行规律是以电子分别在两条线中运行但不相互干扰为前提的。当这两条线的间隔足够远的时候,这个前提是可以保证的。然而,当这两条线的间距近到一定程度的时候,在其中一条线中运行的电子将影响到在另外一条线中运行的电子。电子在纳米尺度上的这种效应起源于量子物理。当硅材料在空间三个维度上均缩小到纳米尺度时,就形成了硅的量子点。不同尺寸的硅量子点有不同的光电性能,这在量子点领域已经

是众所周知的<sup>[5]</sup>。硅材料的波尔半径大致描述了硅材料中电子在纳米尺度的量子效应影响范围。在受到量子效应干扰之后,电子不再按照经典电子学规律运动,在这种量子效应没有被完全弄清楚之前,抛弃使用了将近 200 年的经典电子学原理来设计和使用芯片无疑会遭遇更大的挑战。尽管不同的半导体材料具有不同的波尔半径,但是选择不同的半导体材料只能尽量减小波尔半径,而不能消除量子效应的影响,同时几乎所有半导体材料的波尔半径都在 1 nm 以上。

在芯片二维密度逐渐逼近材料量子效应极限和二维更密单元器件制造成本增加的情况下,三维集成芯片通过增加单位体积内的元器件数目而非一味缩小器件二维尺寸来实现更高的芯片集成密度,被认为可以将芯片的发展空间代入到第三维度,从而成为未来信息技术数据处理能力和存储容量可持续增长的关键。单元器件的数量密度仅仅是芯片集成密度的一个维度,相比而言,集成芯片中单元器件的关联密度对于提升芯片的性能更为重要。所谓关联密度指的是器件闭环通路的平均可行路径数量。与器件数量密度不同的是,关联密度更加关注芯片内各元器件协同工作的能力,此时不同元器件直接关联数目的增加显然有利于提升器件的整体协同工作能力。如图 1 所示,考虑用晶体管为单元器件做出一个二维的导电网络器件,在网络的每一个格点之处,存在一个单元器件。该单元器件可根据需要在其格点的前后左右四个方向上实现导通与否的功能。此时每个单元器件的关联数目为前后左右四个。此二维导电网络器件实现前后或者左右整体导通,则要求单元器件关联之间至少要有 1/2 的概率是导通的。也就是说,为了实现整体导通这一个整体性能,在关联密度为 4 倍单元器件密度的情况下,一半的元器件都需要参与工作。将此模型扩展到三维空间,此时每个单元器件可通过前后左右上下六个方向与其他元器件关联。此三维导电网络器件实现前后、左右或者上下整体导通,仅要求单元器件关联之间至少要有不超过 0.25 的概率是导通的。上述这个模型就是统计物理学中著名的键逾渗模型<sup>[6]</sup>。当单元器件直接的关联密度提高时,实现同样功能所需要参与的单元器件的数目是可以下降的,这也意味着整体更加强大的性能。采用不断缩短所用光源波长的紫外光刻技术来制造芯片,天然存在二维叠层实现准三维制造

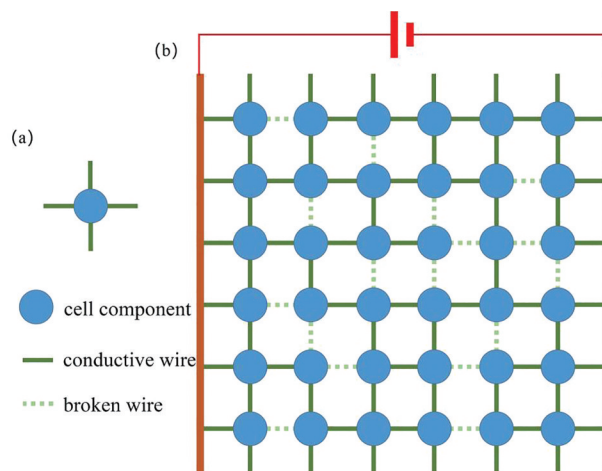


图 1 单元器件平均关联数目为 4 时的二维键逾渗导通示意图。(a)单元器件在前后左右四个方向上均可以导通接线或者不导通接线;(b)单元器件形成二维导电网络,其前后左右四个方向上以一定概率导通接线或者不导通接线

Fig. 1 Schematic diagram of 2D bond overpass when the average number of single components is 4. (a) Single components can be connected or not connected in four directions; (b) single components form a 2D conductive network that is connected or not connected in four directions with a certain probability

的劣势。无法将深紫外等波长的光聚焦在材料内部实现光刻制造,这是三维芯片关联密度提升存在制造基础困难的根本原因。

### 3 第六代双光束超分辨光刻机的概念

对于继第五代极紫外光刻机之后的下一代光刻技术具体发展方向问题,学术界和工业界均未能形成一致的意见。这个问题涉及到以下 4 个方面: 1) 未来芯片将如何发展; 2) 这样的芯片在确保丰富功能的前提下如何低成本超大规模制造; 3) 下一代光刻技术如何解决紫外光刻技术路线面临的上述两个重大挑战; 4) 工业界如何低成本地从现有的第五代极紫外光刻机过渡到下一代光刻机等。虽然对于下一代光刻技术,学术界和工业界有不同的看法,但是最终能够被工业界所接受的技术,一定是需要综合考虑上述几个方面问题的。本文提出第六代双光束超分辨光刻机全新概念并针对上述几个方面的问题,提出了解决的基本方法。

与单光束的紫外光刻技术路线不同,第六代双光束超分辨光刻技术将通过双束可见光共轴

投影的方式,将所需要制造的图案投影到光刻胶上实现曝光。如图 2 所示,该技术的其中一束光与单束紫光光刻技术中的光束一样,被调制成所需要的图案,并最终微缩投影到光刻胶上实现曝光。而该技术的另外一束光被调制成与第一束光阴阳文互补的图案,并经历与第一束光相同或相似的微缩投影过程,与第一束光一同投影到光刻胶上。两束光的阴阳文互补图案在边缘处对

准。两束光对光刻胶材料共同作用,第二束光起抑制作用,效果是消除第一束光因为衍射带来的对图案边缘的影响,从而突破第一束光因为衍射极限对光刻分辨率的限制。上述的两束光的波长一般不同,其中抑制光可以通过光化学或光物理作用打断第一束光对光刻胶的固化反应,并且两束光的中心波长需要尽量远离,避免产生交叉激发的现象。

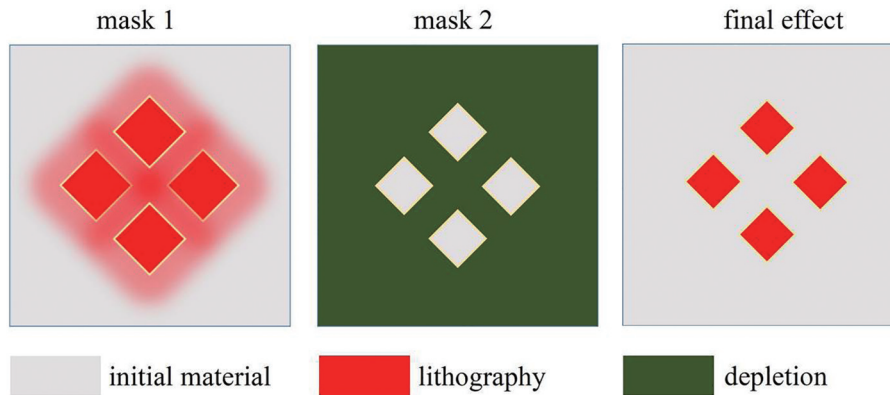


图 2 阴阳文互补掩模版及其双光束投影光刻最终效果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the final effect of the Yin and Yang complementary mask and its dual-beam projection lithography

对于第五代极紫外光刻技术的高制造难度和造价,第六代双光束超分辨光刻机提出采用远场突破光学衍射极限的双光束方法,在不使用短波长光源的前提下,达到与使用短波长光源时相同甚至更好的光刻分辨率效果,从而大幅度降低高分辨率光刻机的研制难度。在使用长波长光源能够实现超衍射极限光刻分辨率假设成立的前提下,采用长波长光源,首先可以解决短波长光源产生的困难。相比于 193 nm 的准分子激光和 13.5 nm 的激光辐照液体锡滴诱导等离子体辐射光源<sup>[7]</sup>,可见光或者 365 nm 等长波长紫外光源的制造难度无疑是大幅度降低的,并且无论是光束质量和出光功率都可以做得更好。特别是在出光功率方面,可见光激光的出光平均功率可做到上万瓦,相比极紫外光源的百瓦高出 2 个数量级,这意味着光刻曝光面积具有大幅度增加的潜力。其次,采用长波长光源,光束传输所面临的传输元件吸收损耗将大大改善。极紫外光刻机之所以采用 13.5 nm 的波长,其关键原因就在于该波长在钼硅涂层的反射下,具有较低的吸收损耗,约为 30%<sup>[8]</sup>。然而即便如此,13.5 nm 的光在出光之后,仅有不到 2% 的光能量能够最终达到光刻胶实现曝光,剩余的 98% 的能量都被损耗掉了。除了各种光学元件会造成吸收损耗之外,空气

等气体也能够强烈地吸收短波长紫外光。将极紫外光刻机的整个光路放置于真空之中显然也增加了设备的研制难度。最后,精密调控光束的光学元件精度要求将大大下降。光刻机是极其精密的制造设备,光源发出的光必须进行精密调控,才能够精确地在光刻胶上曝光。要达到精密调控的效果,光学元件的表面粗糙度普遍要求较高<sup>[9]</sup>。当使用一块反射镜反射光的时候,最理想的情况是一束平面波经过反射后仍然以平面波出射。当反射镜的表面凹凸不平的时候,显然最后出射的光束将偏离理想的情况。反射镜的表面越凹凸不平,其偏离的程度也越严重。反射镜表面凹凸不平的程度,是相对于其反射光的波长而定的,在一般情况下,其粗糙度要比反射光的波长小。在光学中,能够确保光束精密调控的光学元件,其表面粗糙度一般在十分之一波长。对于 13.5 nm 的光而言,确保光束精密调控要求的表面粗糙度为 1.3 nm,而对于 532 nm 的可见绿光而言,其表面粗糙度为 53 nm。这对于制造大尺寸光学元件而言,其制造难度无疑将大幅降低。

对于紫外光刻机技术,第六代双光束超分辨光刻机技术是大部分继承已有紫外光刻技术基础之上的改动,因而既可以真正降低光刻机的研制难度,也可以在不改变工业界几十年积累下来的光刻

工艺的基础之上,低成本地实现产线设备替换和升级。在装备方面,双光束超分辨光刻技术相比于国际现有的紫外光刻技术除了原有短波长光源改为长波长光源并增加一束长波长光源光路之外,并不改动微缩投影曝光的基本方式,因此真正做到了对国际现有光刻技术的继承。国际现有紫外光刻机技术的发展,经过了无数的迭代改进,花费了上千亿美元计算的代价,才取得了今天的技术成就,因此任何意图颠覆国际现有紫外光刻机技术的创新必然难以彻底抛弃这来之不易的技术成就。双光束超分辨光刻技术既可以是改动一束现有光源的波长并新增一条光路,也可以是在现有紫外光刻机的基础之上直接新增一条光路。新增的光路在调制好投影曝光图案之后,与第一束光合束之前,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能够真正地继承原有光刻技术现有的一切。在合束过程中,对于长波长光源,仅仅多增加了一片透过第一束光反射第二束光,或者反射第一束光透过第二束光的双色镜。该双色镜的作用是不改变原有第一束光的路径,同时使得第二束光耦合到原有第一束光的光路中来,并一同进入到光刻投影物镜。双光束超分辨光刻机技术的这种使用方法,完全兼容了现有紫外光刻机技术,因此不会出现原有技术被颠覆而导致代价无法接受的问题,这为工业界最终接受该技术提供了基础。如果新的光刻机技术不是继承性创新,而是破坏性创新,在考虑工业应用需要巨额资金投入的情况下,极可能会出现花费巨大代价研制成功新型光刻装备,但是始终不被工业界接受的最终结果。比如近场光刻技术虽然也能够做到突破光学衍射极限的分辨率,但其要求曝光系统和光刻胶之间的距离短到微米或者纳米尺度<sup>[10]</sup>,这对于工业应用所要求的大尺寸微缩投影并快速制造而言,显然是不能接受的。因而近场光学虽然在微纳制造中能够得到更高分辨率,但是近场光刻从来就没有被真正应用到芯片的工业制造上。

第六代双光束超分辨光刻机技术在应对未来芯片制造,特别是三维芯片制造上,将独具潜力。在工业界,芯片制造一直都采用的是二维制造工艺,并形成了固定的工艺流程,因而难以接受新型光刻技术对制造方法和工艺的改变。但是制造方法和工艺的改变并不是新型光刻技术提出的,而是信息技术发展所要求的。工业界对于花费巨大人

力物力所固化的光刻制造方法和工艺,显然不愿意随便更改,然而这对于应对未来芯片发展的挑战却是远远不够的。今天,信息技术的发展显然面临前所未有的突破,这些突破将从根本上动摇原有芯片制造的方法和工艺。首先是计算机原理。自计算机诞生以来,冯·诺依曼框架便成为了计算机技术的底层基础。在冯·诺依曼框架下,传统计算机中计算和存储是分离的。这一点在计算机中的直接体现就是内存、硬盘和CPU是独立分离的部件。这使得计算机的速度存在方法上的极限。数据在计算之前必须从内存上传至CPU,等到计算结束则重新从CPU传回内存。数据在硬件之间来回的时间使得计算速度存在难以克服的瓶颈,学术上称之为存储墙。与计算机不同的是,人类的大脑很难说是计算和存储分离的,很难说大脑的哪一些部分是负责计算,而另一些是负责存储的。近几年来,人们逐渐意识到存储计算一体化将大幅度提升计算性能,对这个方向的研究也逐渐成为计算机科学中引人关注的热点<sup>[11]</sup>。显然,存储计算一体化将对芯片材料和芯片制造提出了新的要求,现有紫外光刻机技术能否适应这种新的制造要求目前仍然是需要讨论的。人类的大脑有高达860亿个神经元,对比现在的芯片和人的大脑就可以发现,要真正制造出和人类大脑类似的新型芯片,现有紫外光刻机技术仍然有很多需要提升的空间。其次是量子技术。量子计算机凭借其在计算能力方面碾压经典计算机的潜力<sup>[12]</sup>令世界各大国均表现出了极强的兴趣。美国更是力图打造以量子计算机为核心的领先量子信息技术,来实现所谓的量子霸权。量子计算机是近年来信息技术领域最激动人心的进展之一。虽然目前谷歌等公司开发的量子计算机原型机看起来更像一个实验装备<sup>[13]</sup>,然而如何制作基于量子计算的芯片已经作为科研课题引起了人们的关注。显然这样的芯片将完全不同于目前常见的芯片,这无疑也对其制造技术提出了新的挑战。

尽管信息技术的变革是多个方面的,但反映到芯片制造技术上,根本上无疑还是制造分辨率能否满足要求、能否在三维空间内制造任意图案、能否兼容和组合更多材料以及能否更低成本更大规模制造等几个方面的问题。相比于第五代极紫外光刻机技术,第六代双光束超分辨光刻机技术达到同样的制造分辨率可以采用不同的光源波长和波长组合,从而为三维制造和更多材料兼容组合提供了

更多的操作空间。新增加的一束光以及两束光不同的组合能够为光刻制造带来更多的自由度,因而也就具有更强的综合性能和对未来信息技术发展更强的适应能力。

#### 4 双光束超分辨光刻机技术的核心要素

双光束超分辨光刻机技术的关键在于两个方面。第一个方面是光学系统对两束光形成阴阳文互补的曝光对准图案,第二个方面是光刻胶材料需要对两束光产生特定的响应。在这两个关键因素满足的条件下,双光束超分辨光刻机技术能够最终实现超越远场光学衍射极限分辨率的投影光刻。

光刻分辨率受衍射极限限制的根源在于衍射极限对曝光图案边缘的影响。在单光束投影光刻的情况下,曝光图案微缩投影到光刻胶上,光学系统使得曝光图案在边缘处产生衍射。曝光图案在边缘附近的光强分布一般呈现出衍射光斑的显著特征。对于一个理想的点发光图案,其投影后将在投影焦平面上产生一个艾里斑。在该艾里斑的中心位置处,其光强为类高斯分布,同时离其中心位置稍远的地方,还会存在衍射旁瓣。在常见的圆孔衍射情况之下,各级衍射旁瓣占光强能量分布占 16%。点图案投影形成的艾里斑作用于光刻胶,将在光刻胶上光刻出一个点图案。光刻胶对于不同的曝光光强有不同程度的曝光响应。无论是单体转变为聚合物,还是化学键被打断等各种曝光机理,光刻胶在曝光过程中将发生由光导致的光物理和光化学反应。定义一个光刻胶被曝光的程度,其对应着单体转变为聚合物时的单体转变率或者化学键被打断等的百分比<sup>[14]</sup>。一般情况下,光强越强,光刻胶被曝光的程度越高,这种对应关系虽然很多时间都不是线性的,但是这种正相关的趋势是事实存在的。曝光完成之后,在显影过程中,仅仅曝光程度超过一个阈值的光刻胶才能够完成曝光图案到光刻胶的转移。以单体转变为聚合物的负胶为例,只有当曝光光强足够强的时候,才能够有足够比例的单体变为聚合物,光刻胶最终才能够由液体转变为固体。当曝光强度不够的时候,尽管有一定比例的单体变为了聚合物,但最终仍然没有形成单体之间牢固的连接,因而在溶剂显影时这些曝光强度不够的光刻胶还是能够完全溶于显影溶剂中。点图案投影曝光在光刻胶上光刻出的点的物

理大小取决于光刻胶的曝光程度分布以及显影过程的曝光程度阈值,只有超过曝光程度阈值的位置才能够最终贡献曝光点的物理尺寸。

例如用投影曝光的方法制造两个点,两个点图案将投影形成两个艾里斑。当这两个点的位置足够远的时候,两个点之间并不会出现相互影响的情况。然而,制造更小和更密芯片的需求使得在很近的点中心距离下制造出两个物理上分离的点成为了光刻技术最关键的问题。当两个点的中心距离与阿贝衍射极限相当的时候,在两个点间隔的中间位置,两个艾里斑光强会叠加,从而使得中间位置处光刻胶曝光程度在原本没有光强叠加时低于曝光程度阈值因光强叠加而超过曝光程度阈值。最终使得原本需要物理上分离的两个点粘连在一起。为了解决这个问题,双光束超分辨光刻机技术将一次曝光制造高密度图案分解为在不显影的情况下低密度图案多次曝光组合并最终形成高密度图案。如图 3 所示,以投影曝光制造两个中心间距很近的点为例,双光束超分辨光刻机技术在制造出一个点之后,在不显影的情况下,移动曝光物镜与光刻胶的相对位置,然后再使用相同的双光束超分辨光刻机技术投影曝光制造出另一个点。为了使得这两个点最后不发生物理粘连,双光束超分辨光刻机技术的核心目标是缩窄光刻胶曝光程度在空间位置上的分布。此时,双光束超分辨光刻机技术引入第二束光。因为第一束光的目的是要制造出一个点,所以第一束光对应光刻掩模版的形状是有点图案位置处透光,无点图案位置处不透光,实际上就是在铬板上刻蚀出一个透光的点。引入的第二束光所对应的光刻掩模版正好与第一束光对应的掩模版阴阳文互补,第二束光掩模版图案是有点图案位置处不透光,无点图案位置处透光。第二束光通过掩模版并经过光刻物镜投影后,将在光刻胶上投出一个与第一束光投影出的亮点所不同的暗点。调整光学系统,使得两束光分别投影出的亮点和暗点在焦平面上的中心位置对准。将这两束光形成的投影图案同时作用于光刻胶。光刻胶将对这两束光产生不同的响应。第一束光作用于光刻胶,发生与常规单光束光刻相同的光刻物理和化学反应,使得光刻胶发生性能改变。而第二束光则阻止第一束光光刻物理和化学反应的发生,或者延缓其反应的速率,最终使得光刻胶发生性能改变的程度降低乃至不发生性能改变。在两束光的共同作用下,光刻胶最终的曝光程

度为两束光光强的相关函数。第一束光越强,曝光程度越高;而第二束光越强,则曝光程度越低。当第二束光在第一束光投影形成亮点的中心位置处光强为零,往外则光强不断增强,到达半个第一束光波长位置处光强达到最强并再往外不再变化时,原本在第一束光作用下,投影制造一个点所形成的类高斯形状的曝光程度分布,除了中心位置曝光程度不降低之外,其他位置的曝光程度均有不同程度

的降低。离中心位置越远,其曝光程度下降越多。因而最终类高斯形状的曝光程度空间位置分布将变窄<sup>[15]</sup>。此时移动光刻胶的相对位置,在临近位置处再投影曝光制造另一个点,也将得到同样变窄的曝光程度空间位置分布。在两个点相距的中间位置,由于其曝光程度相比于单光束一次曝光制造两个点时可以降低到曝光程度阈值以下,因而可以使得这两个点在物理上仍然是分立的。

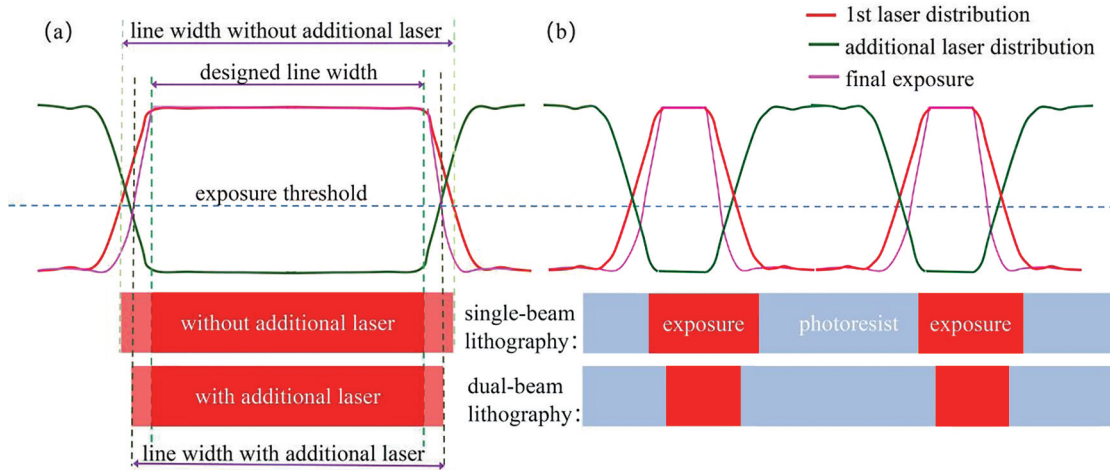


图 3 双光束超分辨光刻机技术引入第二束光对第一束光衍射边缘进行修正。(a)在曝光程度阈值不变的前提下,引入的互补掩模版形状第二束辅助光将使得光刻胶在第一束光衍射边缘处的曝光程度分布变窄;(b)在双光束超分辨光刻技术第二束光作用下,当单次曝光时两个图案的间距较远时,双光束光刻将使得这两个图案之间曝光未超过阈值部分的空间尺寸变得更宽

Fig. 3 Dual-beam super-resolution lithographic system introduces a second beam of laser to correct the first laser diffraction edge. (a) With the complementary mask shape, the introduced second beam of auxiliary laser will narrow the exposure distribution of the photoresist at the first laser diffraction edge; (b) under the action of the second beam of dual-beam super-resolution lithography, the dual-beam lithography between the two patterns will widen the spatial size of the exposure between the two patterns not exceeding the threshold when the single exposure is far apart

上述对于两个点制造的基于投影的双光束超分辨光刻机技术,可以拓展到任意图案的制造。比如拓展到圆盘的制造,相比于点制造,其变化在于点的大小变大。因此根据所需要制造出的圆盘大小,在第一束光对应的掩模版上刻蚀出有一定大小的透光圆形区域,而第二束光则在其对应的掩模版上刻蚀出有一定大小的不透光圆形区域。通过阴阳文互补掩模版的方法,投影出光强分布互补的两种图案,这在光学上是完全可行的。唯一需要考虑的就是两束光投影出来的图案的密度。其密度是受到两束光各自对应波长的衍射极限限制的。以光栅图案为例。第一束光投影产生的光栅的图案密度显然不能超过其光波长对应衍射极限的限制。对于第二束光而言,其产生的与第一束光图案互补的图案密度也不能够超过其自身波长的衍射极限限制。在这个条件之下,两束光

产生不超过其密度限制的任意图案都是允许的。如图 4 所示,为了制造出密度超过衍射极限的图案,双光束超分辨光刻机技术就需要对目标图案进行分解,使得每次曝光时图案的密度都不能超过其衍射极限的限制,并通过显影或者不显影多次曝光的方法最终完成高密度图案的制造。这种方法的核心意义是将高密度图案分解为多个低密度图案,分多次完成每个低密度图案的曝光,由于每个低密度图案的边缘都被第二束光修正,因此其边缘曝光程度的分布变窄,因而最终可以确保物理上需要分离的部分不会因为光学衍射而发生粘连。由于低密度图案多次曝光涉及到位置移动,因此位置精度的保证是重要的。好在多次曝光之间并不需要拿出样品进行显影,而是直接移动样品,因而可确保纳米精度的可重复移动,从而可以低成本地解决移动对准问题。



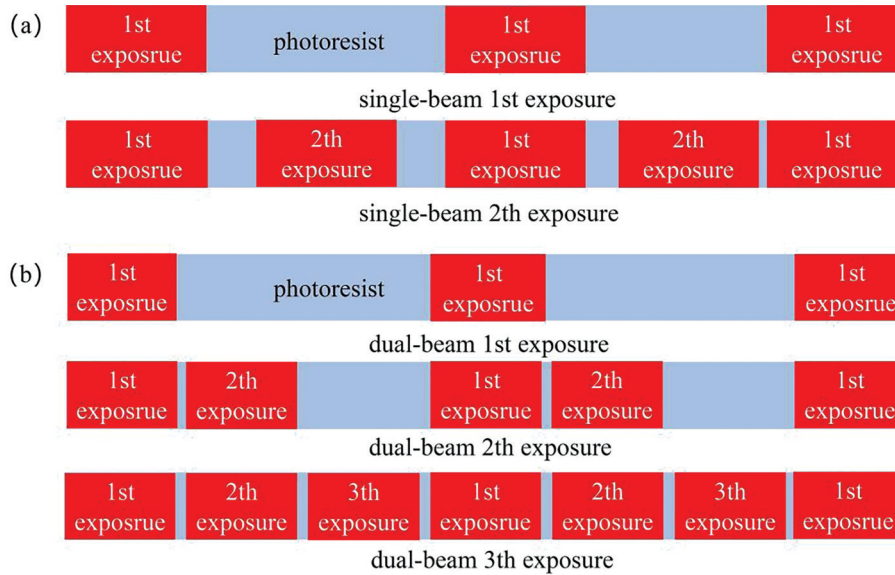


图 4 单光束和双光束投影光刻密度效果对比。(a)单光束光刻只能进行 2 次重复曝光;(b)双光束光刻能进行重复曝光的次数更多,具备更高密度

Fig. 4 Comparison of single-beam and double-beam projected lithography density. (a) Single-beam lithography can only perform 2 repeated exposures; (b) double-beam lithography can make repeated exposures more times, with higher density

双光束超分辨光刻机技术采用双束光的方法达到超分辨的光刻效果。首先,这两束光的波长一般是不同的,因此并不是通过两束光干涉之类的方法实现超分辨的。同时对于两束光中的任意一束光,也并不是采用类似于矢量光束聚焦的方法,使得原本为正常艾里斑分布的光斑,其中心分布变窄,从而可能出现旁瓣能量增加的问题。双光束超分辨光刻技术的核心思想是利用第二束光使得第一束光图案的边缘处,曝光程度分布在空间位置上变窄。因此,第二束光产生的互补投影图案光强分布,需要在第一束光投影图案的边缘处,在原本需要完全曝光的位置处光强为零,往外则不断增强,在第一束光半波长位置附近达到最强。在第一束光光强本身很弱,远远不足以使得光刻胶达到曝光程度阈值的地方,第二束光的光强可以为零,也可以不为零。双光束超分辨光刻机技术在光学系统上的这种设计,在物理上完全可行的前提下,确保光学系统的研制不存在理论上的困难和工程上的不可行。这种设计使得双光束超分辨光刻机技术能够继承现有紫光光刻机技术,在装置上并不需要做大的改动,而是在原有装置的光路中添加一个合束元件,使得两束光在被对准的前提下进入投影物镜并最终打到光刻胶上。

在光学系统可确保两束光光强分布能够按照需要进行设计的情况下,如何使得光刻胶对于两束光

发生所需要的响应,是双光束超分辨光刻机技术能否获得成功的关键。双光束超分辨光刻机技术对光刻胶的要求相比于普通的单光束光刻技术是更高的。对于第一束光而言,光刻胶对光的响应与普通单光束光刻机技术是相同的,光强越强,光刻胶的曝光程度越高。这是确保双光束超分辨光刻机技术能够兼容现有紫外光刻机技术的重要一点。光刻胶对第二束光的响应相比第一束光就复杂多了。双光束超分辨光刻机技术要求局域位置处的光刻胶只有在第一束光光强不为零的情况下,才对第二束光响应。因此即便是第二束光的光强较强,然而第一束光光强为零时,光刻胶也不响应,此时曝光程度为零。同时,在第一束光光强不为零的情况下,第二束光光强越强,则越能够降低光刻胶在第一束光曝光下的曝光程度。双光束超分辨光刻机技术对其配套光刻胶在这两个方面的要求看起来很高,但是却存在同时满足这两个要求的普适机理。本文将介绍一种较为通用的机理-能量去向疏导机理。

光刻胶必须吸收曝光光源的能量,并将这部分能量用于光刻相关的物理和化学反应,才能够最后使得曝光后的光刻胶与曝光之前发生性能改变。如图 5(a)所示,能量去向疏导机理的核心思想是,将光刻胶吸收的能量,通过各种办法疏导到其他的能量通道中去,从而使得用来贡献曝光程度改变光刻胶性能的能量减少。由于这部分能量少了,最终

的曝光程度也就相应下降。光刻胶在被曝光的过程中,一般存在光敏分子吸收第一束光,从基态跃迁到激发态的过程。处于激发态的光敏分子将触发光刻相关的物理化学反应。在光刻胶所吸收的能量中,有一部分是用于使得光刻胶性能发生改变从而贡献曝光程度的增加,而其他的还包括转变为热等不贡献曝光程度增加的部分。如图 5(b)所示,一种可行的方法是,第二束光将处于激发态的光敏分子通过受激辐射的方式,使其跃迁回更低的能级,从而丧失光物理化学反应的活性。在这种方法中,光敏分子吸收光能跃迁到激发态是较为普遍存在的。通过受激辐射的方式使得处于激发态的光敏分子跃迁回能量很低的状态也是普遍可行的。一方面,德国的 Hell 教授所开创的受激辐射显微成像技术表明了这样的分子材料是可寻的,其受激辐射显微成像技术的工作获得了 2014 年诺贝尔

奖<sup>[16-17]</sup>。另一方面,这种受激辐射的方法,一般需要的第二束光的波长要长于第一束光波长,这为光刻胶仅在第二束光作用下不响应,只有在两束光共同作用下才能够响应的状态提供了可行的路径。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二束光的光强成正比,第二束光光强越强,理论上高能态分子跃迁回低能态的比例越高。最后,这种受激辐射的方式使得光敏分子吸收的第一束光的能量,有一部分最终变为长波长的光辐射出去,光刻胶不会吸收该长波长的光。因此,第二束光通过受激辐射的方式新增了光敏分子吸收第一束光能量后的去向通道。这个通道与原有的能量去向通道是竞争性的。能量往新增的通道去得越多,往原有通道去得越少,因而最终减少改变光刻胶性能贡献曝光程度的能量。

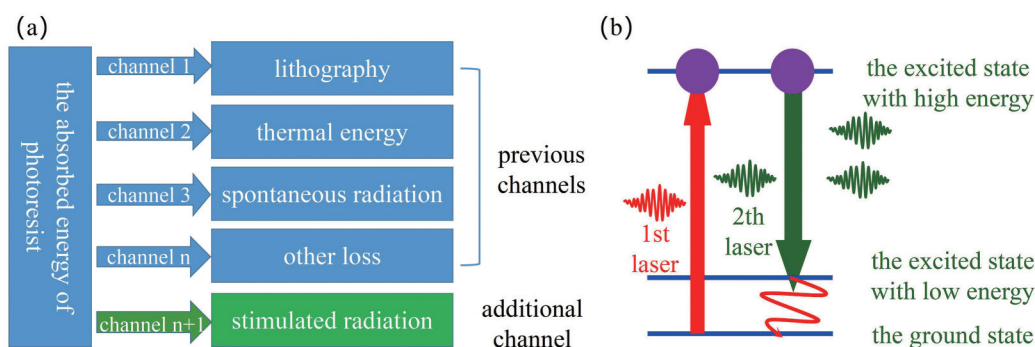


图 5 能量去向疏导机理示意图。(a)通过新增能量去向通道或者改变已有能量去向通道中各通道能量流动速度可以疏导光刻胶吸收能量的去向;(b)采用受激辐射损耗的方法,可以将光刻胶吸收光能从基态激发到激发态后,通过受激辐射损耗诱导到低能量激发态,从而改变能量流动去向

Fig. 5 Schematic diagram of the energy direction and guidance mechanism. (a) Energy absorption direction of photoresist can be diverted by adding the energy direction channel or changing the energy flow speed of each channel; (b) using the method of stimulated radiation depletion, photoresist can be excited from the ground state to the excited state and relaxed to the low energy excited state, thus changing the direction of energy flow

事实上,从光刻胶吸收第一束光的能量,到最终使得光刻胶发生所需要的性能改变,中间存在非常复杂的光物理和光化学过程。要实现最终目标所需的光刻胶性能改变,一般需要经过多个光物理和光化学反应步骤,同时共存其他不贡献曝光程度增加的若干能量去向通道,这就形成了一个能量去向链。在这个能量去向链中,加快不贡献曝光程度增加的能量去向通道的能量流动速度,或者减慢贡献曝光程度增加的能量去向通道的能量流动速度,以及新增不贡献曝光程度增加的能量去向通道,都能够减少改变光刻胶性能的贡献曝光程度的能量。这为双光束超分辨光刻技术配套光刻胶材料的开

发提供了足够的可能性。

## 5 双光束超分辨投影光刻技术的关键难点和解决方法

短波长紫外光刻机技术因为采用短波长光源,从而造成了整机装置研制的极大困难。从目前公开的资料来看,美国和中国均没有能力单独制造出第五代极紫外光刻机。双光束超分辨光刻机技术通过采用双束长波长光光刻的方法,绕过了短波长光源研制的困难以及由短波长光源带来的一系列技术困难。然而,这种办法并非没有代价。基于投影的双光束超分辨光刻机技术虽然大幅度降低了

光学系统的研制难度,但是却存在两个方面的难点。第一个方面是光学系统需要增加一束光,同时这两束光必须对准。第二个方面是光刻胶的开发相比单光束光刻技术所用的光刻胶难度加大。因为双光束超分辨光刻机技术继承了国际现有的紫外光刻机技术,因此光刻机研制本身存在的很多困难,比如高精度工件台的研制、光刻工艺本身如何提高制造质量(例如解决光刻胶倒角)等,并不是双光束超分辨光刻机技术所独有的,因而在本文中不做探讨。

首先是阴阳文互补图案的产生和对准。双光束超分辨光刻机技术通过将高密度图案分解为多个低密度图案的方法,从而解决在长波长光源使用情况下的高密度阴阳文互补图案产生问题。这种方法虽然需要对多个低密度图案分别曝光,但是此时只需要相对移动光刻胶的位置,并不会带来复杂的位置对准问题。而且每次曝光可控制在 1 s 以下,因而也不会显著增加曝光时间。对于具体需要将高密度图案分解为多少个低密度图案,则存在一个双束光具体采用何种波长和最终需要做出图案的密度对比的问题。如果双束光的波长均不小于 532 nm,而此时要光刻出 10 nm 节点的芯片,那么在光刻胶满足要求的情况下,显然需要分解的低密度图案的个数是比较多的。理论上低密度图案的个数大致估计为衍射极限长度除以两倍的节点纳米数,约为 13 个。极紫外光刻机一次曝光就可以实现的图案,用双光束超分辨光刻机需要分 13 步实现,将在一定程度上增加曝光时间,然而这种增加也仅仅不到 20 次。如果双束光的其中一个光源波长采用 193 nm,则分解的图案数目为 5 个左右。这个数目与 193 nm 深紫外光刻机做出 10 nm 节点芯片时,多重图案曝光技术所需要的多重图案重数相比,最多增加 2 次。因此双光束超分辨光刻机所采用的图案分解方法是现有紫外光刻机技术常用的方法,同时也没有大幅度增加多重图案的重数,因此无论是理论上还是工程上,都是可以实现的。

阴阳文互补图案的对准是双光束超分辨光刻机技术取得超分辨光刻效果的关键。阴阳文互补图案的产生,特别是大尺寸均匀图案的产生虽然也存在一定的难度,但是对于单光束光刻机技术而言,各种大尺寸均匀图案的产生问题本身也是存在的,并且也已经得到了非常好的解决。阴阳文互补图案虽然要求两个图案有互补特征,但是对各自图

案而言,仍然是各种大尺寸均匀图案中的一种,因此也能够在继承现有紫外光刻机技术的前提下得以解决。阴阳文互补图案产生后的对准是双光束超分辨光刻机技术所带来的新技术问题。

对准涉及到两个方面。第一个是如何确保阴阳文图案在边缘对齐。双光束超分辨光刻机技术采用第二束光的核心目的是对第一束光产生曝光图案的衍射边缘进行修正。在大尺寸复杂曝光图案的制造中,阴阳文图案的对准并不是对两个图案中的某一个点对准,而是需要对两个图案中的每一个点对准。因此最佳的方法是对两束光经过物镜后的投影图案进行光强分布测量,以得到两个投影图案具体位置光强分布。在一般情况下,当两束光各自产生的图案符合阴阳文互补设计要求时,这两个投影图案没有对准的关键是其相对位置没有对齐。此时可通过调整光学系统中的合束镜或者第二束光经过其掩模版后的反射镜,使得第二束光投影图案的位置相对第一束光投影图案的位置发生改变,并最终对齐。在这个过程中,精确测量每个投影图案的位置光强分布并通过光学系统来调整两者之间的相对位置在工程上都是可行的。

第二个是对准的图案是否对环境敏感以至于难以长时间保持对准。从理论看,光学系统一定存在一个状态,在这个状态下,两个投影图案的相对位置是完全对齐的。光学系统一旦被调整到这个状态,在一般情况下,是可以保持对准的。然而,光学系统在受到整体机械振动、环境温度改变等多方面影响时,能否继续保持对准是值得探索的问题。考虑光学系统在受到各种影响时,两束光投影图案的相对位置发生了改变。反映到光学系统各光学元件位置移动和形状改变的程度,这要求其位置和形状改变必须要小到最终确保目标光刻分辨率的实现。光学系统在受到各种影响时,因为机械环境等带来的光学元件位置移动和形状改变仅仅和环境因素有关,一般与光波长无关。以最差的情况来估计,在当前极紫外光刻机正常工作所保证的系统环境稳定条件下,单束光投影图案自身也存在受环境影响而发生相对位置变化的问题。对于双光束投影光刻技术,相当于相对位置变化的误差进行了两次累积,因此整体上要求整个系统的环境更加稳定。两次位置误差累积使得整体位置误差增加到原来的根号 2 倍。因此对每一束光而言,其受环境影响而发生相对位置变化必须要下降到原来的

根号二分之一才能够最终保持位置误差不变。因此,其最差的情况是系统受环境影响的稳定性相比单束光光刻机技术要有根号 2 倍的提高。由于这个最差情况下的要求并没有成倍甚至成数量级地提升系统的稳定性要求,因此也就并没有设置工程上不可逾越的障碍。同时这个要求仅仅是针对光学系统的,并不涉及到工件台等其他方面。因此也并没有将解决这个问题要求扩散到光刻机整机的其他方面。需要指出的是,光学系统的稳定性要求与光学元件的精确性要求是两个不同的问题。无论光学元件是否精确,光学系统受到环境影响从而位置移动和形状改变都是存在的。因此双光束超分辨光刻机技术大幅度降低光学元件精确度要求的优势并不因此而丧失。

在光刻胶的开发上,双光束超分辨光刻技术对光刻胶提出了更高的要求。然而从理论上讲,存在普遍满足双光束超分辨光刻机技术要求的光刻胶工作机理,使得这样的光刻胶开发不存在不可能实现的前提。特别是在可见光波段,双光束超分辨光刻机技术对光刻胶的两点要求是较为容易满足的。光刻胶一般对短波长响应,而对长波长不响应,这使得在可见光区域,当用来对第一束光衍射边缘进行修正的第二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二束光响应必须是第一束光光强不为零的情况。然而,双光束超分辨光刻机技术要达到甚至超过极紫外光刻机技术的光刻分辨率性能,会面临两种选择。第一种选择是双束光都采用可见光等长波长。此时要求进行衍射边缘修正的第二束光的作用效果要很强,才能达到好的超衍射极限分辨率效果。然而,第二束光光强很强的情况下,光刻胶材料将非常有可能出现光学非线性效应以及其他多种由于强光所导致的负反应和负效果。这种由于强光所导致的负反应和负效果问题目前已经被本文作者所在的团队解决。第二种选择是双束光也可以采用较短波长的光源。比如要达到第四代深紫外光刻机的分辨率能力,双光束超分辨光刻机的第一束光波长可以采用 365 nm,而不是更长的 532 nm。而要到达第五代极紫外光刻机的分辨率性能,双光束超分辨光刻机的第一束光波长可以采用 193 nm。当前,193 nm 的深紫外光刻机通过多重图案曝光,可以制造 10 nm 甚至 7 nm 节点的芯片。中国中芯

国际在得不到荷兰阿斯麦尔公司第五代极紫外光刻机的情况下,就是采用荷兰 193 nm 第四代深紫外光刻机通过多重图案曝光工艺从而实现 7 nm 的。当第一束光本身就已经能够达到较高的分辨率性能时,第二束光就无须使用很强的光强也可以使得其分辨率小幅度提升的情况下,从而达到原本第一束光需要更短波长时才能达到的分辨率性能。因此,对 193 nm 第四代深紫外光刻机进行第二束光升级改造,用以超越第五代极紫外光刻机分辨率性能是较为可行的方法。然而,要使得光刻胶在 193 nm 光辐照下响应,248 nm 等其他紫外波长光辐照下不响应,并且只有 193 nm 光存在的时候,光刻胶才能对 248 nm 等其他紫外波长响应,这个要求是比较高的。光刻胶在 193 nm 等短波长紫外光的辐照下,一般发生的是化学键打断等光物理化学反应。第二束光采用何种波长以及以什么样的机理来确保双光束效果的实现,目前仍然是研究的空白。针对上述两种选择,也有可能最终工业界能够采纳的是综合了这两种选择的一种思路,比如第一束光采用 248 nm 等相比 193 nm 更长的波长。这样做的目的是使得第一束光光刻时,其分辨率的起点相比于可见光更高,从而第二束光并不需要太强的光强,就可以得到较好的分辨率效果。

## 6 面向未来芯片制造的双光束超分辨投影光刻技术

芯片制造一直都是一个资金和高科技密集的行业,光刻机在芯片制造中发挥了最为重要的作用。无论是芯片设计或者是工艺中刻蚀等所需要的其他设备,均将受到光刻机的影响,特别是芯片设计。当制造的方式和方法发生了改变的时候,设计也将随之改变。第六代双光束超分辨光刻机技术首先改变的将是芯片设计。无论是将复杂高密度图案分解为多个简单低密度图案,还是面向以后的三维芯片、量子芯片等制造,其都将很大程度上改变现有芯片设计的方式和理念。

光刻机在历史的发展过程中,面向未来芯片制造,均采用了创新的办法来实现光刻机的性能升级迭代。为面向高密度芯片制造,台湾台积电的林本坚博士提出了浸没式光刻。这种将镜头和光刻胶之间添加水以提高分辨率的方法虽然在显微镜上已经被使用了上百年,但是在光刻领域,一开始受到产业界的质疑。荷兰阿斯麦尔公司为了打败日

本尼康和佳能,提高光刻分辨率,采用了水浸光刻技术,并利用多重曝光技术将工艺节点从 65 nm 逐步推进到了 28 nm,其极紫外光刻机又一步将光刻光源的波长从 193 nm 直接下降到 13.5 nm,从而奠定了其全球唯一垄断地位。如今,信息技术的发展呈现出了历史前所未有的局面,如何以创新的方法使得芯片制造能够应对信息技术对芯片制造的新挑战,是本文重点关注的问题。显然,在 13.5 nm 第五代极紫外光刻机之后,开发更短波长光源的光刻机并不能应对信息技术对芯片制造的这些新挑战。特别是在信息计算和存储一体化方面,三维高密度信息存储和处理、长寿命信息存储和处理等对于芯片制造技术的挑战是前所未有的。由于电子芯片的固态硬盘、磁盘等均不可能保证海量数据的长时间存储,这将导致信息技术特别是基于大数据信息技术的可持续性发展遭到严重挑战。基于直写方法的双光束超分辨光学数据存储等技术虽然为解决大数据长时间存储提供了一种方法,但是海量数据的存储还必须解决读写速度问题,才能够走向实用<sup>[18]</sup>。基于投影工作方式的双光束超分辨光刻技术在解决了分辨率的前提下,还为未来大数据长寿命光存储提供了解决存储速度问题的关键方法,这正体现了光刻机低成本大规模快速制造的优势。基于长波长光源的、投影式工作方式的双光束超分辨光刻机技术在可以应用于数据处理计算芯片制造的同时,也为长寿命大数据存储提供了独一无二的工具,这就为未来信息计算和存储融合提供了前所未有的工具。

在芯片制造的早期历史上,芯片设计和制造一般都是在同一家企业完成的。设计和制造分离的代工模式之所以出现,主要原因就是芯片制造的设备越来越贵,世界上真正有实力建设芯片制造生产线的企业也越来越少。第六代双光束超分辨光刻机在大幅度降低高端光刻机研制难度的前提下,如果能够以相比于第五代极紫外光刻机五分之一以下的造价实现相同的制造分辨率等关键性能,则有望使得中国等发展中国家最终建设出独立自主的高端芯片制造生产线,这无疑将使世界科技、经济甚至政治格局发生改变。

## 7 双光束超分辨直写光刻设备研发进展

将双光束超分辨技术的核心思想应用于光学

制造,最先实现的是双光束超分辨直写光刻技术。在早期的研究工作中,众多的研究工作所展示的都是使用该方法实现特征尺寸或者线宽减小的实际效果。但是特征尺寸并不等于线中心间距。线中心间距(特征分辨率)是与特征尺寸同等重要的光刻技术核心参数。2013年,甘棕松等基于双光束超分辨直写光刻技术,首次实现了线中心间距为 52 nm 的实际效果,并证实了在双光束超分辨直写光刻中特征尺寸与线中心间距的不同步现象,即并不是在特征尺寸最小的时候,其线中心间距最小。2017年甘棕松从顾敏教授课题组离开,加入华中科技大学武汉光电国家研究中心,进一步推动双光束超分辨直写光刻技术往前发展。近 5 年以来,主要从事两个方面的工作。第一,推动双光束超分辨直写光刻技术的应用和成果转化。第二,提出了上述基于阴阳文互补掩模版的双光束超分辨投影光刻技术方案,并开展实验工作。在这一节中,将介绍本文作者团队在双光束超分辨直写光刻设备方面的进展。

双光束超分辨直写光刻设备在国际上尚没有成熟的商业实例可以参考。在激光直写光刻技术领域,在 2001 年由日本开创的基于飞秒激光双光子吸收效应的激光直写光刻因为其三维制造能力,以及可达到 20 nm 以内的特征尺寸和亚微米的线中心间距,而成为了该领域中备受重视的一项技术。在该技术中,基于飞秒激光双光子吸收效应是确保该技术在三维制造能力和制造分辨率上均优于常规的激光直写技术的关键。由于该技术的显著优势,20 年间,世界各地陆续有不少课题组从事与该技术相关的研究。特别是近年来,随着飞秒激光器性能提升和价格下跌,从事与该技术相关的课题组迅速增加。在我国,也形成了一个很大的从事与该技术相关研究的群体。在群体中,飞秒激光直写光刻设备的来源有外购和自制两种方法。自制设备虽然能够完成相关的科研任务,但是存在装置集成度差体积大(比如需要放置在高性能防震光学平台上),稳定性差(包括维护和校准麻烦),软件功能不够强大(很多是基于 Labview 软件编写),与之配套的材料缺乏等问题,因而与商用设备相比,整体性能存在较大的差距。外购设备则几乎都使用进口的品牌,其中最著名的是德国的 Nanoscribe 公司。进口设备整机性能虽然较高,但是其价格也很高, Nanoscribe 公司价格可高达 300~400 万元人民币。

虽然德国在飞秒激光直写光刻设备的商用化领域取得了国际领先的地位,然而该公司也没有进一步推出双光束超分辨直写光刻设备。

为了将双光束超分辨直写光刻设备推向商用,本文作者所在团队在解决了多项技术困难的情况下,目前已经实现了该设备的商用量产。第一,自研了基于数字代码的整机软件系统。目前激光直写光刻设备的软件系统普遍存在使用要求较高的问题。这个问题的根源在于如何设计出激光直写光刻所需要制备的器件以及如何将设计转为直写光刻制造时的代码。自制的飞秒激光直写光刻设备中,软件通常具备在已有制造文件的基础上进行直写光刻的功能,然而缺乏器件设计功能。为了满足用户的设计需要,德国 Nanoscribe 公司推出了三维设计文件转换功能,可以在三维设计软件中设计的文件,转换为直写光刻执行的代码,比如 STL 文件。这就要求用户必须会使用三维设计软件。同时在执行直写光刻制造时,有的软件系统要求用户开展文字编写代码工作,这就要求用户有一定的计算机编程基础,最常见的是使用机械加工中广泛使用的 G 代码。为了简化软件系统,团队开发了数字代码系统。该数字代码软件系统具有以下功能: 1) 用户可以在 Excel、txt 等文件中直接使用数字表格来设计所需要制造的器件。无需学习三维设计软件以及 G 代码等编程,从而大大降低了器件设计人员的要求,并同时大大提升设计效率。2) 所设计的数字代码可以虚拟运行并可视化,从而大大简化了设计效果查看。3) 针对微纳制造器件的周期性特征,对于有周期性特征的结构,可一键自动生成,并允许用户基于已经设计好的单个元胞完成三维周期性结构的设计。4) 各种图片和文字一键自动生成制造文件。5) 兼容三维设计文件自动转制造文件功能。6) 允许用户使用按照函数(比如三角函数等)生成设计文件。第二,自研了先进的双光束焦点重合对准功能,不同于德国 Stefan Hell 教授组所用的银纳米颗粒扫描对准,团队使用了光谱对准方案,简化了对准过程,大大缩短了对准时间。第三,基于新增能量去向通道思路,并辅助稀土材料以无损型分子荧光开关材料,特别是无损型的二芳基乙烯衍生物类分子荧光开关材料,自研了双光束超分辨直写光刻设备配套的光刻胶。除了可使用一束飞秒激光和一束连续激光实现双光束超分辨直写光刻外,光刻胶还允许两束连续激光实现双光

束超分辨直写光刻(基于稀土材料),并且在两束都是连续激光的情况下,实现超分辨直写光刻三维制造。同时光刻胶材料性能稳定,无需特殊的黄光条件。第四,提出了全新的快速装调思路,自行设计了全新的光机系统,大大提升了整个系统稳定性和可调性,并缩小了整个系统的大小。目前整机占地面积  $500\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$ (高),核心光电系统体积仅仅  $500\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  大小。整机包括防震,配套供电柜,电脑(含显示屏),激光器(含配套电源),移动装置(含控制器)等所有零部件,仅需要外接供电即可。在快速装调方面,经过多次展览展出验证,一次搬移设备之后,在几个小时之内即可完成整机重新校准。第五,自研了配套的零部件。团队自行研制了机械开关。3 mm 通光孔径下开关上升和下降时间 0.3 ms,低于美国 Vincent 公司 2 mm 通光孔径下开关上升和下降时间的 1 ms。同时开关次数寿命大幅度提升,从普通的百万次开关寿命提升到 3 亿次以上。团队自行研制了精密防震装置,满足了双光束超分辨直写光刻制造 10 nm 线宽的技术要求,并同时缩小了防震装置的体积,减少了整机系统的质量(可低于 300 kg),使得整机系统可以在楼层较高的普通防震条件下,实施双光束超分辨直写光刻。第六,整机系统集成能力大幅度提升。整机可在预留的空间中集成微区光谱,荧光成像等功能在内,并且在软件上实现了众多电控零部件的兼容。第七,整机零部件国产化程度大幅度提升。整机可使用包括青岛自贸激光(原武汉新虹拓)的飞秒激光器、天津三英精控的纳米位移台、苏州医工所巩岩老师团队研制的高倍物镜在内的国产零部件。同时团队自行研制了光学机械件,无需使用 Thorlabs、Newport 等国外品牌。自行设计了双色镜和滤波片,并委托国内镀膜上进行了加工。零部件国产化程度的提升,大大降低了整机造价。

这些工作进展为双光束超分辨光刻从直写跨越到投影提供了基础。

## 8 结束语

双光束超分辨技术始于德国 Stefan Hell 教授所开创的受激辐射显微成像技术,将该技术的核心思想应用于光学制造,最先实现的是双光束超分辨直写光刻技术。在光学制造领域,囿于对光学衍射极限的了解,长期以来存在线宽和线中心间距混淆的

问题。双光束超分辨直写光刻技术早期的研究工作虽然证实了该方法可以制造出更小的线宽,但是在光刻领域线宽和线中心间距显然不是同一件事。本文作者早期的双光束超分辨直写光刻方面的工作不仅证实了线宽可以达到 10 nm 以下,更重要的是首次证实了线中心间距可以达到约 50 nm。这为该技术真正突破衍射极限,制造高密度器件提供了关键依据。然而,尽管本文作者已经在世界范围内首先推出了商用化的双光束超分辨直写光刻设备,但是该直写式技术被大家广为诟病的关键在于该技术不能投影曝光,因而不可能应用于工业芯片制造,最多只能进行打样。为了提高制造速度,基于相位调制等的多焦点双光束超分辨直写技术被提出<sup>[19]</sup>,然而这类方法本质上仍然是基于直写的。要追上投影曝光的制造速度,其多焦点的个数将在千万个以上才能够实现 GB 数据量每单次曝光的制造速度。然而到目前为止,并没有任何文献资料表明使用类似的方法能够在实验上产生均匀无畸变的数量在千万个以上的多焦点,更没有任何资料讨论傍轴光学近似对图案产生计算的影响、复杂高密度图案分解等相关问题。为了彻底解决速度这个问题,本文提出了基于阴阳文互补掩模版的投影式双光束超分辨光刻机技术。该技术阴阳文互补掩模版的产生可以采用常规刻蚀镀铬金属版的方法,也可以使用空间光调制产生面图形等方法。对于相位调制等产生的各种多焦点图案而言,其都属于阴阳文互补掩模版所能够兼容的一种特例,从而实现了本文提出的投影式双光束超分辨光刻机技术对于各种此类相关技术的兼容。本文提出的技术解决了现有紫外光刻机技术实现纳米分辨率必须采用短波长光源的问题,从而可以大幅度降低高端光刻机的制造难度和造价,并且完全兼容现有的紫外光刻机技术。相比于现有紫外光刻机技术,双光束超分辨光刻机技术虽然在光学系统和光刻胶方面相应增加了难度,但是本文的分析表明,增加的这些难度都是工程上能够解决的,并且其代价将远远小于采用极紫外光源对光刻机研制所带来的代价。这为下一代光刻机技术指出了一条独立于紫外光刻机技术路线的全新可行路线。对于中国等发展中国家而言,受《瓦森纳协定》等限制,高端光刻机对中国等国家禁运已经成为现实,新的双光束超分辨光刻机技术将有望使得受到限制的国家在全新技术路线和大幅度降低研制难度的前提下,发

展出独立自主的高端芯片制造生产线。

### 参 考 文 献

- [1] Hills G, Lau C, Wright A, et al. Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors[J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 595-602.
- [2] Qiu C G, Zhang Z Y, Xiao M M, et al. Scaling carbon nanotube complementary transistors to 5-nm gate lengths[J]. *Science*, 2017, 355(6322): 271-276.
- [3] Hertel S, Waldmann D, Jobst J, et al. Tailoring the graphene/silicon carbide interface for monolithic wafer-scale electronics[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 957.
- [4] Kreupl F. Carbon-nanotube computer scaled up[J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 588-589.
- [5] Bandyopadhyay S. *Physics of nanostructured solid state devices*[M]. Boston: Springer, 2012.
- [6] Grimmett G. *What is percolation?* [M]. Heidelberg: Springer, 1999.
- [7] Fomenkov I, Schafgans A, Brandt D. Laser-produced plasma sources for high-volume-manufacturing EUV lithography[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32(4): 3-8.
- [8] Wood O. EUV lithography: new metrology challenges[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 931(1): 375-381.
- [9] Kaiser W, Kürz P. EUVL-extreme ultraviolet lithography laying the foundations for microchips of the next decade[J]. *Optik & Photonik*, 2008, 3(2): 35-38.
- [10] 蒲明博, 王长涛, 王彦钦, 等. 衍射极限尺度下的亚波长电磁学[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 144101. Pu M B, Wang C T, Wang Y Q, et al. Subwavelength electromagnetics below the diffraction limit[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 144101.
- [11] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80-83.
- [12] Debnath S, Linke N M, Figgatt C, et al. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits[J]. *Nature*, 2016, 536(7614): 63-66.
- [13] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 505-510.
- [14] Gan Z S, Cao Y Y, Jia B H, et al. Dynamic modeling of superresolution photoinduced-inhibition

- nanolithography[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16871-16879.
- [15] Gan Z, Cao 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.
- [16] 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.
- [17] Hanne J, Falk H J, Görlitz F, et al. STED nanoscopy with fluorescent quantum dots[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7127.
- [18] 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.
- Luo Z J, Liu Y N, Chen M L, et al. Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 94-100.
- [19] Gu M, Li X, Cao Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e177.