

## 高通量激光纳米直写技术

刘旭<sup>1,2\*</sup>, 匡翠方<sup>1,2</sup><sup>1</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;<sup>2</sup>之江实验室, 浙江 杭州 311121

**摘要** 激光直写技术因具有灵活的三维微纳结构加工制造能力,在工业以及各个科学领域中得到广泛应用,但要进入亚 100 nm 乃至亚 50 nm 尺度,实现高通量的三维纳米制造还是当前的技术难题。而这在后摩尔时代光电混合集成与多层堆叠集成高度发展的今天显得极为重要。从光学成像的角度,这个问题的核心就是要获得大视场和高分辨信息,即信息带宽积的最大化,在激光直写技术中,就是要实现高通量和高分辨刻写。本文将论述激光直写技术的发展,介绍本课题组在高通量激光纳米直写方向的研究进展。

**关键词** 激光器; 光刻; 激光物质相互作用; 微纳制备

中图分类号 O436TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1714005

## High Throughput Laser Nano Direct Writing Technique

Liu Xu<sup>1,2\*</sup>, Kuang Cuifang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311121, Zhejiang, China

**Abstract** Laser direct writing (LDW) technique has been widely used in various scientific fields because of its flexible 3D micro/nano-structure processing and manufacturing capability. Due to the diffraction limit, it is challenge to get sub 100 nm or sub 50 nm resolution and realize high throughput 3D nano-manufacturing, which is critical important for the integrated circuit industrial applications in the post-Moore law period. From the perspective of optical imaging, it is concerning with superresolution imaging with large field of view, i. e., maximum throughput spatial passband product. LDW technique focuses on writing with high throughput and high resolution. This paper will expound on the development of the LDW technique and introduce our research group's progress in the high throughput LDW technique.

**Key words** lasers; lithography; laser-matter interaction; micro/nano-structure manufacturing

## 1 引言

随着集成电路芯片技术的发展,微电子技术 with 光电子技术相结合的发展趋势逐渐明朗,光电子与微电子的混合器件模式<sup>[1]</sup>将为下一代超大规模集成电路开辟新途径。三维堆叠<sup>[2]</sup>、异质组合<sup>[3]</sup>的器件技术成为重要趋势,这就需要发展出与之相适应的光电混合微纳制备技术。激光直写(LDW)技术是三维微纳器件加工制造的主流技术,但是受光波衍射极限的限制,分辨率大都在微米量级,如果能将分辨率推进至纳米尺度,LDW就有可能成为不仅可以进行传统二维光刻,还可以实现三维加工的重要手段,极大增强了光刻的制备

能力,成为一种重要的微纳加工工具。

自 1983 年 Gale 等<sup>[4]</sup>使用 LDW 制造微透镜阵列 (MLA) 以来,LDW 作为一种简单且灵活的制造方法受到了越来越多的关注<sup>[5]</sup>。如今,LDW 已被广泛应用于各种微米及亚微米结构的加工制造,例如用于光刻制造芯片的光刻掩模<sup>[6]</sup>、集成电路<sup>[7-8]</sup>、微光学器件<sup>[9]</sup>、各种表面微结构<sup>[10]</sup>等。与聚焦离子束(FIB)光刻<sup>[11]</sup>和电子束光刻(EBL)<sup>[12]</sup>等类似的微纳米制造方法相比,LDW 具有成本效益高、灵活性强、加工简单、可在非真空环境工作等优势。然而,由于衍射极限的限制,传统 LDW 的制造分辨率一般在微米量级<sup>[13]</sup>,这就阻碍了其在百纳米乃至亚百纳米下的高精度制造中的应用。因

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-08-12; 录用日期: 2022-08-13

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802200)

通信作者: liuxu@zju.edu.cn

此,近年来,提高LDW的制造分辨率仍然是一个关键问题<sup>[14]</sup>。此外,LDW是一项扫描技术,受点或线扫描过程的限制,单位时间加工的面积有限,即加工通量比较低,低通量的加工在小面积制备时影响不是很大,但是在大面积制备时,线扫描加工通量低的弊病就成为限制LDW应用的另外一个瓶颈。

综上,要发展纳米LDW,就必须解决传统LDW面临的两个挑战:第一个挑战是将LDW的加工精度提高到亚100 nm甚至亚50 nm量级,以满足纳米加工的需要;第二个挑战是突破传统LDW加工速度慢的局限,提高LDW的信息通量。要解决这些问题,就需

要发展新一代高通量LDW技术,以克服现有LDW的缺点,为探索新的制造技术和方法提供支撑。

在提升刻写精度方面,人们提出一种类似于受激辐射损耗(STED)超分辨显微成像技术<sup>[22]</sup>的双光束超分辨LDW<sup>[15]</sup>,并将其称为边缘光抑制(PPI)LDW(PPI-LDW),该技术主要利用光与光刻胶材料之间产生的非线性效应,将光反应限制在光焦点中心极小的区域来实现超高精度的三维结构刻写。图1列出了近十几年来各课题组利用该方法进行刻写时获得的超高分辨率情况,这一技术将LDW的刻写精度提升至亚50 nm量级。

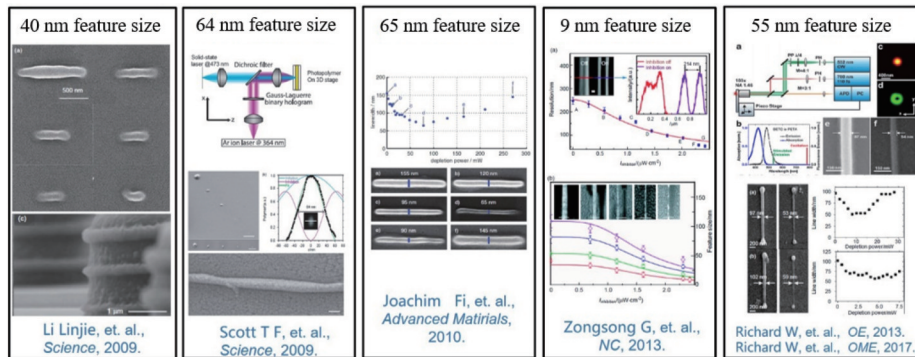


图1 双光束LDW<sup>[15-21]</sup>

Fig. 1 LDW with two laser beams<sup>[15-21]</sup>

在提升刻写速度方面,人们采用多通道光路进行并行刻写,以成倍提升直写速度。光斑点阵的产生方法主要有微透镜阵列法<sup>[23]</sup>、衍射光学法<sup>[24]</sup>和空间光调制法<sup>[25]</sup>等,如图2所示。基于可编程焦点阵列的并行写入策略可明显提高刻写效率,但创建具有高强度且均匀分布的多焦点阵列对于并行刻写至关重要。然而,这些方法在

焦点大小、能量、分布均匀性与焦点数量间存在相互矛盾的关系,即焦点数量越多,焦点能量越低、极限光斑越大、均匀性越差、直写后的分辨率越低。此外,采用微透镜阵列与衍射光学元件产生的多点阵列,无法对多光束进行特异性调控,只能实现较为简单的周期性结构刻写,这就限制了其在复杂三维结构制备中的应用。

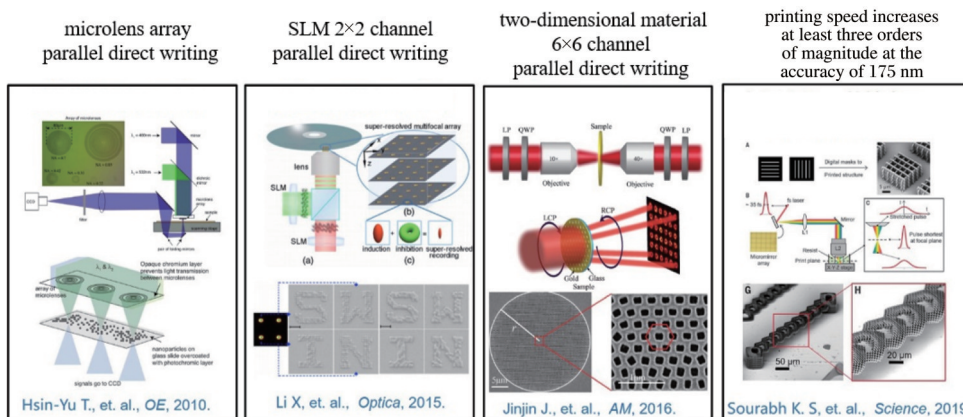


图2 多通道并行LDW<sup>[24-27]</sup>

Fig. 2 Multi-channels LDW technique<sup>[24-27]</sup>

浙江大学刘旭课题组基于光刻胶的PPI效应及多通道并行超快控制方法,提出一种高通量激光纳米直写技术。本文将介绍刘旭课题组近年来围绕这项技术开展的系列研究工作,详细论述LDW的发展现状。

## 2 高通量激光纳米直写原理

LDW是将激光束聚焦,并利用极小的聚焦焦点实现感光胶的曝光。LDW一般采用光学物镜进行光束聚焦直写,由于光学系统衍射极限的限制,通过物镜的

光束的最小光斑尺寸(分辨率为 $R$ )<sup>[28]</sup>可表示为

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} = k_1 \frac{\lambda}{n \sin \theta}, \quad (1)$$

式中: $NA$ 为物镜的数值孔径,由折射率 $n$ 和半角孔径确定; $\lambda$ 为激光的波长。在LDW中,还必须关注另一个重要的参数是激光的焦深( $\eta_{\text{DOF}}$ ),它表征LDW光刻的曝光区域有效长度,可以表示为

$$\eta_{\text{DOF}} = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}, \quad (2)$$

式中: $k_1$ 与 $k_2$ 为LDW曝光中的工艺因子,与光刻胶的曝光特性以及直写工艺等密切相关,一般 $k_1$ 和 $k_2$ 的取值为0.25~1。显然,在传统LDW光刻系统中提高加工分辨率需要缩短入射激光波长 $\lambda$ 或增加物镜的数值孔径 $NA$ 。一般情况下,LDW采用405 nm或375 nm的激光进行直写,国际上LDW设备大都可实现300~500 nm的直写分辨率<sup>[29]</sup>。以上LDW设备中光刻胶的曝光聚合原理是光刻胶对照射激光的单光子吸收效应,这也是常规光刻工艺中光刻胶的曝光机理。

为了压缩感光胶的单光子曝光区域,人们利用激光的双光子或多光子非线性效应来缩小有效作用光斑的尺寸<sup>[30]</sup>。在双光子或多光子非线性效应中,与光刻胶作用的有效光斑尺寸和聚焦光斑的光强分布二次方或高次方成正比,因此有效光斑尺寸被明显压缩,可以显著缩小曝光区域,提高光刻直写的分辨率。实际应用中,激光作用面积可以缩小到接近聚焦激光光斑(衍射极限)的1/5左右,一般可以将光

刻分辨率推进到150 nm左右,从而实现超分辨率光刻。图3给出了传统的LDW中单光子激发的光斑分布与双光子激发的光斑空间分布的情况,可以看到,利用双光子效应可以显著缩小曝光区域,提升刻写分辨率。

尽管双光子LDW可以将刻写精度提升至约150 nm水平,然而对于需要更高精度的纳米器件,这一加工精度还是不能满足需求。为了进一步提升光刻精度,人们借鉴STED超分辨显微成像原理,提出了PPI-LDW。利用该技术可研制出具有特殊性质的感光胶材料,该感光胶具有对一定波长激光曝光交联,而对其余波长激光起到抑制交联作用的特点。因此,利用光斑调制技术将曝光交联的激光聚焦成实心光斑,将抑制交联的光斑聚焦成空心光斑,并将空心光斑套在实心光斑外围(图3中间图),通过调节两束激光的强弱来调控最终曝光交联区域的大小,进而改变传统光刻分辨率对波长与数值孔径的依赖,以显著提升LDW的刻写分辨率。理论上,PPI-LDW的光刻分辨率可以避免完全由光刻波长与光刻系统数值孔径限制的局面,其分辨率可以用交联抑制与双光子曝光光强的相互关系<sup>[31]</sup>来表征,其表达式为

$$R = k_3 \frac{\lambda}{2NA \sqrt{1 + \frac{I_{\text{TP}}}{I_{\text{B}}}}}, \quad (3)$$

式中: $I_{\text{TP}}$ 为双光子激发光的强度; $I_{\text{B}}$ 为3D空心斑的强度。

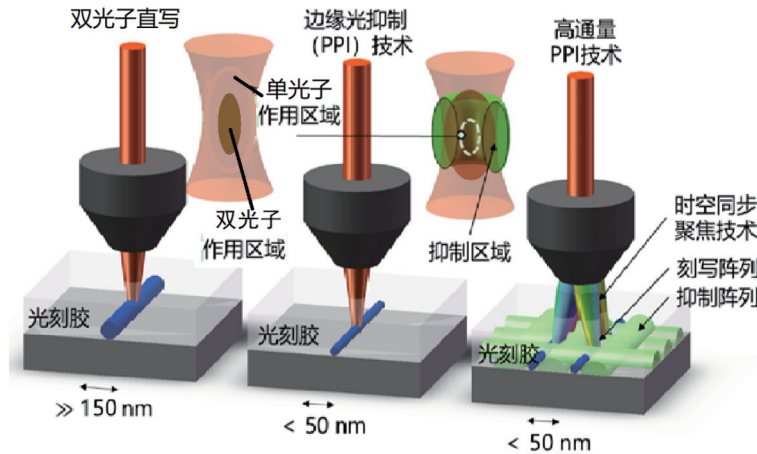


图3 双光子光刻、边缘光抑制以及多通道并行LDW刻写原理<sup>[30]</sup>  
Fig. 3 Principle of TP-LDW, PPI-LDW, and multi-channel PPI-LDW<sup>[30]</sup>

限制激光纳米直写技术被广泛应用的第二个瓶颈问题,就是直写的通量受限的问题。由于LDW采用的是聚焦扫描刻写的方式,每次刻写只进行单点曝光,刻写通量小。为使激光纳米直写进入大批量工业应用,就必须研制出高通量激光纳米直写技术。多通道并行刻写成为解决扫描式LDW系统实现高通量光刻的主要手段,其原理如图3右图所示,入射光束经过调制后在物镜前焦面处产生多个光斑同时进行刻写,进而实现刻写速度的提升。

### 3 高通量激光纳米直写技术

为了提升LDW的光刻分辨率与直写光刻通量,除了直写系统的研制,非线性感光胶的作用也不可替代,因此刘旭课题组将研究工作主要分为新型光刻胶的研制和高通量新型LDW系统的研制两个部分,其中后者又进一步分为:1)实现系统高分辨的3D空心光斑调制技术;2)实现系统高稳定的光束稳定技术;3)实现多通道多路并行激光纳米直写技术。通过以上技术



研究,最终实现高分辨、高稳定、高通量的 LDW。

### 3.1 具有交联抑制的高折射率光刻胶

光刻胶是实现纳米光刻的介质和载体,直接决定了 PPI 的加工精度和质量。PPI 技术对光刻胶具有极其特殊的要求,即光刻胶不仅可以被其中一束光激发,同时还必须被另一束光抑制,该性能主要受光刻胶内光敏剂的影响。PPI 光刻胶在双束激光辐照下的能级跃迁过程如图 4 所示。在飞秒激光的照射下,光刻胶内发生非线性双光子吸收,促使基态电子激发到  $S_1$  激发态,之后经过系间窜越(ISC),进入三重态( $T_1$ ),并由此产生活性种并引发光刻胶的交联聚合反应。通常,ISC 的弛豫时间约为 100 ps<sup>[32]</sup>, $S_1$  的寿命  $\tau_1$  一般为 0.1~4 ns<sup>[16]</sup>。当激发分子被暴露在抑制光下时,被激发到  $S_1$  态的光引发剂发生受激辐射,从而将  $S_1$  态电子拉回基态,导致无法发生 ISC 及后续的光引发反应,从

而达到光抑制的效果。在这个过程中,需要光敏剂的  $S_1$  态具有相对长的寿命,以保证抑制光可以有足够的时间与引发剂  $S_1$  态发生高效的刺激耗散作用。此外,光敏剂还需要具有较高的荧光量子效率,以确保在抑制光照射下,被驱动到基态的  $S_1$  态电子比例足够大。否则, $S_1$  态电子将通过 ISC 过程到达  $T_1$  态,从而失去光抑制能力。因此,开发具有高效刺激耗散能力的光敏剂对 PPI 光刻胶十分重要。

另外,PPI 光刻胶还必须尽可能与高分辨的 LDW 系统折射率匹配,以消除像差,保证更高的刻写精度。现有的 PPI 光刻胶的折射率都小于 1.5,只能适应数值孔径小于 1.5 的光刻光学系统。为此,刘旭课题组探索发展了高折射率的 PPI 光刻胶 Rim-P,以适应更高分辨率物镜的需求,同时使得光学物镜可以浸没在光刻胶中进行光刻,容易实现大高度及高性能的三维光刻。

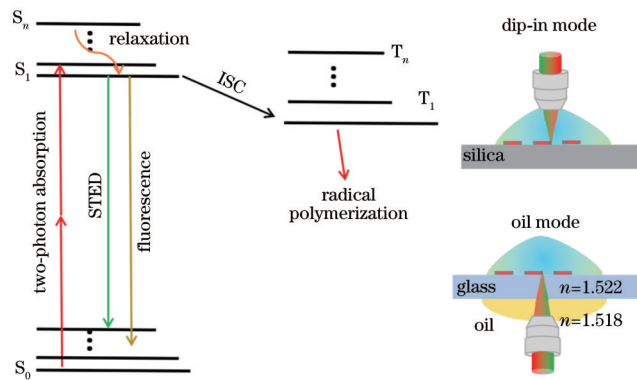


图 4 PPI 光刻胶 Jablonski 图及两种光刻模式(油浸模式与浸没模式)

Fig. 4 Jablonski plot of PPI photoresist (Rim-P) and two writing mode (oil mode & dip-in mode)

为了保证 Rim-P 的 PPI 性能,引入了几种不同的高折射率交联剂,以获得多种类型的 Rim-P。Rim-P 的 PPI 性能通过标准 PPI 测试图案的验证,可以适用于两种不同的光刻模式:油浸模式和浸没模式。Rim-P 光刻胶还考虑了不同光刻模式下的像差影响以及三维直写的尺寸等关键技术与工艺问题。优化

后研制出 Rim-P 系列光刻胶的物理特性与化学组分参数如表 1 所示,其中  $n$  为 589 nm 波长处测得的折射率, $\epsilon_{390}$  为 390 nm 波长处的摩尔消光系数, $I_{Fluo532}$  为 532 nm 波长处的荧光强度, $\tau_{sam}$  为样品的荧光寿命, $P_{th}$  为油浸模式下以 1 mm/s 刻写速度测得的阈值功率。

表 1 交联抑制的双光子 Rim-P 系列光刻胶化学组合与物理特性

Table 1 Chemical components and photophysical performance for Rim-P series photoresist

Sample	Resin composite*	$n$	$\epsilon_{390} / (10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	$I_{Fluo532} / (10^4 \text{ arb. units})$	$\tau_{sam} / \text{ns}$	$P_{th} / \text{mW}$
Rim-P1	38.7% PETA 61.3% BPADA	1.518	1.61	3.740	4.72	3.71
Rim-P2	69.5% PETA 30.5% BPFDA	1.518	1.68	0.262	3.97	2.23
Rim-P3	86.0% TCDA 14.0% BPFDA	1.518	2.61	0.521	3.30	3.00
Rim-P0	100.0% PETA	1.484	2.33	0.319	4.33	2.30

Note: \*the percentage in the resin composite stands for mass fraction.

从表 1 可以看出,所研制的 Rim-P 系列激光纳米直写光刻胶具有较高的折射率,可以与数值孔径为 1.518 的物镜匹配,从而获得更高的光刻分辨率和曝光灵敏度,便于快速扫描直写。

### 3.2 实现系统高分辨的 3D 空心光斑调制技术

利用空间光调制器(SLM)抑制光束中 3D 空心光斑的产生,基本原理如图 5(a)所示。为了充分利用 SLM 的感光面积,将 SLM 分为左、右两个部分,左边

部分加载  $0 \sim 2\pi$  涡旋相位掩模,其目标是产生横向的空心光斑,右边部分加载  $0 \sim \pi$  相位掩模,其目的是产生轴向的空心光斑;由于 SLM 只能对单一偏振光进行调制(本研究认为仅能对 P 偏振光进行调制),入射偏振光可以被分解为 P 偏振光和 S 偏振光两个分量,经过 SLM 左边部分的 P 偏振光被涡旋相位板调制,然后经过反射镜并两次经过  $1/4$  波片,而未被调制的 S 偏振光变为 P 偏振光,再经过 SLM 右边部分被调制成轴向空心光斑,而之前被调制的 P 偏振光变成 S 偏振光不受影响。这样, S 偏振光和 P 偏振光分别形成横向和轴向的空心光斑,合并后成为一个三维的空心出射光斑。另外,在第一次进入 SLM 前,使用一个  $1/2$  波

片来调控 S 偏振光和 P 偏振光的光强比,以得到最理想的三维暗斑。图 5(b)、(c) 所示为搭建的 3D 空心光斑调制模块以及对应调制光斑在物镜前焦面处的形状。

采用 780 nm 飞秒激光作为光刻胶产生聚合实心激发的光源, 532 nm 连续光作为空心抑制光的光源,通过将两束光的中心进行严格重合,可以实现亚 50 nm 的 PPI 刻写精度[图 5(d)]。根据前文所述 PPI 提升刻写精度的原理, 3D 空心光斑是突破衍射极限、在可见光范围内实现 3D 亚 50 nm LDW 的重要因素。因此, 3D 空心光斑调制技术也是超分辨 LDW 设备的关键技术,其产生的空心光斑质量直接影响加工质量。

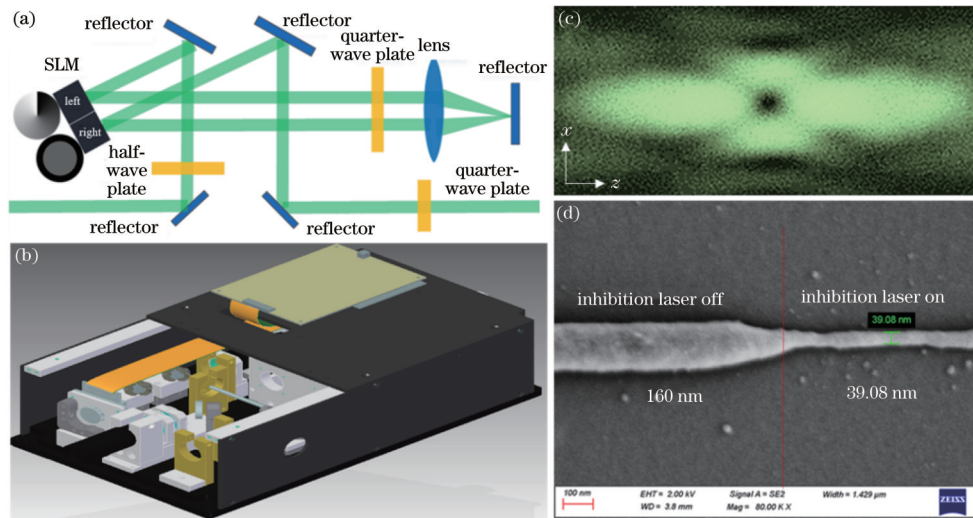


图 5 3D 空心光斑。(a) 基于 SLM 调制的 3D 空心光斑光路示意图; (b) 3D 空心光斑调制模块; (c) 3D 空心光斑在物镜前焦面处的光强分布; (d) 抑制光关与开对应的刻写线宽

Fig. 5 3D hollow spot. (a) Schematic of 3D hollow spot modulated with SLM; (b) modulation module of 3D hollow spot; (c) intensity distribution of 3D hollow spot in front focal plane of objective lens; (d) linewidth corresponding to inhibition laser off or on

### 3.3 实现系统高稳定的光束稳定技术

光束的稳定性对于 LDW 至关重要,特别是当刻写分辨率达到亚 100 nm 时,光束稳定性直接影响刻写精度。为了满足高分辨刻写的需求,刘旭课题组提出了光束稳定技术。图 6(a) 为光束稳定系统的设计原理图,入射光束首先经过反射镜 ( $M_1$ )、再经过回归反射器的三次反射后出射,然后依次经过快速反射镜 (FSM) 和分光镜  $BS_1$  (投射与反射能量的比例为 9:1) 后射出系统。其中 10% 的光束能量在  $BS_1$  处反射进入激光束检测系统,再次经过分光镜  $BS_2$  (投射与反射能量的比例为 9:1) 后分别入射到位置探测器  $PSD_1$  和  $PSD_2$  上,实现对光束的实时角度与位置监控。

光束稳定系统的设计核心特点在于创新性地位置漂移的矫正和角度漂移的矫正分离,从而避免了由传统双快速反射镜系统引起的耦合效应,不仅可以大幅提升精度,并且角度和位置的独立矫正也大幅提升了反馈控制的速度。光束稳定系统主要由光束中心位置矫正单元 (BPCU) 和角度矫正单元 (BACU) 两个部分组成。图 6(b)、(c) 所示为未进行防漂情况下的位置与角度变化情况,图 6(d)、(e) 所示为进行防漂 1 h

后的光束位置与角度变化情况,可见防漂后的光束稳定性得到了显著提升。

### 3.4 多通道并行激光纳米直写技术

为了获得更快的刻写速度、提升刻写效率、实现大面积刻写,提出了多通道并行的高通量 LDW,将刻写通道从单通道通过不同的技术手段扩展至多通道。目前,分别完成了双通道、6 通道直写系统样机制备,正在进行 10 通道样机的研制,本文将主要介绍 6 通道 LDW。

图 7(a)、(b) 为所研制的 6 通道 LDW 系统光路示意图与实物图。将 780 nm 飞秒光纤激光器 (CARMEL CFL-10RFF, 平均功率为 1 W, 重复频率为 80 MHz, 脉宽为 90 fs) 作为光刻胶激发的光源,出射光束经过一个光栅对压缩模块,对飞秒激光在后续光路传输中产生的群速度色散进行预补偿<sup>[30]</sup>,再经过 SLM 产生多光束[图 7(c) 上行]。通过第一组  $4f$  透镜组对光斑进行缩束,以使其通过多通道声光调制器 (AOM),从而实现独立控制每一束光的开关;通过第二组  $4f$  透镜,SLM 处的光斑被成像到转镜平面。在转镜前放置像旋转器,用于调节多光束排列方向与转镜

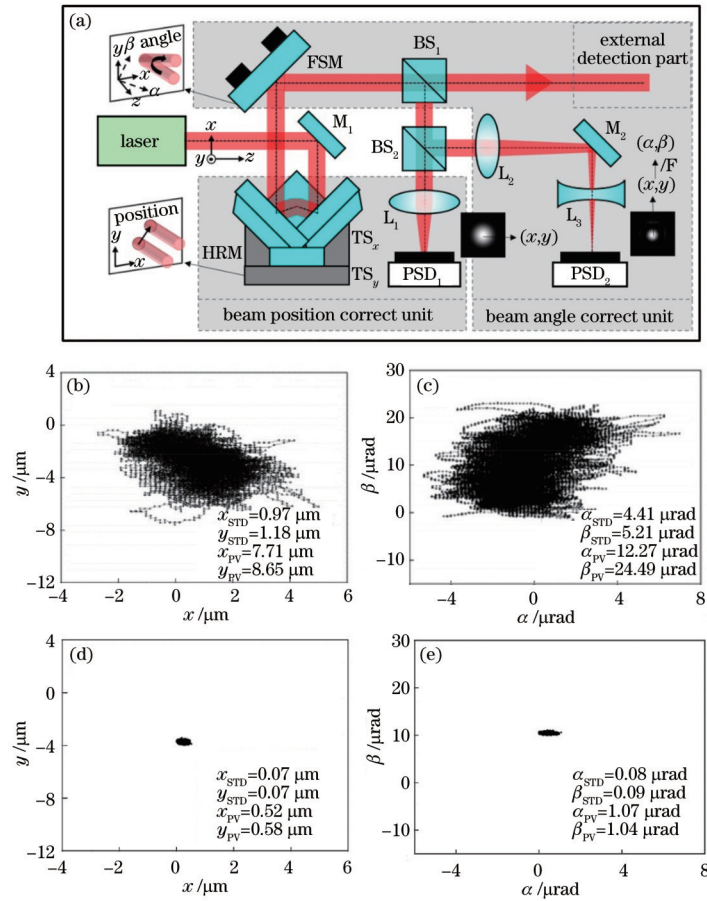


图 6 光束稳定情况。(a)光束稳定模块光路图;(b)(c)未稳定控制下光束的位置与角度漂移的情况;(d)(e)稳定控制下光束的位置与角度漂移的情况

Fig. 6 Beam stabilization. (a) Schematic of beam stabilization module; (b) position and (c) angle drift of beam without drift control; (d) position and (e) angle drift of beam with drift control

扫描方向的夹角。通过转镜后,光束依次经过扫描镜、套筒透镜和物镜(Leica HC-PL-APO-100 $\times$ /1.40-OIL-STED-WHITE)进入样品面,实现多通道刻写。抑制光路采用 532 nm 连续光源,该光路除了无需进行色散补偿,其他部分与激发光路经过的器件类似,这里不再赘述。最后,激发光和抑制光通过偏振合束器进行合束,一起经过扫描系统后再通过物镜入射到样品面上,其产生的空心光斑[图 7(c)下行]与实心激发光的光斑中心重合,从而实现多通道 PPI 刻写。

目前,所研制的 6 通道 PPI 直写系统可以实现 75 nm 的最小线宽刻写,单通道刻写速度 $\geq 7$  mm/s,加工面积可达 55 mm $\times$ 55 mm。

利用所研制的 PPI-LDW 可以实现各种精密纳米器件的加工,包括简单的二维器件甚至复杂的三维器件。由于光刻胶对可见光基本透明,特别是对红光的透明度更好,因此可以打印出各种光学器件。从目前的工艺看,微纳结构表面的粗糙度小于 20 nm,适合于各类微纳光学器件如衍射光学器件、自由曲面器件的直接打印。图 8 所示为研制的几种微纳结构器件,包括应用于硅光芯片的光子引线、光子晶体、微纳光纤耦合器、超表面结构、细胞支架和复杂空间拓扑结构等。

## 4 结 论

本课题组发展了多通道并行刻写的高通量 PPI-LDW 技术。该技术涵盖了实现高分辨刻写的 3D 空心光斑调制技术、光束稳定技术、并行多通道光路产生技术以及对应的高折射率光抑制双光子光刻胶,可以提供亚 50 nm 精度的空间任意图案的三维刻写,单通道刻写速度可达 7 mm/s,刻写面积达到 55 mm $\times$ 55 mm。

经过 3 年的研究,本课题组走出了自己的 PPI 发展路线,这是一条利用特种光刻胶与高通量 LDW 系统有机协同的发展道路。研究表明,PPI-LDW 是一种非常具有挑战、有前景的方向,是材料和技术的结晶。它将不断激励我们优化新的光刻胶体系,改进光刻胶的各种性能,以进一步提高光刻的分辨率,向 10 nm 的特征尺寸发展;同时我们将不断发展具有不同功能的光刻胶,如透明导电、光电传感、压感、温感等功能感光胶,以推进新型多通道并行直写技术的发展,提升激光纳米直写系统的吞吐量,促进新型阵列式快速光强调制器、阵列相位调制器等核心器件与技术的发展,并推动激光技术的进步。



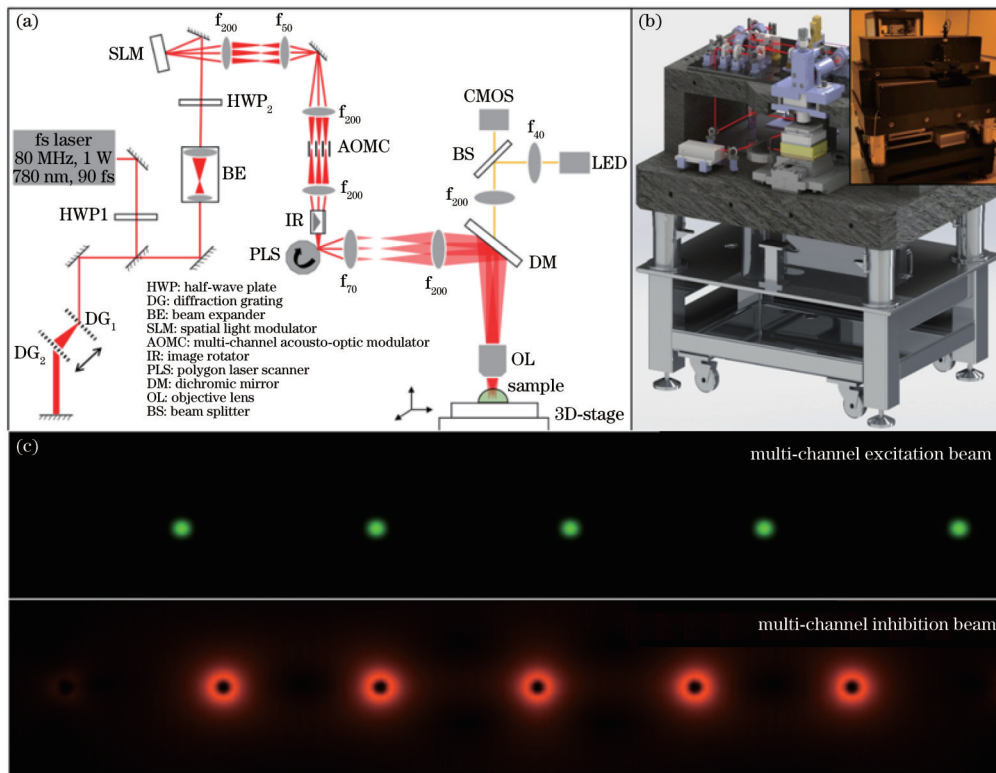


图 7 6 通道 LDW。(a) 6 通道激光直写系统光路原理图；(b) 对应的模型图，插图为实物图；(c) 经过 SLM 产生的 6 通道激发光和抑制光

Fig. 7 Six channels LDW. (a) Schematic of six channels LDW system; (b) CAD module corresponding to Fig. 7(a), the inset is photo of real product; (c) six channels excitation and inhibition beams generated by SLM

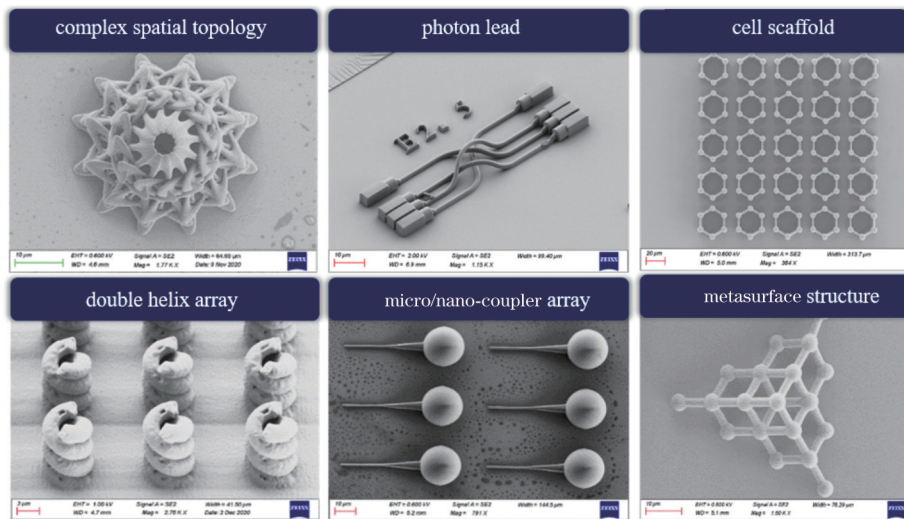


图 8 利用 PPI-LDW 技术刻写的不同微纳结构器件

Fig. 8 Different micro/nano-structure devices written by PPI-LDW

总之,LDW 是一种先进的微纳加工技术,具有灵活的三维加工特点,特别适用于当前异质集成、多层堆叠的集成电路发展模式,尤其是在光电混合器件的研制方面具有步进式光刻机不可比拟的优势。同时,相比于电子束曝光光刻,高通量 PPI-LDW 系统简单、成本效益高,且可实现高分辨光刻,有望在未来用于集成电路掩模版的制备。此外,多功能 PPI 光刻胶为本技术的发展提供了极大的发展空间,例如可以发展各种光

电功能的光刻胶,用 PPI 技术直接打印各种光电器件,无需传统微纳制备工艺中的刻蚀工艺,直接成型所需的器件,这将在各种传感器的研制中具有良好的发展前景。

参 考 文 献

[1] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next

- generation of systems on a chip[J]. *Nature*, 2018, 556(7701): 349-354.
- [2] Ingerly D B, Amin S, Aryasomayajula L, et al. Foveros: 3D integration and the use of face-to-face chip stacking for logic devices[C]//2019 IEEE International Electron Devices Meeting, December 7-11, 2019, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [3] Kum H, Lee D, Kong W, et al. Epitaxial growth and layer-transfer techniques for heterogeneous integration of materials for electronic and photonic devices[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(10): 439-450.
- [4] Gale M T, Knop K. The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 0398: 347-353.
- [5] Wang S, Zhou Z, Li B, et al. Progresses on new generation laser direct writing technique[J]. *Materials Today Nano*, 2021, 16: 100142.
- [6] Venkatakrisnan K, Ngoi B K A, Stanley P, et al. Laser writing techniques for photomask fabrication using a femtosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2002, 74(4): 493-496.
- [7] Qin L, Huang Y Q, Xia F, et al. 5 nm nanogap electrodes and arrays by super-resolution laser lithography[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 4916-4923.
- [8] Cai J G, Lü C, Watanabe A. Laser direct writing and selective metallization of metallic circuits for integrated wireless devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(1): 915-924.
- [9] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 554-560.
- [10] Wang M, Liu Q, Zhang H R, et al. Laser direct writing of tree-shaped hierarchical cones on a superhydrophobic film for high-efficiency water collection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(34): 29248-29254.
- [11] Wanzenboeck H D, Waid S. Focused ion beam lithography[M]. London: InTech, 2011.
- [12] Vieu C, Carcenac F, Pépin A, et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 164(1/2/3/4): 111-117.
- [13] Zheludev N I. What diffraction limit? [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(6): 420-422.
- [14] Zhang Y L, Chen Q D, Xia H, et al. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing[J]. *Nano Today*, 2010, 5(5): 435-448.
- [15] Scott T F, Kowalski B A, Sullivan A C, et al. Two-color single-photon photoinitiation and photoinhibition for subdiffraction photolithography[J]. *Science*, 2009, 324(5929): 913-917.
- [16] Li L J, Gattass R R, Gershgoren E, et al. Achieving  $\lambda/20$  resolution by one-color initiation and deactivation of polymerization[J]. *Science*, 2009, 324(5929): 910-913.
- [17] Fischer J, von Freymann G, Wegener M. The materials challenge in diffraction-unlimited direct-laser-writing optical lithography[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(32): 3578-3582.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Wollhofen R, Katzmann J, Hrelescu C, et al. 120 nm resolution and 55 nm structure size in STED-lithography[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10831-10840.
- [21] Wollhofen R, Buchegger B, Eder C, et al. Functional photoresists for sub-diffraction stimulated emission depletion lithography[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(7): 2538-2559.
- [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] Wu H K, Odom T W, Whitesides G M. Connectivity of features in microlens array reduction photolithography: generation of various patterns with a single photomask[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(25): 7288-7289.
- [24] Jin J J, Pu M B, Wang Y Q, et al. Multi-channel vortex beam generation by simultaneous amplitude and phase modulation with two-dimensional metamaterial[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(2): 1600201.
- [25] Tsai H Y, Thomas S W, Menon R. Parallel scanning-optical nanoscopy with optically confined probes[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 16014-16024.
- [26] Li X P, Cao Y Y, Tian N, et al. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate[J]. *Optica*, 2015, 2(6): 567-570.
- [27] Saha S K, Wang D E, Nguyen V H, et al. Scalable submicrometer additive manufacturing[J]. *Science*, 2019, 366(6461): 105-109.
- [28] 张汝京. 纳米集成电路制造工艺[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- Zhang R J. Nanoscale integrated circuits-the manufacturing process[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [29] Heidelberg Instruments[EB/OL]. [2022-05-30]. <http://www.stella-litho.com/heidelberg/DWL.html#dw166>.
- [30] 孙萌涛, 李源作. 单光子和双光子吸收原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- Sun M T, Li Y Z. One-and two-photon absorptions: principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [31] Hell S W. Far-field optical nanoscopy[J]. *Science*, 2007, 316(5828): 1153-1158.
- [32] Fischer J, Wegener M. Ultrafast polymerization inhibition by stimulated emission depletion for three-dimensional nanolithography[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(10): OP65-OP69.



## 约稿专家简介:



刘旭(1963—), 博士, 博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授, 973项目首席科学家, 浙江省特级专家, 教育部创新团队带头人。1984年7月浙江大学光学仪器工程学系光学仪器专业本科毕业获学士学位, 1990年7月获艾克斯-马赛第三大学马赛国立高等物理工程师学校信息传感专业博士学位。现任浙江大学现代光学仪器国家重点实验室主任, 中国光学学会秘书长, 中国光学学会、美国光学学会和国际光学工程学会会士。长期从事光学薄膜技术与光学显示、成像方面的研究与教学工作, 曾主持多项国家科技项目, 获国家科学技术进步奖、国家自然科学基金、国家技术发明奖各一项, 省部级科技进步奖三项, 中国光学学会光学科技奖, 第八届中国青年科技奖。E-mail: liuxu@zju.edu.cn。