



Y3849329



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

大面积硅基超表面透镜关键工艺研究

作者姓名: 王磊

指导教师: 李伟 研究员

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学位类别: 工程硕士

学科专业: 集成电路工程

培养单位: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2021年6月

Y3849329



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

大面积硅基超表面透镜关键工艺研究

作者姓名: 王磊

指导教师: 李伟 研究员

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学位类别: 工程硕士

学科专业: 集成电路工程

培养单位: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2021年6月

The key technology of large area silicon based metalens

A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Engineering
In Integrated Circuit Engineering
By
Wang Lei
Supervisor: Professor Li Wei

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology

Chinese Academy of Sciences

June 2021

中国科学院大学 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：王磊

日期：2021.5.27

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分內容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：王磊

日期：2021.5.27

导师签名：李伟

日期：2021.5.27

摘 要

传统光学系统一般是由分立的块状光学元件组成,通过不同元件的组合,来克服传统的光学误差,这就需要将传统的光学元件按照一定的精度组装到一起,这使得传统光学系统体积大、重量大。遥感卫星是国家的重大需求,在社会经济发展、气象灾害监测、资源测绘应用等方面有巨大的经济价值,遥感卫星在成像过程中,其光学系统是实现高质量遥感成像的关键。遥感卫星目前的光学系统为传统光学系统,其缺点给遥感卫星造成了极大的负担,不利于小型化、轻量化集成。

超表面透镜是一种微纳结构的光学元件,是人为设计的微纳尺寸结构,按照一定方式排布得到的功能结构,能够实现传统光学系统的功能。超表面透镜具有重量轻、设计自由度高、结构灵活的特点,其紧凑的结构,能够很好的实现器件集成,克服传统光学系统的缺点。因此,超表面透镜有望突破尺寸的限制,成为下一代光学器件。

对于遥感卫星等大型设备,其光学系统为传统的大型光学系统,为了代替这种大型光学系统,我们需要进行大面积超表面透镜的制作。受当前工艺限制,超表面透镜面积无法做大。当前大面积超表面透镜最大直径为 2cm,同时存在制作效率低,无法大规模生产等问题,无法满足大型设备光学系统的需求。本文对当前工艺现状进行分析,创新性的提出了大面积超表面透镜关键工艺的研究,主要方案如下:

1.在 4.35 μm 工作波长下,设计了硅基大面积超表面透镜,采用了新型版图压缩算法,较当前压缩算法更加简单,该方法将版图压缩了 42 倍并成功实现制版。

2.在工艺方案上,采用光刻拼接的方式,制作了直径 4cm 的大面积超表面透镜,打破了当前超表面透镜最大直径 2cm 限制,该工艺方法可以拓展到更大面积超表面透镜的制作。

3.在硅基衬底上,成功实现了大面积特殊结构超表面透镜的工艺方法,将套刻标记误差限制在 0.5 μm 内,成功制作了偏移误差 1.304 μm 的大面积超表面透镜,并提出偏移误差准确的测量方案,解决了偏移误差大且无法测量问题。

关键词：小型化，轻量化，大面积，超表面透镜，特殊结构超表面透镜

Abstract

Traditional optical system is generally composed of discrete block optical elements. By combining different components, the traditional optical errors can be overcome. Therefore, it is necessary to assemble these traditional optical elements together in accordance with certain precision, which makes the traditional optical system large in volume and heavy. Remote sensing satellite is a major national demand, which has great economic value in social and economic development, meteorological disaster monitoring, resource mapping applications, etc. In the imaging process of remote sensing satellite, the optical system is the key to achieve high quality remote sensing imaging. Its shortcoming causes great burden to the remote sensing satellite, which is not favorable for miniaturization and lightweight integration.

Metalens is a kind of micro-nano structure optical element, which is a functional structure of the artificial design of micro-nano size structure arranged in a certain way, which can realize the function of the traditional optical system. Metalens has the characteristics of light weight, high design freedom and flexible structure. Its compact structure can realize device integration well and overcome the shortcomings of traditional optical system. Therefore, metalens is expected to break through the limit of size and become the next generation of optical devices.

For large equipment such as remote sensing satellite, its optical system is the traditional large optical system. In order to replace this large optical system, we need to make large-area metalens. Due to the current technological limitations, the area of the metalens cannot be enlarged. The maximum diameter of the current large-area metalens is 2cm. At the same time, there are problems such as low production efficiency and inability to mass produce, which cannot meet the needs of the optical system of large equipment. In this paper, the current status of the process is analyzed and studied, and the key technologies of large-area metalens are innovatively proposed. The main schemes are as follows:

1. Under the operating wavelength of $4.35\mu\text{m}$, a silicon based large-area metalens is designed, and a new layout compression algorithm is adopted, which is simpler than the current compression algorithm. The method compacts the layout by 42 times and successfully realizes mask-making.

2. In the process scheme, a large area of metalens with a diameter of 4cm was made by splicing lithography, which broke the current limit of the maximum diameter of metalens with a diameter of 2cm. This process method can be extended to the production of metalens with a larger area.

3. On silicon substrate, the process method of large-area special metalens is successfully realized, and the error of alignment is limited to $0.5\mu\text{m}$, and the large-area special metalens with alignment error of $1.304\mu\text{m}$ is successfully manufactured. The accurate measurement scheme of deviation error is proposed, which solves the problem of large deviation error and immeasurability.

Key Words: Miniaturized, Lightweight, Large area, Metalens, Special metalens

目 录	
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 大面积超表面透镜的研究背景.....	1
1.3 国内外大面积超表面透镜的研究现状.....	2
1.4 论文的研究目标.....	8
1.5 论文的研究内容及章节安排.....	8
第 2 章 大面积超表面透镜的理论设计与工艺方法.....	11
2.1 引言	11
2.2 大面积超表面透镜基本理论设计.....	11
2.3 大面积超表面透镜工艺方法.....	15
2.4 本章小结.....	22
第 3 章 硅基大面积超表面透镜的设计与关键工艺研究.....	23
3.1 引言	23
3.2 硅基大面积超表面透镜的光学设计和仿真.....	23
3.2.1 硅基大面积超表面透镜设计目标.....	23
3.2.2 硅基大面积超表面透镜结构单元仿真.....	23
3.2.3 硅基大面积超表面透镜仿真.....	27
3.3 大面积超表面透镜版图压缩研究.....	31
3.3.1 大面积超表面透镜版图问题.....	31
3.3.2 大面积超表面透镜版图压缩方法.....	32
3.3.3 大面积超表面透镜版图压缩效果.....	33
3.4 硅基大面积超表面透镜关键工艺方法研究.....	33
3.4.1 硅基大面积超表面透镜工艺流程.....	33
3.4.2 硅基大面积超表面透镜线宽实验.....	37
3.4.3 硅基大面积超表面透镜刻蚀实验.....	37
3.4.4 硅基大面积超表面透镜光刻拼接工艺.....	39
3.5 硅基大面积超表面透镜的表征.....	40
3.5.1 硅基大面积超表面透镜直径测量.....	40
3.5.2 拼接偏移误差计算.....	40

3.5.3 硅基大面积超表面透镜聚焦测试.....	42
3.6 本章小结.....	43
第4章 大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法研究.....	45
4.1 引言.....	45
4.2 大面积双面超表面透镜的工艺方法.....	45
4.2.1 双面超表面透镜工艺流程.....	45
4.2.2 大面积双面定标设计.....	47
4.2.3 大面积双面超表面透镜样品筛选.....	49
4.3 大面积双面超表面透镜的测量方法.....	51
4.3.1 大面积双面超表面透镜偏移误差测量方案.....	52
4.3.2 大面积双面超表面透镜表征.....	53
4.3.3 大面积双面偏移误差计算.....	55
4.4 本章小结.....	55
第5章 结论与展望.....	57
5.1 论文主要内容.....	57
5.2 研究工作展望.....	58
参考文献.....	59
致 谢.....	65
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	67

图目录

图 1.1 直径 0.4mm 超表面透镜 (a) 放大图 (b) 外观图 (c) 扫描电镜下线宽图 (d) 扫描电镜下柱高图.....	3
图 1.2 直径 2cm 超表面透镜光刻流程及测试图.....	4
图 1.3 单元库及核心算法示意图.....	5
图 1.4 边长 1cm 超表面透镜及其 SEM 图.....	5
图 1.5 反应离子刻蚀和升华下大面积超表面透镜图片.....	7
图 2.1 (a) 金属 V 型天线的构型和波前 (b) 修正的斯涅耳折射定律示意图.....	11
图 2.2 偏振不敏感的超表面透镜示意图.....	12
图 2.3 偏振敏感的超表面透镜示意图.....	13
图 2.4 双面超表面透镜示意图.....	14
图 2.5 电子束曝光工艺方法示意图.....	15
图 2.6 拟合公式校正版图.....	16
图 2.7 补偿后超表面透镜线宽测量图.....	17
图 2.8 NIKON-I12 步进光刻机.....	17
图 2.9 纳米压印技术超表面透镜工艺.....	18
图 2.10 Nanoscribe 双光子激光直写系统.....	19
图 2.11 中红外波段螺旋面阵列圆偏振手性超表面透镜三维表征图.....	20
图 2.12 硅片拼接技术示意图.....	21
图 2.13 硅片拼接时存在的误差.....	21
图 3.1 超表面透镜结构单元仿真图.....	24
图 3.2 参数筛选前 (a) 相位与半径关系 (b) 透射率与相位关系图.....	27
图 3.3 参数筛选后 (a) 相位与半径关系 (b) 透射率与相位关系图.....	27
图 3.4 超表面透镜结构划分方式示意图.....	28
图 3.5 直径 60 μm 超表面透镜结构图.....	28
图 3.6 直径 60 μm 超表面透镜仿真建模图.....	29
图 3.7 直径 60 μm 超表面透镜仿真结果 (a) 透射率 (b) 聚焦情况 (c) 半高宽.....	30
图 3.8 版图压缩算法示意图.....	32
图 3.9 直径 4cm 超表面透镜 (a) 四分之一圆版图 (b) 局部放大图 (c)	

压缩算法后版图文件大小.....	33
图 3.10 直径 4cm 大面积超表面透镜工艺流程.....	34
图 3.11 实验用涂胶机设备.....	34
图 3.12 NIKON-I12 光刻机设备.....	35
图 3.13 实验用去胶机设备.....	35
图 3.14 实验用电子束蒸发设备.....	36
图 3.15 深硅刻蚀设备 ICP380.....	37
图 3.16 刻蚀后扫描电镜测量图.....	38
图 3.17 刻蚀后硅纳米柱俯视图.....	38
图 3.18 光刻拼接工艺示意图.....	39
图 3.19 光刻机曝光区块设定图.....	39
图 3.20 直径 4cm 大面积超表面透镜测量图.....	40
图 3.21 完整拼接后版图示意图.....	41
图 3.22 下方区块拼接误差测量图.....	42
图 3.23 焦距位置 (a) 焦斑 (b) 半高宽.....	43
图 4.1 双面大面积超表面透镜工艺流程.....	45
图 4.2 双面光刻使用设备.....	46
图 4.3 背套标记(a)正面背套(b)反面背套(c)背套重合标记效果图.....	48
图 4.4 正反面版图标记重合示意图.....	48
图 4.5 放大的游标示意图.....	49
图 4.6 红外摄像分析仪设备图.....	50
图 4.7 红外摄像分析仪下背套标记(a)左标(b)右标(c)补充标记.....	51
图 4.8 红外摄像分析仪下套刻标记 (a) 对准 (b) 未对准图标.....	51
图 4.9 正方形标记与直径 5mm 超表面透镜关系示意图.....	52
图 4.10 直径 5mm 大面积双面超表面透镜正面 (a) (b) (c) 反面 (d) (e) (f) 外观测试图.....	53
图 4.11 正面图案到(a)上边(b)下边(c)左边(d)右边长的距离.....	54
图 4.12 反面图案到(a)上边(b)下边(c)左边(d)右边长的距离.....	54

表目录

表 1.1	METAC 算法压缩前后设计文件大小对比表.....	4
表 3.1	不同直径下未压缩版图文件大小.....	32
表 3.2	拼接误差测量及计算结果记录表(微米).....	42

第1章 绪论

1.1 引言

光是一种重要的自然现象,人体能够通过眼睛看到外面丰富多彩的客观世界,离不开光的作用。眼睛是人类的重要感官,人类90%的信息获取,是通过眼睛完成的,因此光对于人类的重要性不言而喻。光学发展至今,已经进入现代光学时期。在这个新的时期,光学的应用层出不穷,小到相机、可穿戴设备,大到望远镜、遥感卫星,光学几乎无处不在,随着应用的增加,传统光学系统面临着巨大的挑战。

一般来说,传统光学系统主要由分立的块状光学元件,如透镜、光栅、滤光片等组合而成,光学元件的加工需用经过切割、抛光和研磨。为了克服传统的光学误差,如像差、色差,需要将这些分立元件以一定的校准精度组装到一起,这阻碍了传统光学系统的小型化、轻量化。随着手机、便携式电子设备、医疗设备的持续发展,对高表现和轻量化的微型光学系统的需求快速增加,人们也开始了对新型的光学系统的探索^[1-4]。

得益于微纳加工工艺以及半导体工艺的快速发展,加工设备的进步,微纳结构光学的发展为突破上述瓶颈打开了新的窗口。微纳结构是微米或者纳米量级的具有一定顺序的功能结构,包括但不限于光栅、波带片、光子筛、超表面等。微纳结构光学元件具有体积小、易于集成、重量小等特点。其中,微纳结构的超表面,由于其特殊的电磁特性和优异的界面操控能力,引起了学术界的关注。

所谓超表面,普渡大学 V. M. Shalaev 教授给出了广义的超表面的定义^[2],即超表面是亚波长的厚度小的薄层结构;哈佛大学 F. Capasso 教授也给出了狭义的超表面的定义^[3-4],超表面是由特征尺寸为亚波长的(金属或介质的)光学散射结构在界面上构成的二维阵列,最主要的功能是改变入射光相位,从而根据散射结构在界面上的空间分布相应地调制光束波前。超表面的这种灵活的相位调控特性,在光学领域展现出显著优势^[5-29]。

1.2 大面积超表面透镜的研究背景

遥感卫星是国家的重大需求。一方面，遥感卫星在国家的社会经济发展中发挥着显著作用；另一方面，遥感卫星在国家的国防安全领域中扮演着重要角色，广泛应用于军事侦察、导弹预警、武器制导和军事测绘。

遥感卫星搭载的光学系统是实现高质量遥感成像的关键。轻量化、广域性、多光谱的遥感卫星光学系统是国际前沿科技竞争的热点，各国也纷纷投入研发，预占领该领域制高点。自主掌控该项技术关系到国计民生和国防安全，是我国当前的迫切需求。轻量化是指光学系统的体积小、重量轻，对火箭和卫星载荷负担小；广域性是指监测范围广，能够支持广角成像；多光谱是指工作频段宽，能够同时对不同波段的入射光响应。

当前遥感卫星光学系统中广泛采用两类方案，均是基于传统的反射式或折射式光学镜片。一类是反射式镜片组，采用多组对不同波段响应的半反半透镜，以满足多光谱性能，但对于解决广域性问题无能为力。此外，多组半反半透镜会带来严重的能量损耗问题，无法满足高透射率光学系统的需要，而透过率是衡量光学系统优劣的主要指标，它直接影响图像的信噪比。另一类方案是折射式（也称为透射式）镜片组，具备广域性性能，但面对多光谱问题时束手无策。此外，这两类方案的共性问题在于为了优化成像质量，同时满足光学系统的视场、像差等条件，采用了多个镜片构成的复杂镜片组，具有体积大、重量大的显著缺点。上述问题的存在使得当前遥感卫星光学系统的发展面临瓶颈。而超表面透镜作为小型化、轻量化的新型光学系统，成为解决遥感卫星光学系统体积大、重量大的可行性方案。

由于遥感卫星光学系统所需镜片面积大，因此对于超表面透镜的面积，也提出了新的要求。目前超表面透镜的加工，受制程能力的限制，仅局限于小面积制作，采用当前先进微纳加工工艺实现大面积超表面透镜，人力、时间、经济等成本十分昂贵。如何实现高效率、低成本地制作大面积超表面透镜是一个很好的研究方向。本文以遥感卫星光学系统为背景，为实现其光学系统小型化、轻量化，满足其光学系统大面积需求，对大面积硅基超表面透镜工艺进行研究。

1.3 国内外大面积超表面透镜的研究现状

超表面透镜在近几年发展成为研究的一个热点，对超表面透镜的研究方向也不尽相同，本节将从超表面透镜研究中的器件面积出发，有代表性地概述近几年

国内外大面积超表面透镜的研究进展。

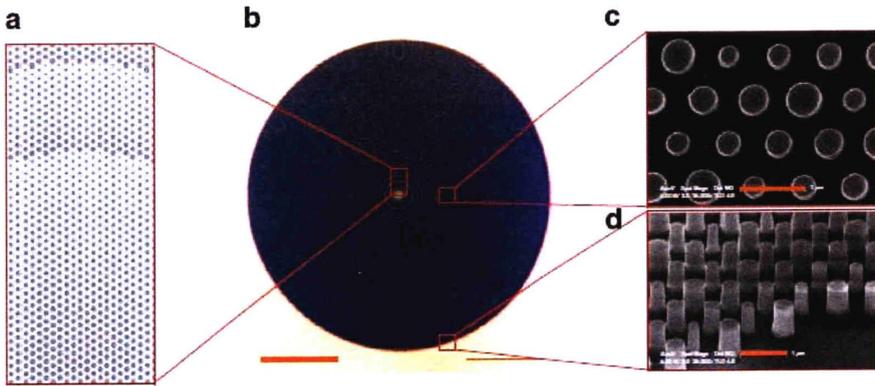


图 1.1 直径 0.4mm 超表面透镜 (a) 放大图 (b) 外观图 (c) 扫描电镜下线宽图 (d) 扫描电镜下柱高图^[4]

Figure 1.1 Metalens with a diameter of 0.4mm (a) Enlarged view (b) Appearance view (c) Line width view of SEM (d) Column height view of SEM^[4]

2014 年，加州理工学院的 Amir Arbabi 等^[4]在二氧化硅片上沉积了一层 940nm 的多晶硅，采用电子束曝光的方式进行光刻，并在显影后使用氧化铝作为刻蚀硬掩模，加工了直径 0.4mm 的超表面透镜。图 1.1 中 b 图为直径 0.4mm 超表面透镜外观图，图 1.1 中 c 图为刻蚀后线宽呈渐变的周期结构，图 1.1 中 d 图为刻蚀后侧面柱高侧壁图，图 c 与图 d 比较可以看出刻蚀最大深宽比接近 3:1，刻蚀难度相对较低。

超表面透镜早期采用电子束曝光的方式进行光刻工艺，这种方式优点为线宽误差小，但是采用电子束曝光的方式进行光刻，图形需要逐个书写，工作时间长，成本高，这严重阻碍了在大面积超表面透镜中的应用，单独采用电子束曝光的方式进行大面积超表面透镜的制作并不可取，因此，采用合适的方式实现大面积超表面透镜的制作，仍然是一个亟待解决的问题^[30-31]。

2018 年哈佛大学 Federico Capasso 带领团队^[32]在 4 英寸二氧化硅片上，通过光刻的方式，制作了直径 2cm 的大面积超表面透镜，通过步进式光刻，将图形铺满整个 4 英寸片，成功实现了大面积超表面透镜的低成本、大量生产。图 1.2 为通过步进式光刻机，进行大面积超表面透镜的光刻工艺，该工艺通过对 4 英寸片切割分片，获得一定数量的大面积超表面透镜。

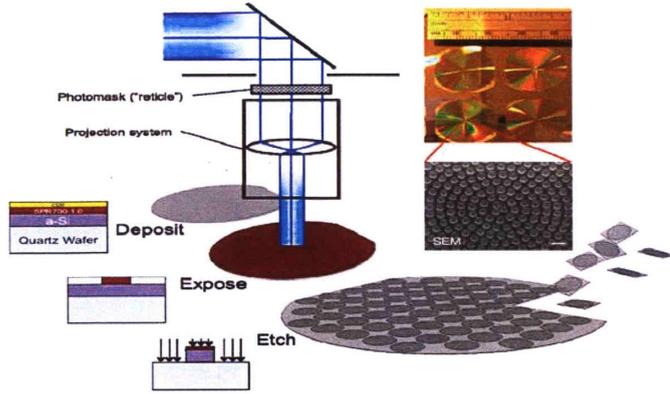


图 1.2 直径 2cm 超表面透镜光刻流程及测试图^[32]

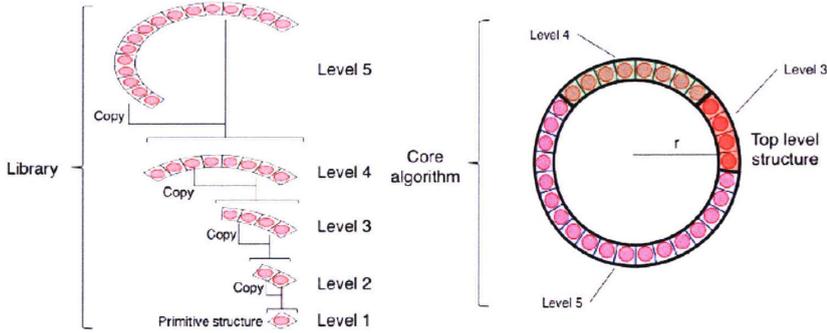
Figure 1.2 Photolithography of a 2cm diameter metasurface lens and test diagram^[32]

表 1.1 算法压缩前后设计文件大小对比表^[32]

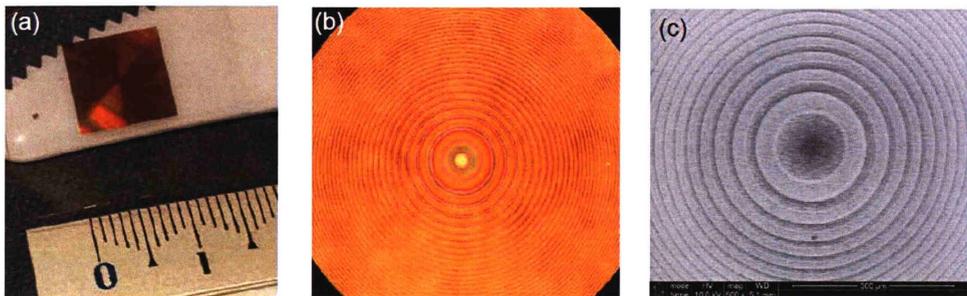
Table 1.1 Algorithm before and after compression design file size comparison table^[32]

Device diameter	Meta-element count	Uncompressed file size(B=Byte)	METAC file size
10 μm	150	19.8 kB	9.1 kB
50 μm	3,614	157.9 kB	44.5 kB
100 μm	14,068	501.4 kB	94.1 kB
500 μm	1,053,822	30.3 MB	972.1 kB
1 mm	3,204,089	91.2 MB	1.9 MB
5 mm	73,194,422	2.2 GB	11.0 MB
10 mm	291,697,949	8.8 GB	23.3 MB
50 mm	6,853,721,364	205.7 GB	131.1 MB

通过步进式光刻，进行大面积超表面透镜制作，前提是需要对图形版图进行制版，表 1.1 记录了超表面透镜版图中，超表面结构单元数量及版图内存大小之间的关系，直径 10mm 的超表面透镜版图中大约包含 2.9 亿个结构单元，内存大小达 8.8G，而在掩模版制作过程中，8.8G 版图需要转化为制版标准格式，这个转化会更加增大版图大小，为制版带来困难。随着直径增加到 50mm，超表面结构单元数量高达 6.8 亿个，内存大小高达 205.7G，这不仅仅为制版带来了难度，同时也增加了计算机读取的难度^[32-36]。

图 1.3 单元库及核心算法示意图^[32]Figure 1.3 The library and core algorithm of METAC^[32]

Federico Capasso 团队为解决这个问题，从版图内存出发，提出了能够优化版图内存大小的压缩算法“METAC(METAsurface Compression)”。该算法在分布文件中使用了大量的层次化结构单元，来复制中心光轴上的超表面结构单元，利用旋转对称性很好地减少了沿径向定义的超表面结构单元的数量。图 1.3 中以超表面透镜某一径向为例，首先生成了自参考的结构库单元，然后再在上层结构单元中引用自参考库。比如在库中，库的 level 1 是由基本超表面结构单元生成，在相同径向位置经过适当的方位角偏移引用两个 level 1 的副本，生成 level 2，同样在相同径向位置经过适当的方位角偏移引用两个 level 2 的副本，生成 level 3，以此类推，建立了整个库单元，在顶层文件中，通过 Core algorithm 进行顶层引用，这样库中的每个唯一元素最多引用了一次。在表 1.1 中，通过 METAC 压缩的版图内存大小有明显改善，直径 10mm 的版图压缩后只有 23.3MB，而直径 50mm 的版图压缩后只有 131.1MB，成功解决了大面积超表面透镜制版问题。

图 1.4 边长 1cm 超表面透镜及其 SEM 图^[30]Figure 1.4 1cm side length metalens and its SEM image^[30]

Federico Capasso 团队提出的步进式光刻的方式，不仅成功实现了大面积超表面透镜的制作，同时针对大面积版图内存问题，提出了有效的解决方案，该研究也是目前国内外记载中，最大面积的超表面透镜。

2019 年，Mitchell Kenney 及其团队^[30]采用电子束曝光的形式，制作了大面积超表面透镜，图 1.4 中图 a 为制作的超表面透镜测量示意图，超表面透镜边长达 1cm，超表面结构单元为硅纳米柱阵列，直径变化范围从 70nm 到 360nm，图 b、图 c 为其显微镜下测试图及 SEM 下测试图，硅柱高度 700nm。在边长 1cm 的超表面透镜制作过程中，对于版图 Mitchell Kenney 团队也面临了同样的问题。首先边长 1mm 版图大小接近 30MB，而边长 10mm 版图面积是边长 1mm 的 100 倍，换算后表明，边长 10mm 的版图大小接近 30GB，大面积版图一般采用脚本的方式生成，Python 脚本自动生成该版图需要 2.5-3 天，同样大小的版图，对于电子束曝光电脑软件工具来说也是一个挑战。为了解决这个问题，通过修改 Python 代码，将 10mm×10mm 的区域切割成 100 个 1mm×1mm 的区域，并将允许访问的数据限制在<500MB 的分区内，所采用的 VB6 电子束曝光工具能够利用其两个 500MB 的内存同时处理两组数据，这样解决了在读数据和写数据模式时的瓶颈问题。使用这种方法，电子束曝光工作了接近 15 小时，完成了边长 1cm 的超表面透镜的光刻。

显然 15 小时的工作时间无法满足超表面透镜的大规模量产。Mitchell Kenney 团队针对这个问题，从几个方面提出了可行性解决方案。第一个方面，由于正方形镜头边角部分多余的空间没有使用，将正方形超表面透镜更改为圆形超表面透镜，移除多余部分节省了 21%的面积，这种情况下电子束曝光时间缩小了约 3 小时。第二个方面，采用一个近似有限的边缘粒度的圆形纳米柱，使用较大的电子束步长和较少的光滑顶点组成圆形纳米柱，这大大减少了电子束的停留时间。采用此方法制作直径 10mm 的超表面透镜，预计节省 50%的光刻时间，花费大约 7 小时完成。这种优化的潜力可以让我们大胆的预测，制作直径 20mm 的超表面透镜只需要 28 个小时，这为制作大面积超表面透镜提供了一种可行性的方法。

Mitchell Kenney 团队采用电子束曝光的方式制作了边长 1cm 的超表面透镜，是当前文献记载采用电子束曝光方式制作的面积最大的超表面透镜，其提出的直径 2cm 的方案，也是一种十分有效的大面积超表面透镜的制作方法，但是如果需求面积再增大或者需要大规模量产，电子束曝光的表现依然不如步进式光刻，

这也是电子束曝光存在的最大问题。

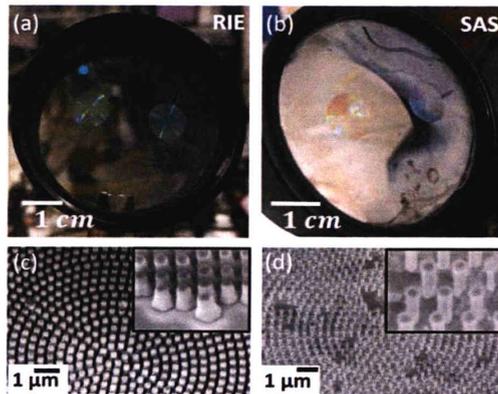


图 1.5 反应离子刻蚀和升华下大面积超表面透镜图片^[37]

Figure 1.5 Large area metalens images under RIE and SAS^[37]

2019 年, Patrice Genevet 及其团队^[37-52]在传统光刻之外采用了新的方式, 即在蓝宝石衬底上沉积一层氮化镓, 通过纳米压印的方式, 在蓝宝石衬底上成功制备出直径 10mm 大面积超表面透镜, 并提出了新的刻蚀方式。图 1.5 中, 图 (a) 为通过反应离子刻蚀 (RIE) 后的大面积超表面透镜, 图 (c) 为其在冷场扫描电镜 (SEM) 的图片, 通过 RIE 的大面积超表面透镜结构单元垂直性差, 呈山峰状; 图 (b) 为通过选择性区域升华 (SAS) 后的大面积超表面透镜, 图 (d) 为其在冷场扫描电镜 (SEM) 下的图片, 通过 SAS 的大面积超表面透镜结构单元垂直性好, 侧壁角度陡直, 但是超表面透镜结构单元有丢失现象。

Patrice Genevet 及其团队所制作的大面积超表面透镜, 虽然直径只有 10mm, 但是其采取的纳米压印的工艺方式, 成功代替了光刻工艺, 为大面积超表面透镜的制作提供了一种新的可能。

综上所述, 当前, 对于大面积超表面透镜的制作的研究取得了一定的进展, 但是也存在一些需要解决的问题: 第一点, 大面积超表面透镜超表面结构单元数量数以亿计, 需要采用脚本生成, 生成时间长, 特大面积版图生成后, 计算机无法打开或处理; 第二点, 大面积超表面透镜的版图大小高达几十甚至几百千兆, 制版设备或电子束曝光软件工具无法进行处理; 第三点, 电子束曝光精度准确, 但是时间成本高, 即便优化后效果, 也无法满足大规模生产需求; 第四点, 新兴的图形转移方式, 如纳米压印, 使用前首先需要对模具 (印章) 进行制作, 印章

往往和所需图形相反，数量相等，印章制作的难度和直接制作大面积超表面透镜相当，并且采用纳米压印制作的超表面透镜，其超表面结构单元形状不如传统方式更加标准。

1.4 论文的研究目标

本文的研究目标是在先前研究的基础上，采用了新的工艺方式及简易的版图优化方式，更加简单、高效、低成本的实现大面积超表面透镜的制作，最终制作的大面积超表面透镜尺寸大于当前国际最大尺寸直径 2cm，达到直径 4cm。同时，为了解决像差、色差问题，满足特殊结构大面积超表面透镜制作的需求，创造性的提出了大面积双面超表面透镜精确对准误差的工艺方式，以及可靠的对准误差测量方式，为大面积超表面透镜的各种工艺需求积累了宝贵经验。

1.5 论文的研究内容及章节安排

本文研究内容主要分为两个部分，第一部分为大面积超表面透镜的设计与工艺研究；第二部分为大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法研究。

本文以上述两个研究内容为核心，将论文划分为五个章节，分别为绪论、大面积超表面透镜的理论与工艺方法、硅基大面积超表面透镜的设计与关键工艺研究、大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法研究、总结与展望，五部分进行论述，各个章节的主要内容安排如下：

第一章主要介绍了光学的发展概况，先就光学发展的时期、现代光学的发展与应用、现代光学的瓶颈、微纳加工及超表面的替代作用进行了详细论述。接着介绍了大面积超表面透镜的研究背景，以遥感卫星光学系统为背景，介绍了大面积超表面的实际需求。紧接着介绍了国内外大面积超表面的研究现状，交代了目前最大面积超表面透镜的工艺能力以及瓶颈，就现有研究的不足进行了总结。然后，明确了本论文的研究目标。最后，对论文研究内容及章节安排进行了有序的介绍。

第二章主要介绍了本论文研究过程中，超表面透镜设计相关的基本理论，同时对当前大面积超表面透镜所使用的工艺方法及其优缺点进行了详细介绍，现有工艺方法包括：电子束曝光、光刻、纳米压印、3D 打印、硅片拼接。

第三章主要介绍了硅基大面积超表面透镜的设计与关键工艺的研究。首先

从设计出发，获得满足设计需求的结构单元参数。其次，找到结构单元位置与相位之间的对应关系，通过版图压缩算法的方式，生成满足光刻制版要求的版图。再次，通过新的工艺方式，完成直径 4cm 大面积超表面透镜的制作。最后通过对大面积超表面透镜的表征，确定新工艺方式的有效性，并对新的工艺方式进行分析与总结。

第四章主要介绍了大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法。首先从色差、像差等需求出发，介绍了双面超表面透镜的作用。其次，创造性的提出了大面积双面超表面透镜的工艺方法，完成了大面积双面超表面透镜的制作。最后，通过对大面积双面超表面透镜工艺方案的设计，创造性的提出了一种准确测量双面对准误差的方法，并对此方法进行了论证与总结。

第五章总结了本文的工作内容，介绍了本文的创新点，结合当前研究，对未来大面积超表面透镜的工艺实现进行了展望。

第 2 章 大面积超表面透镜的理论设计与工艺方法

2.1 引言

上一章主要介绍了大面积超表面透镜的发展,着重介绍了国内外大面积超表面透镜的发展现状,本章内容将详细的介绍超表面透镜设计相关的基本理论,以及当前大面积超表面透镜制作的工艺方法。

2.2 大面积超表面透镜基本理论设计

相位累积是光传播过程中传统光学元件形成光束的主要理论,而超表面在理论上的突破出现在 2011 年,哈佛大学 F. Capasso 教授的课题组^[28]在 Science 上发表了基于超表面的光线传播调控原理。通过引入波长尺度上的突变相位,获得了新的自由度。具有空间相位变化响应和亚波长分离的二维光学谐振腔阵列,可以在光传播穿过两种介质界面时,实现这种相位不连续。相位不连续为光束的设计提供了很大的灵活性,如图 2.1 中图 (a) 所示,不同开口的 V 形金属天线按照一定角度分布在表面,能够实现偏折角度任意的改变,从而提出了一种修正的斯涅耳折射定律和反射定律。

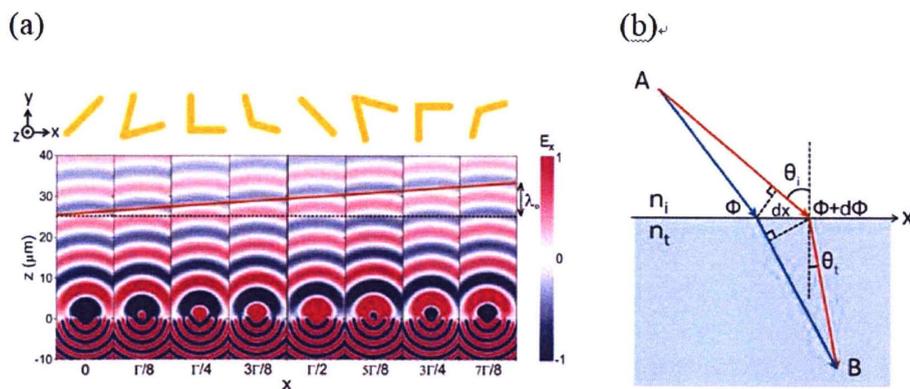


图 2.1 (a)金属 V 型天线的构型和波前(b)修正的斯涅耳折射定律示意图^[28]

Figure 2.1 (a)Configuration and wavefront of metal V-shaped antenna (b) Schematic diagram of modified Snell's law of refraction^[28]

当界面上存在相位突变时,光束的折射角和反射角不仅由入射角、介质折射率、入射光波长决定,还受相位突变的调控,满足广义斯涅耳折射定律,即:

$$\sin \theta_t n_t - \sin \theta_i n_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} \quad \dots (2.1)$$

和广义斯涅耳反射定律，即：

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi n_i} \frac{d\phi}{dx} \quad \dots (2.2)$$

其中 λ 为入射光在自由空间的波长， θ_i 、 θ_t 和 θ_r 分别是入射角、折射角和透射角， n_i 和 n_t 分别是入射光和折射光所处介质的折射率， ϕ 为界面处的相位突变。传统的斯涅耳折反射定律是修正的折反射定律在界面相位突变为零 ($\frac{d\phi}{dx} = 0$) 时的特殊情况。在修正的斯涅耳折射定律和反射定律为理论基础前提下，在之后的几年时间，国内外学者在超表面聚焦和成像方面开展了一系列研究^[53-67]。接下来的内容，将从三种超表面类型出发，介绍该类型超表面的理论设计。

偏振不敏感的超表面透镜理论设计 一般来说，超表面的结构单元可以根据对入射光偏振是否敏感分为两种类型，偏振敏感的超表面透镜是由具有 C_2 旋转对称性线性双折射纳米结构构成，像光栅、矩形孔、椭圆柱面和长方体等，而偏振不敏感的超表面透镜普遍是由高空间旋转对称性结构单元构成，像圆盘、圆柱和方柱等。

对于偏振不敏感的超表面透镜设计，这里普遍采用圆柱型的超表面结构单元，为了设计一个偏振不敏感的超表面透镜，首先要确定超表面结构单元库的参数空间，在这个库中，在所有结构单元的晶格常数一定的前提下，通过改变圆柱直径大小（占空比），来实现高透射率以及相位的 0 到 2π 的相位覆盖^[68-71]。

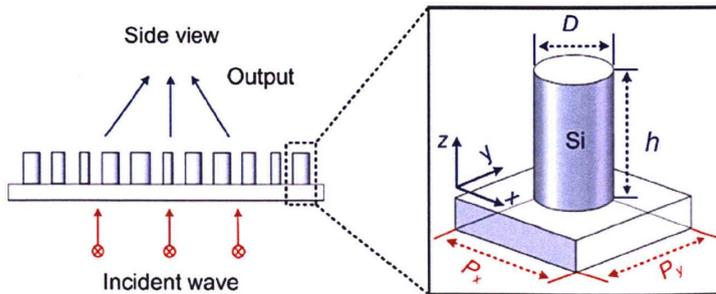


图 2.2 偏振不敏感的超表面透镜示意图^[68]

Figure 2.2 Schematic diagram of polarization-insensitive metasurfaces^[68]

图 2.2 为长波红外设计超表面透镜示意图，其中硅纳米柱排列在正方形结构单元上。入射的平面波通过超表面透镜调制成为一个汇聚的波前，这就要求每一个位置(x,y)的相位分布必须满足：

$$\varphi_d(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_i} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \quad \dots (2.3)$$

其中 λ_i 为自由空间的工作波长， f 为焦距，通过改变圆柱直径（即在单元库中找到合适的对应单元）来改变不同位置(x,y)的相位 $\varphi_d(x,y)$ 的大小。

偏振敏感的超表面透镜理论设计 在上一小节已经对偏振是否敏感的超表面透镜给出了详细定义，对于偏振敏感的超表面透镜设计^{[12][72]}，一般采用长方体的超表面结构单元，如图 2.3 所示，图 A 中为了得到聚焦的效果，相位同样需要满足：

$$\varphi_{nf}(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_d} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \quad \dots (2.4)$$

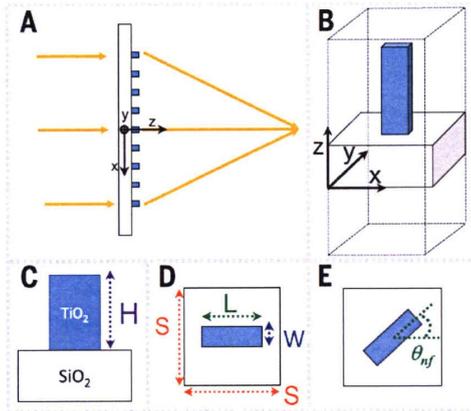


图 2.3 偏振敏感的超表面透镜示意图^[12]

Figure 2.3 Schematic diagram of polarization-sensitive metasurfaces^[12]

和偏振不敏感超表面透镜设计不同，偏振敏感的超表面透镜结构单元，在右旋圆偏振入射光情况下，相位分布 $\varphi_{nf}(x,y)$ 和旋转角度 $\theta_{nf}(x,y)$ 之间关系为：

$$\varphi_{nf}(x,y) = 2\theta_{nf}(x,y) \quad \dots (2.5)$$

并伴随着偏振转换，入射光由右旋光转换成为左旋光。因此，长方体纳米柱在坐标点(x,y)位置上，结构单元需要旋转的角度为：

$$\theta_{nf}(x, y) = \frac{\pi}{\lambda_d} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \quad \dots (2.6)$$

图 B-D 为超表面结构单元示意图，图 E 为通过改变长方体结构单元角度，来满足聚焦功能所需的相位分布。

双面超表面透镜理论设计 单平面透镜对于不同入射角度无法实现衍射约束成像，传统的解决方法是通过添加透镜，来校正球差、慧差、散光等，单面超表面透镜同样面临着这个问题，但是超表面透镜的校正与传统平面透镜不同，它是通过采用双面超表面透镜设计，来克服球差、慧差等像差，这种设计并没有引入透镜之间的组合，更有利于平面化、小型化设计^{[9][73-75]}。

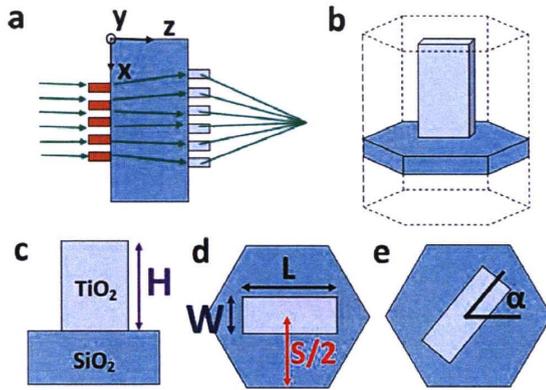


图 2.4 双面超表面透镜示意图^[9]

Figure 2.4 Schematic diagram of metalens doublet^[9]

图 2.4 中，图 a 为双面超表面设计结构，图 b-d 展示的为单个超表面结构单元，该设计采用偏振敏感型超表面结构单元，图 e 中超表面结构单元通过旋转的方式，来实现对应位置所需的相位分布。双面超表面透镜与单面超表面透镜不同的是，双面结构设计引入了两个超表面透镜，其中一个为孔径超表面透镜，它的相位满足：

$$\varphi_{AL}(x, y) = \sum_{n=1}^5 a_n \left(\frac{\rho}{R_{AL}} \right)^{2n} \quad \dots (2.7)$$

相似的是，另一个超透镜为聚焦超表面透镜，其相位应满足：

$$\varphi_{FL}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_d} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) + \sum_{n=1}^5 b_n \left(\frac{\rho}{R_{FL}} \right)^{2n} \quad \dots (2.8)$$

其中, λ_d 为工作波长, f 为焦距, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, R_{AL} 和 R_{FL} 为孔径超表面透镜和聚焦超表面透镜的半径, 在公式(2.8)中在双曲线相位剖面上增加了一个多项式来校正像差, 系数 a_n 和 b_n 为优化参数。 a_n 和 b_n 通过光线追踪的方法, 以沿焦平面的最大焦点为目标函数, 采用梯度下降法进行光线追踪优化, 经过多次循环, 优化参数 a_n 和 b_n 通过所有入射角度的光线都达到了衍射约束限制的情况下获得。

2.3 大面积超表面透镜工艺方法

目前, 随着微纳加工的进步, 以及对超表面透镜的研究, 超表面透镜的工艺方法越来越成熟, 方式也越来越多, 本节将从工艺方法入手, 详细介绍了大面积超表面透镜可行的工艺方法及他们的优缺点, 论证当前限制大面积超表面透镜工艺方法的关键因素, 以此体现文章提出的新工艺方法的优越性。

电子束曝光 电子束曝光是采用电子束在衬底上制作图形的工艺, 是拓展的光刻技术。光子波长与光刻的精度呈正相关性。光波长越短, 光刻后线宽精度越高。众所周知, 电子波长极短, 采用电子进行曝光所得到的线宽精度可以达纳米级, 但是电子束光刻需要一定的时间, 这限制了其大规模应用。

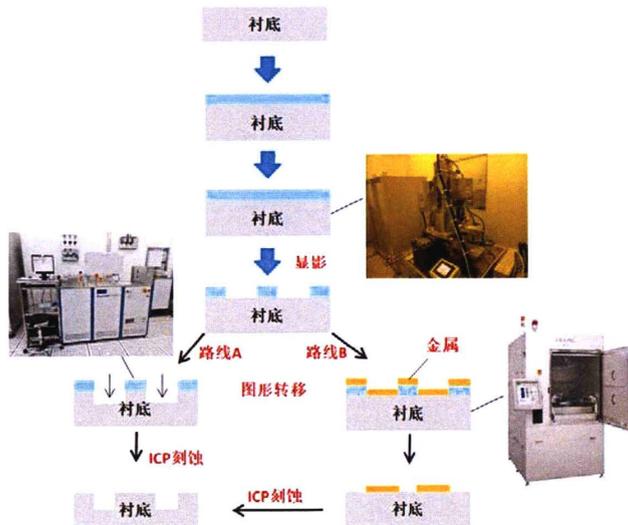


图 2.5 电子束曝光工艺方法示意图

Figure 2.5 Schematic diagram of electron beam lithography

图 2.5 为电子束曝光工艺方法示意图, 在电子束曝光的超表面透镜工艺中,

首先在清洗干净的衬底上旋涂一层薄的光刻胶，如 300nm 厚的正胶 ZEP-520A，旋涂后 180°C 烘烤 5 分钟，利用电子束光刻工艺对超表面图形进行曝光，完成后进行显影。由于超表面透镜所需线宽深宽比大，故采用路线 B 的方式，使用沉积金属作为刻蚀的硬掩模，进行感应耦合等离子刻蚀（ICP 刻蚀）。

电子束曝光过程中除了写场对准外，还需要解决一个很关键的问题——临近效应，由于临近效应的存在，导致版图设计尺寸和实际尺寸存在一定的偏差，这种偏差接近于线性关系，这就需要在进行电子束曝光前，对加工尺寸进行一定的补偿。通常情况下，采用拟合公式的方式进行版图校正，图 2.6 为通过拟合公式的方式进行版图校正，横坐标 x 为设计版图直径，纵坐标 y 为实际测量样品直径，通过公式拟合的方式，得到拟合的线性关系为：

$$y = 1.00262x + 53.084 \quad \dots (2.9)$$

变形得：

$$x = \frac{y - 53.084}{1.00262} \quad \dots (2.10)$$

将设计尺寸代入公式 (2.10) 中，即可得到补偿后版图尺寸。补偿后的超表面透镜线宽 SEM 测量图如图 2.7，补偿后所得线宽误差控制在 5% 以内。

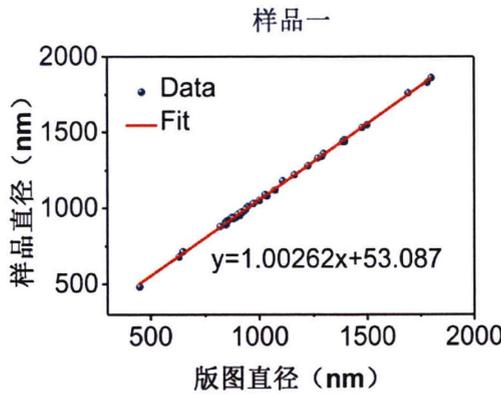


图 2.6 拟合公式校正版图

Figure 2.6 The fitting formula corrects the map

步进式光刻 光刻机是半导体工艺或者微纳加工工艺中最常见的曝光方法，将超表面透镜俯视图制成掩模版，通过光刻机将图案转移到衬底上。

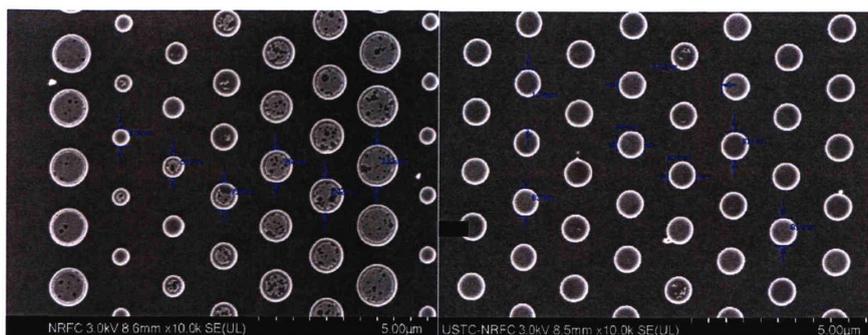


图 2.7 补偿后超表面透镜线宽测量图

Figure 2.7 Measurement of linewidth of compensated metalens

按照曝光方法分类，光刻分为：接触式、接近式、投影式，其中接触式曝光为掩模版与光刻胶贴合接触，曝光图案与设计图案接近 1:1，接触式曝光光刻板无法长期使用；接近式曝光为掩模版与光刻胶层之间有一定的缝隙，虽然防止了掩模版的损伤，但是引入了衍射效应，降低了分辨率，接触或接近式光刻曝光线宽精度大于 $2\mu\text{m}$ ，对于最小线宽 450nm 的超表面透镜并不适应；投影式曝光在掩模版和材料间使用了光学系统，掩模版尺寸放大了 4 倍，采用投影的方式将超透镜图案曝光在衬底上，衬底上图案较掩模版图案缩小了 4 倍，这种光刻方式提高了曝光精度，其中扫描步进投影式曝光沿用至今，曝光区域可达 $26\text{mm}\times 33\text{mm}$ ，精度可达 180nm ，图 2.8 为 NIKON-I12 步进式光刻机，曝光精度 350nm ，曝光区域 $22.5\text{mm}\times 22.5\text{mm}$ 。



图 2.8 NIKON-I12 步进光刻机

Figure 2.8 NIKON-I12 step lithography machine

第一章 1.3 节国内外研究现状中，目前国内外大面积超表面透镜最大直径为 2cm，采用步进式光刻的方式，最大直径 2cm 不是随意确定的，受步进式光刻机曝光区域限制，以 NIKON-I12 步进式光刻机为例，其曝光区域为 22.5mm×22.5mm，意味着采用 NIKON-I12 步进式光刻机进行大面积超表面透镜工艺时，得到最大的超表面透镜面积不会超过曝光区域面积，这也是限制了直径大于 2cm 的大面积超表面透镜的制作。

纳米压印 纳米压印技术是微纳加工发展中的一种新型的加工技术。纳米压印通过机械的方式，将图案转移到衬底上，能够达到纳米级的精度，同时也被认为是未来代替传统光刻的技术，成为半导体、材料等领域中重要的工艺方法。纳米压印技术的成熟使其被应用于超表面透镜的工艺当中，成为代替传统光刻的一种手段，图 2.9 为应用纳米压印技术制备超表面透镜^[37]。在蓝宝石衬底上，通过分子束外延生长（MBE）生长一层 715nm 的氮化镓，再沉积一层 50nm 氮化硅作为刻蚀氮化镓的硬掩模，采用 UV 纳米压印工艺将印章上的图案转移到光刻胶上，在光刻胶上沉积一层 50nm 镍，并剥离实现图形转移，通过 RIE 刻蚀的方式对氮化硅进行刻蚀，对氮化硅的刻蚀不会影响到氮化镓的完整性，最后通过 ECR-RIE 干法刻蚀方式（Oxford system 100）完成对氮化镓的刻蚀。

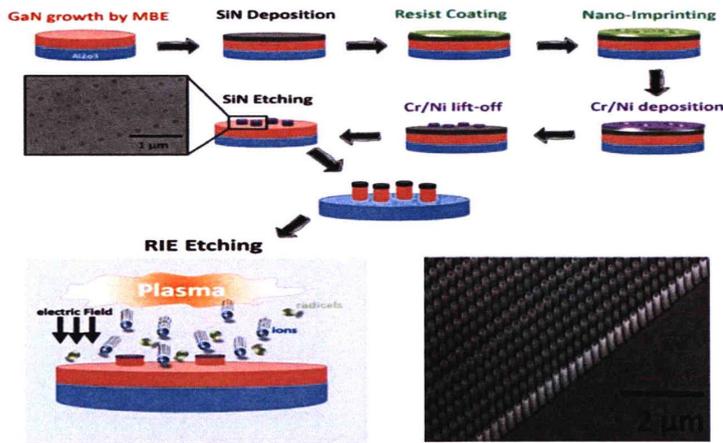


图 2.9 纳米压印技术超表面透镜工艺^[37]

Figure 2.9 Nano imprint technology metalens process^[37]

从纳米压印工艺方法上可以看出，采用机械的方式代替传统光刻，首先要对纳米压印使用的印章进行制作，纳米压印印章目前依然是采用电子束曝光的方式

制作,对比直接使用电子束曝光制作超表面透镜,纳米压印的优点是效率高、成本低、易量产,这很符合当前大面积超表面透镜的工艺需求。但是,纳米压印技术当前也存在一些问题:首先,纳米压印印章采用电子束曝光制作,印章的时间成本高;其次,纳米压印的印章经多次使用后易损坏;再次,纳米压印过程中,可能存在压印不完全现象。

对于大面积超表面透镜的工艺方法,纳米压印提供了一种很好的思路,虽然当前还有一些缺点无法满足大面积超表面透镜的工艺需求,但是随着对纳米压印技术研究的深入,未来纳米压印技术在大面积超表面透镜工艺中会有很好的应用前景。

双光子激光直写 双光子激光直写也是近几年新兴起的一种 3D 打印技术,采用双光子激光直写系统,可以进行三维微纳结构的制作,且应用领域十分广泛。双光子激光直写系统具有宽广的光敏材料选择的自由度,可以根据实际需求,配比合适折射率与波长的光敏材料作为打印对象^[76-77]。

如图 2.10 所示,为 Nanoscribe 双光子激光直写系统,其二维工作平面范围在 $100\times 100\text{mm}^2$,XY 最小步长小于 160nm ,线宽精度小于 500nm ,最大物体高度达 8mm ,所有特征表明 Nanoscribe 能够满足大面积超表面透镜的制作。

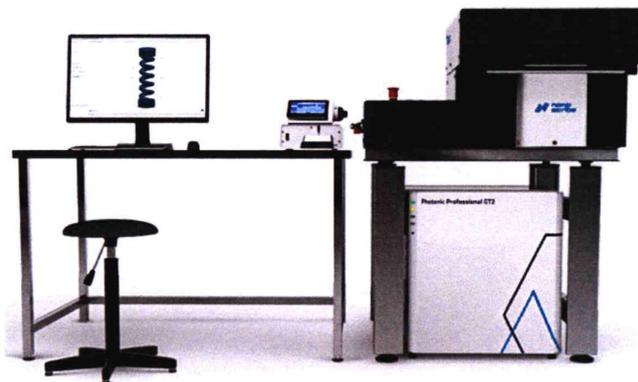


图 2.10 Nanoscribe 双光子激光直写系统

Figure 2.10 Nanoscribe two-photon laser direct writing system

如图 2.11 所示,为中红外波段螺旋面阵列圆偏振手性超表面透镜三维 SEM 表征图^[76-77],该结构采用双光子激光直写技术制作,超表面结构单元尺寸约 $1.51\mu\text{m}$,高度约 $1.78\mu\text{m}$,接近于设计尺寸,并实现了聚焦功能。

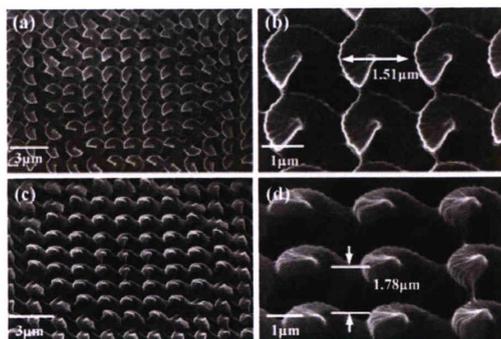


图 2.11 中红外波段螺旋面阵列圆偏振手性超表面透镜三维 SEM 表征图^[76]

Figure 2.11 3D SEM image of helioid array circularly polarized chiral metalens in mid-infrared band^[76]

双光子激光直写系统，无论是从系统参数，还是从当前应用来看，采用双光子激光直写进行大面积超表面透镜制作是可行的，且其使用的光敏材料选择自由度高，激光直写精度和工作面积可以满足大面积超表面透镜的设计需求。但是，双光子激光直写系统目前也处在一个发展阶段，工艺的成熟度、产品的可靠性依然需要时间的验证，同时双光子激光直写系统与电子数曝光一样，效率相对较低，不适合大规模生产，这也限制其在大面积超表面透镜方面的应用，对于尺寸大于 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 的大面积超表面透镜来说，双光子激光直写同样面临挑战。

硅片拼接技术 硅片拼接技术借鉴于光栅拼接技术与半导体封装工艺的结合，是在研究大面积超表面透镜实现方式时提出的一种可能性方案。硅片拼接技术与光栅拼接技术近似，

如图 2.12 所示，将大面积版图分为 ABCD 四个部分，采用机械的方式分别将 AB 固定在平面或者某一衬底上，在 AB 缝隙或者衬底四周涂覆 UV 固化胶，将 AB 两块超表面固定，采用同样的方式将 BC、CD、DA 之间缝隙点胶进行固定，所得拼接后器件为完整设计的大面积超表面透镜。

硅片拼接方案既可以实现规模化量产，也可以引用到更大面积超表面透镜的制作，只要增加拼接超表面结构的数量，能够突破实现更大面积的超表面透镜。但是，在硅片拼接过程中，引入了 6 个拼接误差，如图 2.13 所示，分别为 Δx ， Δy ， Δz ， $\Delta \theta_x$ ， $\Delta \theta_y$ ， $\Delta \theta_z$ ，其中 Δx 为 x 方向拼接误差， Δy 为 y 方向的拼接误差，它们都是由机械平移或者固化胶引入的误差； Δz 为 z 方向的拼接误差，它

是由固化胶过多或过少引起的误差； $\Delta\theta_x$ ， $\Delta\theta_y$ ， $\Delta\theta_z$ 为沿各轴的旋转误差，它们是由机械旋转操作、固化胶分布不均或者底面不平整引起的翘曲造成的误差，这些误差影响到了拼接的精度^[78]

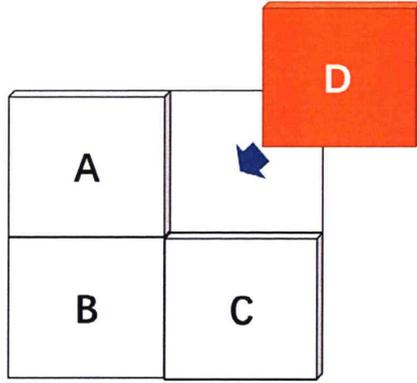


图 2.12 硅片拼接技术示意图

Figure 2.12 Schematic diagram of silicon wafer splicing technology

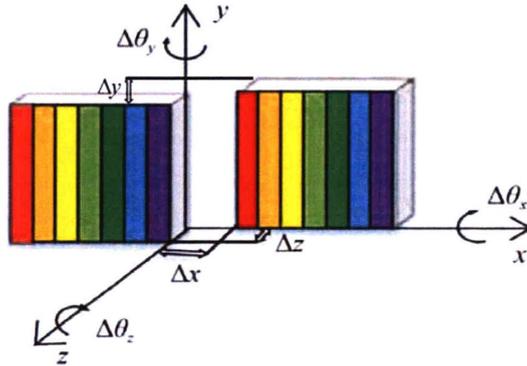


图 2.13 硅片拼接时存在的误差^[78]

Figure 2.13 The error of silicon wafer splicing^[78]

更进一步发现，由于硅片切割道凹凸不平，硅片边缘高低处误差在 50nm 至 200nm 之间，硅片边缘误差对于高精度大面积超表面透镜是不可忽略的，片与片间在未拼接之前已经引入了 100nm 至 400nm 的误差，这会导致后续超表面结构单元相对相位的改变，从而影响聚焦成像。所以，硅片拼接技术只适用于大线宽，拼接误差要求较低的大面积超表面透镜工艺，对于高精度的大面积超表面透镜来

说，是不适用的。

2.4 本章小结

本章内容主要对超表面透镜设计相关的基本理论，其中详细介绍了偏振不敏感、偏振敏感以及双面超表面透镜的理论和设计。同时，介绍了当前超表面透镜的工艺方法，分析了当前工艺方法制作大面积超表面透镜的优势和局限性。

第3章 硅基大面积超表面透镜的设计与关键工艺研究

3.1 引言

当前,大面积超表面透镜主要采用了电子束曝光、光刻、纳米压印、3D 打印等、硅片拼接等工艺方法,这些方法制作的大面积超表面透镜直径均未超过20mm,不论是受效率限制,无法量产,还是受视场限制,无法一次做大,这都证明当前工艺下需要一种可行性方案,来实现高效率、高精度的大面积超表面透镜的制作,以满足遥感卫星等大型光学系统的替代性需求。本章以 $4.35\mu\text{m}$ 大面积超表面透镜的设计与工艺为例,提出了这些问题的新的解决方案。

3.2 硅基大面积超表面透镜的光学设计和仿真

3.2.1 硅基大面积超表面透镜设计目标

本章设计的大面积超表面透镜,通过 FDTD 仿真,透射率大于 50%,以硅为衬底材料,工作波长在 $4.35\mu\text{m}$,焦距为 16cm, F 数为 4,采用光刻拼接的工艺方式,超表面透镜图案在同一硅衬底上,加工后超表面透镜直径为 4cm,拼接误差小于 $3\mu\text{m}$ 。

3.2.2 硅基大面积超表面透镜结构单元仿真

建模 由于硅在 $4.35\mu\text{m}$ 波长下透射率高,损耗低,所以采用硅作为衬底材料,根据以往对硅基超表面透镜的设计,将晶格常数固定在边长 $2.5\mu\text{m}$,即对衬底硅的 x_{\min} 设定为 $-1.25\mu\text{m}$, x_{\max} 设定为 $1.25\mu\text{m}$, y_{\min} 设定为 $-1.25\mu\text{m}$, y_{\max} 设定为 $1.25\mu\text{m}$,硅柱高度固定在 $2.5\mu\text{m}$,即对圆柱硅的 z_{\min} 设置为 $0\mu\text{m}$, z_{\max} 设置为 $2.5\mu\text{m}$,这种参数搭配下的超表面结构单元较其他搭配,有更高的透射率,以及更多的参数空间来实现相位 $0:2\pi$ 的覆盖。

仿真区域 FDTD 仿真区域的设定,是为了对仿真区域进行指定,仿真区域之外的区域,仿真器不予以计算。在超表面结构单元仿真中, FDTD 区域大小 x_{\min} 设定为 $-1.25\mu\text{m}$, x_{\max} 设定为 $1.25\mu\text{m}$, y_{\min} 设定为 $-1.25\mu\text{m}$, y_{\max} 设定为 $1.25\mu\text{m}$,仿真区域 xy 方向尺寸与建模晶格常数 xy 方向尺寸一致。为了使仿真能够收敛,避免仿真时间结束而仿真未收敛问题出现,将仿真时间设定为 10000 fs,

auto shutoff min 设定为 10^{-5} ，当仿真小于 10^{-5} 时，判定为收敛，仿真结束。为了在仿真准确前提下提高仿真速率，将 mesh accuracy 设定为 2，图 3.1 中 (b) 图，橙色框架为仿真 FDTD 设定区域，FDTD 区域必须覆盖整个仿真实空。

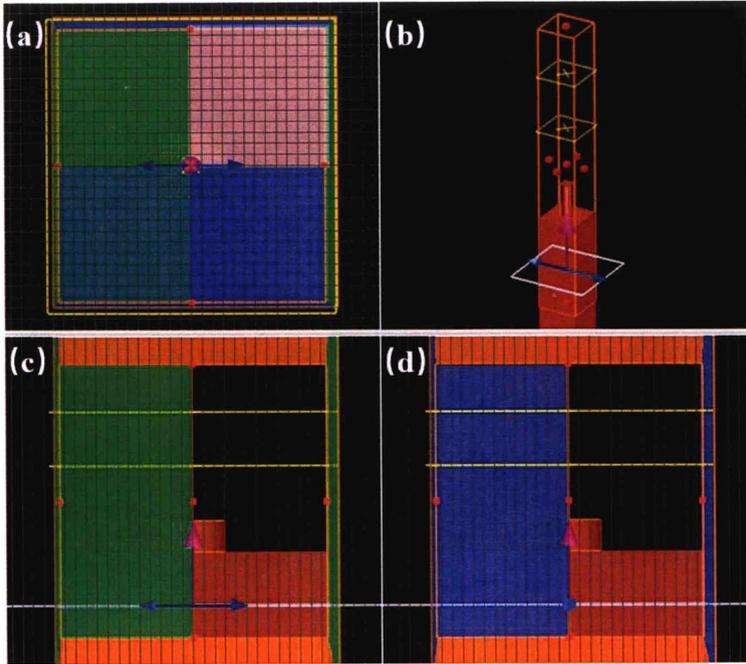


图 3.1 超表面透镜结构单元仿真图

Figure 3.1 Simulation diagram of the metalens structure unit

边界条件 边界条件是电磁仿真时必须给定的仿真条件，本研究在设定 FDTD 中边界条件时采用了反对称边界条件 (Anti-Symmetric)、对称边界条件 (Symmetric) 及完美匹配层 (PML) 边界条件，当面对一个或多个对称面时，需要使用对称、反对称式边界条件，激励源和结构都是互相对称的，对称边界电场是镜面对称，磁场是反镜面对称，反对称边界条件情况是相反的。完美匹配层是仿真时常用的吸收边界条件，完美匹配层内部场与外部无关。完美匹配层能够吸收进入的电磁波，对垂直入射光可有效吸收，对临界入射光会产生较大的反射。

因此在建模时，将 FDTD 的边界条件 x 最小边界、 x 最大边界设定为 Anti-Symmetric， y 最小边界、 y 最大边界设定为 Symmetric， z 最小边界、 z 最大边界设定为 PML。在 PML 边界条件中，可以对 PML profile 和 layers 进行设定，PML profile 包含 standard, stabilized, steep angle, custom, 其中 standard 为少层

数, 来提供良好的整体吸收, 一般优先配置为 standard。当仿真计算不包含穿过 PML 的区域使用最佳, 本文仿真设定为 standard 模式; stabilized 为物质边界穿过 PML 区域时使用, 一般物质边界穿过 PML 区域时, 存在数值不稳定性, PML 区域内场振幅局部指数增长, PML profile 设定为 stabilized 时需增加层数以达到 standard 水平; steep angle 经常在周期性边界和 PML 边界组合使用时使用, 此设定增强了光平行于 PML 边界的吸收; custom 为自定义模式, 不同边界使用不同 PML profile 能有效减少仿真时间。Layers 决定于仿真的需求, layers 越多占用内存越大, 这里将层数设定为 32。图 3.1 中 (a) 图为边界条件设定情况, 这种边界设定情况下, 仿真器会只对第一象限进行仿真, 并通过计算得到完整场分布情况, 结果比较好, 相比于全部设定为 PML 边界条件, 它们仿真的结果是相同的, 但是对称、反对称的设定节省了四分之三的仿真时间和内存, 提高了仿真效率。

网格设定 仿真区域网格的设定, 决定着 FDTD 仿真精度, 网格越密, 仿真精度越好, 当然网格越密所需要的内存及仿真时间越大, 仿真器无法仿真无限小的网格区域, 因此要对仿真准确性和仿真内存、时间之间进行权衡。仿真最小网格设定应满足小于 $\frac{\lambda}{10n}$, 对于工作波长 $4.35\mu\text{m}$, 硅材料折射率 3.42, 最小网格设定不大于 127.1nm , 在进行 FDTD 仿真区域设定时, 对 min mesh step 设定为 250nm , 仿真区域的网格设定大小显然大于仿真最小网格设定值, 这对于仿真来说远远是不够的, 因此我们还可以对 mesh override region 进行设定, 来对 FDTD 仿真区域网格进行覆盖。网格覆盖区域主要是用来覆盖模拟区域某些部分的默认网格, 对于模拟区域的某些部分需要一些特定的网格化条件, 就可以指定网格覆盖区域。在本仿真中, 对于网格覆盖区域的设定采用了 set maximum mesh step 的方式, 并对 override x mesh 中 dx 设定为 50nm , override y mesh 中 dy 设定为 50nm , override z mesh 中 dz 设定为 50nm , 以细化网格, 增加仿真的准确性。

激励源 激励源采用平面波的形式, 光源水平向前射向超表面结构单元, 激励源的区域大小需要大于等于仿真区域, 为了便于提取相位, 将激励源放置在 z 为 $-4.35\mu\text{m}$ 处, 距离超表面结构单元表面一个波长处, 激励源为单波长, 所以 wavelength start 和 stop 设定为 $4.35\mu\text{m}$ 。

监视器 超表面结构单元监视器主要用来对相位及透射率进行监视, 在进行超表面透镜设计时, 相位需要有满足 $0: 2\pi$ 的相位覆盖, 这里的相位指的是

相对相位，采用 frequency domain power monitor 中的点监视器，对电场 E_x 进行相位提取并进行运算，点监视器放置在 $2.5\mu\text{m}$ 波长硅纳米柱上方一个波长位置的中心点处。透射率提取采用 frequency domain power monitor 中的 2D Z-normal 监视器，对 xoy 面进行透射率提取，透射率监视器与相位监视器放置在相同位置，区域大小需大于等于仿真区域大小。

参数扫描 所设计超表面透镜结构单元为边长为 $2.5\mu\text{m}$ 的正方形，通过改变硅纳米柱（圆柱）底面半径来改变占空比，从而改变相对相位大小，对于已完成建模改变圆柱半径，需进行参数扫描，以获得连续改变半径下的相位大小。本仿真中，半径 start 为 $0.3\mu\text{m}$ ，stop 为 $1.2\mu\text{m}$ ，工艺对于半径的变化有一定的敏感性，所以半径变化步长不应太小，根据目前所采用的工艺方式，将 Number of point 设定为 31，变化步长为 60nm。

资源分配 为了提高仿真计算速度，FDTD 仿真支持多核多线程，也可将仿真任务分配给局域网内配置好的计算机设备，这里采用 8 核 4 线程的设定进行仿真，占约 50% 的 CPU 使用，既满足仿真效率，又不影响服务器的其他使用。

仿真与内存 在进行仿真前，需对仿真器仿真内存进行检查与确认，仿真内存与建模时设定仿真区域大小、网格划分大小、激励源波长范围、监视器监视数据有关，对于整体结构的仿真，数据过大可能导致仿真耗费时间长或者无法完成，因此，在每次仿真前进行仿真内存的检查与确认是十分必要的。本仿真为超表面结构单元的仿真，结构简单、数据量少，所需内存小，通过检查 Initialization and mesh 为 21MB，Running simulation 为 11MB，Data collection 为 109kB，Monitor data saved to fsp file 为 55kB。

参数筛选 参数扫描结束后，对原始相位及透射率关系需进行筛选，在满足相对相位 $0:2\pi$ 覆盖前提下，尽选择透射率高的以满足透射率要求，线宽大的以减小工艺难度。图 3.2 (a) 为筛选前半径与相位关系图，半径从 300nm 变化到 1200nm，可以看出 300nm 至 840nm 可以完成相位 $0:2\pi$ 覆盖，由于线宽越小工艺能力要求越高，如果采用光刻设备精度较低，可以采用 840nm 至 1200nm 中相位近似的线宽来替代 300nm 线宽。图 3.3 (a) 为筛选后半径与相位关系图，由于受制版工艺能力限制，将 300nm 省略，相对相位同样满足 $0:2\pi$ 相位覆盖。图 3.2 (b) 筛选前半径与透射率关系图，能够看出在半径 300nm 至 1200nm 范围内，个别半径对应的透射率低于 50%，透射率低于 50% 的超表面结构单元越多，

超表面透镜的透射率越低, 所以需要将透射率低于 50% 的个别结构单元省略, 省略少量透射率低的超表面结构单元不影响最终超表面透镜的设计。图 3.3 (b) 为筛选后半径与透射率关系图, 筛选后透射率均高于 50%。

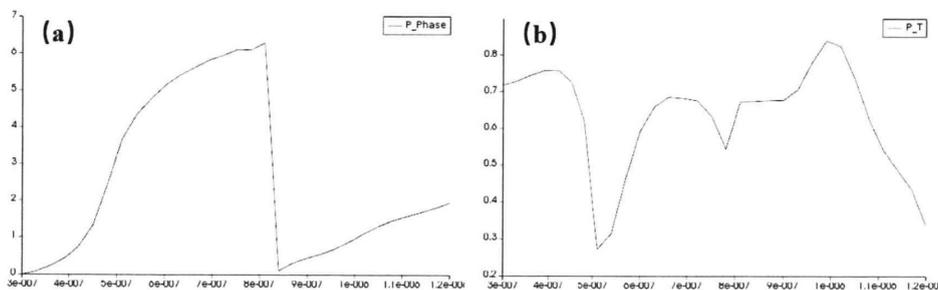


图 3.2 参数筛选前 (a) 相位与半径关系 (b) 透射率与相位关系图

Figure 3.2 Before parameter screening (a) relation between phase and radius (b) relation between transmittance and phase

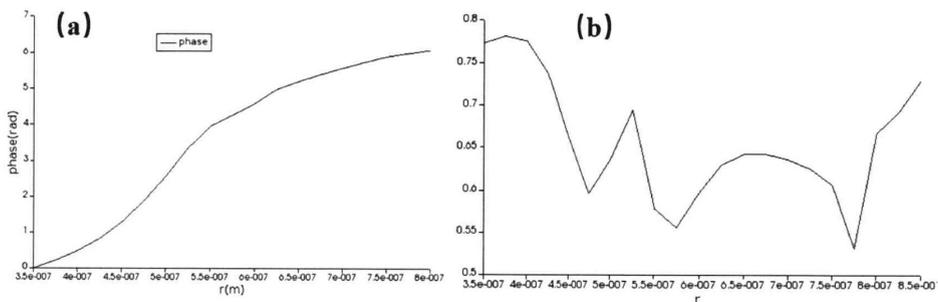


图 3.3 参数筛选后 (a) 相位与半径关系 (b) 透射率与相位关系图

Figure 3.3 Before parameter screening (a) relation between phase and radius (b) relation between transmittance and phase

3.2.3 硅基大面积超表面透镜仿真

Mapping 超表面透镜结构单元仿真结束后, 需要将筛选后的参数空间作为单元库, 根据公式 (2.3) 将单元库中结构对应相位与超表面透镜相应位置的相位对应起来, 并将单元库中结构周期性的放置在合适的位置上。对于正方晶格的超表面结构单元, mapping 超表面透镜可以采用两种划分方式, 第一种如图 3.4 中 (a) 图所示, 橙色线为坐标轴, 图案中心为原点 (0,0), 按照距离坐标轴 $2.5\mu\text{m}$ 的一个周期长度进行划分单元格, 其余超表面单元结构分别分布在 (1,0) (1,1)

(0,1); 第二种如图 3.4 中 (b) 图所示, 橙色线为坐标轴, 图案中心为原点 (0,0), 按照距离坐标轴 $1.25\mu\text{m}$ 的半个周期长度进行划分单元格, 超表面单元结构分别分布在 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ $(\frac{1}{2}, \frac{3}{2})$ $(\frac{3}{2}, \frac{1}{2})$

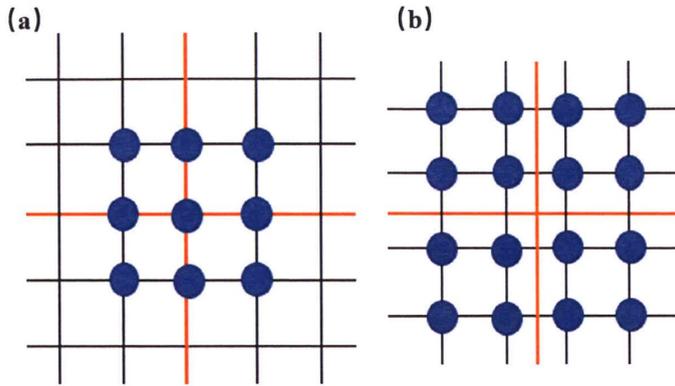


图 3.4 超表面透镜结构划分方式示意图

Figure 3.4 Diagram of the structure division of the metalens

根据光刻拼接的工艺方式, 需要将版图以坐标轴为分割线, 分成均等的四份, 每一部分通过拼接的方式, 拼成完整的超表面透镜图案, 所以采用第二种方式进行 mapping 为最佳, 这种方式避免了第一种方式中, 坐标轴上图案被切割的问题, 保证了图形的完整性。

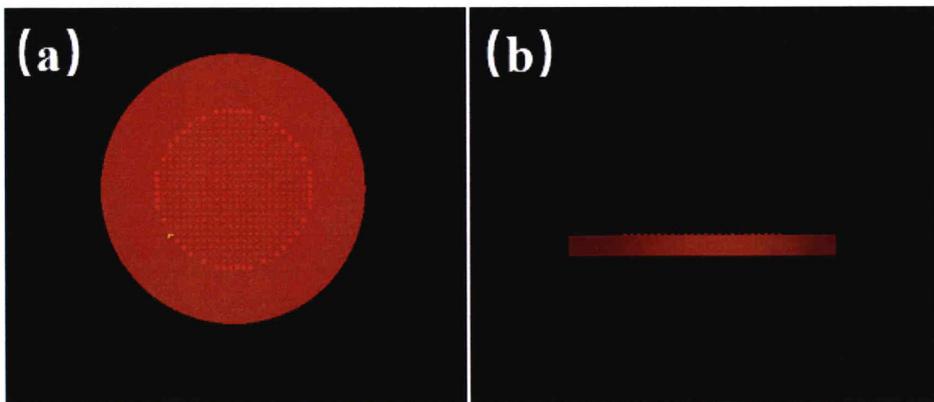


图 3.5 直径 $60\mu\text{m}$ 超表面透镜结构图

Figure 3.5 Structure of $60\mu\text{m}$ diameter metalens

在确定好超表面透镜 mapping 方式后, 需要计算出划分单元格位置对应的超

表面单元结构线宽，将划分后其中一个单元格实际坐标代入公式(2.3)中，计算出该位置所需要的理论相位值并将其化简至 $0:2\pi$ 区间内，将这个相位值与单元库中相位进行做差比较，相位差值最小的单元库中单元所对应的线宽，即为该位置上应放置的超表面结构单元线宽，通过这种方式依次将每一个位置的最佳线宽选择出并放置在该位置上，图3.5为采用这种方式生成的直径 $60\mu\text{m}$ 超表面透镜 mapping 后结构图，这种方式为逐个比对选择，适合小口径超表面透镜设计或建模。

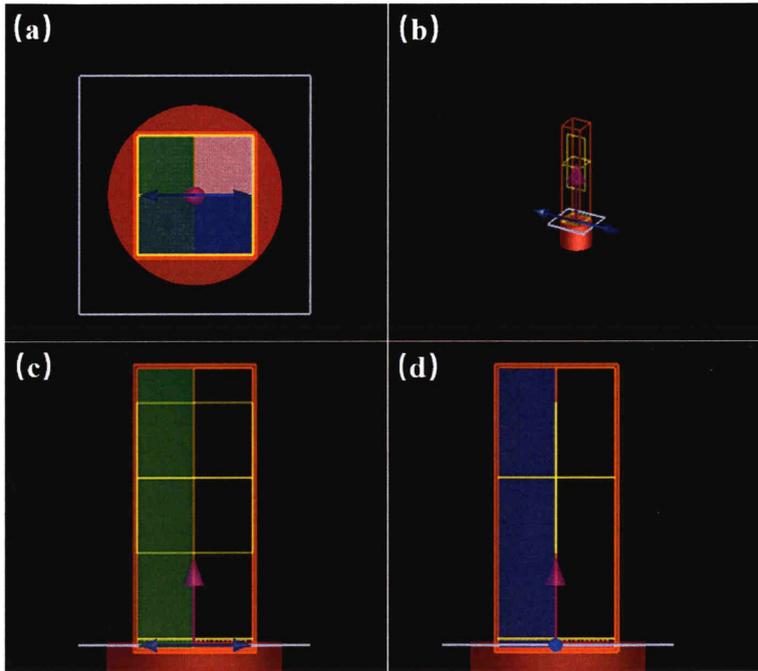


图 3.6 直径 $60\mu\text{m}$ 超表面透镜仿真建模图

Figure 3.6 Simulation modeling of a $60\mu\text{m}$ diameter metalens

建模 直径 4cm 大面积超表面透镜仿真所需内存庞大，仿真器无法完成直径 4cm 大面积超表面透镜的仿真，本仿真中采用等比例缩小的方式进行超表面透镜仿真，结果近似。3.2.1节设计目标中提到，设计一个直径 4cm ，焦距 16cm ，F数为4的大面积超表面透镜，本仿真采用直径 $60\mu\text{m}$ ，焦距 $240\mu\text{m}$ ，F数为4的超表面透镜进行代替，并模拟超表面透镜在硅片上的情况，设定了FDTD仿真区域大小，如图3.6中(a)所示。对于边界条件的设定，将FDTD的边界条件中x最小边界设定为Anti-Symmetric，y最小边界设定为Symmetric，x最大边界，y

最大边界, z 最小边界, z 最大边界设定为 PML profile 设定为 steep angle, 层数为 12, 如图 3.6 中图 (a) (c) (d) 所示。在硅纳米柱上方一个波长处和焦距处放置 frequency domain power monitor, 分别用于计算透射率以及监视聚焦情况, 如图 3.6 中图 (b) 所示。这里应该指出的是, 上文提到本仿真需要设定的最小网格为 127.1nm, 由于超表面透镜仿真所需内存远大于超表面单元结构仿真, 所以这里不再对网格覆盖区域进行设置, 而统一将 FDTD 仿真区域中 min mesh step 设置为 100nm, 以保证仿真精度前提下, 减小仿真内存。设置完成后, 通过内存检查 Initialization and mesh 为 8.761GB, Running simulation 为 4.406GB, Data collection 为 51MB, Monitor data saved to fsp file 为 25MB。

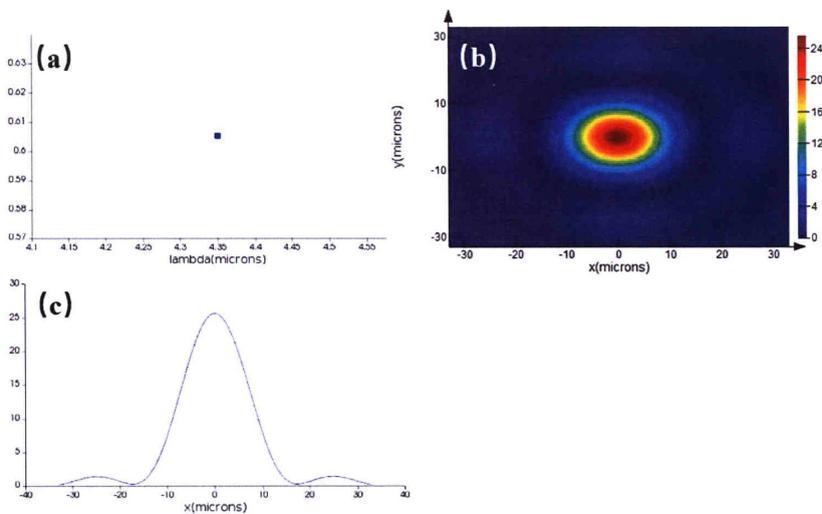


图 3.7 直径 $60\mu\text{m}$ 超表面透镜仿真结果 (a) 透射率 (b) 聚焦情况 (c) 半高宽

Figure 3.7 Simulation results of a hypersurface lens with a diameter of $60\mu\text{m}$ (a) transmittance (b) focusing condition (c)FWTH

仿真结果 在建模完成并确定好仿真内存后, 开始对直径 $60\mu\text{m}$ 超表面透镜进行仿真, 图 3.7 为仿真后结果, 图 (a) 为超表面透镜透射率, 其结果大于 60%, 这个结果对于设计要求 50% 的超表面透镜是足够的, 并保有 10% 的工艺误差容错, 工艺制作会造成一部分光散射出去, 降低透射率。图 (b) 为焦距 $240\mu\text{m}$ 处聚焦情况, 在焦距处 xoy 平面上, 得到一个很好的焦斑。图 (c) 为沿图 (b) 中 $y=0$ 方向的切线图, 图 (c) 中可以看出焦斑的半高宽约为 $17\mu\text{m}$, 为了验证仿真准确性, 这里计算了理论上半高宽大小, 公式 (3.1) (3.2) 可推导出公式 (3.3),

其中 λ 为工作波长, f 为焦距, n 为空气折射率, D 为超表面透镜直径, 将数值代入公式 (3.3) 得半高宽约为 $17.4\mu\text{m}$, 仿真结果与理论计算结果对应, 仿真单元库参数符合设计要求, 所形成的超表面透镜满足设计要求, 可以用来生成直径 4cm 大面积超表面透镜。

$$FWHM = \frac{\lambda}{2NA} \quad \dots (3.1)$$

$$NA \approx \frac{nD}{2f} (f \gg D) \quad \dots (3.2)$$

$$FWHM \approx \frac{\lambda f}{nD} \quad \dots (3.3)$$

3.3 大面积超表面透镜版图压缩研究

单元仿真确定了生成直径 4cm 的大面积超表面透镜的单元库参数, 接下来需要在超表面透镜相应位置上, 根据相位关系将单元库结构放置在该位置上, 以此生成可供光刻使用的 GDS 格式版图, 下面小节详细说明了版图生成过程中的问题、解决方法及效果。

3.3.1 大面积超表面透镜版图问题

版图生成时间 在 3.2.3 节中提到的版图生成方法, 即将每个数据进行做差取最小值, 再对应到相应位置生成版图, 版图越大, 数据就越多, 这种方法显然需要耗费大量的时间进行计算, 该方法适应于小面积超表面透镜, 对于直径 4cm 大面积超表面透镜来说并不适用, 直接采用该方法生成直径 4cm 大面积超表面透镜会导致计算机无法工作, 版图完成时间无法估计。

版图文件大小 版图文件大小是大面积版图生成过程中一个最重要问题, 表 3.1 为采用单元库参数生成的大面积超表面透镜未压缩文件大小, 其中直径 1cm 的柱子数量为 2500 万个, 未压缩文件大小 14.7GB , 而本研究设计的直径 4cm 大面积超表面透镜的柱子数量达 4 亿个, 未压缩文件大小为 235.2GB , 计算机、制版设备、光刻设备均无法直接对这个大小的版图进行编辑、处理、制作, 这限制了大面积超表面透镜的制作。

表 3.1 不同直径下未压缩版图文件大小

Table 3.1 Uncompressed layout file sizes with different diameters

直径	柱子数量	未压缩版图大小
1 cm	25,000,000	14.7GB
2 cm	1,000,000,000	58.8GB
4 cm	4,000,000,000	235.2GB

3.3.2 大面积超表面透镜版图压缩方法

根据对大面积版图的问题研究，提出了简易的主要优化算法：

浅复制 版图复制分为深复制和浅复制，深复制的每一个对象都是独立的，而浅复制则是引用了复制对象的数据，浅复制是版图压缩的一个最主要方式，本研究所使用压缩算法主要来自于浅复制。进行压缩算法，首先需要将每个单元结构对应的坐标进行归类，相同单元结构对应坐标归为同一类，作为一个 mapping 库。然后采用脚本对每个单元结构生成版图，图 3.8 生成了半径为 R 的单元结构版图，通过脚本对半径为 R 的单元结构版图进行浅复制，图 3.8 中箭头指向表示对单元结构版图，其相对应的坐标位置上进行了浅复制，坐标位置上的版图均为半径为 R 的单元结构版图的子版图，这极大降低了版图数据记录的数量，减少了版图文件大小。同时压缩算法中对于 mapping 库的建立，跨过了逐一比较，逐个生成版图的方法，这解决了版图生成时间问题。

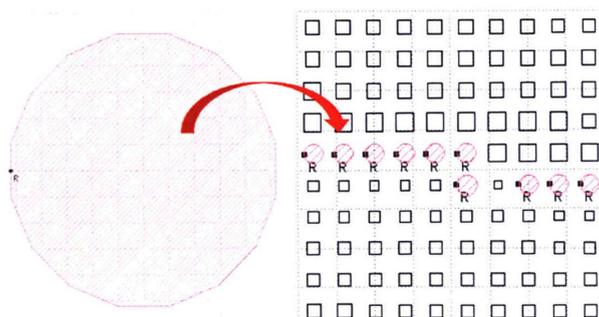


图 3.8 版图压缩算法示意图

Figure 3.8 Schematic diagram of layout compression algorithm

3.3.3 大面积超表面透镜版图压缩效果

采用上节提到的简易压缩算法对直径 4cm 大面积超表面透镜四分之一版图进行压缩, 图 3.9 为直径 4cm 大面积超表面透镜四分之一版图压缩后效果图, 图 (c) 中能清楚的看到直径 4cm 大面积超表面透镜四分之一版图大小仅仅 1.4GB, 相比于 3.3.1 节中 58.8GB 直径 2cm 的超表面透镜, 版图压缩了 42 倍, 这种压缩算法对于版图的压缩效果是十分喜人的, 完全解决了大面积版图文件大小过大导致的计算机或设备无法打开、编辑、处理的问题。

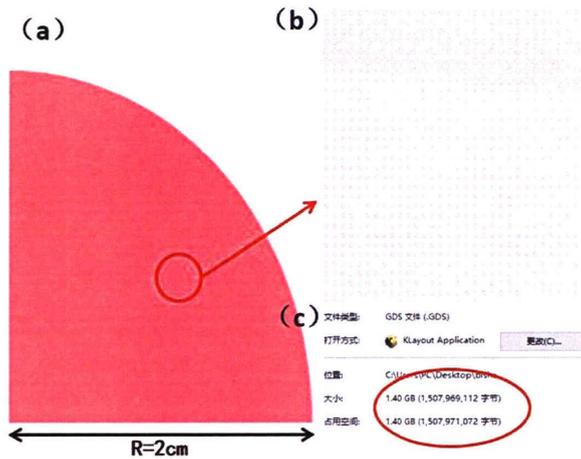


图 3.9 直径 4cm 超表面透镜 (a) 四分之一圆版图 (b) 局部放大图 (c) 压缩算法后版图文件大小

Figure 3.9 Metasurface lens with diameter of 4cm (a) 1/4 circle map (b) local magnification map (c) size of map file after compression algorithm

3.4 硅基大面积超表面透镜关键工艺方法研究

根据对大面积超表面透镜现状的调研, 工艺方法的区别主要是在光刻方式上的不同, 而本论文根据现有工艺, 创造性地提出了光刻拼接的工艺方法, 该方法既能克服电子束曝光低效率, 不能满足大量生产的问题, 又能突破现有光刻机视场的限制, 目前采用的 2×2 拼接成直径 4cm 的大面积超表面透镜的方式, 可拓展至更大面积超表面透镜的制作, 以下对工艺方法进行详细介绍。

3.4.1 硅基大面积超表面透镜工艺流程

图 3.10 为直径 4cm 大面积超表面透镜工艺流程, 该工艺采用了光刻拼接的方式光刻, 并且采用金属铬作为硬掩膜, 来进行深硅刻蚀, 详细流程如下:

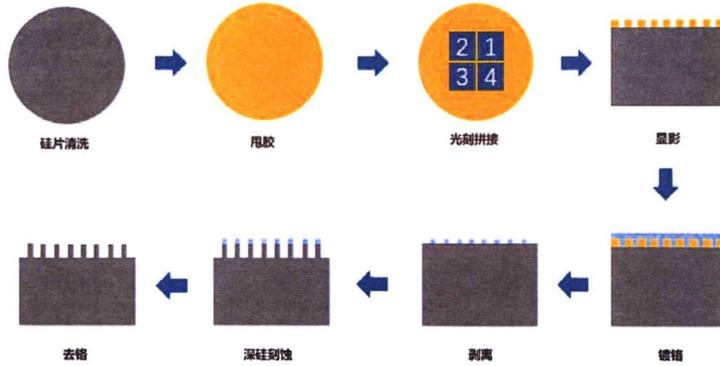


图 3.10 直径 4cm 大面积超表面透镜工艺流程

Figure 3.10 Process flow of large area metalens with diameter of 4cm

硅片清洗 将 4 英寸硅片放入丙酮中超声 5 分钟，超声完成后在表面滴入数滴 IPA，放入去离子水中进行清洗，清洗结束后用气枪吹干，并放在热板上干燥 2 分钟。

涂胶 超表面透镜设计最小线宽为 700nm，最小线宽相对较大，这里选择了实验室常用的 AZ6112 光刻胶，AZ6112 光刻胶为正胶，理论线宽能够达 500nm，足够光刻使用。选择 AZ6112 的另一个原因，是 AZ6112 光刻胶厚度较薄，后期便于剥离，由于本文主要研究采用光刻拼接工艺来实现直径 4cm 大面积超表面透镜，所以对于分辨率小、易剥离、光刻后线宽误差小的最佳光刻胶未做深入评估。



图 3.11 实验用涂胶机设备

Figure 3.11 Experimental photoresist coating machine equipment

涂胶机设定第一程式 Speed 500rad/min Time 5s, 第二程式 Speed 4000rad/min Time 30s 甩胶完成后在 100°C热板上烘烤 180s, 图 3.11 为本工艺用涂胶机。

光刻拼接 光刻是半导体工艺中最重要的一步, 也是图案转移到衬底上的关键, 图 3.10 中光刻拼接步骤, 按图案 1-4 顺序分别对衬底进行四次光刻, 四次光刻互不影响, 最终得到一个完整的图案。光刻使用 NIKON-I12 步进式光刻机, 如图 3.12 所示, 光刻精度 350nm, 套刻精度 150nm。在光刻过程中硅片全程不取出, 所涉及的拼接、对版、更换掩模版、曝光等操作的误差, 均在选择工艺方法已详细考虑, 光刻整个过程所造成的误差均小于其套刻精度 150nm, 这个误差是可以容忍的。对于拼接图案的偏移误差控制, 可以通过 Step Pitch 进行精准调节。



图 3.12 NIKON-I12 光刻机设备

Figure 3.12 NIKON-I12 lithography machine equipment



图 3.13 实验用去胶机设备

Figure 3.13 The photoresist removing machine is used in the experiment

显影 使用 3038 显影液浸泡 10s, 然后顺时针旋转、逆时针旋转 25s 使其充

分反应，显影完成后放入去离子水中冲洗，并吹干，显影后光刻胶溶解部分顶层有一层顶胶，影响后期镀膜和剥离效果，在镀铬前需要使用去胶机去顶胶，去胶机如图 3.13 所示，将参数设定为 Power 200W，Time 3min，Pressure 80，O₂ 200，去除约 250nm 的胶层厚度。

镀铬 刻蚀硅纳米柱阵列，需要大深宽比、高垂直度的深硅刻蚀，只使用光刻胶作为刻蚀掩膜无法满足要求，这里采用金属铬作为刻蚀硬掩膜，图 3.14 为电子束蒸发设备，0.1A/s 蒸发 60nm 金属铬，蒸发不均匀度 $\leq\pm 5\%$ 。

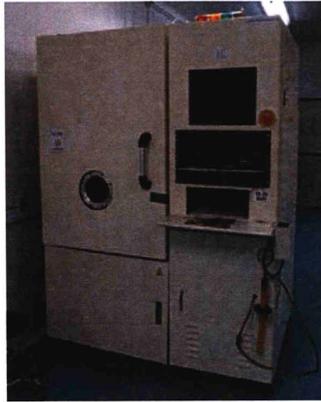


图 3.14 实验用电子束蒸发设备

Figure 3.14 Electron beam evaporation equipment for experiments

剥离 AZ6112 虽不是专用 lift-off 专用胶，但是其剥离方法比较简单，电子束蒸发完成后马上使用丙酮进行浸泡，浸泡时间 2 小时，浸泡完成后使用超声机，设定功率 40%，频率 45kHz，超声振动 1 分钟，用显微镜观察是否剥离干净，若有残余则继续使用丙酮浸泡，并使用滴管向图形表面吹气。

深硅刻蚀 深硅刻蚀设备为 ICP380，如图 3.15 所示，采用非 Bosch 工艺，通过对 SF₆, C₄F₈, Press, APC, ICP, RF, DC, He, Temp 等参数进行调节，实现硅材料高深宽比、高垂直度刻蚀。由于硅片采用 4 英寸完整硅片，所以刻蚀时间设定为 357s，来实现刻蚀高度 2.5 μm ，垂直度 90° \pm 5°的硅纳米柱刻蚀。

去铬 刻蚀完成后，需要去掉硬掩膜铬，这里采用实验室自配去铬溶液浸泡 5 分钟，然后用去离子水清洗干净，放在热板上烘干，最终得到直径 4cm 大面积超表面透镜完整器件。



图 3.15 深硅刻蚀设备 ICP380

Figure 3.15 Deep silicon etching equipment ICP380

3.4.2 硅基大面积超表面透镜线宽实验

超表面透镜通过周期性变化的硅纳米柱直径，来达到改变相位的功能，而采用光刻机进行光刻时，通过调节参数只能对某一固定线宽达到准确曝光，而超表面透镜线宽为周期性变化的，其他线宽可能有一定的误差，这就需要通过参数调节，将所有线宽误差控制在一个固定的范围，本研究采用线宽实验的方法，将线宽误差控制在 20%。线宽实验是在制作大面积超表面透镜前，使用 Nikon-I12 对 AZ6112 光刻胶进行曝光实验，实验以之前工艺经验为基础，在固定光强（设备固定，会随使用衰减）、焦距情况下，对曝光时间进行了 4×4 曝光实验，光刻后分别放入扫描电镜中进行线宽测量，并与设计值比较，计算出每个线宽误差是否控制在 20%，并选取其中较优参数。对较优参数进行微调，再进行一次曝光实验，可以对参数进行优化，选取最优解。这里需要指出由于本研究主要侧重在光刻拼接工艺的实现及误差计算，所以对线宽的要求相对宽松，如果有严格的误差限制，需要对选胶、曝光实验进行更进一步的研究。

3.4.3 硅基大面积超表面透镜刻蚀实验

本论文设计的超表面透镜硅纳米柱阵列为圆柱形，所以圆柱的刻蚀效果会对透射率和相位产生一定影响，类似于 Bosch 的螺纹型侧壁会导致透射率的降低，圆台状的硅纳米柱会影响相位，从未影响聚焦效果。因此，探索实现大深宽比、高垂直度、高度均匀、光滑侧壁的刻蚀方法十分重要。在本研究之外，对于刻蚀工艺做了较深入的实验，最终确定使用金属铬作为硬掩膜，干法刻蚀的工艺方案，

实现了最小线宽深宽比 5:1，垂直度 $90^\circ \pm 5^\circ$ ，高度不均匀度 $\leq 3\%$ ，侧壁光滑的硅纳米柱刻蚀。

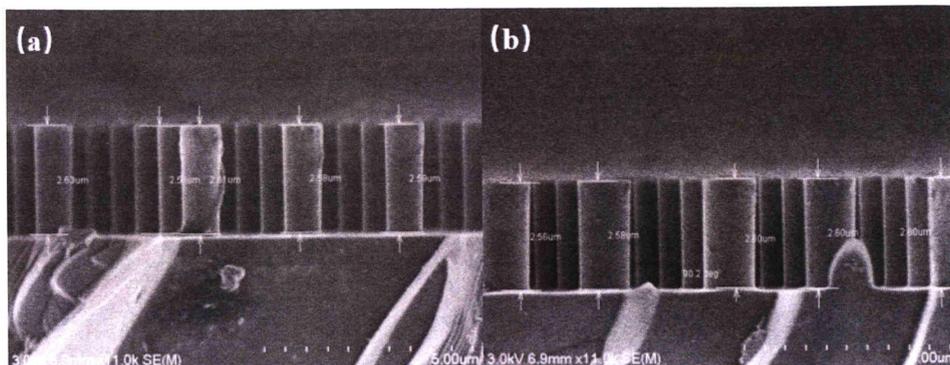


图 3.16 刻蚀后扫描电镜测量图

Figure 3.16 Scanning electron microscope measurement after etching

图 3.16 中 (a) (b) 为刻蚀实验中满足工艺要求的硅片，扫描电镜下硅纳米柱侧面测量图，共抽检 10 个硅柱，平均高度 $2.59\mu\text{m}$ ，高度不均匀度约 1.5%，垂直角度 90.2° ，侧壁光滑，实验设计版图最小线宽 500nm ，最小线宽深宽比 5.18:1，该刻蚀结果十分优异，完全能够满足直径 4cm 大面积超表面透镜对于刻蚀的工艺要求。

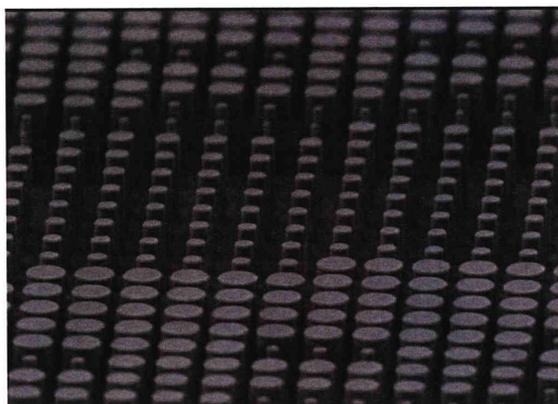


图 3.17 刻蚀后硅纳米柱俯视图

Figure 3.17 Top view of etched silicon nanocolumn

图 3.17 为刻蚀实验第二批刻蚀效果，从俯视图中可以看出，刻蚀效果十分符合要求，该刻蚀参数优异，可以迁移至直径 4cm 大面积超表面透镜刻蚀使用。

3.4.4 硅基大面积超表面透镜光刻拼接工艺

上节 3.4.1 中提到光刻拼接的工艺方法，这里首先做一个详细介绍。光刻拼接是将硅片拼接技术和光刻技术的结合，是一种单芯片多区块成型技术，克服了硅片拼接引起的旋转误差、错层误差等，又继承了光刻高效率的优点，本研究中将直径 4cm 超表面透镜完整版图拆成 4 块，每一块是一个四分之一圆，独立生成 4 个四分之一圆的版图，并分别制版。如图 3.18 所示，通过光刻形式，将 4 个四分之一圆转移到光刻胶上，拼成一个完整的直径 4cm 超表面透镜。

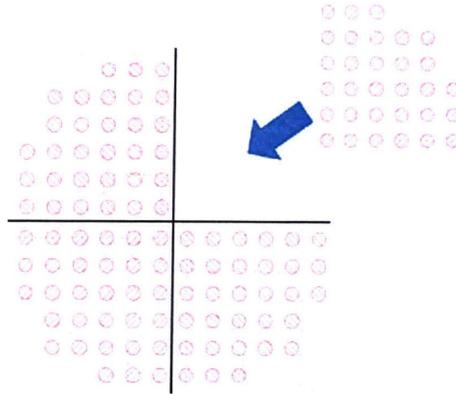


图 3.18 光刻拼接工艺示意图

Figure 3.18 Diagram of lithography splicing process

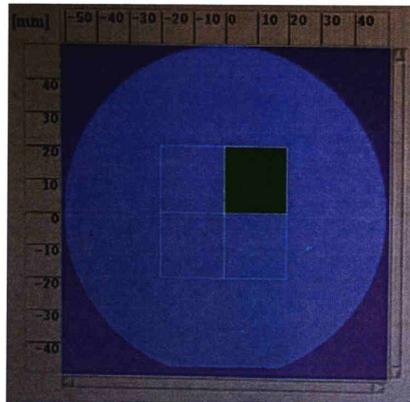


图 3.19 光刻机曝光区块设定图

Figure 3.19 Lithography machine exposure block setting

最初确定了两种光刻拼接方案，第一种为在裸片上光刻套刻标记，套刻标记

用来套刻剩余 4 个四分之一圆图案，这种方法工艺步骤过多，过于繁琐。因此采用了第二种方案，结合了对光刻设备的认知，将硅片放入设备后不予取出，这时硅片在设备中的坐标是不变的，通过更换 4 个四分之一圆的掩膜版，一次完成整个图形的光刻。图 3.19 为在光刻机上设定了四个曝光区块，依次对不同区块进行曝光，区块大小取决于图案和步进大小，也就是曝光图案和预留切割道大小。

这里需要注意两点，第一点，由于硅片未取出，所以硅片原点坐标未变，对于高精度步进式光刻来说，光刻步骤误差均可忽略；而图案之间的偏移在 3.4.1 节提到可以通过 Step Pitch 进行精准调整；第二点，该方法以 2×2 拼接工艺为例，但实际有向后兼容性，能够很好地实现 5×5 拼接工艺，适应未来对大面积超表面透镜的需求。

3.5 硅基大面积超表面透镜的表征

沿用本节大面积超表面透镜的工艺方法，最终得到了直径 4cm 大面积超表面透镜，本节将对该器件的拼接效果进行表征，并计算出光刻拼接的偏移误差。

3.5.1 硅基大面积超表面透镜直径测量

图 3.20 为直径 4cm 大面积超表面透镜外观图，从外观看，超表面透镜结构完整，没有肉眼可见的缺失，对其使用直尺进行测量，直径达到设计要求为 4cm。

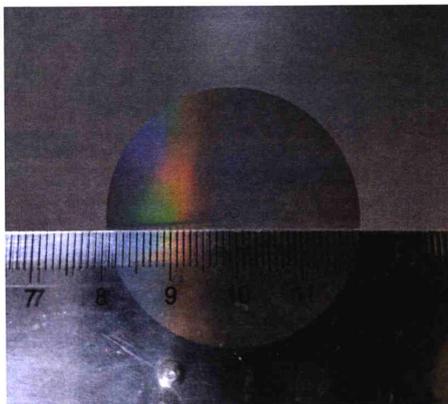


图 3.20 直径 4cm 大面积超表面透镜测量图

Figure 3.20 Large area metasurface lens measurement with a diameter of 4cm

3.5.2 拼接偏移误差计算

为了说明光刻拼接工艺的可行性，确定拼接图形间的偏移误差，需要有一套

确定拼接误差的方法，在确定方法前，首先要在上亿个图形中间找到4块版图的拼接间隙，才能更好地进行下一步的测量。

拼接间隙寻找方法 图 3.21 结合设计版图，说明了如何找到拼接间隙。从图中可以看到，拼接后的版图之间均有一处白色间隙，我们认为它为拼接间隙，我们把拼接间隙分为上下左右区块，上方区块为第一块版图和第二块版图拼接形成的。从完整版图中心向上，可以看到中心区域均为小圆形，垂直向上某一区域突然变为大圆形，而且这个区域有 24 个小圆形嵌在大圆形内，24 个圆形的对称轴位置（红线），就是拼接间隙，其他区块方法类似。这里要强调的是，24 个圆形不是故意设计，而是相位分布的自然结果，规律是通过观察设计版图获得的，所以方法不唯一，能够在亿万个图形中确定拼接间隙即可。

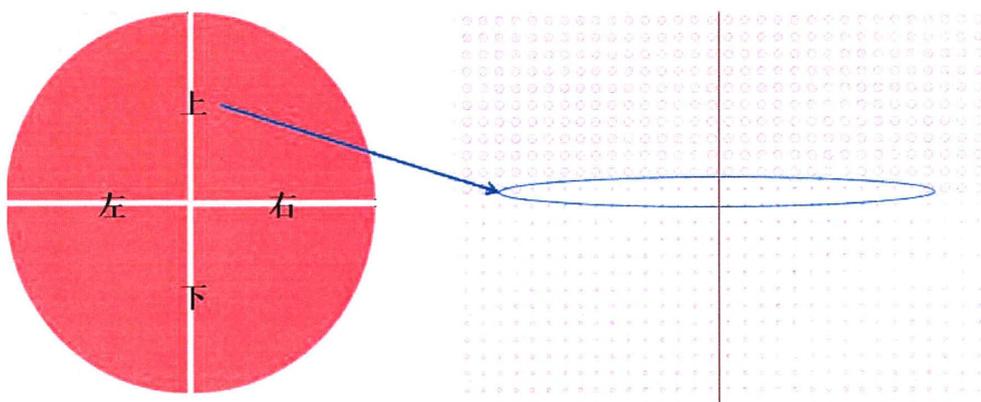


图 3.21 完整拼接后版图示意图

Figure 3.21 The layout diagram after complete splicing

计算方法 图 3.21 中对拼接间隙分为了上下左右区块，且说明了寻找拼接间隙的方法，这里通过扫描电镜对四个区块之间的位置关系进行测量，并详细说明了拼接误差的计算方法。

图 3.22 为下方区块扫描电镜测量图片，图 (a) 中测量距离 x_1 为 $2.41\mu\text{m}$ ， x_1 为拼接间隙距离，测量距离 x_2 为 $2.30\mu\text{m}$ ，所以 $\Delta x = x_1 - x_2$ 为 $0.11\mu\text{m}$ ，也就是说下方区块由第三块和第四块版图拼接而成，它们的横向拼接误差为 $0.11\mu\text{m}$ 。图 (b) 中测量拼接间隙两侧相邻的圆柱，首先测量它们的圆心间距离 y_1 为 $2.43\mu\text{m}$ ，再测量两圆柱之间的水平距离 y_2 为 $2.41\mu\text{m}$ ，所以 $\Delta y = \sqrt{y_1^2 - y_2^2}$ 为 $0.31\mu\text{m}$ 。按照此方法分别计算上左右区块拼接偏移误差，结果记录在表 3.1 中。

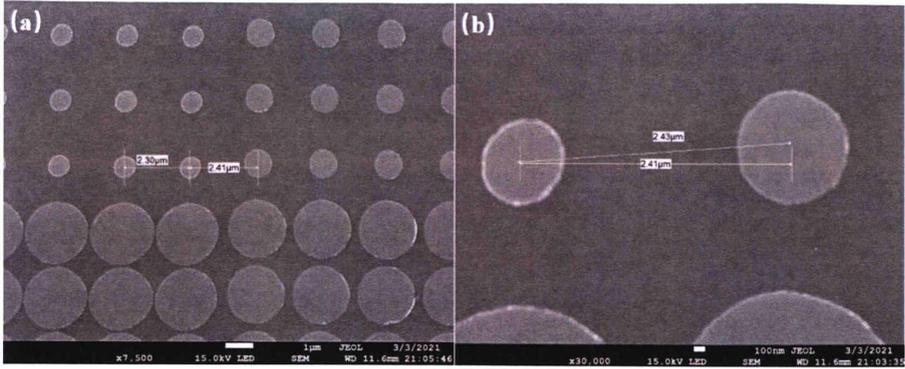


图 3.22 下方区块拼接误差测量图

Figure 3.22 The bottom block splicing error measurement figure

表 3.2 中记录的数据可以看出，光刻拼接工艺制作直径 4cm 大面积超表面透镜横向最大拼接误差为 $0.38\mu\text{m}$ ，纵向最大拼接误差为 $0.31\mu\text{m}$ ，这个误差对于器件来说是微不足道的，因此采用光刻拼接工艺完成大面积超表面透镜的制作是可行的，且误差在百纳米级别。

表 3.2 拼接误差测量及计算结果记录表（微米）

Table 3.2 Record of stitching error measurement and calculation results (micron)

位置	x_1	x_2	Δx	y_1	y_2	Δy
上方	2.48	2.3	0.18	2.48	2.48	0
下方	2.41	2.3	0.11	2.43	2.41	0.31
左方	2.43	2.40	0.38	2.41	2.25	0.16
右方	2.39	2.38	0.21	2.38	2.31	0.07

这里需要指出，上述测量同一版图内一个周期设计尺寸为 $2.5\mu\text{m}$ ，测量尺寸约 $2.4\mu\text{m}$ ，这里的误差可能由测量时引入，光刻拼接中的偏移误差，可能来自于制版误差。对于拼接间隙的调整，可以通过对光刻机步进参数的修改进行。

3.5.3 硅基大面积超表面透镜聚焦测试

为了验证设计聚焦效果，说明线宽实验和刻蚀实验优化的作用，对大面积超表面透镜进行等比例缩小，制作了一个直径 6.75mm 、焦距 27mm 、F 数为 4 的超表面透镜，工作波长 $4.35\mu\text{m}$ 。使用黑体辐射源和中波红外探测系统，对大面

积超表面透镜进行探测。图 3.23 中 (a) 为焦距位置焦斑和 (b) 为半高宽测试图, 所设计大面积超表面透镜, 在焦距处有聚焦效果, 且半高宽为 $20\mu\text{m}$, 透射率高于 50%。能够看出测试与仿真的半高宽存在明显差异, 这是由于线宽实验将线宽误差限制在 20%, 以及探测器分辨率低导致的。

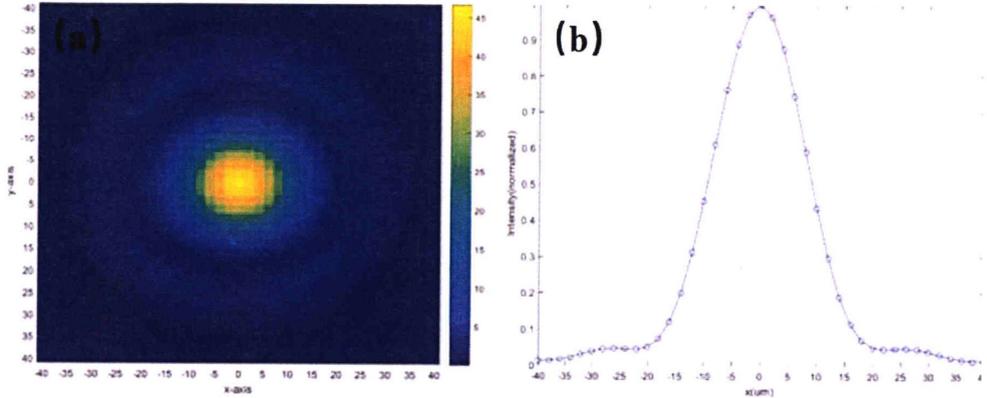


图 3.23 焦距位置 (a) 焦斑 (b) 半高宽

Figure 3.23 Focal length position (a) focal spot (b) FWTH

3.6 本章小结

本章从大面积超表面透镜研究现状出发, 设计了工作波长 $4.35\mu\text{m}$, 直径 4cm , 焦距 16cm 的大面积超表面透镜, 提出了一种便于应用的版图压缩算法, 将直径 4cm 大面积版图压缩了 42 倍, 解决了版图过大无法制版问题。根据现有工艺, 提出了光刻拼接的工艺方法, 对大面积版图进行制作, 该方法产生的拼接误差小, 对器件影响可以忽略不计, 并可拓展到更多数量的拼接, 以制作更大面积的超表面透镜。

第4章 大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法研究

4.1 引言

单面超表面透镜设计上存在着色差、像差等问题,为了解决此问题,大量研究将方向转到了双面超表面透镜。研究表明,在双面图案对准情况下,双面超表面透镜能够克服单面存在的色差、像差问题,双面图案偏移越小,效果越好。目前有研究记载,双面超表面透镜的偏移误差为 $2\mu\text{m}$,这也只是其估计偏移误差,并不是实际测量的偏移误差准确值。对于大面积超表面透镜,双面工艺是不可避免的,研究一套成熟的、可测量双面偏移误差的成熟工艺是有必要的。本章从此研究背景出发,对大面积双面超表面透镜进行了工艺研究,结合现有半导体工艺,成功制作了直径 5mm 的大面积双面超表面透镜,偏移误差小于 $2\mu\text{m}$,并实现了真实可测,为更大面积双面超表面透镜的工艺提供了一套可行性方法。

4.2 大面积双面超表面透镜的工艺方法

大面积双面超表面透镜工艺,其难点主要为需要在衬底两面制作超表面透镜图案,且需要保证偏移误差尽可能小,在设计上超表面透镜图案最小线宽一般在百纳米,而目前双面光刻机的精度只有微米级别,这就无法使用双面光刻机一次完成,增加了工艺复杂度。同时,由于一些超表面透镜的设计精度要求较高,可能需要电子束曝光等高精度设备,如何实现高精度设备双面光刻也是一个难点。在光刻完成后,如何完整的表征偏移误差,而不是估计偏移误差,同样也困扰着我们。本节针对这些问题,依次进行解决,详细方案如下。

4.2.1 双面超表面透镜工艺流程

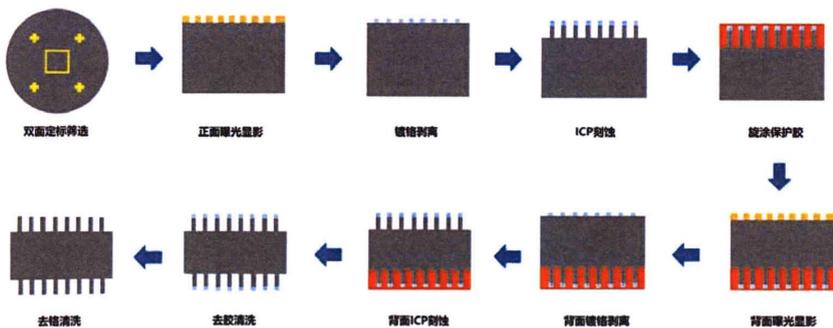


图 4.1 双面大面积超表面透镜工艺流程

Figure 4.1 Process flow of double-sided large area metalens

图 4.1 为双面大面积超表面透镜工艺流程图，光刻工艺采用电子束曝光，整个工艺流程也是围绕着电子束曝光展开的，如果欲更换光刻工艺方式，则后续步骤需要围绕光刻工艺展开更改，流程如下：

双面定标筛选 使用双面光刻机，如图 4.2 所示，双面光刻机最小线宽 $2\mu\text{m}$ ，背面套刻精度 $1\mu\text{m}$ 。在衬底的正反两面制作电子束曝光套刻使用的十字标记，十字标记为金材料，高度 300nm ，制作完成后，使用红外成像分析仪对样品进行筛选，筛选出标记偏移误差小，符合要求的样品进行下一步双面图案制作。



图 4.2 双面光刻使用设备

Figure 4.2 Equipment used for double-sided lithography

正面曝光显影 这里光刻采用电子束曝光工艺，上一步骤中已经完成了电子束曝光需要使用的套刻标记，电子束曝光套刻精度 40nm ，完全满足制作需求，电子束曝光时间与曝光面积、曝光剂量成正比，束流大小成反比， 5mm 的超表面透镜图形图案所需时间较长。电子束曝光使用 PMMA4 光刻胶，转速 4000rpm 进行匀胶，胶厚 200nm ，使用电子束曝光设备对直径 5mm 双面超表面透镜正面版图进行处理，曝光剂量 810 。设定完毕后，将图案按照套刻标记的位置，套刻进正面硅衬底上。曝光完成后正常显影，并在热板上进行后烘 5 分钟。

镀铬剥离 使用 RIE 刻蚀机通氧气对样品进行去胶，功率 30 瓦，时间 10 秒，由于 PMMA4 胶厚度只有 200nm ，所以去顶胶时间不宜过长。重复 3.4.1 节电子

束蒸发镀铬。蒸镀完毕后,使用 NMP 溶液 80 摄氏度水浴加热 3 小时,并使用超声振动 1 分钟,将铬金属层剥离。

ICP 刻蚀 ICP 刻蚀工艺步骤与 3.4.1 节中深硅刻蚀步骤相同,刻蚀 $2.5\mu\text{m}$ 高度的硅纳米柱,刻蚀最小线宽深宽比达 5:1,垂直度 $90^\circ\pm 5^\circ$,高度不均匀度 $\leq 3\%$ 。

旋涂保护胶 正面图形完成后,需要对背面图形进行制作,制作时需要将正面已刻蚀图形进行涂胶保护,涂胶厚度需要大于刻蚀深度与铬掩膜的高度,这里使用厚度大于 $3\mu\text{m}$ 的 AZ 系列光刻胶,在后期去胶清洗时使用丙酮容易去除。

背面曝光显影 背面曝光显影同正面曝光显影。

背面镀铬剥离 背面镀铬剥离同正面镀铬剥离,这里要指出,在剥离过程中正面保护胶会被去除,这里需要在进行下一步骤前,使用保护治具将正面重新旋涂保护胶,再继续向下进行。

背面 ICP 刻蚀 背面 ICP 刻蚀同正面 ICP 刻蚀。

去胶清洗 使用丙酮浸泡 3 小时,并按照 3.4.1 节进行超声清洗,这里需要使用特殊花篮进行清洗,双面图案不可碰触杯底。

去铬清洗 使用去铬溶液将两面图案的硬掩膜去除,并进行去清洗,最终得到直径 5mm 的大面积双面超表面透镜。

4.2.2 大面积双面定标设计

双面定标设计是本章节的一个重点,标记的设计直接影响到后续套刻的精度。这里双面定标使用标记分为两类,第一类为双面光刻机使用背套标记,下文统一称作背套标记;第二类为电子束曝光使用套刻标记,下文统一称作套刻标记。

背套标记是双面光刻机使用标记,它包含两个,第一个为正面背套标记,第二个为反面背套标记,如图 4.3 所示。其中图 (a) 为正面背套标记,它采用了两段小长条游标,宽度为 $5\mu\text{m}$ 。所谓游标,这里相当于一个尺子,在设备上根据游标来进行背面套刻。尽量增加游标的数量和图形的复杂度(标记 1A),以确保背套时有更多的参考,增加背套准确性。图 (b) 为反面背套标记,反面背套标记采用了一段大长条游标,宽度为 $4\mu\text{m}$,比正面背套标记小 $1\mu\text{m}$,恰恰是这 $1\mu\text{m}$ 的差距成为后期筛选合格样品的关键。正反面被套标记所有设计都是对应的,坐标是相同的。当双面光刻机背套正确时,如图 4.3 中 (c) 所示,两个标记完全套刻在一起。通过筛选,将游标套刻在一起的样品选出,样品偏移小于 $0.5\mu\text{m}$ 。

套刻标记设定简单，根据使用电子束曝光设备要求进行设定，正反面套刻标记尺寸相同，坐标位置也需要保持一致，这样在背面套刻准确的前提下，套刻标记能够达到基本重合。

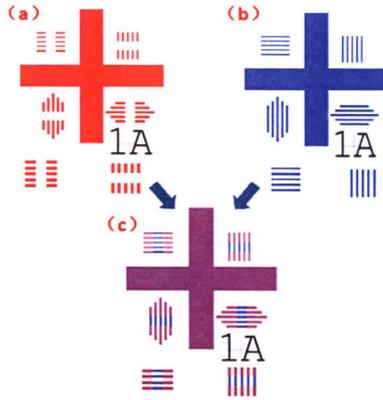


图 4.3 背套标记 (a) 正面背套 (b) 反面背套 (c) 背套重合标记效果图

Figure 4.3 Back cover mark (a) front back cover mark (b) back cover mark (c) back cover overlap effect schematic diagram

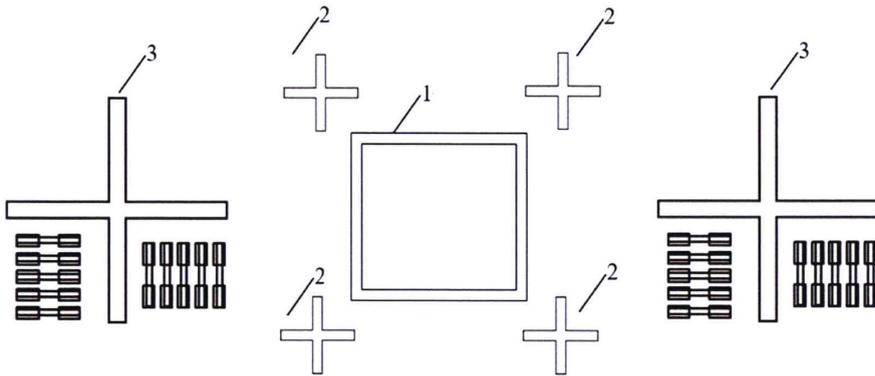


图 4.4 正反面版图标记重合示意图

Figure 4.4 Schematic diagram of overlap of front and back layout markers

图 4.4 为正反面版图标记重合示意图，能够说明整个光刻板的标记布局，标记仅供问题说明，比例大小非正常比例。图中标号 1 为后期测量设计标记，在下节中将介绍其作用。标号 2 为电子束曝光的套刻标记，标号 3 为双面光刻的背套标记。当双面背套准确情况下，标号 1 和 2 的标记完全重合，标号 3 的标记重合，且其游标互相嵌套。

4.2.3 大面积双面超表面透镜样品筛选

筛选样品是面积双面超表面透镜的一个重要步骤，筛选依据是通过游标，对游标套刻在一起的样品筛选出来，图 4.5 为游标放大图，以此来说明筛选的原理。图中两段小长条游标（红色）和一段大长条游标（蓝色）套刻在一起，且两个游标宽度相差 a ，放大后可以看出，只要两个游标套刻在一起，那么双面光刻机背套的精度一定小于 $\frac{a}{2}$ 。这种方法能够结合游标的设计，能够筛选出偏移误差小于任意值的样品。样品偏移误差越小，套刻标记偏移误差越小，使用电子束曝光套刻的精度越高。本设计正面背套标记宽度为 $5\mu\text{m}$ ，反面背套标记宽度为 $4\mu\text{m}$ ，筛选出的样品偏移误差小于 $0.5\mu\text{m}$ ，也就是说正反面衬底上，电子束曝光使用的套刻标记之间，偏移误差控制在 $0.5\mu\text{m}$ 以内。这里要注意，这种套刻的优点在于不需要一味的追求小线宽来实现高精度对准，双面光刻机光刻的最小线宽为 $2\mu\text{m}$ ，在进行曝光小线宽时，很难实现 $2\mu\text{m}$ 以下的线宽。采用游标对齐的方式，游标线宽越小，对准越精确，而 $2\mu\text{m}$ 的限制很难提高对准精度。这里设计采用 $4\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$ 线宽宽度，并采用游标套刻的方式，很好的匹配率光刻机的线宽限制，同时通过套刻的差值，实现了百纳米偏移误差的控制。

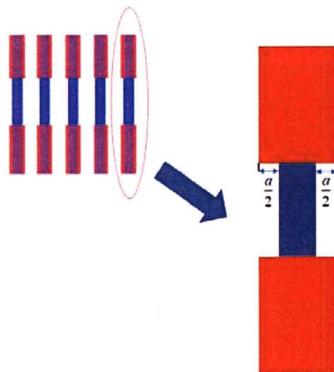


图 4.5 放大的游标示意图

Figure 4.5 Enlarged diagram of the cursor

通过游标筛选的原理已经阐述的十分清楚，那么如何筛选呢？我们知道硅片是不透明的，通过双面光刻机制作的带有标记的样品，无论是正面观察，还是反面观察，都没有办法观察到游标之间的套刻关系，这也就是为什么其他研究中只

能使用估计偏移误差，而无法准确观察到图案的偏移。本研究，另辟蹊径地利用了波长与物质之间透射关系，使用红外摄像分析仪进行筛选。红外摄像分析仪，是 MEMS 加工中比较常见的设备，主要用于观察材料背面的腔体和正面图案之间的位置关系。红外摄像分析仪的原理，主要是利用硅材料和金属材料对红外波长的光，透射率的差异，这种差异表现出不同的透反射现象。硅材料对红外波长是透射的，而金属材料存在反射，这种现象通过感应平台成像表现出来。图 4.6 为红外摄像分析仪设备图片，红外摄像分析仪下能够很清楚的观察到衬底背面的金属。



图 4.6 红外摄像分析仪设备图

Figure 4.6 Infrared camera analyzer equipment diagram

双面光刻标记完成的样品正面朝上，红外摄像分析仪下成像如图 4.7 和图 4.8。图 4.7 为红外摄像分析仪下观察背套标记图，其中图 (a) (b) 中设计的背套标记正面为两段小长条游标，反面为一段大长条游标，图中可以看到正面的金属是亮的，背面的金属是暗的，正面游标内有一段大长条阴影嵌入其中，说明背面的游标准确套刻进了正面的游标。图 (c) 为大尺寸辅助游标，能够更加清楚的看出，正面的游标和反面的游标精准度套刻在了一起，凭此筛选出标记偏移误差小于 $0.5\mu\text{m}$ 的样品。图 4.8 为红外摄像分析仪下套刻标记图，图 (a) 中标记很精准的对齐，周边没有任何偏移，为了更加形象，特意增加了故意对偏的样品，来说明红外摄像分析仪的准确性。图 (b) 很清晰的看出正面的金属和反面的金属有一个明显的偏移，这种样品能够通过红外摄像分析仪，被筛选掉。

4.3 大面积双面超表面透镜的测量方法

上一小节主要介绍了电子束曝光前样品筛选,本小节将从双面超表面透镜器件完成角度,详细介绍大面积双面超表面透镜偏移误差的测量方案,并对已完成器件进行表征,详细说明如何计算表征后器件的偏移误差。

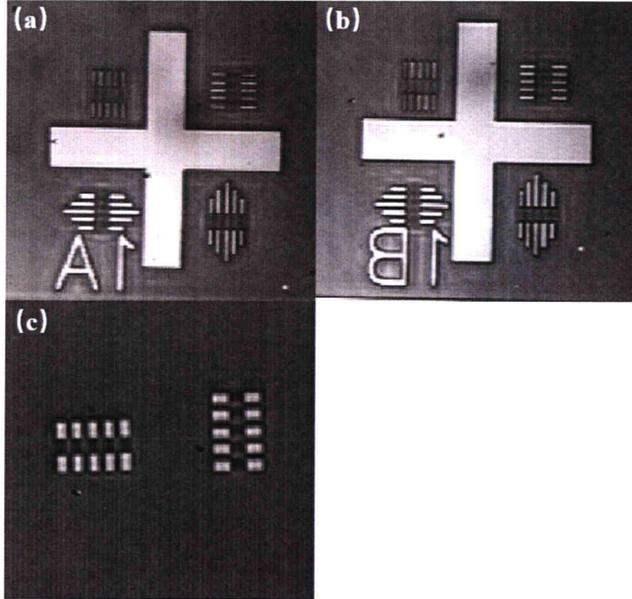


图 4.7 红外摄像分析仪下背套标记 (a) 左标 (b) 右标 (c) 补充标记

Figure 4.7 Infrared camera analyzer under the back set of mark (a) left mark (b) right mark (c) supplementary mark

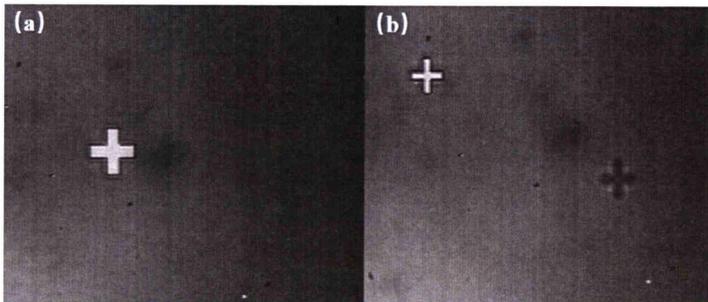


图 4.8 红外摄像分析仪下套刻标记 (a) 对准 (b) 未对准图标

Figure 4.8 Infrared camera analyzer under the set of marking (A) alignment (B) not alignment icon

4.3.1 大面积双面超表面透镜偏移误差测量方案

在 4.2.2 节中我们提到，图 4.4 标号为 1 的标记，这里对其进行详细介绍。在筛选出标记偏移误差小于 $0.5\mu\text{m}$ 的样品后，使用选出样品进行直径 5mm 的大面积双面超表面透镜的制作，为了方便对电子束曝光的偏移误差进行定量的测量，这里设计了标号为 1 的正方形标记，后面统称为正方形标记。该标记设计尺寸需要根据超表面透镜的设计尺寸进行调节，图 4.9 为正方形标记与直径 5mm 超表面透镜图案关系示意图。从示意图中可以看出，正方形标记和图案中心是重合的，且正方形标记比图案大。将右边缘放大，可以看到临近正方形边缘处的图案是一排圆形，最中间的圆形被标注了出来。测量圆形到正方形边缘的距离为 $4\mu\text{m}$ ，也就是说在设计标记版图时，设定正方形标记边长比图案直径大 $8\mu\text{m}$ ，圆形图案对应位置到正方形四边的距离均为 $4\mu\text{m}$ ，以正方形标记作为参考标记，来测量电子束曝光后，双面图案的偏移误差。

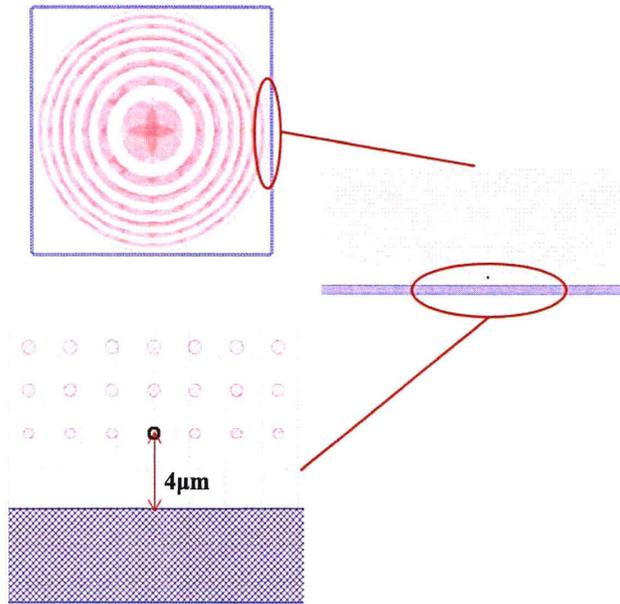


图 4.9 正方形标记与直径 5mm 超表面透镜关系示意图

Figure 4.9 Diagram of relation between square mark and metalens with 5mm diameter

根据正方形标记设计，这里给出了电子束曝光偏移误差的测量方案。假设在筛选样品时，双面标记是没有误差的，正反面的所有标记是完全重合的。根据套刻标记，可以将图案通过电子束曝光分别套刻进硅片的正反两面，此时加工完的超表面透镜图案应该在正方形标记内。根据假设，正反面所有标记整体的中心是

重合的，如果套刻准确，正反面的超表面透镜图案中心也应是重合的，这时正反面的所有标记整体以及透镜图案有共同的坐标中心，这是最理想的情况。使用扫描电镜对加工完成的器件正反面分别进行测量，测量图案上下左右四个位置上指定圆形，到正方形四边的距离，通过距离可以计算出套刻图案中心与正方形标记中心的偏移误差，由于正反面正方形标记的中心是相同的，所以根据正反两面图案与正方形标记之间的关系，就可以计算出电子束曝光的偏移误差。这时再将忽略的偏移误差考虑进计算结果，此时得到的误差就是最终大面积双面超表面透镜的偏移误差。

能够看出，使用这种测量方案，能够很好的定量测量双面超表面透镜的偏移误差。本研究加工的大面积双面超表面透镜，筛选出的样品标记偏移误差小于 $0.5\mu\text{m}$ ，而电子束曝光的套刻精度仅有 40nm ，理论上只要能将样品标记尺寸制作准确，并筛选出标记偏移误差小的样品，双面超表面透镜套刻误差可以忽略不计。这里需要指出，不是所有的双面超表面都需要正方形标记，在进行有功能双面超表面透镜制作时，正方形标记会影响器件的功能，正方形标记仅作为实验阶段，测量电子束曝光套刻误差的参考，当实验成熟或者大量实验的套刻误差被做了规律性统计后，可以将正方形标记去除。

4.3.2 大面积双面超表面透镜表征

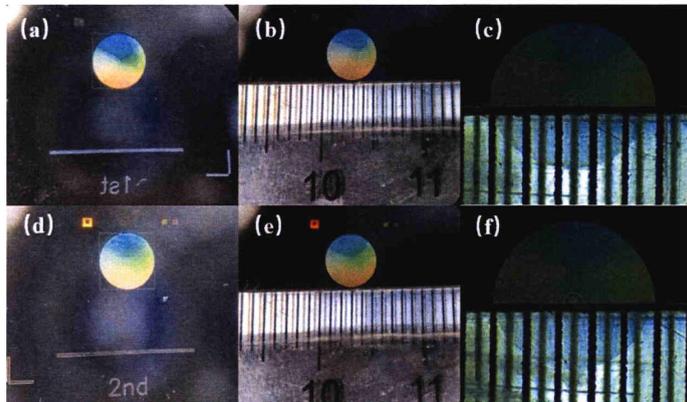


图 4.10 直径 5mm 大面积双面超表面透镜正面 (a) (b) (c) 反面 (d) (e) (f) 外观测试图

Figure 4.10 Large area double-sided metalens with a diameter of 5mm front (a) (b) (c) and back (d) (e) (f)

外观测量 直径 5mm 大面积双面超表面透镜加工完成后,对其进行表征测试,已验证本研究提出的方法是否正确可行。图 4.10 中 (a) (d) 分别为正反两面超表面透镜的外观图,在途中能够很清晰的观察到正方形标记,图 (b) (e) 测量正反面超表面透镜直径为 5mm,图 (c) (f) 为 (b) (e) 对应放大测量图。

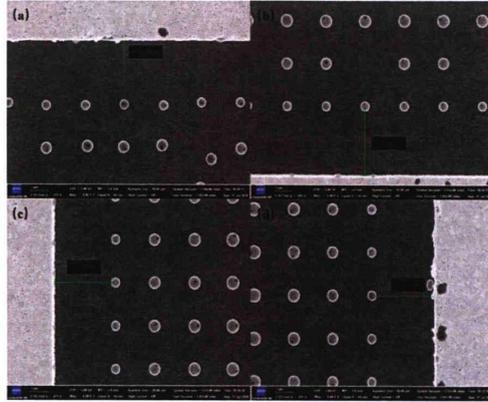


图 4.11 正面图案到 (a) 上边 (b) 下边 (c) 左边 (d) 右边长的距离

Figure 4.11 Front pattern to (a) length on top (b) length on bottom (c) length on left (d) length on right

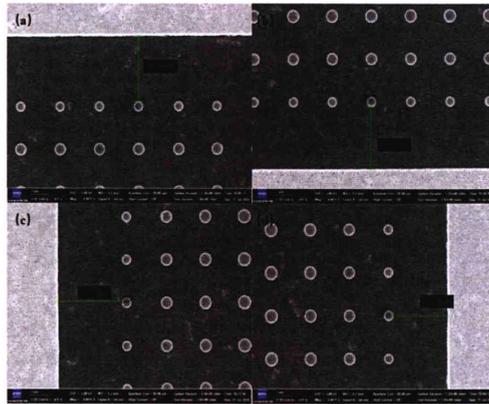


图 4.12 反面图案到 (a) 上边 (b) 下边 (c) 左边 (d) 右边长的距离

Figure 4.12 Back pattern to (a) length on top (b) length on bottom (c) length on left (d) length on right

电子束曝光偏移误差 使用扫描电镜对正面超表面透镜图案进行测量,测量对应圆形位置到正方形四边的距离,表征测量数据如图 4.11 所示,测量到上下左右四边长的距离分别为 $3.154\mu\text{m}$, $3.419\mu\text{m}$, $3.28\mu\text{m}$, $3.377\mu\text{m}$ 。使用相同方式

对反面图案进行测量表征测量数据如图 4.12 所示, 测量到上下左右四边长的距离分别为 $3.489\mu\text{m}$, $3.308\mu\text{m}$, $3.74\mu\text{m}$, $3.168\mu\text{m}$ 。

4.3.3 大面积双面偏移误差计算

双面超表面透镜的偏移误差主要包含两个部分, 第一部分为筛选样品时, 标记的偏移误差; 第二部分为测量指定圆到正方形标记四边长的距离, 计算出电子束曝光偏移误差, 两个误差的叠加即为双面超表面透镜的偏移误差。假设标记的偏移误差为 a , 正面超表面图案到上下左右四边长的距离分别为 b_1, c_1, d_1, e_1 , 反面超表面图案到上下左右四边长的距离分别为 b_2, c_2, d_2, e_2 , 那么正面图案中心坐标为 $\left(\frac{b_1-c_1}{2}, \frac{d_1-e_1}{2}\right)$; 反面图案中心坐标为 $\left(\frac{b_2-c_2}{2}, \frac{d_2-e_2}{2}\right)$, 正反面超表面透镜图案中心偏移距离为 $\frac{\sqrt{(b_1-c_1-b_2+c_2)^2+(d_1-e_1-d_2+e_2)^2}}{2}$, 这个偏移距离即为电子束曝光的偏移误差。通过标记偏移误差和电子束曝光偏移误差的叠加, 得到双面超表面透镜的偏移误差公式:

$$\Delta P \leq a + \frac{\sqrt{(b_1-c_1-b_2+c_2)^2+(d_1-e_1-d_2+e_2)^2}}{2} \quad \dots (4.1)$$

将 4.3.2 节表征结果带入公式(4.1), 其中 b_1, c_1, d_1, e_1 分别为 $3.154\mu\text{m}$, $3.419\mu\text{m}$, $3.28\mu\text{m}$, $3.377\mu\text{m}$; b_2, c_2, d_2, e_2 分别为 $3.489\mu\text{m}$, $3.308\mu\text{m}$, $3.74\mu\text{m}$, $3.168\mu\text{m}$; 标记偏移误差 $a \leq 0.5\mu\text{m}$, 所以偏移误差 $\Delta P \leq 1.304\mu\text{m}$ 。

这里需要指出, ΔP 为双面超表面透镜的最大偏移误差, 是因为将所有偏移误差均视为相反方向的最大误差, 通过对两个误差的进一步分析, 可以更深入确定标记以及超表面透镜图案与中心位置的关系, 从而对偏移误差有更精确的判断。

可以看出, 采用本节的方法制作的大面积双面超表面透镜的偏移误差小于等于 $1.304\mu\text{m}$, 远比当前研究估计偏移误差 $2\mu\text{m}$ 小, 且双面超表面透镜的工艺方法可行性强, 对准精度高, 适合大批量生产需求。所提及的偏移误差测量及计算方法, 能够准确反映出超表面透镜正反两面图案的真实偏移情况, 定量的计算出偏移误差。

4.4 本章小结

本章根据双面超表面透镜的研究,提出了大面积双面超表面透镜的工艺方法,通过双面定标及光刻兼容的方法,能够实现大部分大面积双面超表面透镜的制作,且制作工艺简单,效率高,易于大规模生产。针对目前双面超表面透镜偏移误差无法测量问题,通过工艺与设计结合,创造性的提出了大面积双面超表面透镜的测量方法,成功制作了直径 5mm 大面积双面超表面透镜,通过提出的测量方案,计算出偏移误差小于等于 $1.304\mu\text{m}$,精度高于当前双面超表面透镜研究的精度,为大面积双面超表面提供了一种可信赖的方案。

第5章 结论与展望

5.1 论文主要内容

超表面透镜的面积限制了在大型设备的应用范围,目前,国内外对大面积超表面透镜的研究,最大直径停留在2cm。本文针对当前瓶颈提出了光刻拼接的工艺方案,解决了大面积版图制版问题,实现了直径4cm的大面积超表面的制作,并将其拼接误差控制在百纳米以内,该误差对聚焦成像等功能可以忽略不计。在大面积超表面透镜工艺之外,针对当前大面积双面超表面透镜拼接误差无法测量问题,提供了可行的解决方案。经实验验证,该工艺方案效率高、精度好,且能够准确测量出双面超表面透镜的偏移误差,解决了当前双面超表面透镜估计偏移误差的问题。

本论文的主要工作如下:

1.为解决大面积版图文件内存过大,电子束曝光或者制版计算机无法处理问题,从版图存储原理出发,提出了一种简易的版图压缩算法,该算法不需要非常复杂的脚本,将尺寸2cm版图从58.8GB压缩到了1.4GB,压缩了42倍,压缩后版图大小完全能够满足电子束曝光或者光刻制版要求,研究结果有望应用于内存过大的周期性版图优化。

2.为打破当前大面积超表面透镜直径2cm工艺瓶颈,提出了光刻拼接的工艺方式,成功制作了直径4cm的大面积超表面透镜,所制作超表面透镜的拼接误差小于等于 $0.38\mu\text{m}$ 。在拼接光刻工艺之外,进行了线宽实验,将线宽误差控制在20%以内;同时进行了刻蚀实验,所得刻蚀参数能够实现最小线宽深宽比5:1,垂直度 $90^\circ\pm 5^\circ$,高度不均匀度 $\leq 3\%$ 的深硅刻蚀,研究内容有望应用于遥感卫星、天文望远镜等大型设备中代替传统光学系统。

3.为解决当前双面超表面透镜对准精度差、偏移误差无法测量问题,提出了大面积双面超表面透镜的工艺与测量方法,实验验证了该方法的可行性,并成功制作了直径5mm的大面积双面超表面透镜,拼接误差小于等于 $1.304\mu\text{m}$,研究内容有望应用于MEMS双面工艺、双面超表面透镜的制作等领域。

相比现有的大面积超表面透镜研究,本文研究工作的创新主要如下:

1.简化了文件过大版图的优化方法,当前大面积超表面透镜版图压缩效果虽

然更好，但是算法过于繁琐，本文提出的压缩算法从版图存储原理出发，脚本更加简单，压缩效果足够后期处理使用；突破了当前最大面积超表面透镜尺寸，当前最大面积超表面透镜直径为 2cm，而通过本文提出的工艺方案，制作了直径 4cm 的大面积超表面透镜，面积为当前研究的 4 倍，该方法可以拓展到更大面积超表面透镜的制作。

2.提出了可行性好的大面积双面超表面透镜工艺方案。当前双面超表面透镜工艺方案，无法确认偏移误差，凭借经验摸石头过河的方式，工艺效率和精度并不高，而本文中提出的筛选方案，极大提高了双面超表面透镜对准精度，满足大规模生产需求。

3.提出了大面积双面超表面透镜偏移误差测量方案。当前双面超表面透镜偏移误差无法定量测量，只能估计偏移误差，而本文提出的测量方案，能够精确地测量双面图案的偏移误差。

5.2 研究工作展望

目前，对于大面积超表面透镜的工艺研究仍然处于一个初始阶段，未来应用于大型光学系统的道路艰难且漫长，对于大面积超表面透镜，未来有望从以下几个方面进行突破：

1.本文所提出的光刻拼接的工艺方式，实现 2×2 图形拼接是十分容易的，并且可以拓展至更多图形拼接，但是随着图形数量的增加，工艺复杂度提高，对于不平整的硅片来说，刻蚀的不均匀度增加。因此，采用先进的封装工艺，来实现超表面透镜器件间的拼接，是未来可以深入研究的工艺方案。

2.本文所提出的大面积双面超表面透镜的工艺方案，是现有工艺设备下的可行性工艺方案，随着半导体工艺的愈发成熟，高精度双面光刻机的使用，可以颠覆整个大面积双面超表面透镜的工艺方案。因此，高精度双面光刻机随着科技的发展，一定会投入使用。

3.本文所提出的方案均为设计、工艺、测试、设备的结合，因此在未来的设计中，需要融入更多因素来解决困扰的问题，多专业融合是必然的趋势。

参考文献

- [1] 马明祥. 光学的发展历史概述[J]. 大众科技, 2007, 000(011):82-83.
- [2] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-Free Ultrathin Flat Lenses and Axicons at Telecom Wavelengths Based on Plasmonic Metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [3] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. Nature Communications, 2016, 7.
- [4] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays[J]. Nature Communications, 2015, 6.
- [5] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. Nature Communications, 2018, 9.
- [6] Chen W T, Zhu A Y, Khorasaninejad M, et al. Immersion Meta-Lenses at Visible Wavelengths for Nanoscale Imaging[J]. Nano Letters, 2017, 17(5): 3188-3194.
- [7] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 220-+.
- [8] Chen X, Huang L, Muehlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. Nature Communications, 2012, 3.
- [9] Groeover B, Chen W T, Capasso F. Meta-Lens Doublet in the Visible Region[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 4902-4907.
- [10] Kang M, Feng T, Wang H-T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [11] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: Versatile multifunctional photonic components[J]. Science, 2017, 358(6367).
- [12] 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.
- [13] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral Chiral Imaging with a Metalens[J]. Nano Letters, 2016, 16(7): 4595-4600.
- [14] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, et al. Achromatic Metalens over 60 nm Bandwidth in the Visible and Metalens with Reverse Chromatic Dispersion[J]. Nano Letters, 2017, 17(3): 1819-1824.
- [15] Khorasaninejad M, Zhuit A Y, Roques-Carnes C, et al. Polarization-Insensitive Metalenses at Visible Wavelengths[J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [16] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar Photonics with Metasurfaces[J]. Science,

- 2013, 339(6125).
- [17] Ma X, Huang C, Pu M, et al. Multi-band circular polarizer using planar spiral metamaterial structure[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 16050-16058.
- [18] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas[J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427-427.
- [19] Ni X, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light-Science & Applications*, 2013, 2.
- [20] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband Focusing Flat Mirrors Based on Plasmonic Gradient Metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [21] Saenz E, Ederra I, Gonzalo R, et al. Coupling Reduction Between Dipole Antenna Elements by Using a Planar Meta-Surface[J]. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(2): 383-394.
- [22] Shi H F, Wang C T, Du C L, et al. Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths[J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6815-6820.
- [23] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z, et al. Planar Lenses Based on Nanoscale Slit Arrays in a Metallic Film[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 235-238.
- [24] 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.
- [25] Wang W, Guo Z, Li R, et al. Plasmonics metalens independent from the incident polarizations[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 16782-16791.
- [26] Wang W, Guo Z, Li R, et al. Ultra-thin, planar, broadband, dual-polarity plasmonic metalens[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 68-71.
- [27] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [28] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [30] Kenney M, Grant J, Hao D, et al. Large area metasurface lenses in the NIR region [M]//BODERMANN B., FRENNER K. *Modeling Aspects in Optical Metrology Vii*. 2019.
- [31] Ou K, Yu F, Li G, et al. Mid-infrared polarization-controlled broadband achromatic metadevice[J]. *Science Advances*, 2020, 6(37).
- [32] She A, Zhang S, Shian S, et al. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1573-1585.
- [33] Chen W, Tymchenko M, Gopalan P, et al. Large-Area Nanoimprinted Colloidal Au Nanocrystal-Based Nanoantennas for Ultrathin Polarizing Plasmonic Metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5254-5260.
- [34] Kordonski W, Shorey A. Magnetorheological (MR) jet finishing technology[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(12): 1127-1130.
- [35] Moitra P, Slovick B A, Li W, et al. Large-Scale All-Dielectric Metamaterial Perfect

- Reflectors[J]. *Acs Photonics*, 2015, 2(6): 692-698.
- [36] Zhang C, Li Q, Jin L, et al. Printed Large-area Flat Optical Component: Metasurfaces for Cylindrical Vector Beam Generation [M]. 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2017.
- [37] Briere G, Ni P, Heron S, et al. An Etching-Free Approach Toward Large-Scale Light-Emitting Metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14).
- [38] Adesida I, Mahajan A, Andideh E, et al. REACTIVE ION ETCHING OF GALLIUM NITRIDE IN SILICON TETRACHLORIDE PLASMAS[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(20): 2777-2779.
- [39] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [40] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Multiwavelength polarization-insensitive lenses based on dielectric metasurfaces with meta-molecules[J]. *Optica*, 2016, 3(6): 628-633.
- [41] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1141-1143.
- [42] Buchnev O, Podoliak N, Kaczmarek M, et al. Electrically Controlled Nanostructured Metasurface Loaded with Liquid Crystal: Toward Multifunctional Photonic Switch[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(5): 674-679.
- [43] Chen B H, Wu P C, Su V-C, et al. GaN Metalens for Pixel-Level Full-Color Routing at Visible Light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [44] Chen W T, Zhu A Y, Khorasaninejad M, et al. Immersion Meta-Lenses at Visible Wavelengths for Nanoscale Imaging[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3188-3194.
- [45] Cho H K, Khan F A, Adesida I, et al. Deep level characteristics in n-GaN with inductively coupled plasma damage[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2008, 41(15).
- [46] Choi B, Iwanaga M, Miyazaki H T, et al. Photoluminescence-enhanced plasmonic substrates fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Journal of Micro-Nanolithography Mems and Moems*, 2014, 13(2).
- [47] Damilano B, Vezian S, Brault J, et al. Selective Area Sublimation: A Simple Top-down Route for GaN-Based Nanowire Fabrication[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(3): 1863-1868.
- [48] Decker M, Kremers C, Minovich A, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8879-8885.
- [49] Guo Z, Xu H, Guo K, et al. High-Efficiency Visible Transmitting Polarizations Devices Based on the GaN Metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(5).
- [50] Kock W E. METALLIC DELAY LENSES[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(1): 58-82.
- [51] Lin M E, Fan Z F, Ma Z, et al. REACTIVE ION ETCHING OF GAN USING BCL3[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(7): 887-888.

- [52] Mouffak Z, Bensaoula A, Trombetta L. A photoluminescence study of plasma reactive ion etching-induced damage in GaN[J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(11).
- [53] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. ORBITAL ANGULAR-MOMENTUM OF LIGHT AND THE TRANSFORMATION OF LAGUERRE-GAUSSIAN LASER MODES[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [54] Biagioni P, Huang J S, Duo L, et al. Cross Resonant Optical Antenna[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25).
- [55] Brorson S D, Haus H A. DIFFRACTION GRATINGS AND GEOMETRICAL-OPTICS[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 1988, 5(2): 247-248.
- [56] Encinar J A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size[J]. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(10): 1403-1410.
- [57] Fan J A, Wu C, Bao K, et al. Self-Assembled Plasmonic Nanoparticle Clusters[J]. *Science*, 2010, 328(5982): 1135-1138.
- [58] Fattal D, Li J, Peng Z, et al. Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 466-470.
- [59] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [60] Ginn J, Shelton D, Krenz P, et al. Polarized infrared emission using frequency selective surfaces[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4557-4563.
- [61] Grober R D, Schoelkopf R J, Prober D E. Optical antenna: Towards a unity efficiency near-field optical probe[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(11): 1354-1356.
- [62] Liu S, Chuang C-J, See C W, et al. Double-grating-structured light microscopy using plasmonic nanoparticle arrays[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1255-1257.
- [63] Miyazaki H T, Kurokawa Y. Controlled plasmon resonance in closed metal/insulator/metal nanocavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(21).
- [64] Padgett M, Courtial J, Allen L. Light's orbital angular momentum[J]. *Physics Today*, 2004, 57(5): 35-40.
- [65] Padilla P, Munoz-Acevedo A, Sierra-Castaner M, et al. Electronically Reconfigurable Transmitarray at Ku Band for Microwave Applications[J]. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(8): 2571-2579.
- [66] Sukharev M, Sung J, Spears K G, et al. Optical properties of metal nanoparticles with no center of inversion symmetry: Observation of volume plasmons[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(18).
- [67] Xu Q, Bao J, Rioux R M, et al. Fabrication of large-area patterned nanostructures for optical applications by nanoskiving[J]. *Nano Letters*, 2007, 7(9): 2800-2805.
- [68] Fan Q, Liu M, Yang C, et al. A high numerical aperture, polarization-insensitive metalens for long-wavelength infrared imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(20).
- [69] Decker M, Chen W T, Nobis T, et al. Imaging Performance of Polarization-Insensitive

- Metalenses[J]. *Acs Photonics*, 2019, 6(6): 1493-1499.
- [70] Jiang X, Chen H, Li Z, et al. All-dielectric metalens for terahertz wave imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14132-14142.
- [71] Kanwal S, Wen J, Yu B, et al. Polarization Insensitive, Broadband, Near Diffraction-Limited Metalens in Ultraviolet Region[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(8).
- [72] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral Chiral Imaging with a Metalens[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.
- [73] Kim C, Kim S-J, Lee B. Doublet metalens design for high numerical aperture and simultaneous correction of chromatic and monochromatic aberrations[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18059-18076.
- [74] Tang D, Chen L, Liu J, et al. Achromatic metasurface doublet with a wide incident angle for light focusing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12209-12218.
- [75] Wei Y, Wang Y, Feng X, et al. Compact Optical Polarization-Insensitive Zoom Metalens Doublet[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13).
- [76] He C, Sun T, Guo J, et al. Chiral Metalens of Circular Polarization Dichroism with Helical Surface Arrays in Mid-Infrared Region[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24).
- [77] Franklin D, Chen Y, Vazquez-Guardado A, et al. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces[J]. *Nature Communications*, 2015, 6.
- [78] Yang G, Qi X, Yu H, et al. Development of mosaic technology for large-size reflective gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 542-551.

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，美好的时光总是短暂的。三年的研究生学习生活匆匆结束，也意味着自己的学生生涯就此画上了句号，虽说学无止境，但再回首我已不是少年。回首这三年的时光，有工作考研的坚持，有考研录取的喜悦，有恩师敦敦的教诲，有科研实验的刻苦，有攻克难题的快乐，有同学朋友的扶持，这三年是我人生中极其重要的三年，这三年我把他留给了中国科学院大学，留给了中国科学院上海微系统与信息技术研究所。

在此，我要感谢这三年里我遇到的每一位老师，感谢您在学业上给了我巨大的帮助和指导！感谢这三年里我遇到的同学，感谢你们在学业上给了我真诚的陪伴！感谢我的家人和朋友，一路走来对我的支持和鼓励！希望能在此表达我内心最诚挚的祝福。

在这里，首先我要感谢我的导师，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员李伟老师，李老师扎实的理论基础、严谨的学风和对工作认真负责的态度一直是我学习的榜样。李老师竭尽全力为课题组提供尽可能好的科研条件，对每一位学生都有详细的培养规划，在科研工作中，给了学生很大的自由和信任，使每一位学生都有很好的发挥空间。自己很荣幸是李老师第一位学生，也很荣幸能够在李老师课题组进行科研学习。在此，祝愿我的导师李伟研究员，桃李满天下。

衷心感谢组里助理研究员周易、甘峰源两位老师。周易老师性格直爽，工作认真，学习能力强，在课题和工作方面给了我很大的支持，总是能够悉心指导，不吝赐教；甘峰源老师性格温和，为人和善，科研功底深厚，在学习和生活方面给了我很大的帮助和关心。两位老师虽与我同龄，但能力出众，是我今后工作中追赶的榜样。在此，祝愿两位老师科研顺利，在组里越走越好。

衷心感谢研究生部练敏英、邵天浩、沈玲燕、温静、张腾蛟等老师，感谢你们对学生所内生活的关心和帮助；感谢实验室高丹、汤玉琼、吴琼、郭世杰、樊琳等老师，感谢你们对学生工作的付出；感谢杨雪雷师妹、蓝盾师弟，感谢你们在课题组内的支持；感谢办公室中所有同学，我们一起度过的那些快乐的科研生活。

衷心感谢我的好朋友史达亨、陈波、章志涛、曲志毅、刘启勇、冯立扬、李

子平、张帅，你们是我从大学到工作再到研究生，积累下来的财富；感谢我的球友，在篮球场陪伴的日日夜夜。

最后我要感谢我的父母和未婚妻，感谢我的父母给了我好的成长环境、信任以及无条件的支持，祝愿父母能够身体健康；感谢我的未婚妻侯秋实女士，九年的陪伴，一路走来感谢侯秋实女士对我的包容、鼓励和支持。我会努力成长，成为你们坚强的臂膀。

2021年6月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2011年09月——2015年06月,在青岛大学物理学院(系)获得学士学位。

2015年07月——2017年10月,在中达电子(苏州)有限公司担任工程师。

2018年09月——2021年06月,在中国科学院上海微系统与信息技术研究所攻读硕士学位。

获奖情况: 无。

工作经历:

2015年07月——2017年10月,在中达电子(苏州)有限公司担任工程师,主要从事光通信模块和硅光学模块工艺研发工作。

已发表(或正式接受)的学术论文:

[1] Zhou Y, Wang L, Li J, et al. CMOS compatible multichannel mid-infrared photonic crystal sensor[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(3): 279-283。

申请或已获得的专利:

[1] 李伟,王磊,周易,等,双面超表面结构的制作方法及其双面超表面结构对准测量方法,发明专利,202011314162.4。

[2] 李伟,周易,甘峰源,王磊,柔性遥感卫星光学镜片及其制作方法,发明专利,202010069416.4。

[3] 李伟,周易,甘峰源,王磊,柔性手机摄像头光学镜片及其制作方法,发明专利,202010069442.7。

[4] 周易,李伟,甘峰源,王磊,等,紫外和可见光共透镜双光路成像探测系统及其制作方法,发明专利,202011350398.3。

[5] 周易,李伟,甘峰源,王磊,等,一种紧凑型共光路共焦红外双波段光学系

统及其制作方法，发明专利，202011350345.1。

参加的研究项目及获奖情况：

- [1] 混合相位调控硅基超结构光学透镜关键工艺研究。
- [2] 超表面光学成像天线的关键工艺研究。
- [3] 面向轻量化遥感系统的广角宽频硅基超表面透镜研究。