

引用格式: DONG Yuan, ZHONG Qize, ZHENG Yongjian, et al. Progress in Wafer-level Metasurface-based Flat Optics (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1024002

董渊, 钟其泽, 郑勇剑, 等. 晶圆级超构表面平面光学研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1024002

晶圆级超构表面平面光学研究进展(特邀)

董渊, 钟其泽, 郑勇剑, 郑少南, 胡挺, 古元冬

(上海大学 微电子学院, 上海 200444)

摘 要:超构表面是由亚波长结构单元组成, 它可以利用微纳制造工艺在平面上制造出来。通过改变超构单元的形貌以及排列方式可以实现对光的精确控制, 从而使超构表面实现多种光学器件的功能。超构表面平面光学器件具有超薄、超轻、可芯片级集成、易于大规模量产等优点, 近些年来成为了微纳光子学里最热门的研究领域之一。基于紫外光刻工艺的晶圆级加工技术是未来实现超构表面光学器件大规模量产最可行的路线之一。本文综述了近些年来基于紫外光刻技术的晶圆级超构表面光学所取得的进展。这些研究工作在不同尺寸和材料的晶圆上实现了超透镜、偏振带通滤波器、半波片、完美吸收体、光束偏转器等光学器件。

关键词:超构表面; 光学; CMOS; 纳米光子学; 晶圆加工

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215010.1024002

Progress in Wafer-level Metasurface-based Flat Optics (Invited)

DONG Yuan, ZHONG Qize, ZHENG Yongjian, ZHENG Shaonan, HU Ting, GU Yuandong
(School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Metasurface is composed of many sub-wavelength metastructures that can be fabricated in a flat surface using CMOS process. Light can be precisely controlled by a metasurface through the specifically designed shape and arrangement of metastructures. This enables metasurfaces to realize same functions as conventional optical devices. In recent years, metasurface-based flat optic devices have attracted great attention since they are ultrathin, ultralight, mass-producible, and can be monolithically integrated with other optoelectronic devices. Ultraviolet photolithography based wafer-level fabrication has been considered as one of the most promising approaches for the mass-production of metasurface-based flat optic devices. In this article, recent progress in wafer-level metasurface-based flat optics is reviewed. Optical devices such as metalens, polarization bandpass filter, half-wave plate, perfect absorber, and beam deflector are demonstrated on different types of wafers with various diameters.

Key words: Metasurface; Optics; CMOS; Nanophotonics; Wafer processing

OCIS Codes: 240.3990; 130.3120; 220.4241

0 引言

超构表面光学是近十年来纳米光子学里最热门的研究领域之一。超构表面由亚波长尺寸的超结构单元组成, 该结构可以对光的性质进行精确控制。通过合理地设计超结构形貌以及其空间排布可以使超构表面实现超透镜成像^[1-9]、偏振控制^[10-14]、全息成像^[15-25]、波束扫描^[26-28]、色彩滤波^[29-32]等不同的功能。例如, 哈佛大学 CAPASSO F 团队^[1]利用二氧化钛超结构实现了可见光波段的消色差超透镜; 台湾大学 TSAI D P 团队^[10]利用铝等离子超构表面实现了对光的偏振控制; 伯明翰大学 ZHANG Shuang 团队^[15]通过金 (Au) 等

第一作者(通讯作者): 董渊(1990—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为集成光子、硅光子芯片设计与工艺研究。Email: dongyuan@shu.edu.cn

收稿日期: 2021-07-30; 录用日期: 2021-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

离激元超构表面实现了高效率的全息成像等。

目前报道的大多数超构表面都是通过电子束曝光(Electron Beam Lithography, EBL)来实现微纳结构的图案化的。虽然EBL可以制备出几十到几百纳米线宽的超结构,但是在晶圆上制备较多的大尺寸器件需要耗费大量的工艺时间。可见,EBL工艺并不适合超构表面光器件的大规模量产。紫外光刻技术已经在集成电路制造领域被大规模使用。一次紫外光刻工艺就可以在整个晶圆上制备出大量的超构表面光学器件,加工速度比EBL直写快几个数量级。紫外光刻技术拥有极好的尺寸控制、高可重复性、低缺陷率,以及兼容互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)加工工艺平台等优点。此外,采用CMOS兼容的加工工艺方式易于将超构表面光学器件直接加工在光电子器件上,实现晶圆级的单片集成,这将有益于缩小光电系统的尺寸和降低封装的成本。

随着几十年半导体芯片加工产业的发展,紫外光刻已经拥有了一套成熟的技术体系,例如光学邻近效应修正(Optical Proximity Correction, OPC)、涂胶-显影-曝光工艺、缺陷扫描、线上量测等。不同工艺节点的紫外光刻机可以满足超构表面加工中从几微米到几十纳米线宽的工艺要求。主流的光刻机按照使用的光波长来划分,可以分为g线(436 nm)、h线(405 nm)、i线(365 nm)、以及深紫外的248 nm KrF和193 nm ArF光刻机。此外,通过将曝光镜头浸没在液体中的方式可以增加数值孔径,从而进一步提高了光刻机的分辨率。其中最具有代表性的就是浸润式193 nm ArF光刻机,这是目前芯片大规模量产中加工几十纳米线宽微纳结构最常用的光刻设备。

目前已经有多篇综述论文从不同的角度对超构表面光学进行了总结与分析^[33-37]。本文将从基于紫外光刻技术的晶圆级超构表面光学这一角度,综述近些年来该方向所取得的研究进展。这些研究工作使用了不同种类的晶圆材料,也覆盖了2、4、6、8、12英寸(1 inch=25.4 mm)等常用的晶圆尺寸^[38-56]。本文首先介绍了基于硅(Si)晶圆的超构表面光学器件研究工作;然后介绍了基于二氧化硅(SiO₂)玻璃晶圆的研究工作,这部分按照加工工艺的不同分为直接加工法(Direct Patterning)和薄膜转移法(Layer Transfer)两类;最后讨论了本领域当前所面临的挑战与未来发展方向。

1 Si晶圆上制备的超构表面

Si是半导体芯片加工中最常见的晶圆材料,其加工工艺技术成熟,晶圆代工产业链也最为完善。由于在可见光波段Si具有较高的光吸收系数,因此Si衬底一般不适用于可见光波段的透射式光学器件。2018年,新加坡微电子研究院的HU Ting等^[38]报道了基于12英寸Si晶圆制备的可见光波段反射型彩色显示超构表面。该晶圆采用CMOS兼容工艺,其超构表面结构关键尺寸(Critical Dimension, CD)小于100 nm。该工作利用193 nm ArF深紫外浸润式光刻技术代替EBL对超构表面进行图形化转移,在保持高分辨率的同时大大缩短了工艺时间。图1(a)展示了该超构表面器件的结构示意图。所加工的12英寸超构表面晶圆如

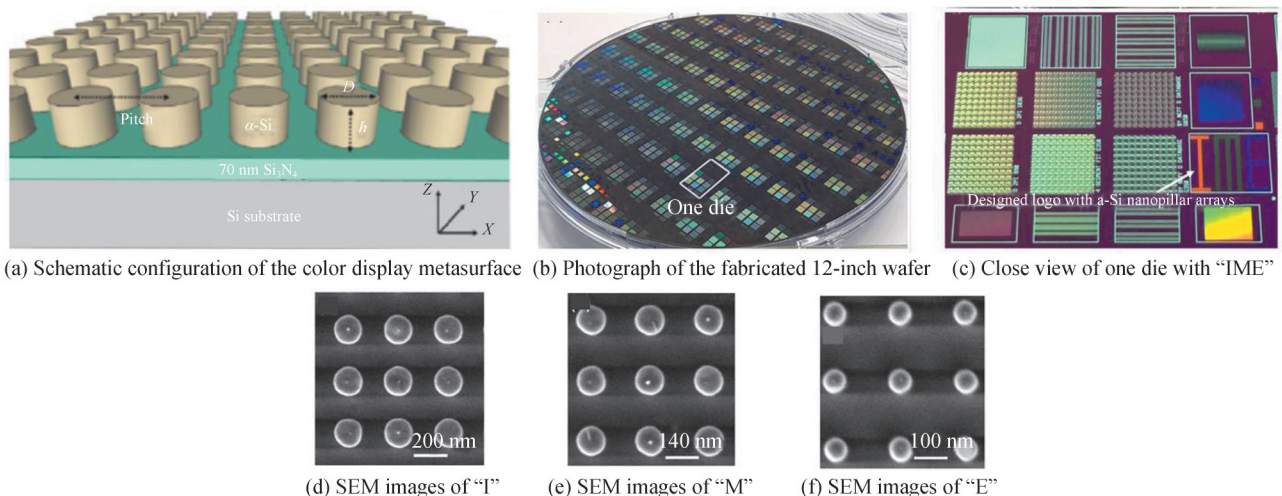


图1 基于12英寸硅基晶圆的超构表面彩色显示器件^[38]

Fig. 1 Metasurface-based color display on a fabricated 12-inch Si wafer^[38]. Adapted with permission from Ref.[38] © The Optical Society

图1(b)所示;图1(c)展示其中一个晶粒的光学照片。由于超构表面的特殊设计,“IME”三个字母分别呈现出红、绿、蓝(RGB)三种不同颜色。这三种颜色所对应的超构表面俯视扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)图像分别如图1(d)~(f)所示。此外,作者还进一步分析了晶圆级CD的均匀性与超构表面的反射特性,实验数据表明,超构表面形貌与CD在制造过程中得到了良好的控制。这项工作为介质超构表面的大规模生产提供了一个有效的解决方案。

Si在大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 波长的近红外波段具有较高的透射率,因此适合制备透射型的超构表面光学器件。2019年,新加坡微电子研究院的XU Zhengji等^[39]在12英寸Si晶圆上展示了基于全硅超构表面的透射型偏振带通滤波器(Polarizing Bandpass Filter, PBF)。近红外波段的偏振控制光学器件不仅可以提高成像器在雨雾天气条件下的性能,还可实现如材料识别等新功能,因此具有重要的应用价值。图2(a)展示了12英寸硅基超构表面晶圆光学照片,图2(b)为晶圆中心处晶粒的光学照片,其中白色虚线框内为所报道的PBF器件。图2(c)~(e)为PBF中超构表面纳米结构的表征结果。此外,利用傅里叶变换红外光谱仪对17个偏振带通滤波器的工作带宽进行了测量,其测量结果如图2(f)所示。由图可见,除了晶圆最边缘的两个器件,剩下15个器件的偏振带通测试性能接近,显示了较好的均一性。该工作利用与CMOS兼容的 $193\ \text{nm}$ ArF深紫外浸润式光刻技术和电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)蚀刻工艺制程实现了82%良率的器件产量。

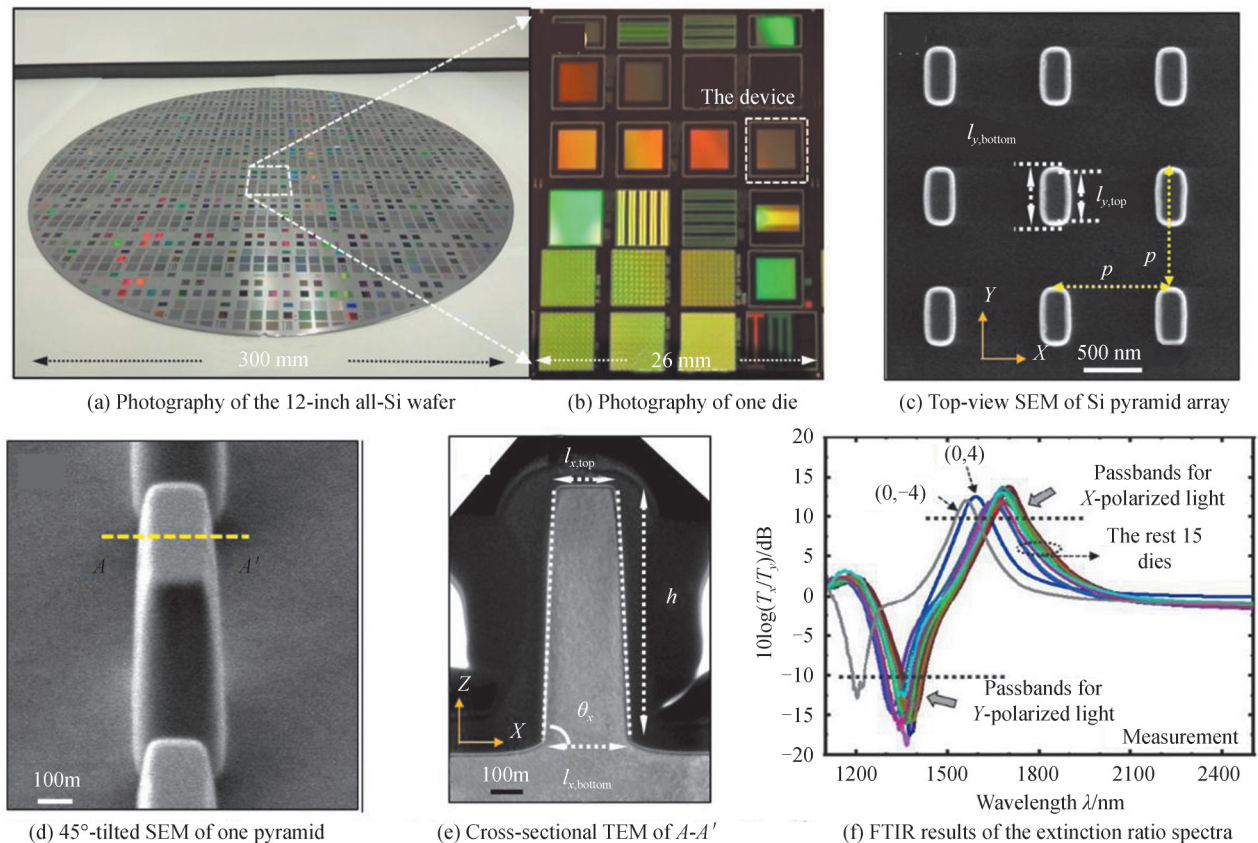


图2 基于12英寸硅基晶圆的超构表面偏振带通滤波器^[39]

Fig. 2 Metasurface-based polarizing bandpass filter on a fabricated 12-inch Si wafer^[39]. Adapted with permission from Ref.[39]
© The Optical Society

半波片是另一种常用的偏振控制器件。传统的基于双折射晶体的半波片体积较大,难以与其他光学元件进行单片集成。为解决这一问题,2019年,新加坡微电子研究院DONG Yuan等^[40]通过优化12英寸CMOS工艺,报道了可大规模量产的超构表面半波片。图3(a)为所报道超构表面半波片的三维示意图,它主要由Si纳米柱阵列构成。在 x 方向偏振光输入下可以转换成垂直方向的 y 偏振。图3(b)是制备的12英寸超构表面晶圆光学图像。图3(c)~(d)为对半波片超构表面的SEM图像表征。文章通过仿真和实验研究

了纳米结构和工艺变化对器件性能的影响,并探究了在不同晶圆位置上制备半波片的交叉偏振和共极化偏振透射率(T_{cross} 和 T_{co})特性,此外,还展示了该半波片在 $1.7\ \mu\text{m}$ 工作波长附近及不同晶圆位置 $95.6\% \pm 0.8\%$ 的偏振转换效率[图2(e)~(f)].较传统半波片,超构表面半波片更为轻薄、紧凑,因此具有广阔的应用前景。

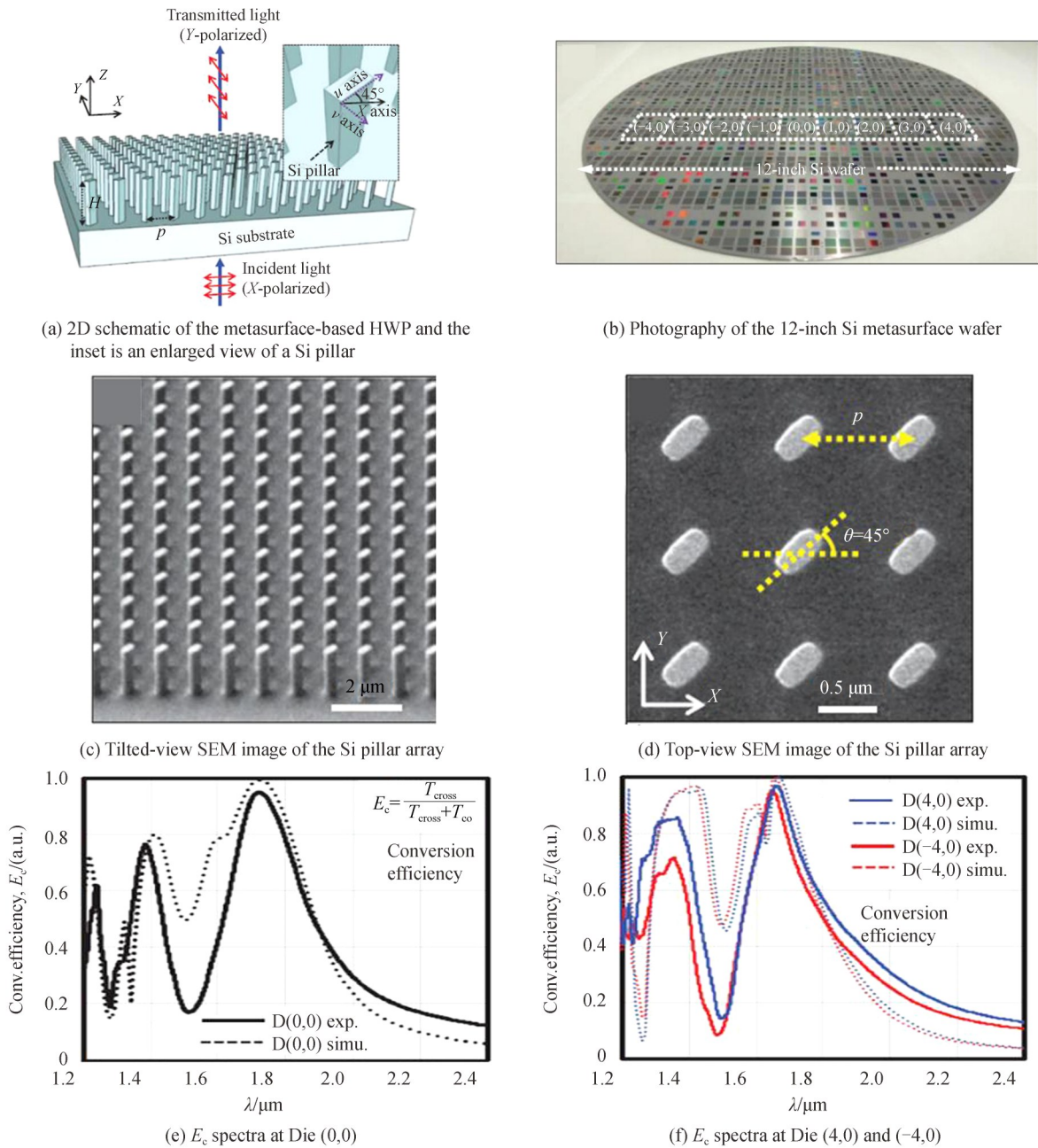


图3 基于12英寸硅基晶圆的超构表面半波片^[40]

Fig. 3 Metasurface-based half-wave plate on a fabricated 12-inch Si wafer^[40]. Adapted from Ref.[40], © 2019 Zhengji Xu et al., published by De Gruyter. Under the Creative Commons Attribution 4.0 Public License

超构透镜由于其出色的光学性能,以及更小、更薄、更轻的特性而备受关注。2018年, COLBURN S等^[41]在4英寸硅晶圆上制备了 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长的超透镜。该超透镜直径为 $1\ \text{cm}$,由大约1.2亿个氮化硅(SiN)纳米柱状超结构组成。利用阿尔瓦雷斯透镜原理,通过两片超透镜组成了可变焦光学系统,如图4(a)所示。通过这一设计,最终实现了在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长下超过 $6\ \text{cm}$ 的焦距变化。同时,该超透镜还在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长实现了 57% 的聚焦效率。器件的制造工艺流程图如图4(b)所示。首先使用等离子体化学气相沉积(Plasma

Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)在硅衬底上生长 $2\ \mu\text{m}$ 厚的SiN薄膜,随后通过i线步进式光刻机曝光,并结合金属蒸发沉积和剥离工艺制备出Al硬掩模,最后通过ICP干法刻蚀出SiN的超构表面。图4(c)展示了工艺完成后的晶圆照片,图4(d)是超结构的倾斜视角SEM图。受限于i线光刻机的线宽,该超透镜的SiN纳米柱的直径在 $500\sim 1\ 100\ \text{nm}$ 之间。除了Si衬底,作者还使用了石英作为衬底材料,利用同一套器件设计版图与工艺,制备了工作在波长为 $633\ \text{nm}$ 的可变焦超透镜系统。该超透镜在 $633\ \text{nm}$ 波长的聚焦效率较低,仅为 15% 。这一效率可以通过在未来使用更加先进的光刻工艺来提升。仿真计算证明,如果使用深紫外光刻机来制备直径为 $125\sim 400\ \text{nm}$ 之间的SiN纳米柱结构,工作在 $633\ \text{nm}$ 波长的超透镜透射效率可能被大大提高。

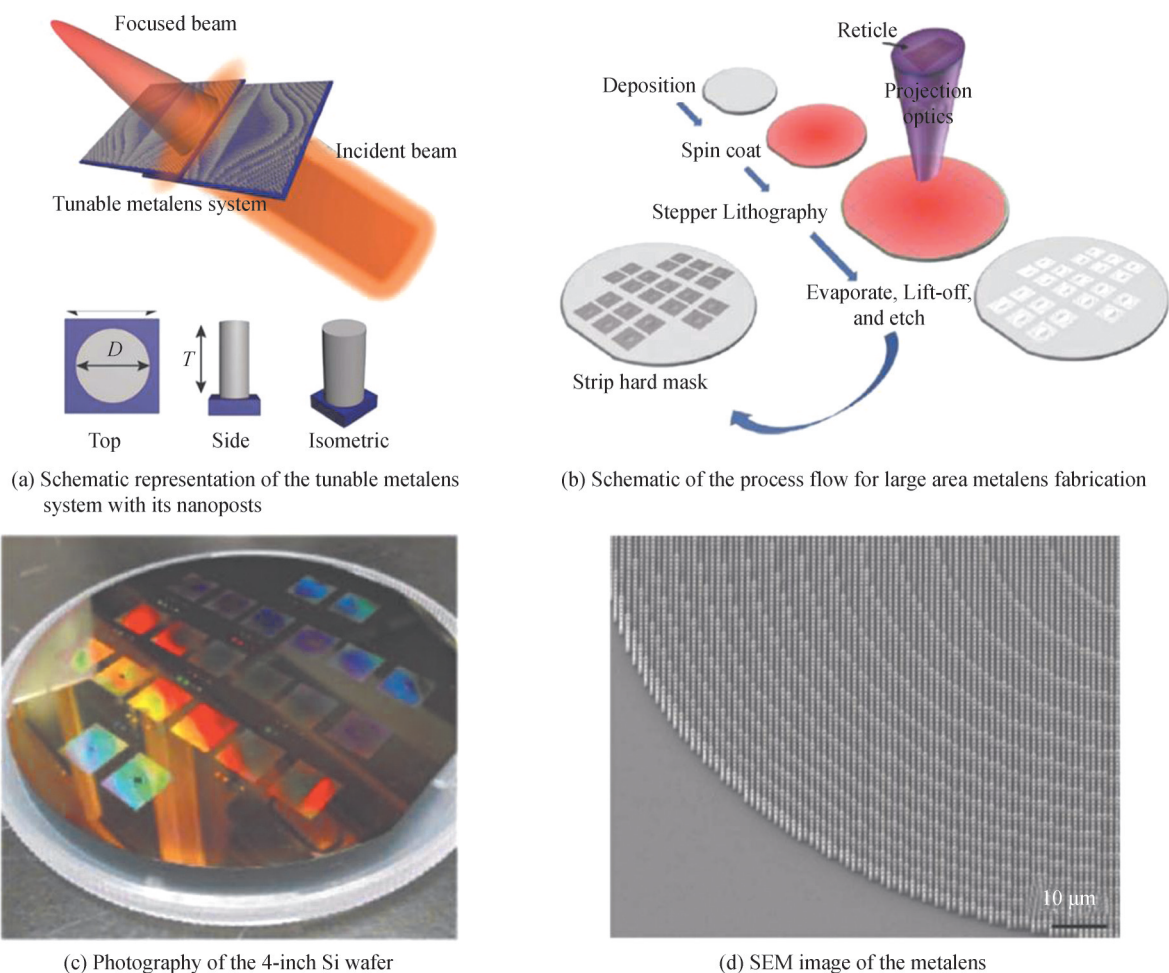
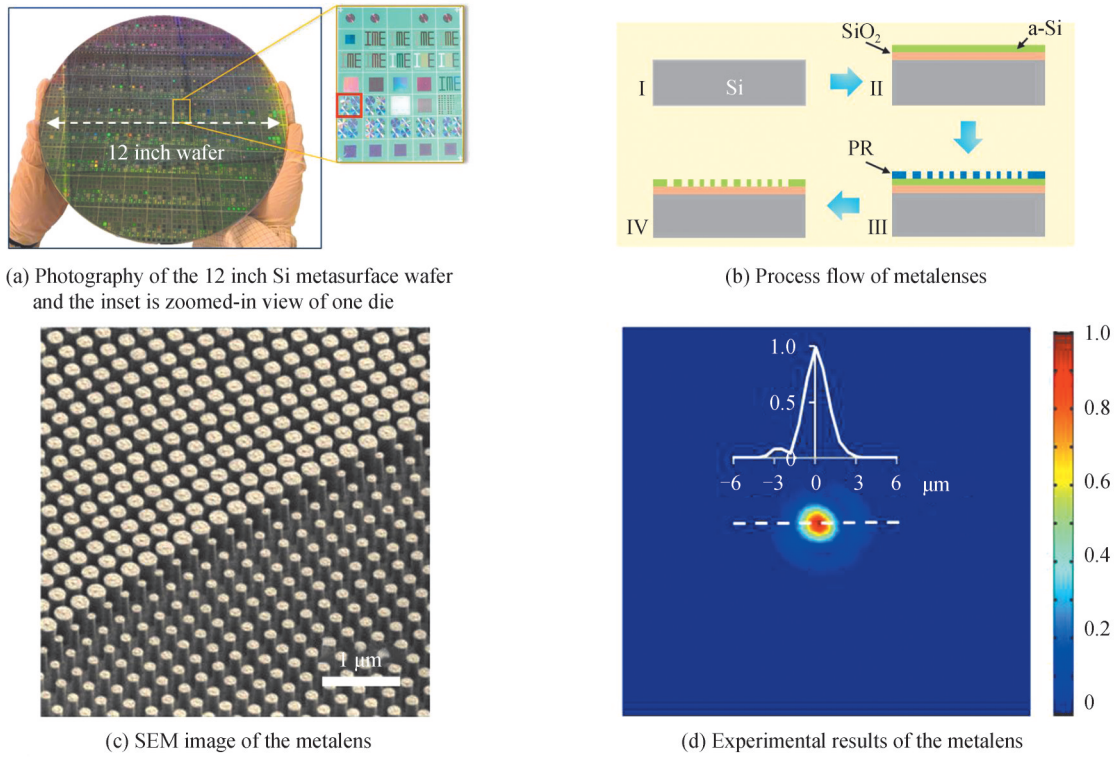


图4 基于4英寸硅基晶圆的超构透镜^[41]

Fig. 4 Metalens fabricated on a 4-inch Si wafer^[41]. Adapted with permission from Ref.[41] © The Optical Society

2019年,新加坡微电子研究院ZHONG Qize等^[42]在12英寸硅晶圆上制造了直径为 $2\ \text{mm}$ 、工作在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长的超构透镜,如图5(a)所示。图5(b)展示了超构透镜制造工艺流程。作者通过PECVD在Si晶圆上分别沉积了 SiO_2 和非晶硅(amorphous Silicon, a-Si)介质层,随后通过 $193\ \text{nm}$ 浸润式光刻机技术进行图案转移,最后利用ICP干法刻蚀制造超构透镜纳米结构,如图5(c)所示。作者通过实验测试发现超构透镜焦点光斑的半高全宽为 $2.0\ \mu\text{m}$ [图5(d)]。该成果为大规模制造超构透镜提供了可行性方案。

在中红外光波段,研究人员在不同尺寸的硅晶圆上制备了基于金属超构表面的完美吸收体。2015年,哈尔滨工业大学(深圳)的LIU Jia等^[43]在2英寸的硅晶圆上制备了Au超构表面的中红外波长完美吸收体。该超构表面由双“E”形状的Au超结构单元组成,这一完美吸收体具有偏振不相关、广角、双波段的特点。晶圆加工工艺方面,Au/ZnSe/Au多层薄膜通过电子束蒸发沉积生长在2英寸硅晶圆上,后通过紫外光刻机制备出最小线宽大于 $1\ \mu\text{m}$ 的微纳图案,随后使用ICP以Ar离子物理轰击的方法对Au进行刻蚀,从而制备出



(a) Photography of the 12 inch Si metasurface wafer and the inset is zoomed-in view of one die

(b) Process flow of metalenses

(c) SEM image of the metalens

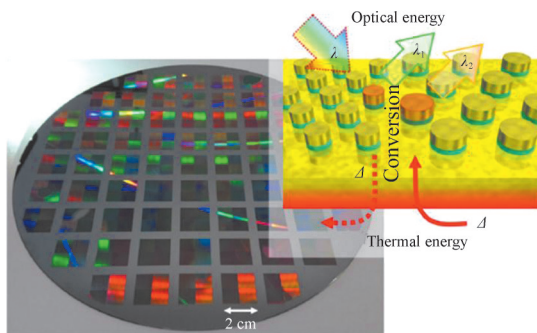
(d) Experimental results of the metalens

图5 基于12英寸硅基晶圆的超构透镜^[42]

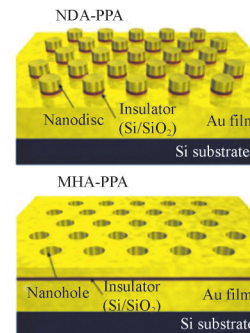
Fig. 5 Metalens fabricated on a 12-inch Si wafer^[42]. © 2019 IEEE. Reprinted with permission from Ref.[42]

高为 30 nm 的 Au 超构表面结构。实验结果显示,该完美吸收体在 18.1 THz (16.6 μm)和 26.8 THz (11.2 μm) 有 2 个吸收峰。

2019年,日本横滨国立大学的 NISHIJIMA Y 等^[44]在 8 英寸硅晶圆上制备了中红外波段的 Au 超构表面等离激元完美吸收体(Plasmonic Perfect Absorber, PPA)。图 6(a)展示了在 8 英寸硅晶圆上制备多个器件的示意图以及该 PPA 的工作原理图。实现这一器件功能的 Au 超结构有 2 种设计:纳米碟形阵列(Nano-Disk Array, NDA)和多孔阵列(Multi-Hole Array, MHA),如图 6(b)所示。光刻过程中对 NDA 和 MHA 两种器件使用同样的掩模版,不同的是 NDA 采用正胶而 MHA 采用反胶。所制备出的两种结构的微纳结构尺寸略有差别,其中 NDA-PPA 比 MHA-PPA 的直径略大,如图 6(c)所示。此外,Au 超结构下方又有 2 种不同的绝缘层的材料:Si 或者 SiO₂,因此通过排列组合共有 4 种器件组成形式,即 Si/NDA、SiO₂/NDA、Si/MHA 和 SiO₂/MHA。这四种器件结构中,Si/NDA 在 4 μm 波长附近具有最高的吸收率。通过对器件进行热辐射和热吸收测试,发现辐射率和吸收率基本一致,如图 6(d)所示,这从实验上验证了热力学平衡状态下的基尔霍夫热辐射定律。加工工艺方面,首先通过溅射沉积的方式在 8 英寸硅衬底上生长 200 nm 厚的 Au 薄膜,然后通过 i 线步进式光刻机曝光。随后通过磁控溅射生长 10 nm 的 Si 或者 SiO₂的绝缘层以及 50 nm 的



(a) Concept of Kirchhoff's metasurface devices and inset illustrates thermal/optical energy conversion



(b) Schematic illustrations of NDA and MHA type PPA structures

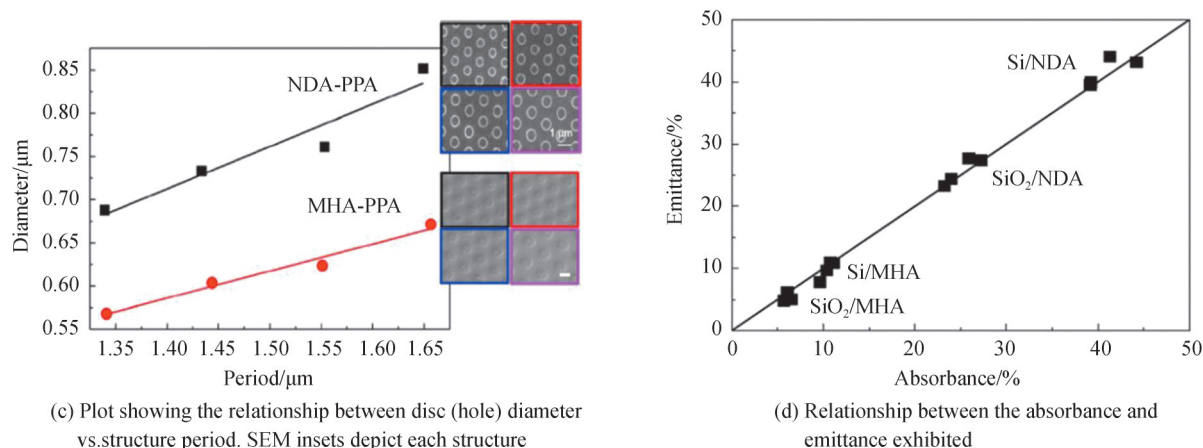
图6 基于8英寸硅基晶圆的超构表面等离子体完美吸收体^[44]

Fig. 6 Plasmonic perfect absorber fabricated on an 8-inch Si wafer^[44]. Adapted from Ref. [44]. Under the Creative Commons Attribution 4.0 Public License

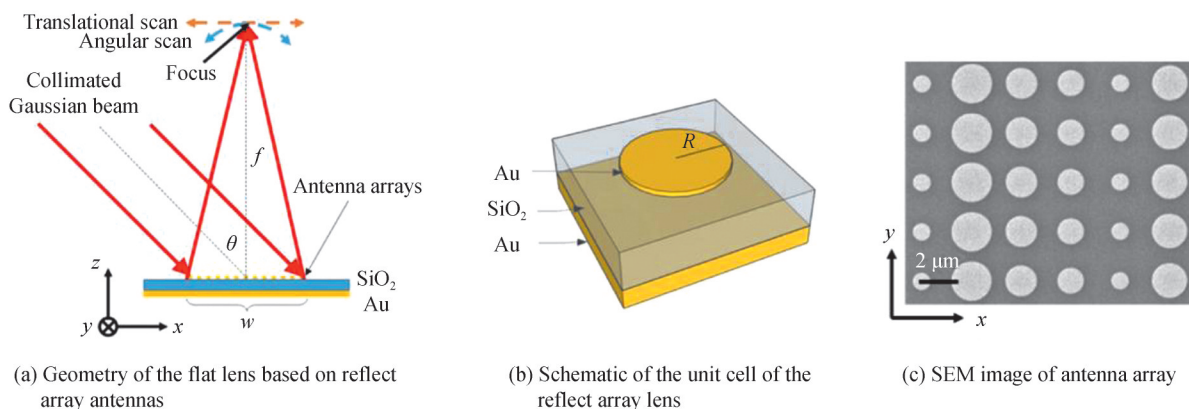
Au层,绝缘层与Au层之间有3 nm的钛(Ti)。最后,通过剥离工艺制备出Au超构表面结构。

2 SiO₂玻璃晶圆上制备的超构表面

2.1 直接加工法制造超构表面器件

2016年,哈佛大学的ZHANG Shuyan等^[45]在6英寸的熔融石英衬底上制备了反射型超透镜。该超透镜由Au超构表面结构组成,在4.6 μm波长有80%的聚焦效率,且具有接近衍射极限的聚焦性能。图7(a)展示了该超透镜在 $x-z$ 轴截面的工作示意图。光源入射方向与 z 轴夹角 θ 为45°,反射透镜的焦距 f 为80 mm,超透镜的直径为3.08 mm。图7(b)展示了Au超构表面反射单元的示意图。400 nm厚的SiO₂介质层通过PECVD制备,SiO₂薄膜上下两层Au厚度分别为50 nm和200 nm,均通过电子束蒸发沉积的方法制备。最上层的碟形超构表面通过i线步进式光刻机在6英寸晶圆上实现了微纳结构的图案化。图7(c)是所制备的Au超构表面反射阵列一个区域的俯视SEM图片,可以看到该超构表面由尺寸不同的碟形超结构组成。一张6英寸晶圆上可以制备超过160个不同光学性能的超透镜,展示了晶圆级超构表面光学在大规模量产上的潜在优势。

2018年,哈佛大学的SHE A等^[46]在4英寸的熔融石英衬底上制备了透射型超透镜。该超透镜直径达到2 cm,焦距为50 mm。超透镜由600 nm高的a-Si超结构组成,在1 550 nm的近红外光波段的聚焦效率达到了91.8%±4.1%。图7(d)展示了超透镜的工艺流程。600 nm厚的a-Si薄膜通过PECVD沉积在4英寸熔融石英衬底上,然后再旋涂光刻胶与对比度增强材料。随后使用i线步进式光刻机对晶圆进行曝光。光刻步骤完成后,使用ICP工艺制造出a-Si纳米柱,最后去残胶划片之后即得到大量的超透镜器件。右上方的图片显示了所制备的2 cm直径的超透镜照片,以及超透镜中心区域的SEM图片。图7(e)和(f)分别显示了该单个透镜对哈佛大学校徽和USAF分辨力测试图的成像结果,其工作波长在1 550 nm。



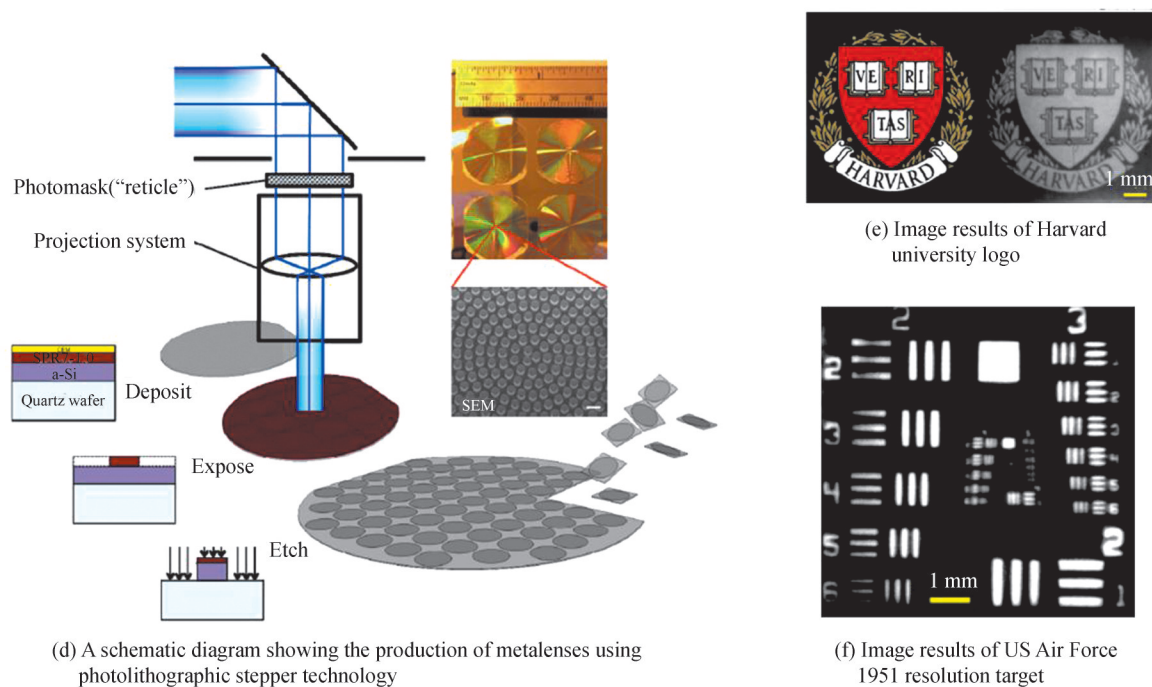
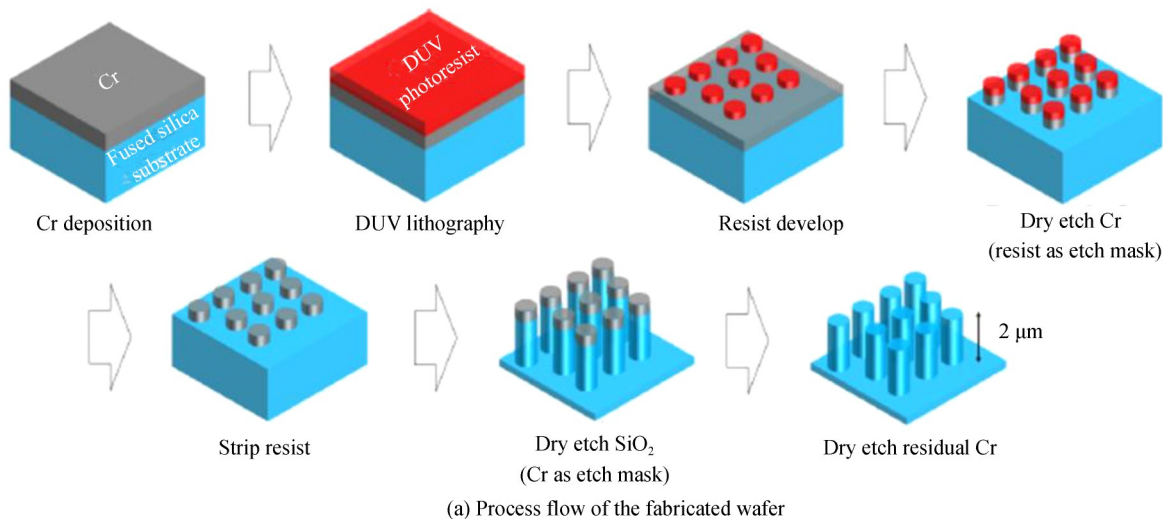


图7 石英玻璃晶圆的反射型^[45]与透射型超透镜^[46]

Fig. 7 Reflective^[45] and transmissive^[46] metalenses fabricated on quartz wafers. Adapted with permission from Refs.[45-46] © The Optical Society

2019年,哈佛大学的PARK JS等^[47]使用了分辨率更高的248 nm KrF深紫外光刻机,在4英寸熔融石英衬底上制备了透射型超透镜。由于248 nm KrF光刻机可制备的超结构尺寸比i线光刻机的更小,因此所制备超透镜可以工作在可见光波段。该超透镜由高为2 μm的SiO₂纳米柱组成,直径为250~600 nm之间。图8(a)展示了制造超构表面透镜的工艺流程。100 nm厚的铬(Cr)首先通过物理气相沉积的方式生长在4英寸熔融石英衬底上,随后使用248 nm KrF光刻机实现微纳结构的图案化。Cr硬掩模和SiO₂纳米柱结构均通过ICP刻蚀的方法实现,不过分别使用了氯基和氟基两种不同的工艺气体。图8(b)显示了SiO₂纳米柱在倾斜角度下的SEM图,从图中可以看出纳米结构的侧壁存在一定的倾斜,这影响了原本设计好的超结构单元的光相位分布,从一定程度上降低了透镜的聚焦效率。图8(c)显示了超透镜的俯视SEM图,插图所示的是在透镜边缘区域的放大SEM图像。一片4英寸的晶圆上可以加工49个1 cm直径的超透镜,这些透镜均可以对可见光形成明显的聚焦效果,如图8(d)所示。该透镜在633 nm波长的聚焦效率为45.6%,未来可以通过使用更加先进的193 nm ArF光刻机来制备更小直径的超结构和提升刻蚀的纳米柱侧壁陡直性两种方法来提高效率。



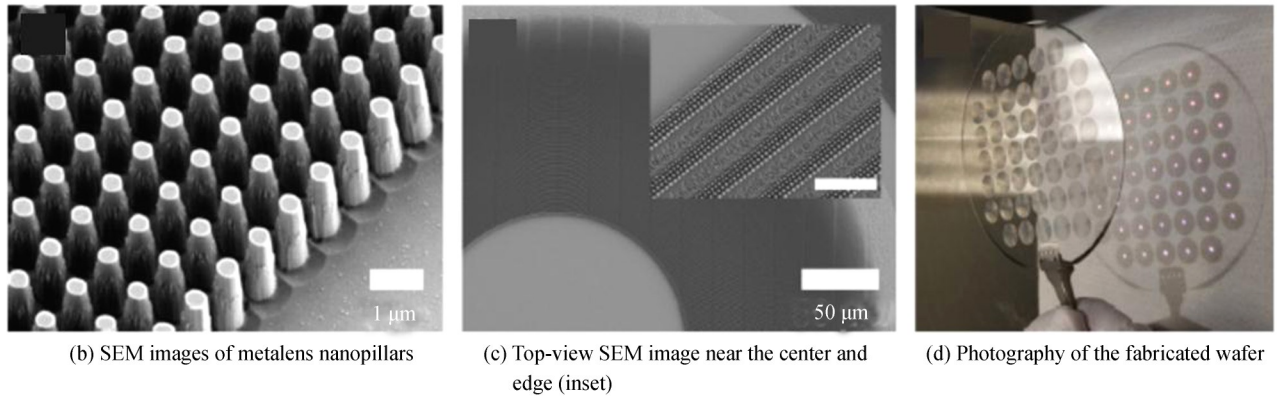
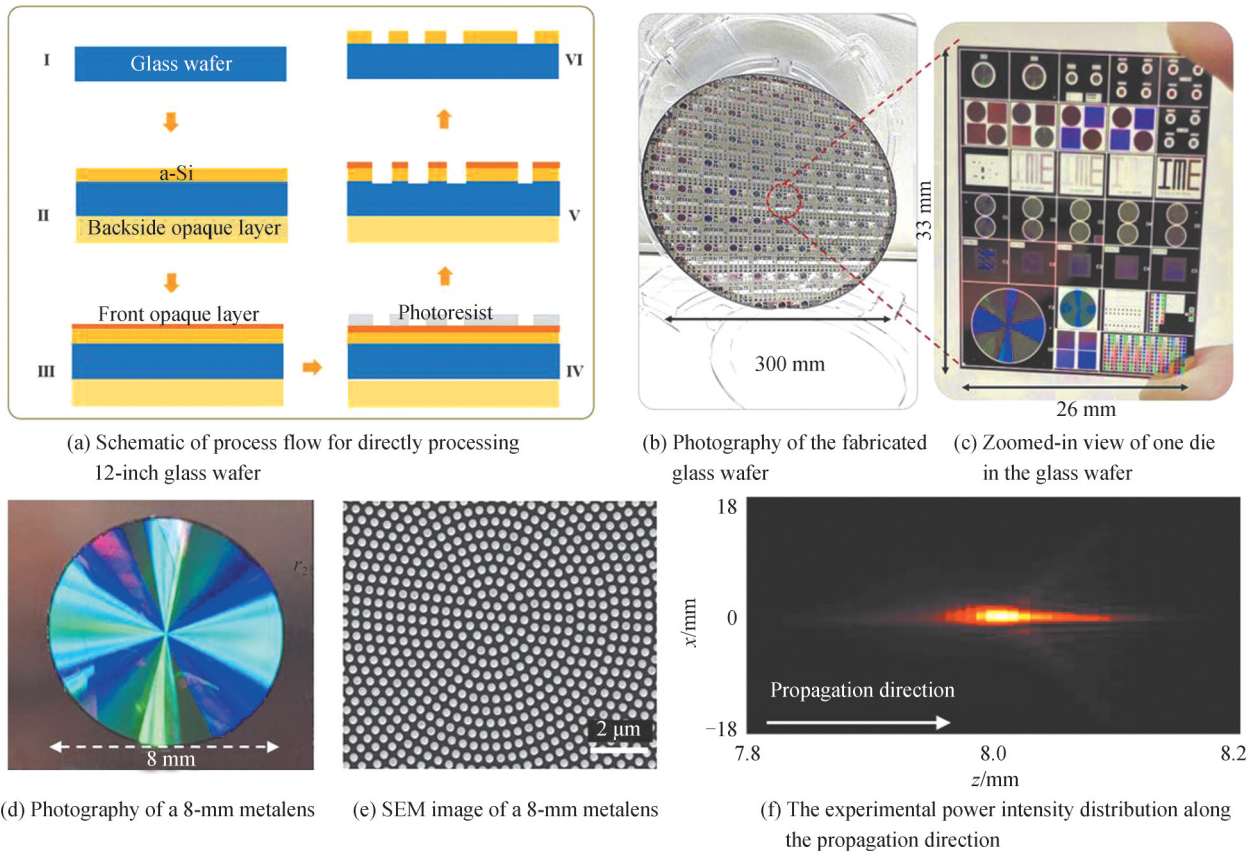
图8 全石英玻璃超构透镜晶圆^[47]

Fig. 8 Transmissive metalenses fabricated in all quartz glass wafers. Adapted with permission from Ref. [47] © 2019 American Chemical Society

在以上3个研究工作中,哈佛大学的研究团队^[45-47]使用了*i*线和248 nm KrF两种紫外光刻技术,晶圆尺寸为4~6英寸。2020年,新加坡微电子研究院的研究团队^[48-49]报道了基于更加先进的193nm ArF浸润式光刻技术在12英寸熔融石英晶圆上制备的超透镜。ZHONG Qize等^[48]报道了直径为8 mm的a-Si超透镜,该透镜工作在940 nm的近红外波段。主要工艺流程如图9(a)所示。晶圆的正面通过PECVD生长400 nm厚的a-Si薄膜,上面再通过物理气相沉积生长一层超薄的挡光层用来辅助光刻机对焦。晶圆背面也生长了一层挡光层。通过193 nm ArF浸润式光刻实现了超构表面结构的图案化,最终经过多次ICP刻蚀以及清洗之后形成了最终的晶圆,如图9(b)所示。图9(c)为12英寸晶圆上一颗晶粒的照片,一个标准晶粒尺寸为(宽)26 mm × (长)33 mm,可以制备数十个不同大小的超构表面光学器件,每一片12英寸晶圆可以加工61个完整的晶粒。图9(d)~(e)分别展示了所制备的8 mm超透镜的光学照片和透镜中心区域的俯视SEM图。该



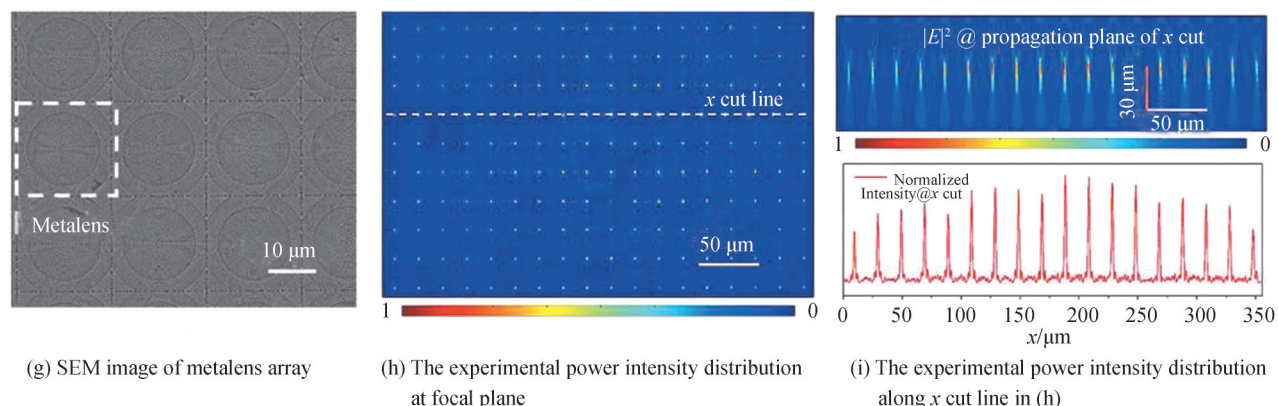


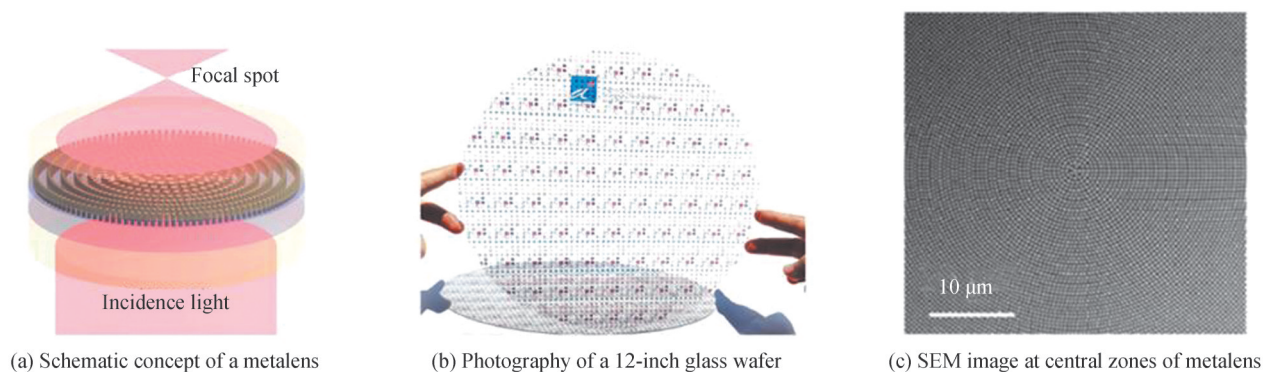
图9 直接在12英寸玻璃晶圆上制造的超透镜^[48-49]
 Fig. 9 Metalenses directly fabricated on a 12-inch glass wafer^[48-49]. Adapted from Refs.[48-49]

超透镜在沿光传输方向的光强分布图验证了其在 940 nm 波段的聚焦功能,如图 9(f)所示。另外,利用同一加工工艺平台, HU Ting 等^[49]开发了可用于三维传感、面部识别和运动检测的点阵列投影机。该器件由 25×25 个相同的 a-Si 超透镜阵列组成。图 9(g)展示了在超透镜阵列焦平面上所测试到的光强分布。图 9(i)展示了沿光传播方向的光场分布,可以看出每个透镜都有基本相等的焦距。沿白色虚线(x-cut line)所得到的归一化之后的光强度曲线图显示在图 9(i)中。

2.2 薄膜转移法超构表面器件

上文总结了多个在玻璃晶圆上直接制造超构表面的研究工作。然而需要注意的是,目前的半导体晶圆代工产业主要还是以 Si、GaAs、InP 等传统的半导体晶圆为主。对于大规模量产而言,玻璃衬底上进行 CMOS 工艺加工的技术和产业链相对不够成熟。为了解决这一问题,新加坡微电子研究院的研究团队开发了一种薄膜转移的方法:将超构表面结构在 Si 晶圆加工制造,然后通过晶圆的临时键合/解键合的工艺将超构表面转移到玻璃晶圆上。转移过程中使用了一种键合胶(glue)来作为超结构的包覆层(cladding),该键合胶的折射率接近 SiO_2 的折射率,且在特定波长范围内吸收率较低。以下介绍几个基于薄膜转移法在 12 英寸 SiO_2 玻璃晶圆上制备的超构表面光学器件。

2020 年, HU Ting 等^[50]通过薄膜转移工艺在 12 英寸玻璃晶圆上制备了工作在 940 nm 的近红外超透镜。超构表面由高为 600 nm、直径为 100~294 nm 的 a-Si 纳米柱阵列组成,其工作原理如图 10(a)所示。加工工艺方面,首先在硅衬底上通过 PECVD、193 nm ArF 浸润式光刻、ICP 干法刻蚀等成熟工艺制备了 a-Si 超构表面结构,然后通过临时键合技术将具有超构表面的硅晶圆与 12 英寸玻璃晶圆进行粘接,最后通过研磨和湿法刻蚀技术将硅基衬底层移除,从而完成了超构表面晶圆的制备。图 10(b)展示了使用这种方法制备的 12 英寸晶圆。图 10(c)和 10(d)是 ICP 刻蚀后不同放大倍数下的超结构 SEM 图。所测试得到的焦平面上的光强度分布如图 10(e)所示,在峰值点沿 x 方向的一维光强分布曲线显示在图 10(f)中。可以看出,测试所得的焦点光强分布曲线与理想的艾里函数相似,通过其半高全宽可以得到聚焦光斑尺寸为 $1.26 \mu\text{m}$ 。最后,作者验证了超透镜在指纹识别领域的潜在应用。图 10(g)和(h)分别展示了单个超透镜成像和超透镜阵列



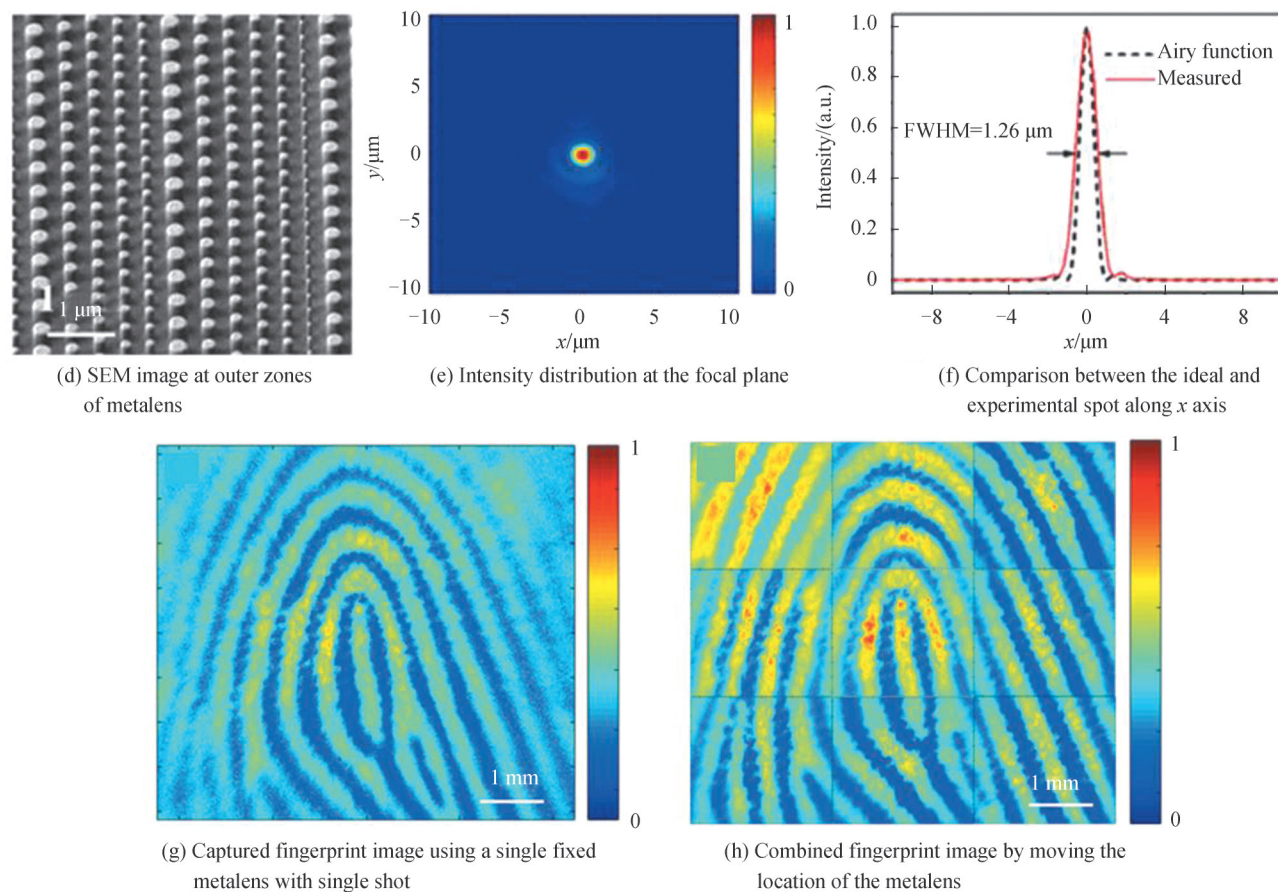
图10 通过薄膜转移技术在12英寸玻璃晶圆上制造超构透镜^[50]

Fig. 10 Metalens fabricated on a 12-inch glass wafer by layer transfer technology^[50]. Adapted from Ref.[50], © 2020 Ting Hu et al., published by De Gruyter. Under the Creative Commons Attribution 4.0 Public License

拼接成像的指纹成像结果。后者具有更加紧凑的成像系统尺寸以及更加清晰的成像效果。

除了成像用的超透镜,薄膜转移方法还被用来制造控制光传播方向的光束偏转器和控制透射波长的彩色滤光片。2019年,LI Nanxi等^[51]报道了工作在940 nm波长的玻璃基超构光束偏转器件,如图11(a)所示。图11(b)展示了该晶圆的工艺流程,该流程与文献[50]中所报道的类似,区别在于a-Si超结构的高度为145 nm。图11(c)和(d)展示了ICP刻蚀工艺后的不同放大倍率下a-Si超构表面SEM图。图11(e)是测试得到的近红外随机散点图,图11(f)将实验结果与仿真结果做了对比,实验中产生的随机点阵列显示出与设计的良好匹配。2020年,XU Zhengji等^[52]利用薄膜转移工艺技术在12英寸玻璃上制备了超构表面减色滤光片(Subtractive Color Filters, SCFs)。光学彩色滤光片在显示、成像、传感、全息、能量采集、测量等领域具有重要的应用。相较于基于染料的传统彩色滤光片,SCFs克服了其在高温和紫外线辐射下的不稳定性,因此受到了极大关注。作者通过利用a-Si纳米柱高度和间距的变化,实现了具有不同显示颜色的SCFs。

表1总结了上文介绍的各项晶圆级超构表面光学研究成果,并对其核心指标进行了对比。从表中可以看出,目前已报道的研究成果覆盖了2、4、6、8、12英寸等常用的晶圆尺寸。光学器件涉及超透镜、半波片、偏振带通滤波器、光束偏转器、完美吸收体等。这些器件工作在可见光、近红外、中红外等光波段。制造这些超构表面光学晶圆的过程中,使用了紫外掩模对准曝光机(UV mask aligner)、i线步进式光刻机、248 nm深紫外光刻机、193 nm浸润式深紫外光刻机等。此外,表中还对比了超结构的材料、包覆层材料、超结构尺寸与高度等。

表 1 晶圆级超构表面光学研究总结^[38-56]
Table 1 Summary on wafer level metasurface based flat optics^[38-56]

Wafer Mat. ^a	Wafer size/inch	Device type	Characterization wavelength	MS Mat.	MS cladding Mat.	MS min. CD/nm	MS height/nm	Lithography tool	Fabrication approach	Ref.
Si	2	Perfect absorbers	Mid-IR (10.0~18.7 μm)	Au	Air	$>1\ 000$	30	UV mask aligner	Direct patterning	[43]
Si	8	Perfect absorbers	Mid-IR (3~10 μm)	Au	Air	$\sim 570^b$	50	I-line stepper	Direct patterning	[44]
Si	12	Color display	Visible (0.4~0.8 μm)	a-Si	Air	65 ^b	130	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[38]
Si	12	Metalens	Near-IR (1.55 μm)	a-Si	Air	100	850	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[42]
Si	12	Polarizing bandpass filter	Near IR (1.1~2.5 μm)	Si	Air	$\sim 170^b$	$\sim 750^b$	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[39]
Si	12	Half-wave plate	Near IR (1.1~2.5 μm)	Si	Air	$\sim 200^b$	$\sim 1\ 700^b$	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[40]
Si or SiO ₂	4	Metalens	Near-IR (1.55 μm) or Visible (0.633 μm)	SiN	Air	500	2 000	I-line stepper	Direct patterning	[41]
SiO ₂ glass	4	Metalens	Near-IR (1.55 μm)	a-Si	Air	830	600	I-line stepper	Direct patterning	[46]
SiO ₂ glass	4	Metalens	Visible (0.633 μm)	SiO ₂	Air	250	2 000	248 nm DUV stepper	Direct patterning	[47]
SiO ₂ glass	6	Metalens	Mid-IR (4.6 μm)	Au	Air	800	50	I-line stepper	Direct patterning	[45]
SiO ₂ glass	12	Subtractive color filter	Visible (0.4~0.8 μm)	a-Si	Glue	130 ^b	400 ^b	193 nm DUV immersion scanner	Layer transfer	[53]
SiO ₂ glass	12	Beam deflector	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Glue	221	125 ^b	193 nm DUV immersion scanner	Layer transfer	[51]
SiO ₂ glass	12	Metalens	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Air	N.A.	400	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[54]
SiO ₂ glass	12	Subtractive color filter	Visible (0.4~0.8 μm)	a-Si	Air	240 ^b	400 ^b	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[55]
SiO ₂ glass	12	Metalens	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Glue	100	600	193 nm DUV immersion scanner	Layer transfer	[50]
SiO ₂ glass	12	Metalens	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Air	100	400	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[48]
SiO ₂ glass	12	Metalens	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Air	N. A.	400	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[49]
SiO ₂ glass	12	Beam deflector	Near-IR (0.94 μm)	a-Si	Air	100	400	193 nm DUV immersion scanner	Direct patterning	[56]
SiO ₂ glass	12	Subtractive color filter	Visible (0.4~0.8 μm)	a-Si	Glue	105 ^b	110, 170, 230 ^b	193 nm DUV immersion scanner	Layer transfer	[52]

a: Abbreviations. MS, Metasurface; Mat., Material; IR, Infrared; DUV, Deep Ultra Violet; N. A., Not Available

b: Obtained from experimental data

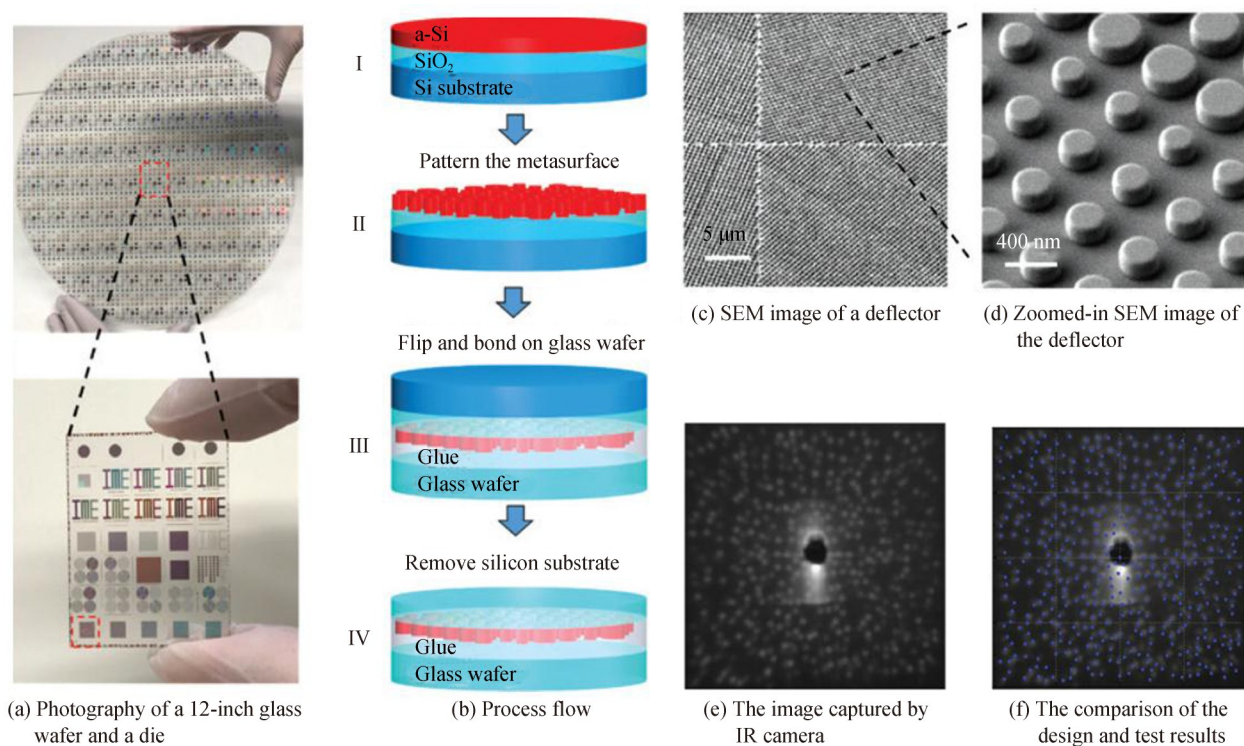


图 11 通过薄膜转移技术在 12 英寸玻璃晶圆上制造超构光束偏转器^[51]

Fig. 11 Metasurface deflector fabricated on a 12-inch glass wafer by layer transfer technology^[51]. Adapted from Ref. [51], © 2020 Nanxi Li et al., published by De Gruyter. Under the Creative Commons Attribution 4.0 Public License

3 总结与展望

本文综述了基于 CMOS 加工工艺平台的晶圆级超构表面光学的研究进展。晶圆级超构表面光学使用紫外光刻、刻蚀、薄膜沉积等芯片加工中标准化的工艺设备,每片晶圆上可同时制备大量的超构表面光学器件。所使用的晶圆材料主要为 Si 和 SiO₂ 玻璃,尺寸从 2 英寸到 12 英寸均有报道。在超构表面结构图案化方面使用了 i 线、248 nm KrF DUV、193 nm ArF 浸润式 DUV 等多个工艺节点的光刻技术。此外,还采用了磁控溅射、电子束蒸发镀膜、等离子体增强化学气相沉积、电感耦合等离子体刻蚀等多个 CMOS 平台兼容的工艺技术。下面将对这一技术领域目前所面临的挑战与未来的发展趋势进行总结。

3.1 所面临的挑战

虽然近些年晶圆级超构表面光学的研究取得了很大的进展,但是对于真正的大规模量产还面临着诸多挑战。其中比较突出的挑战有:

1) 光刻与刻蚀工艺

光刻与刻蚀是超构表面加工中最核心的两个工艺。在光刻方面的挑战有以下两个方面:(1)由于一些器件性能的需要,往往要将超结构设计成非常规的形貌,这样的结构在接近光刻机最小加工尺寸时难以被制备出来;(2)超结构的 CD 变化范围较大,如一个超透镜的纳米柱直径可能是 100~300 nm 之间,如何保证不同尺寸的超构表面结构都同时满足 CD 误差要求也是需要研究的一个问题。一种可行的研究方向是通过光学临近修正 OPC 技术,对不同的超结构进行修正,从而使其形貌和 CD 都能够达到设计要求。

介质型的超构表面光学器件一般由高深宽比的介质超结构组成。这些结构对刻蚀工艺的要求很高,除了高深宽比,一般还要求很高的侧壁陡直性、较高的介质/掩膜刻蚀速率选择比、晶圆中心-边缘均一性,以及晶圆-晶圆刻蚀均一性等。另外,一些器件需要使用诸如 TiO₂ 等较难刻蚀的材料,如何制备这类材料的高深宽比微纳结构还需要更多的研究。

2) 透明晶圆的加工

这里的透明晶圆特指可见光波段透明的晶圆,例如石英玻璃等。可见光波段光学器件在现实生活中应

用最为广泛,市场前景非常广阔。透明晶圆的加工主要面临着以下几个问题:(1)设备不兼容。目前主流的芯片代工厂的工艺设备主要都是为不透明的半导体晶圆(如Si, InP, GaAs等)设计的。在高度自动化的半导体设备中引入透明衬底可能会增大设备报错、碎片的风险。(2)SiO₂玻璃晶圆的热导率较小。例如常用的熔融石英晶圆的热导率在室温下约为1.38 W/mK,比Si晶圆148 W/mK的热导率低2个数量级以上。在等离子体刻蚀过程中,离子轰击和表面化学反应导致玻璃晶圆表面温度相对较高,可能会降低待刻蚀材料与光刻胶之间的刻蚀速率选择比。此外,较小的导热率也可能使得在一些工艺过程中晶圆局部温度分布不均匀,导致较大的工艺偏差。(3)玻璃晶圆一般导电率较低。在大规模量产中,经常要使用SEM对晶圆进行无损的CD测量和缺陷扫描。相比较于常规半导体晶圆,玻璃晶圆的导电率一般都很低。因此当电子束照射在玻璃晶圆表面时多余的电荷不能及时导走,导致玻璃表面形成电荷积累,从而产生一个静电场干扰入射电子束和二次电子的发射,使得图像出现畸变、模糊等现象。

以上几个问题增大了玻璃晶圆上超表面结构的工艺开发难度,降低了晶圆良率。要解决这些问题,需要设计方、设备厂商与晶圆代工厂的三方协作来共同解决这一挑战。除了直接在透明晶圆上加工超构表面,另一种思路是通过薄膜转移的方法将制备好的超构表面转移到透明衬底上。这一工艺过程中需要将玻璃与Si晶圆在升温条件下进行键合。Si在300~500 K温度下的热膨胀系数大约在 $2.6 \times 10^{-6}/K$ 到 $3.6 \times 10^{-6}/K$ 之间,而常用的熔融石英玻璃的热膨胀系数仅为 $0.6 \times 10^{-6}/K$ 左右。这一较大的热膨胀失配会导致工艺过程中晶圆翘曲度增加。因此,薄膜转移工艺需要使用与Si热膨胀系数失配尽可能小的玻璃晶圆。薄膜转移这一方法的光刻和刻蚀工艺可以在Si晶圆上完成,因此其CMOS兼容性更好。但是目前也有以下两个问题需要更加深入的研究:1)薄膜转移过程涉及到晶圆临时键合/解键合、Si衬底的去除等步骤,这些工艺步骤还需要进一步优化来提升最终晶圆的良率;2)薄膜转移过程中使用的键合胶会包覆在超结构外,相应键合胶的稳定性是否能够满足不用应用场景的要求还需要进一步的研究。

3.2 未来发展方向

晶圆级超表面光学在未来还有多个有潜力的研究方向:1)可调超表面。目前所报道的晶圆级超表面光学器件均是静态的,而在空间光调制器、激光雷达等领域需要对超表面进行动态调制。有多种方法可以实现可调超表面:例如在晶圆加工工艺中引入相变材料等新材料,从而可以通过加电来控制超结构的物理性质,最终改变超构表面的光学性能;另一种方法是与微机电系统(Micro Electromechanical System, MEMS)结合,通过MEMS振镜等可移动器件对超构表面的性能进行动态调制。2)与其他光电子器件进行单片集成。通过CMOS工艺可以将超构表面与光电子器件加工在同一晶圆上,从而提升光电子器件的性能。例如可以将超构表面加工在光电二极管上来增加光探测效率,或者可以与垂直表面腔发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL)结合对出射波束进行控制等。3)多层堆叠技术。晶圆加工工艺的一大特点是可以进行多层堆叠,这一技术已经被应用于存储器、图像传感器等领域。将多个超表面进行堆叠,有助于实现超薄、超轻、低成本、高性能的超表面光学系统。此外,还可以通过与其他微电子、光电子等芯片进行堆叠来实现完整的集成光电系统。

参考文献

- [1] CHEN W T, ZHU Y, SANJEEV V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [2] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [3] WANG S, WU P C, SU V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [4] LIN R J, SU V C, WANG S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [5] FAN Z, QIU H, ZHANG H, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-10.
- [6] OU K, YU F, LI G, et al. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadvice[J]. *Science Advances*, 2020, 6(37): eabc0711.
- [7] LI Z, LIN P, HUANG Y W, et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality [J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabe4458.

- [8] BOSCH M, SHCHERBAKOV M R, WON K, et al. Electrically actuated varifocal lens based on liquid-crystal-embedded dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3849-3856.
- [9] WANG R, INTARAVANNE Y, LI S, et al. Metalens for generating a customized vectorial focal curve[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(5): 2081-2087.
- [10] WU P C, TSAI W Y, CHEN W T, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 445-452.
- [11] YU N, AIETA F, GENEVE T P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [12] WU C, ARJU N, KELP G, et al. Spectrally selective chiral silicon metasurfaces based on infrared Fano resonances[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-9.
- [13] SONG Q, KHADIR S, VEZIAN S, et al. Bandwidth-unlimited polarization-maintaining metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabe1112.
- [14] DORRAH A H, RUBIN N A, ZAIDI A, et al. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(4): 287-296.
- [15] ZHENG G, MUEHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [16] HU Y, LUO X, CHEN Y, et al. 3D-Integrated metasurfaces for full-colour holography [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-9.
- [17] REN H, FANG X, JANG J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [18] QU G, YANG W, SONG Q, et al. Reconfigurable meta-hologram for optical encryption[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-5.
- [19] SONG Q, BARONI A, SAWANT R, et al. Ptychography retrieval of fully polarized holograms from geometric-phase metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-8.
- [20] KIM I, ANSARI M A, MEHMOOD M Q, et al. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(50): 2004664.
- [21] LI J, YU P, ZHANG S, et al. Electrically-controlled digital metasurface device for light projection displays[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-7.
- [22] GEORGI P, WEI Q, SAIN B, et al. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography[J]. *Science Advances*, 2021, 7(16): eabf9718.
- [23] KIM I, KIM W S, KIM K, et al. Holographic metasurface gas sensors for instantaneous visual alarms [J]. *Science Advances*, 2021, 7(15): eabe9943.
- [24] KAISSNER R, LI J, LU W, et al. Electrochemically controlled metasurfaces with high-contrast switching at visible frequencies[J]. *Science Advances*, 2021, 7(19): eabd9450.
- [25] KIM I, JANG J, KIM G, et al. Pixelated bifunctional metasurface-driven dynamic vectorial holographic color prints for photonic security platform[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-9.
- [26] LI S, XU X, VEETIL R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [27] XIE Y, NI P, WANG Q, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 125-130.
- [28] MENG C, THRANE P C V, DING F, et al. Dynamic piezoelectric MEMS-based optical metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2021, 7(26): eabg5639.
- [29] JOO W J, KYOUNG J, ESFANDYARPOUR M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10,000 pixels per inch[J]. *Science*, 2020, 370(6515): 459-463.
- [30] SMALLEY J S T, REN X, LEE J Y, et al. Subwavelength pixelated CMOS color sensors based on anti-Hermitian metasurface[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-7.
- [31] YANG W, XIAO S, SONG Q, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-8.
- [32] JANG J, BADLOE T, YANG Y, et al. Spectral modulation through the hybridization of mie-scatterers and quasi-guided mode resonances: Realizing full and gradients of structural color[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 15317-15326.
- [33] HSIAO H H, CHU C H, TSAI D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [34] HE Q, SUN S, XIAO S, et al. High-efficiency metasurfaces: Principles, realizations, and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800415.
- [35] LI N, XU Z, DONG Y, et al. Large-area metasurface on CMOS-compatible fabrication platform: driving flat optics from

- lab to fab[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3071-3087.
- [36] CHEN W T, ZHU Y, CAPASSO F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.
- [37] HU Yueqiang, LI Xin, WANG Xudong, et al. Progress of micro-nano fabrication technologies for optical metasurfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201035.
胡跃强, 李鑫, 王旭东, 等. 光学超构表面的微纳加工技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20201035.
- [38] HU T, TSENG C K, FU Y H, et al. Demonstration of color display metasurfaces via immersion lithography on a 12-inch silicon wafer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19548-19554.
- [39] XU Z, DONG Y, TSENG C K, et al. CMOS-compatible all-Si metasurface polarizing bandpass filters on 12-inch wafers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 26060-26069.
- [40] DONG Y, XU Z, LI N, et al. Si metasurface half-wave plates demonstrated on a 12-inch CMOS platform [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(1): 149-157.
- [41] COLBURN S, ZHAN A, MAJUMDAR A. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 825-831.
- [42] ZHONG Q, LI Y, HU T, et al. 1550nm-Wavelength metalens demonstrated on 12-inch Si CMOS platform[C]. 16th International Conference on Group IV Photonics (GFP), IEEE, 2019: 1-2.
- [43] LIU J, ZHU M, ZHANG N, et al. Wafer-scale metamaterials for polarization-insensitive and dual-band perfect absorption[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(45): 18914-18917.
- [44] NISHIJIMA Y, BALCYTIS A, NAGANUMA S, et al. Kirchhoff's metasurfaces towards efficient photo-thermal energy conversion[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-9.
- [45] ZHANG S, KIM M H, AIETA F, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on metasurface reflectarrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18024-18034.
- [46] SHE A, ZHANG S, SHIAN S, et al. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1573-1585.
- [47] PARK J S, ZHANG S, SHE A, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [48] ZHONG Q, DONG Y, LI N, et al. Large-area metalens directly patterned on a 12-inch glass wafer using immersion lithography for mass production [C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2020: Th2A. 8.
- [49] HU T, ZHONG Q, LI N, et al. A metalens array on a 12-inch glass wafer for optical dot projection[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2020: W4C. 3.
- [50] HU T, ZHONG Q, LI N, et al. CMOS-compatible a-Si metalenses on a 12-inch glass wafer for fingerprint imaging[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 823-830.
- [51] LI N, XU Z, DONG Y, et al. Large-area metasurface on CMOS-compatible fabrication platform: driving flat optics from lab to fab[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3071-3087.
- [52] XU Z, LI N, DONG Y, et al. Metasurface-based subtractive color filter fabricated on a 12-inch glass wafer using a CMOS platform[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(1): 13-20.
- [53] XU Z, DONG Y, FU Y H, et al. Embedded dielectric metasurface based subtractive color filter on a 300mm glass wafer [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Optical Society of America, 2019: STh1O.4.
- [54] FU Y H, LI N, ZHONG Q, et al. Metalens with fixed-gap nanopillars for immersion lithography patterning on 12-inch glass wafer[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Optical Society of America, 2020: SF2R.7.
- [55] XU Z, LI N, DONG Y, et al. CMOS-Compatible Metasurface-based subtractive color filters on a 300-mm glass wafer [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Optical Society of America, 2020: JT u2B.28.
- [56] LI N, FU Y H, DONG Y, et al. Metasurface beam deflector array on a 12-inch glass wafer [C]. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2020: W2A. 9.