

# 激光与光电子学进展

## 多层压电驱动器在光刻机中的应用

杜刚<sup>1,2,3</sup>, 康晓旭<sup>4</sup>, 曾江涛<sup>1,2,3</sup>, 曾涛<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>上海材料研究所压电材料及器件研究中心, 上海 200437;

<sup>2</sup>上海电子线路智能保护工程技术研究中心, 上海 201202;

<sup>3</sup>上海材料研究所上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437;

<sup>4</sup>上海集成电路研发中心有限公司, 上海 201210

**摘要** 多层压电驱动器具有体积小、响应快、刚度大、位移精度高、驱动力大等优点, 在光刻机的开发中有广泛的应用。简要介绍了多层压电驱动器的基本结构与特征, 列举了多层压电驱动器在光刻机投影物镜的高精度微调、掩模台的定位及光刻机的主动减振等方面的典型应用。最后, 对多层压电驱动器的发展方向进行了展望。

**关键词** 多层压电驱动器; 光刻机; 投影物镜; 主动减振

中图分类号 O469

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922024

## Application of Multilayer Piezoelectric Actuator in Lithography Scanners

Du Gang<sup>1,2,3</sup>, Kang Xiaoxu<sup>4</sup>, Zeng Jiangtao<sup>1,2,3</sup>, Zeng Tao<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Piezoelectric Materials and Devices, Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

<sup>2</sup>Shanghai Engineering Research Center of Electronic Circuit Intelligent Protection, Shanghai 201202, China;

<sup>3</sup>Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

<sup>4</sup>Shanghai Integrated Circuit R&D Center Co., Ltd., Shanghai 201210, China

**Abstract** Multilayer piezoelectric actuator has the advantages of small volume, fast response, large stiffness, high displacement accuracy, and large driving force output, which is extensively utilized in the development of lithography scanners. This paper briefly introduces the basic structure and characteristics of multilayer piezoelectric actuator, and lists the typical applications of piezoelectric actuator in high-precision adjustment of projection lens of lithography scanners, positioning of reticle stage, and active vibration isolation of lithography scanners. Finally, the development direction of multilayer piezoelectric actuator is prospected.

**Key words** multilayer piezoelectric actuator; lithography scanner; projection lens; active vibration isolation

## 1 引言

近年来, 随着以 5G、物联网、人工智能、云计算、大数据等为代表的新一代信息技术的飞速发展, 人们对高速度、高集成度、低功耗、低时延的半导体芯

片的需求日益激增。光刻机作为集成电路制造的核心装备, 其技术水平与集成电路的极速发展密切相关, 甚至直接决定了摩尔定律的生命力<sup>[1-2]</sup>。

光刻是指利用特定波长的光进行辐照, 将掩模上的图形转移到光刻胶上的过程。光刻涉及一系

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-04-05; 录用日期: 2022-04-07

基金项目: 上海市国际合作项目(20520730600)

通信作者: \*zengtao@srin.com.cn

列复杂的物理化学过程,是半导体器件及大规模集成电路制造的核心步骤。光刻机是迄今为止人类所能制造的最精密装备之一,其光刻投影物镜的波像差需要控制到亚纳米量级,接近“零像差”,同时其工件台与掩模台需要有极高的加速度及纳米量级的同步精度。再者,在高速曝光过程中,硅片面要求始终保持在投影物镜 $\sim 100$  nm的焦深范围内。随着半导体制程逐渐逼近 5 nm 的物理极限<sup>[3]</sup>,光刻机的设计难度与加工精度也呈指数级增加,纳米级定位、亚纳米级加工精度、运行环境的精确控制等对光刻机技术的发展而言都是极大的挑战<sup>[4-5]</sup>。

目前,全球能生产光刻机的主要厂商,除了荷兰的 ASML,其次就是日系厂商尼康和佳能,还有我国的上海微电子。上海微电子已经量产应用于 90 nm 技术代的光刻机,与 ASML 量产的应用于 7 nm 及以下技术代的 EUV(极紫外)光刻机相比,仍存在巨大的差距。

中国作为全球芯片最大的消费国之一,光刻机制造水平仍然较低,即使是全球最先进光刻机制造商 ASML,其 90% 以上的零部件都依赖进口,特别是镜头、光源等核心技术更是强烈依赖美国、德国等的一些先进企业。目前,很多西方国家对我国实行严苛的出口管控或技术封锁,与光刻机有关的核心零部件更是严格禁运,致使我国光刻机的研发一直步履维艰。因此,继续加大对芯片制造的研发投入,突破极紫外光源、精密透镜加工技术、精准曝光与光刻计量等技术瓶颈,开发具有自主知识产权的先进芯片制造设备,才能在未来摆脱对高端光刻机的进口依赖,彻底解决芯片制造领域的“卡脖子”问题。为此,我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中将《极大规模集成电路制造技术及成套工艺》项目列为 16 个重大专项的第 2 位(简称 02 专项),实现高端光刻机的国产化成为我国未来科技攻关的重要方向。

另一方面,多层压电驱动器(也称为压电致动器、压电马达)由于具有纳米级位移分辨率且响应快、体积小、扭力大、无电磁干扰、可实现闭环控制等优点,广泛应用于超精密光学、生物医疗、精密加工、纳米定位、主动隔振等领域<sup>[6-7]</sup>。在光刻机的制造与应用过程中,投影物镜的纳米级精细调节、曝光过程中掩模台/工件台的精确定位、光刻机的主动减振等方面都可能使用到压电驱动技术,从而保证光刻机的成像质量、分辨率与稳定性。例如,在

DUV(深紫外)光刻机的应用中,DUV 光源长期聚焦于投影物镜系统中的各级透镜,导致产生大量的热量,这些热量会严重影响投影物镜的光学参数,因此需要在投影物镜系统中引入多层压电驱动器,从而实现微米级的调节范围以及纳米级的调节精度。

本文简要介绍了多层压电驱动器的基本原理与结构,并列出了其在光刻机中的若干典型应用,最后对我国在该领域的发展现状和未来的研究重点进行了展望。

## 2 多层压电驱动器简介

多层压电驱动器(也称为叠堆压电驱动器)相比于传统的机械或电磁驱动器而言具有体积小、响应快、刚度大、位移精度高、驱动力大等优点<sup>[8-11]</sup>。然而,一般单层压电陶瓷的形变量约为陶瓷尺寸的 0.1%~0.15%,并且极化与驱动电压高达几千伏,严重限制了压电驱动器的广泛应用<sup>[12]</sup>。为此,采取机械串联、电学并联的多层叠堆式结构,在保证输出位移的前提下,可将驱动电压降低至 100 V 左右的水平。并且,多层压电陶瓷叠堆的方法可实现输出位移成倍的累加,最终满足小尺寸、低电压、大位移的应用需求。因此,多层压电驱动器已广泛应用于精密工业制造、精确阀门控制、纳米级定位及主动隔振系统等领域中<sup>[9]</sup>。

按照叠堆结构、极化方向与驱动方式的不同,典型的多层压电驱动器可分为三种类型,如图 1 所示<sup>[8, 10, 13]</sup>。对于纵向型多层压电驱动器,压电陶瓷层和电极层按一定规则交替组合,电极层中,采用叉指型的方式将压电陶瓷层的正负电极分别引到两个端面的外电极上,如图 1(a)所示。极化处理后,相邻陶瓷层的极化方向相反,在沿极化方向的外电压的驱动下,每一层陶瓷产生纵向的形变,进而多层形变叠加在一起实现对外的位移输出。横向型的结构相对简单,所有的压电层的极化方向都是横向的,且取向一致,驱动电压直接加载于器件的两个端面,实现横向与纵向的同步形变,对外输出的位移为压电陶瓷层垂直于电场方向的横向位移量的叠加,如图 1(b)所示。切向型多层压电驱动器的结构与纵向型类似,只是陶瓷层的极化方向为横向方向,在垂直于极化方向的外电场驱动下,产生切向方向的位移输出,如图 1(c)所示。多层压电驱动器可实现几千牛顿的驱动力与几十微米的位

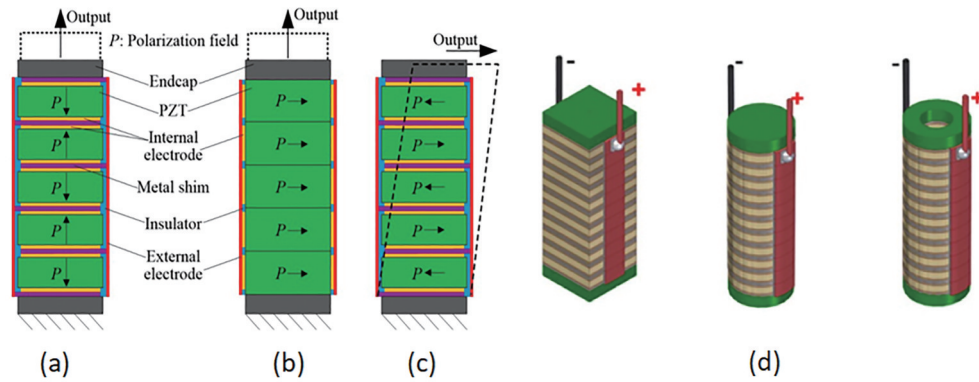


图 1 三种典型的多层压电驱动器的结构<sup>[8, 10, 13]</sup>。(a)纵向型;(b)横向型;(c)切向型;(d)典型的多层压电驱动器的形状  
Fig. 1 Three kinds of stacking structures of multilayer piezoelectric actuators<sup>[8, 10, 13]</sup>. (a) Longitudinal stack; (b) transversal stack; (c) shear stack; (d) typical shape of multilayer piezoelectric actuators

移输出。为满足不同应用需求,驱动器的结构还可设计成方形、圆形、环形等多种形状,如图 1(d)所示。

商用的多层压电驱动器多采用固溶或掺杂改性后铅钛酸铅(PZT)基压电材料。根据不同的使用场景要求以及驱动系统的结构设计,压电材料的性能参数可以在较大的范围内调控,例如,压电常数 $d_{33}$ 的常用可调区间为 $300\sim 800$  pm/V, $d_{31}$ 为 $-150\sim -350$  pm/V, $d_{15}$ 为 $400\sim 900$  pm/V。此外,不同的应用对多层压电驱动器的厚度、层数、驱动电压、刚度、滞后性等分别有不同的要求。同时,驱动系统驱动电压的大小、输出量程范围、最大承载力、位移精度等性能指标与驱动器的尺寸、形状设计及制动系统的设计密切相关<sup>[14-15]</sup>。例如,在需要大量程驱动的场景,可通过系统设计,采用杠杆放大、三角放大及柔性铰链等方法将驱动量程增大至毫米级别。对于需要较大承载力的场景,则可以将压电驱动器排布成阵列结构。对于位移精度要求高的场景,亦可通过设计闭环控制系统,实现低滞后、高精度的位移控制。这些精巧的系统设计大大拓宽了压电驱动器的应用范围,赋予了压电驱动器无限的生命力。

对于多层压电驱动器的制备,通常有陶瓷粘接法和低温共烧法两种<sup>[16]</sup>。陶瓷粘接法将预先制备好的压电陶瓷切成薄片后,采用胶水将陶瓷薄片逐层粘接起来。该法工艺流程简单,对设备的依赖性较低,通过几十上百层的粘接可以得到位移大、推力大的多层压电驱动器。但是该方法操作繁琐,难于大批量生产,且粘接层在高频、高温环境下容易失效,限制了该方法的大规模应用。低温共烧法采

用低温共烧陶瓷(LTCC)技术,将压电陶瓷粉体与一定比例的有机溶剂混合制备出黏度适中的浆料,然后利用流延工艺将陶瓷浆料制备成薄膜坯体,之后利用丝网印刷等工艺将金属内电极涂布在薄膜坯体层上,再经过叠层、压制、排胶、烧结等一系列工艺最终制得多层压电驱动器。该方法将陶瓷与金属电极叠层压制后一次性烧成,便于大规模生产,且制得的多层压电驱动器性能优良,符合驱动器件片式化、集成化的发展趋势。同样,该方法也存在技术复杂、成本昂贵等问题。可见,两种制备工艺各有优劣,目前商用的多层压电驱动器两种工艺兼有,很好地发挥了两种工艺的互补性特征。

多层压电驱动器的性能除了直接与压电陶瓷的组分有关外,还与制备过程中的工艺参数密切相关<sup>[17]</sup>。以低温共烧法为例,陶瓷浆料的比例与黏度、流延薄层的厚度、金属电极的成分与布局、烧结工艺参数等均会极大地影响最终器件的性能。更为重要的是,作为商用产品,器件的成本、稳定性与寿命等也是至关重要的指标。压电驱动器的使用环境,如温度、湿度、电场(交流或直流)等都会显著影响器件的使用寿命<sup>[18]</sup>。以光刻机的应用环境为例,为防止静电放电对半导体工艺的影响,光刻机所在的超净间往往需要维持一定的湿度。当水分子渗透压电驱动器电极层时,在驱动电压的作用下会发生电解反应,导致电极材料(通常为Ag)从阴极向阳极渗透,从而导致陶瓷层击穿或短路,器件失效<sup>[19]</sup>。另一方面,当多层压电驱动器在循环交流电压的作用下,在驱动器伸缩的同时,器件内部也会产生显著的应力集中,甚至导致微裂纹的扩展或电极层的剥落,使得驱动器的可靠性急剧下降。由此



可见,多层压电驱动器的性能与器件结构、制备工艺及服役环境等直接相关。性能出众、寿命长、稳定性好的多层压电驱动器的设计与制造是一个技术要求非常高的工作。由于技术积累的不足,我国在多层压电驱动器的产业化方面仍然饱受国外公司昂贵的价格及技术封锁的困扰。

目前,国内的多层压电驱动器产品依然大量依赖进口,国产化率普遍偏低。例如,德国的 Physik Instrumente(简称 PI)公司作为世界领先的多层压电驱动器厂商,可提供各种规格的压电原材料、多层压电驱动器、步进式压电驱动器及压电超声马达等产品。该公司的驱动器产品位移精度可达亚纳米水平、响应时间达到微秒量级,且分辨率及稳定性都非常出色。另外,美国的 Thorlabs 公司、日本的 NEC 与 TDK 公司、丹麦的 Noliac 公司等少数公司有较为成熟的多层压电驱动器产品。国内的昆山攀特、扬州联能等公司也有多层压电驱动器产品,但是总体而言,国内厂商的市场份额及产品综合性能尤其是可靠性和一致性与国外公司尚存在较大的差距。从研发来看,我国对相关产品的研发起步较晚,近年来,以上海材料研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、南京航空航天大学、北京大学等为代表的科研单位在多层压电驱动器领域取得了一定的进展,正逐步缩小与欧美日等国家的差距。其中,上海材料研究所在推进多层压电驱动器的产业化应用方面进行了大量的工作,产品的综合性能已经可以媲美国外主流厂商的同类产品,加速了多层压电驱动器的国产化进程。

### 3 多层压电驱动器在光刻机中的应用

#### 3.1 多层压电驱动器在光刻机投影物镜中的应用

随着集成电路特征尺寸的不断下降,投影物镜的像差也在不断减小。目前高端 ArF 浸没式光刻机的波像差与畸变已经降低到了 1 nm 以下<sup>[20]</sup>。为了提高投影物镜的成像质量,需要对投影物镜进行高精度微调<sup>[21-22]</sup>。

在 ASML 的 TWINSCAN NXT 型光刻机中,采用了如图 2 所示的德国 PI 公司生产的纵剪型多层压电驱动器<sup>[23]</sup>。该驱动器由三部分组成:预应力外壳、压电腿及中心传动杆。其中,核心的压电腿由叠层锆钛酸铅(PZT)陶瓷制成,具体由夹持压电单元及切变压电单元组成。夹持压电单元由  $d_{33}$  纵

向模式的多层压电陶瓷组成,而切变压电单元由  $d_{15}$  剪切模式的多层压电陶瓷组成。当电信号加载到夹持压电单元时,压电材料产生垂直于传动杆的纵向形变,从而与传动杆发生夹持或远离作用(Y轴方向)。 $d_{15}$  压电材料的极化方向与  $d_{33}$  不同,在正负电信号的驱动下,分别产生平行于传动杆方向的位移( $\pm Z$ 轴方向)。

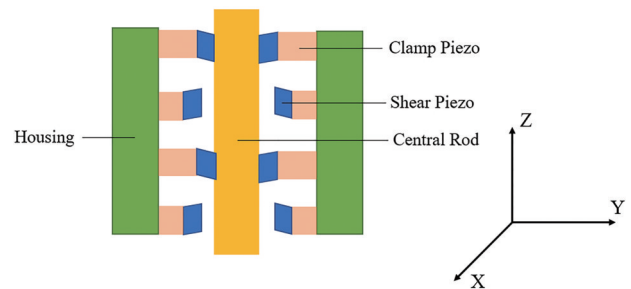


图 2 TWINSCAN NXT 型光刻机中多层压电驱动器的结构示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Structural diagram of multilayer piezoelectric actuator of TWINSCAN NXT lithography scanner<sup>[23]</sup>

为满足驱动器大量程与高精度的需求,纵剪式驱动器在不同的驱动条件下可以产生两种模式的运动。模拟运动模式:该模式只有  $d_{15}$  驱动器起作用,所有的切变压电单元与中心传动杆接触,从而驱动传动杆沿 Z 轴方向运动。该运动模式可提供高动态的切变行程(典型值约为 6  $\mu\text{m}$ )以及约 100 pm 的分辨率。步进式运动模式<sup>[24-26]</sup>:该运动模式需要纵向驱动单元与剪切驱动单元的协同运动,具体驱动步骤如图 3 所示。首先,一组纵向驱动单元沿纵向伸长与传动杆接触,接触以后,切变驱动单元产生切向的形变,从而带动传动杆产生步进式运动,运动的步长可以方便地由切变驱动电压的大小调节。同时,另一组纵向驱动单元沿纵向收缩,使切向驱动单元离开驱动杆,并产生与第一组呈 180° 相位差的反向运动,接下来纵向驱动单元与传动杆接触,第一组驱动器离开传动杆,完成传动杆第二步的步进式运动。传动杆的运动可带动物镜的位移,从而实现物镜系统的微调。该运动模式典型的驱动电压为  $\pm 250$  V,可以驱动重达 20 kg 的光学物镜,同时保证亚纳米级的位移精度<sup>[27]</sup>。

此外,在日本尼康公司的光刻机投影物镜中,也引入了“I-MAC”系统,用于控制物镜的位置与倾斜角度<sup>[28]</sup>。该系统的示意图如图 4 所示,该系统中多个物镜分别由 PZT 制成的多层压电驱动器支撑,同时搭配位置传感器,通过压电驱动器与传感器控

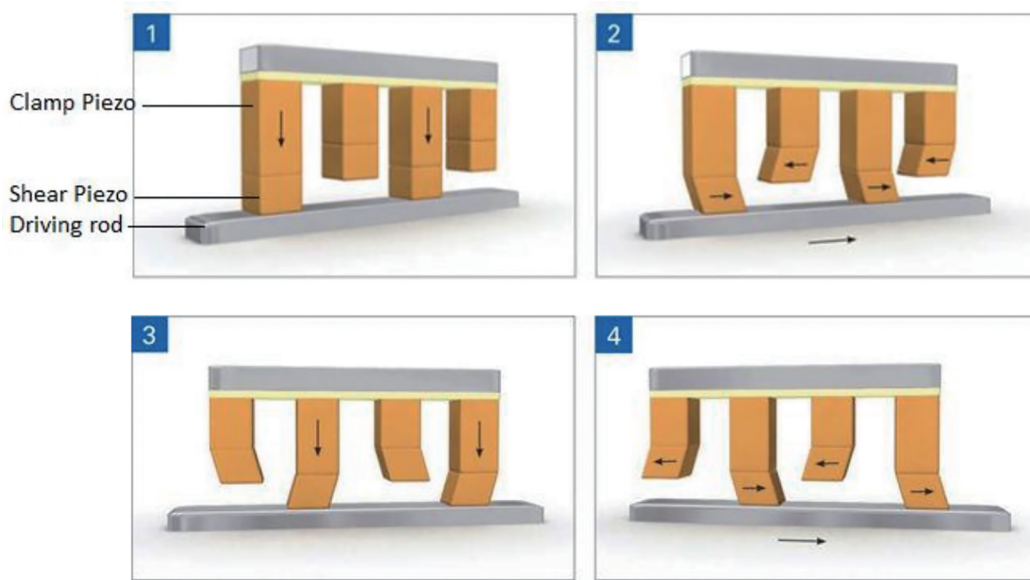


图 3 压电驱动器压电腿的行进方式示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 3 Schematic of walking action of the piezoelectric actuator legs<sup>[27]</sup>

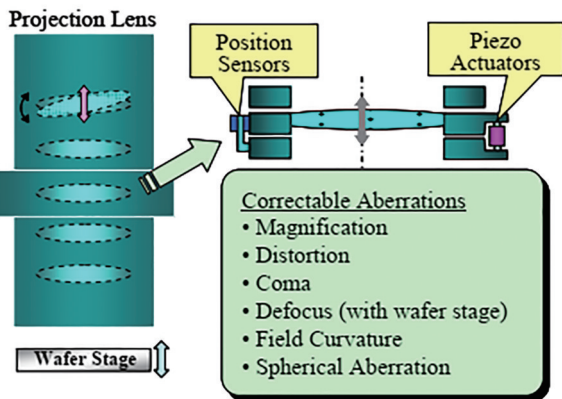


图 4 尼康光刻机投影物镜采用的压电驱动“I-MAC”系统示意图<sup>[28]</sup>

Fig. 4 Schematic of piezoelectric actuated “I-MAC” system adopted by Nikon lithography projection lens<sup>[28]</sup>

制物镜产生纳米级精度的上下移动及倾斜运动,从而精确控制物镜系统的聚焦,消除高功率激光照明系统导致的投影物镜的热畸变。此外,国内一些机构也针对光刻投影物镜的像质补偿问题设计了不同的物镜调节机构。例如,中国科学院光电技术研究所杨超等<sup>[29]</sup>设计了一种光刻投影物镜中的动镜 X-Y 向柔性调节机构,如图 5 所示,该机构采用了 PZT 材料,由各自方向上的 PZT 驱动柔性铰链产生变形,使连接透镜的机构内圈分别在相应方向上移动,结合电容传感器闭环控制,实现镜片的高精度位移调节。长春光学精密机械与物理研究所的郭抗等<sup>[30]</sup>则设计了一种采用 6-PSS 型并联机构的光

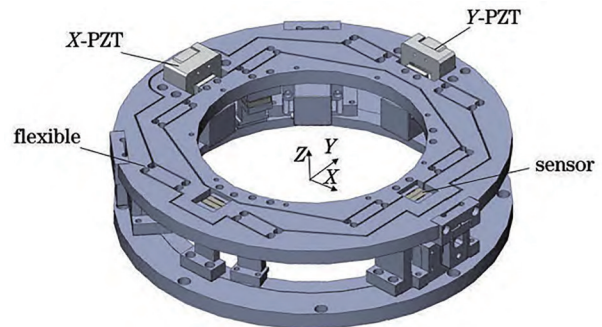


图 5 光刻投影物镜中动镜 X-Y 向柔性调节机构三维模型<sup>[29]</sup>

Fig. 5 Three dimensional model of X-Y direction flexible adjustment mechanism of moving mirror in lithography projection lens<sup>[29]</sup>

学元件精密轴向调节机构,以使光刻物镜中光学元件的调节行程达微米级,调节精度达纳米级。

### 3.2 多层压电驱动器在掩模台定位中的应用

步进扫描投影光刻机是以扫描的方式将掩模图形成像到硅片上的。扫描过程中,掩模图形与硅片当前曝光场需要保持严格的物像关系,这就需要掩模台与工件台保持高精度的同步运动,以确保光刻机动态成像质量<sup>[31-32]</sup>。工件台与掩模台的同步运动误差会导致成像位置偏移,直接影响光刻机的分辨率和套刻精度。目前,主流光刻机的投影物镜采用 4× 缩小倍率,这大大降低了掩模制造的难度,减小了掩模缺陷对成像质量的影响<sup>[33]</sup>。但是,这也意味着在扫描曝光的过程中,掩模的运动速度要 4 倍于工件台的运动速度,同时为了提高芯片产率,工

件台与掩模台必须具有很高的步进速度与加速度。因此,在曝光过程中,掩模往往受到较大的惯性力,导致掩模的位置精度降低,甚至导致掩模滑动,极大地影响套刻的精度。为解决曝光过程中掩模的滑动问题,麻省理工学院提出了一种基于压电驱动器的掩模辅助器件,可以很好地防止掩模的滑动问题<sup>[34]</sup>。该器件的结构如图 6 所示,其中对于精密定位台,采用了德国 PI 公司的 P-841.10 型多层压电驱动器,其输入电压最大为 100 V,位移范围为 15  $\mu\text{m}$  内,刚度

为 57  $\text{N}/\mu\text{m}$ 。该器件由一个粗调台和一个多层压电驱动器为主的精调台组成。由于商用光刻机中掩模的尺寸误差约为  $\pm 0.4 \text{ mm}$ ,因此粗调台用于抵消不同掩模之间的尺寸误差,而固定在粗调台边缘的多层压电驱动器则用于施加一个可控的推力,来消除掩模在步进扫描过程中产生的惯性负载。当然,该功能还需要电容式位移传感器及反馈控制系统的协同来实现。经测试证实,该压电辅助器可消除 95% 的惯性负载,有效地提升了掩模的运动精度<sup>[34]</sup>。

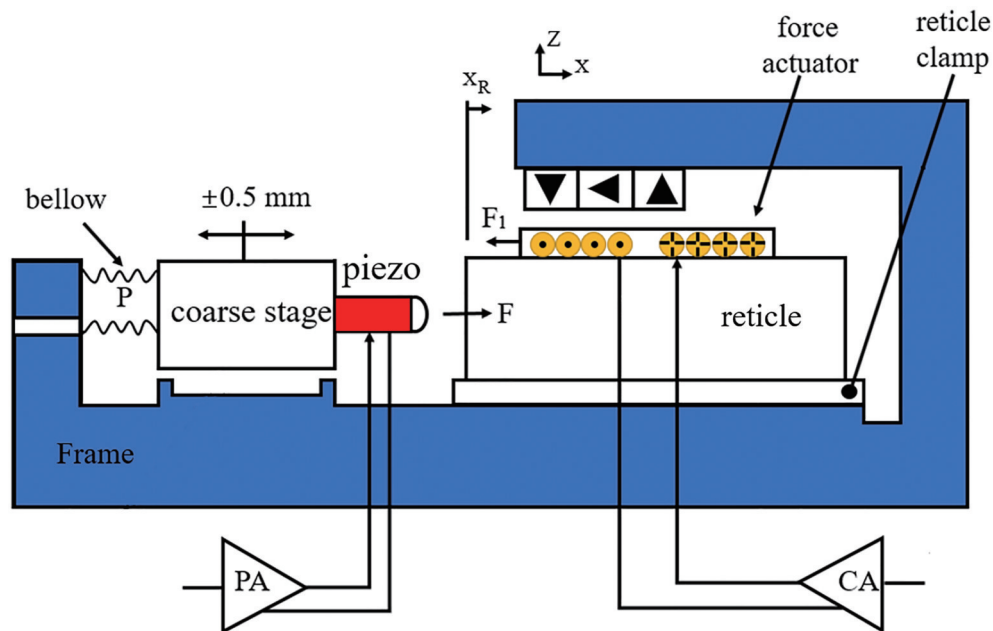


图 6 基于多层压电驱动器的掩模辅助器结构示意图<sup>[34]</sup>

Fig. 6 Structural of piezoelectric driven reticle assist device<sup>[34]</sup>

### 3.3 多层压电驱动器在光刻机减振系统中的应用

光刻机在工作过程中,由于工件台和掩模台具有较高的运动加速度和运动速度,运动部件产生的大惯性力和其他外部因素将引起光刻机工作核心部分即工作平台的振动,从而影响曝光的质量<sup>[35]</sup>。为了保证光刻机在工作过程中具有极高的精度,必须将运动过程产生的振动部分和曝光部分隔离,现代扫描光刻机普遍采用被动振动隔离和主动减振技术<sup>[36]</sup>。主动减振器主要由受控对象、驱动器、控制器、测量系统和电源等组成。多层压电驱动器具有响应速度快、频率范围宽、驱动力大、环境适应能力强的优点,在亚微米以下的微幅、超微幅主动减振中具有较优异的性能,广泛应用于精密加工、精密测量领域中。基于压电原理的主动减振技术的核心本质就是利用逆压电效应在原有振动上再主动叠加一个振动,使两个振动互相抵消<sup>[37]</sup>。根据传

感功能检测到的振动信号,应用一定的控制策略,经过实时计算进而控制压电驱动器对控制目标施加一定的影响,最终达到抑制或消除振动的目的<sup>[38]</sup>。压电减振器的效果受驱动器的材料、形状、尺寸、位置、特别是控制策略等众多因素的影响。控制器是主动控制系统的核心环节,其控制策略也从 PID(比例-积分-微分)控制、鲁棒性控制逐步向模糊控制、自适应控制等方向发展<sup>[39]</sup>。

在基于压电驱动器的主动减振设备中,美国 TMC 公司生产的 STACIS III 型压电式主动减振器是较为成熟与先进的<sup>[40]</sup>。该减振器的外观如图 7 所示,可实现 6 自由度减振,隔振频率范围为 0.6~150 Hz,对 2 Hz 以上的频率,隔振效果大于 90%。同时,该减振器的刚度优于传统空气隔振数百倍,并且该减振器已成功安装在美国半导体制造技术战略联盟的先进浸没式光刻机中,经对比测试,安



装减振器后的曝光图形质量得到了大幅提升<sup>[41]</sup>。此外,我国的中南大学也曾采用 TMC 公司的 STACIS 2100 型主动压电式减振器,成功开发了步进扫描光刻机主动精密减振系统,该系统通过了国家自然科学基金委和上海市科委的验收<sup>[42]</sup>。

遗憾的是,由于技术封锁,我们无法获知 TMC 公司压电式减振器的内部构造与控制原理,目前国内也尚未有同类型的商用产品,因此开发具有自主知识产权的压电式减振器也是我国未来努力的方向。



图 7 美国 TMC 公司生产的 STACIS III 型压电式主动减振器<sup>[40]</sup>

Fig. 7 STACIS III piezoelectric active vibration isolator produced by TMC company of the United States<sup>[40]</sup>

国内一些研究单位也对光刻机应用中的压电式减振系统进行了研究。上海微电子装备有限公司的黄静莉<sup>[43]</sup>提出了一种采用压电陶瓷作为驱动器与传感器的方法,实现了对光刻机物镜的微振动主动控制,该方法可使物镜位置稳定性提高 35% 左

右,从而提高物镜成像质量。具体的减振设计结构如图 8 所示。其原理是由传感器检测结构的动力响应和外部激励,将检测的数据发送到计算机,然后根据给定的算法施加与振动方向相反的控制力,实现结构振动控制。

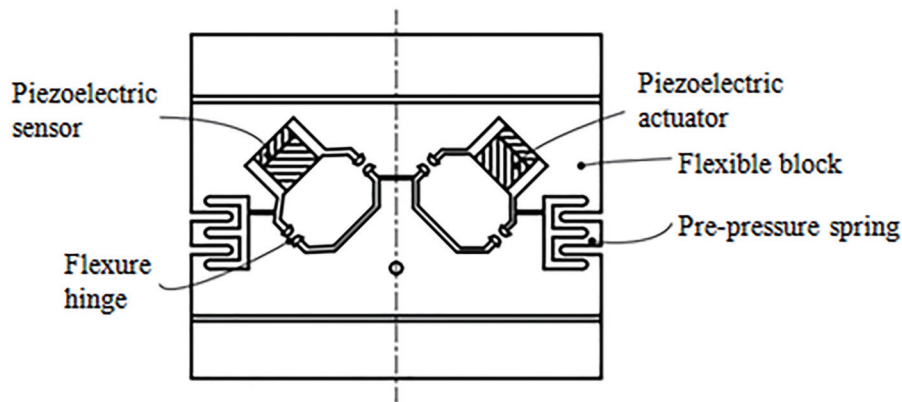


图 8 压电式减振器的结构图<sup>[43]</sup>

Fig. 8 Structural of piezoelectric vibration isolator<sup>[43]</sup>

## 4 展 望

光刻机的研发是一项极为复杂的系统工程,汇集了光学、精密加工、控制系统、尖端材料等众多领域的顶级技术,且很多技术都越来越接近工程极限。特别是在目前日益复杂的国际形势下,开发具有自主知识产权的新一代浸没式光刻机,对我国打

破西方国家的科技垄断,实现集成电路与信息产业的可持续发展,最终向科技强国迈进具有重要的战略意义。

在光刻机的分系统中,投影物镜的精细化调控、掩模台与工件台的极速精准定位、光刻机系统的主动减振等方面都需要纳米级精度的定位与驱动技术来实现。然而,对于光刻机中使用的多层压

电驱动器与驱动系统, 西方国家对我国实行较为严格的技术封锁与产品禁运, 公开的数据资料非常有限, 无法获知其中的设计细节与材料组成, 这无疑加大了我们研发的难度。近年来, 我国在压电材料的开发与多层压电驱动器的设计方面取得了可喜的进步, 继续增加多层压电驱动器的研发投入, 推进其产业化应用, 实现相关器件的国产化替代与规模化商用仍然需要持续的努力。

可以预见, 多层压电驱动器以体积小、响应快、电压低、位移大、推力强及分辨率高等独特的优势, 未来必将在超精密加工、微电子工程、微机电系统等领域有越来越广泛的应用。对于光刻机应用的多层压电驱动器的开发而言, 未来我们还需要从以下几个方面做些探索: 1) 新型压电材料的开发与优化, 开发更适合于压电驱动器使用的低温共烧体系, 重点是提升多层压电驱动器的使用寿命与稳定性; 2) 多层压电驱动系统的性能除了与压电材料相关外, 与系统的设计亦直接相关, 因此, 新型驱动器结构的设计与新驱动原理的探索, 也是未来关注的重点之一; 3) 驱动器性能全面测试系统的搭建, 尤其是极端环境下的性能评测平台的开发也需要同步跟进。

### 参 考 文 献

- [1] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-3.  
Wang X Z, Dai F Z. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-3.
- [2] 马晓喆, 张方, 黄惠杰. 光刻机照明光场强度分布校正技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2005001.  
Ma X Z, Zhang F, Huang H J. Correction technology for illumination field intensity profile in photolithography machine[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2005001.
- [3] Quhe R G, Li Q H, Zhang Q X, et al. Simulations of quantum transport in sub-5-nm monolayer phosphorene transistors[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(2): 024022.
- [4] Schmidt R H M. Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry[J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2012, 370(1973): 3950-3972.
- [5] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823018.
- [6] Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823018.
- [7] Spanner K, Koc B. Piezoelectric motors, an overview[J]. Actuators, 2016, 5(1): 6.
- [8] 周子夜, 冯忠毅, 黄林海, 等. 紧凑型压电式高性能快反镜结构设计[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1305002.  
Zhou Z Y, Feng Z Y, Huang L H, et al. Structure design of compact piezoelectric fast steering mirror with high performance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1305002.
- [9] Mohith S, Upadhy A R, Navin K P, et al. Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: a review[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(1): 013002.
- [10] Gao X Y, Yang J K, Wu J G, et al. Piezoelectric actuators and motors: materials, designs, and applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(1): 1900716.
- [11] Wang S P, Rong W B, Wang L F, et al. A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: classifications, principles, connections and distinctions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 591-605.
- [12] Wang L, Chen W S, Liu J K, et al. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133: 106254.
- [13] Ho S T, Jan S J. A piezoelectric motor for precision positioning applications[J]. Precision Engineering, 2016, 43: 285-293.
- [14] Jiang X N, Rehrig P W, Hackenberger W S, et al. Advanced piezoelectric single crystal based actuators [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5761: 253-262.
- [15] Gozen B A, Ozdoganlar O B. Characterization of three-dimensional dynamics of piezo-stack actuators [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 31: 268-283.
- [16] Su H H, Hong C S, Tsai C C, et al. Domain structure of nonstoichiometric sodium potassium niobate-based ceramics for piezoelectric acoustic actuators[J]. Ceramics International, 2018, 44(4): 3787-3790.
- [17] 范抗抗. PZT 基多层压电陶瓷的制备及作动器件 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 9-13.



- Fan K K. Fabrication of PZT-based multilayer piezoelectric ceramic and actuators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 9-13.
- [17] Pozzi M, King T. Piezoelectric actuators in micropositioning[J]. *Engineering Science & Education Journal*, 2001, 10(1): 31-36.
- [18] Lipscomb I P, Weaver P M, Swingler J, et al. The effect of relative humidity, temperature and electrical field on leakage currents in piezo-ceramic actuators under dc bias[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 151(2): 179-186.
- [19] Ling H C, Jackson A M. Correlation of silver migration with temperature-humidity-bias (THB) failures in multilayer ceramic capacitors[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1989, 12(1): 130-137.
- [20] Jan M, Jos D K, Martijn L, et al. Latest developments on immersion exposure systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6924: 69241P.
- [21] 李朋志. 压电促动器的纳米级精度控制及其在光刻物镜中的应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019: 9-12.
- Li P Z. Research on nanoscale precise control of piezoelectric actuator and its application in lithographic projection lens[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 9-12.
- [22] 曹小涛, 李德全, 李洪文, 等. 非共振式压电直线电机精密驱动及定位控制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2139-2148.
- Cao X T, Li D Q, Li H W, et al. Precision drive and position control of non-resonance piezoelectric stack linear motor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2139-2148.
- [23] Khan M A. Simultaneous use of piezoelectric transducer as actuator and sensor in real-time applications[D]. Tampere: Tampere University of technology, 2016.
- [24] Marth H, Lula B. Advancements in linear piezoelectric actuator mechanisms[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7424: 74240H.
- [25] Müller K D, Marth H, Pertsch P, et al. Piezo-based, long-travel actuators for special environmental conditions[C]//*Proceedings of 12th Euro. Space Mechanisms & Tribology Symp*, September 19-21, 2007, Liverpool, UK. [S.l.: s.n.], 2007.
- [26] Marth H, Lula B. Development of a compact high-load PZT-ceramic long-travel linear actuator with picometer resolution for active optical alignment applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62731K.
- [27] PI's core technologies: braking new ground[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://www.physikinstrumente.com/en/expertise/technology.html>.
- [28] Nakashima T, Ohmura Y, Ogata T, et al. Thermal aberration control in projection lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6924: 69241V.
- [29] 杨超, 朱咸昌, 金川, 等. 光刻投影物镜中动镜 X-Y 向柔性调节机构设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0411002.
- Yang C, Zhu X C, Jin C, et al. Design of X-Y flexible adjustment mechanism for moving mirror in lithographic projection objective[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0411002.
- [30] 郭抗, 巩岩. 6-PSS 型光学元件精密轴向调节机构[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2648-2655.
- Guo K, Gong Y. Precise axial adjustment mechanism with 6-PSS type of optical elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2648-2655.
- [31] de Jong F, van der Pasch B, Castenmiller T, et al. Enabling the lithography roadmap: an immersion tool based on a novel stage positioning system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7274: 72741S.
- [32] Butler H H. Position control in lithographic equipment: an enabler for current-day chip manufacturing [J]. *IEEE Control Systems*, 2011, 13(3): 28-47.
- [33] Levinson H J. Principles of lithography[M]. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, 2011.
- [34] Amin-Shahidi D, Trumper D L. Design and control of a piezoelectric driven reticle assist device for prevention of reticle slip in lithography systems[J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 562-571.
- [35] 杨辅强, 吴运新, 邓习树. 步进扫描式光刻机隔振试验平台主动减振系统试验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2008, 28(4): 3-5.
- Yang F Q, Wu Y X, Deng X S. Experimental research on an active vibration control system of the step and scan lithography vibration isolation platform [J]. *Noise and Vibration Control*, 2008, 28(4): 3-5.
- [36] Karnopp D. Active and semi-active vibration isolation [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1995, 117(B): 177-185.
- [37] Wang C X, Xie X L, Chen Y H, et al. Investigation on active vibration isolation of a Stewart platform

- with piezoelectric actuators[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 383: 1-19.
- [38] 姚晓成, 赵程, 曾涛. 压电材料在振动控制领域的研究进展与应用现状[J]. 机械工程材料, 2019, 43(6): 72-76.
- Yao X C, Zhao C, Zeng T. Research progress and application status of piezoelectric materials for vibration control[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(6): 72-76.
- [39] Breton R L, Deleglise G, Allibe J, et al. Nanometer scale active ground motion isolator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 204: 97-106.
- [40] TMC. STACIS III[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://www.techmfg.com/products/stacis/stacisiii>.
- [41] TMC. Impact of vibration on advanced immersion lithography[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://www.techmfg.com/learning/applicationnotes/impact-of-vibration-on-advanced-immersion-lithography>.
- [42] 邓习树. 步进扫描光刻机模拟隔振试验平台主动减振系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 1-5.
- Deng X S. Study on active vibration-reduction system of simulated vibration-isolation testing table for stepping and scanning lithography[D]. Changsha: Central South University, 2007: 1-5.
- [43] 黄静莉. 基于压电技术的光刻机物镜隔振设计与研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2014(7): 30-33.
- Huang J L. Design and research on vibration isolation of lithography objective lens based on piezoelectric technology[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2014(7): 30-33.