

清华大学学位论文用纸

提 要

1248031

基于二元光学技术广阔的应用前景, 本论文研究了二元光学器件的设计与制作。文中首先对国内外二元光学的发展现状作了综述, 然后详细论述了二元光学器件的理论基础、设计方法和制作工艺, 制作并检测了三种新型二元光学器件: 多阶位相型菲涅耳微透镜阵列(FZP)、多阶位相型Talbot光栅和基于Talbot效应的非门器件。其中8阶位相型FZP的衍射效率达到67%, 不均匀性 $<30\%$; 9阶位相型Talbot光栅的衍射效率为50%, 不均匀性 $<17\%$ 。接着将多阶位相型菲涅耳微透镜阵列器件应用于神经网络关联记忆系统、多重成像系统、半导体激光器象散校正系统以及透镜光栅系统, 实验结果与理论分析吻合。最后开发了一台CCD采样存储仪, 为二元光学器件的检测提供了一个有力的工具。文中介绍了CCD采样存储仪的工作原理及软、硬件的功能。

关键词: 二元光学, 菲涅耳微透镜(FZP), Talbot效应, CCD

清华大学学位论文用纸

The Design and Fabrication of the Binary Optical Elements

ABSTRACT

In this paper, The design and fabrication of the binary optical elements are developed because of the various application prospects of the binary optical technology. The current research situation of the binary optics in the world is reviewed. The theory, design and manufacture of the binary optical elements are discussed. Three new kinds of binary optical elements, including multilevel phases Fresnel zone plate(FZP), the multilevel phases Talbot grating and the logical "Non" gate element based on the Talbot effect, are fabricated and measured. The efficiency of the 8 phase levels FZP is 67% and the ununiformity is below 30%; These two parameters of the 9 phase levels Talbot grating is 50% and 17%. The multilevel phases FZP is used in the following four systems: the associate memory system, the multilevel imaging system, the correcting astigmatism system of diode laser and the lenslet grating system. The experiment results are agreed with the theory analysis. The CCD sampling and storing instrument, which is a potential tool for inspection of the binary optical elements, is also made. Its working principles and hardware's as well as software's functions are introduced.

Wang Xu (Optical Instruments)

Directed by: Yan Yingbai (Vice Professor)

Keywords: Binary Optics, Fresnel zone plate, Talbot effect, CCD

清华大学学位论文用纸

目 录

第一章 绪 论

第一节 引言	(1)
第二节 国内外二元光学的发展动态	(2)
第三节 本课题的预期目标及完成情况	(9)

第二章 菲涅耳型微透镜的研制

第一节 理论基础	(10)
第二节 设计方法	(15)
第三节 制作工艺	(18)
第四节 检测结果	(25)
第五节 应用研究	(34)

第三章 基于Talbot效应之器件的研制

第一节 Talbot效应的概述	(43)
第二节 多阶位相型Talbot光栅的研制	(48)
第三节 非门器件的研制	(54)

第四章 CCD采样存储仪的研制

第一节 引言	(59)
第二节 硬件电路的设计	(59)
第三节 软件程序的编制	(63)

第五章 课题互作小结及建议

致 谢	(67)
-----	------

攻读硕士学位期间所发表的论文	(68)
----------------	------

清华大学学位论文用纸

参考文献	(69)
------	------

附录 1, 菲涅耳型微透镜的 CAD 程序	(74)
2, 器件表面形貌测量数据的绘图程序	(75)
3, CCD 采样存储仪的使用说明	(77)
4, CCD 采样存储仪的数据传输与处理程序	(79)

清华大学学位论文用纸

第一章 绪 论

第一节 引 言

近年来随着超大规模集成电路 (VLSI) 和计算机辅助设计 (CAD) 以及电子束刻蚀印刷术 (E-Beam Etching Microlithography) 的发展, 在光学领域出现了一个新的分支——二元光学。它是基于衍射理论由光学与微电子技术相互渗透、交叉而形成的新学科, 它的出现促成了宏观光学向微观光学的过渡, 给光学加互工艺带来了一场新的革命而被称为90年代的光学技术。二元光学的特点是利用计算机技术优化设计微图形结构并用大规模集成电路互工艺的光刻技术与微细加工技术制作出新型功能器件。这种新型器件较传统的光学元件有更灵活的波前变换与校正功能, 在实现空间变、空间滤波等方面有着广阔的应用前景。

二元光学器件有以下几个特点:

- ① 器件一般呈薄片状结构, 重量轻、造价低且便于与半导体激光器、光纤等耦合成具有特殊处理功能的组件或系统, 这种系统的零部件无需对中, 完全由设计与加互工艺保证其相互位置精度。
- ② 器件具有从紫外到红外宽广的互作波段, 可实现许多普通折反射光学器件难以完成的功能, 如位相与波前的校正、光锥旋转及位相滤波等。
- ③ 二元光学与经典光学元件的组合, 可改善器件的光学特性 (视场与相对孔径) 及成像质量 (分辨率与对比度); 利用二元光学器件与经典光学的色散互补性, 还可以减少对昂贵材料的需求。

二元光学器件的上述特点将促进光学仪器或元部件向微型化、列阵化、集成化和多功能化发展,^[1] 这是光学技术上具有革命性的进步, 因此自80年代末期以来, 世界光学界掀起了一股“二元光学热”。可以预期, 通过二元光学技术产生的二元光学器件在不久的将来必将在国防与国民经济各领域得到广泛应用, 所以我们应利用现有条件和技术, 迅速开展二元光学的基础与应用技术的研究, 力争在国际竞争中占有一席之地并有所突破和创新。本课题研究的开展就是基于这一出发点并得到国家自然科学基金委员会重大项目基金的资助。

第二节 国内外二元光学的发展动态

一、形成与发展

二元光学一般是指利用高分辨率的光刻与离子刻蚀技术将二元或多阶位相的表面浮雕图形制作在某种基片上。早在本世纪70年代,二元光学的概念就在相息图和计算全息的概念上建立起来了,但器件制作工艺的复杂性极大地限制着它的发展,直到80年代后期由于VLSI制造工艺的水平达到 $\lambda/50$ 精度而使器件可达到99%的衍射效率,才使这种二元光学器件有可能用于普通光学系统中。

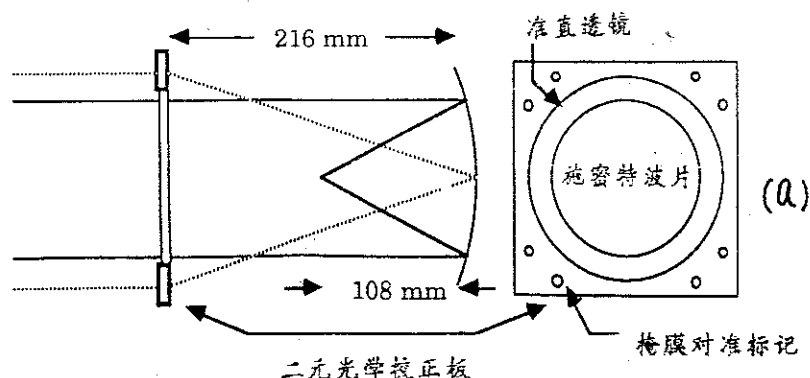
近几年来,美国麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)与美国Perkin-Elmer公司等研究机构发展和利用了半导体微电子技术工艺与设备(电子束与离子束曝光刻蚀机、精密定位对准设备等),研制成功用于激光束扫描的二元微透镜阵列和改变、校正波面的相位片等各种二元光学器件,^[2]他们为二元光学的形成与发展作出了贡献。

二、研究的现状

目前在二元光学技术研究方面,美国处于领先地位,主要是麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)、牛津学院物理系、佐治亚州理工学院等高校以及Honeywell、Perkin-Elmer、Teledyn-Brown、Dopont等公司和研究机构进行了不少研究制造工作,其精度正朝着实现 $0.1\mu\text{m}$ 量级的光刻水平前进。^{[3][4]}我国在这方面的工作虽刚刚起步,但在一些领域已居世界水平。当前二元光学研究主要涉及以下一些领域:

1. 波面的修正

美国Perkin-Elmer公司在施密特望远镜系统中配置二元光学校正板^[5],如图1-1(a)所示,从(b)中可看出,系统的球差已完全消除。



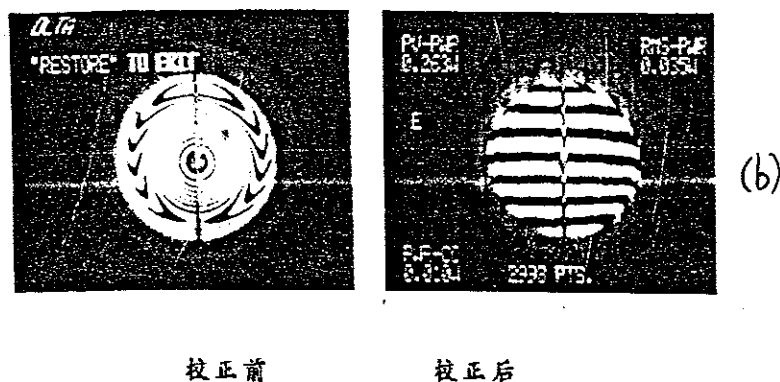


图1-1. (a) 二元光学象差校正板 (b) 象差校正的效果

MIT/LL制作了二元微透镜阵列用于校正列阵半导体激光器的象散。如图1-2所示，透镜的孔径呈矩形，一方向的焦距为 $69\mu\text{m}$ ，相对孔径为 $f/1$ ，另一方向的焦距为 $100\mu\text{m}$ ，相对孔径为 $f/2$ ，采用3次光刻及刻蚀而得到8个位相台阶，衍射效率为93%(理论值为95%)，接近衍射受限情况。此外，他们还在 CO_2 激光雷达光束中加进二元位相光栅使光强呈高斯分布的激光束变换成均匀分布，改善了激光雷达的性能，其转换效率为90%。

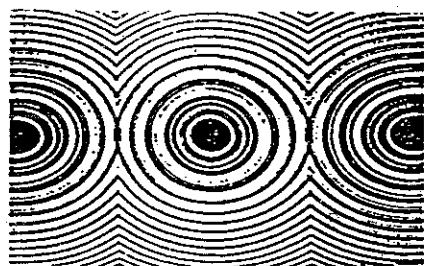


图1-2. 二元微透镜阵列

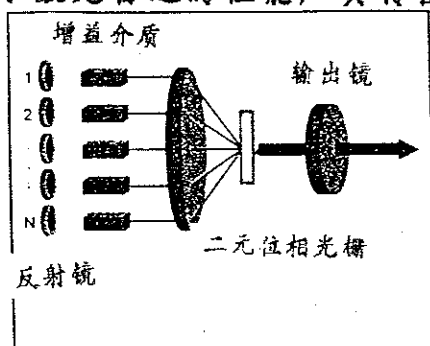


图1-3. 运用二元位相光栅实现
激光束的相干叠加

2. 激光束的相干叠加

在一些领域中如光通讯、光雷达、传真机、激光打印机等^[6]，激光功率是至关重要的，且要求在远场功率集中，此时单个激光器难以满足要求，MIT/LL运用二元光学技术用三种方法实现了激光束的相干叠加：

- ① 二元位相光栅法，如图1-3所示，其转换效率为75%
- ② 孔径填充法，如图1-4所示，其转换效率为51%
- ③ 微透镜阵列准直法，它利用 Talbot 效应将输出反射镜放在微透镜的 $1/2$ Talbot距离处而构成Talbot微腔，

图1-5 (a)为原理图, (b)为实验结果, 沿光轴方向集中了80%的能量, 得到很好的耦合效果。

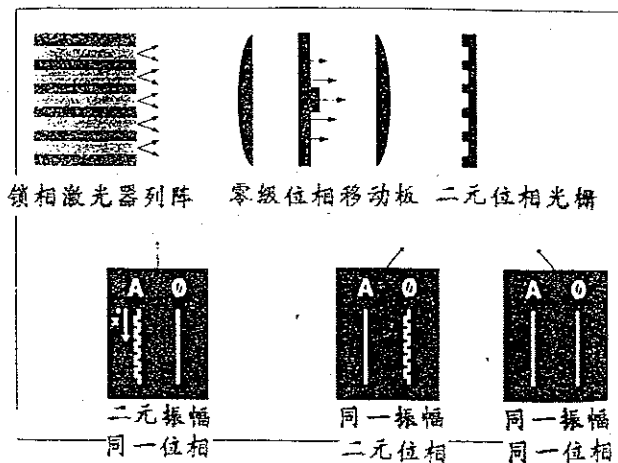


图1-4. 孔径填充法实现激光束的相干叠加

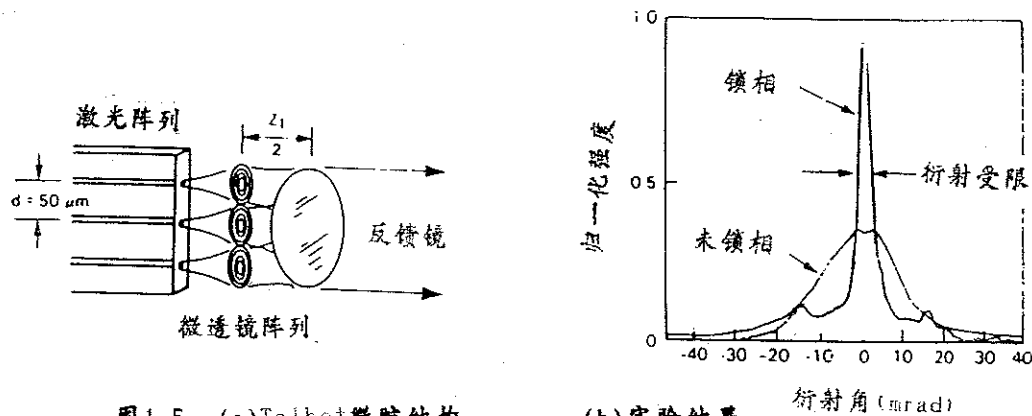


图1-5. (a)Talbot微腔结构

(b)实验结果

3. 红外系统的应用研究

美国Honeywell公司在 $\lambda = 8-12\mu m$, F/1的凝视系统和F/2.4的扫描系统中都成功地运用了二元光学器件, 简化了结构、减轻了重量并降低了成本。MIT/LL也研制了一种全息二元光栅可在CO₂激光雷达系统中增强波长为10.6 μm 的红外本机振荡光束。 [7]

4. 小型特殊功能组件的研究

①由两组微透镜阵列形成灵巧扫描器。 [8] 两阵列以共焦形式组合, 当其中之一作横向移动时, 透过它们的激光束就会发生偏转。如图1-6 所示, 微透镜直径: 200 μm , 焦距: 990 μm , 扫描视场角: 11.5°, 扫描速率: 35HZ。

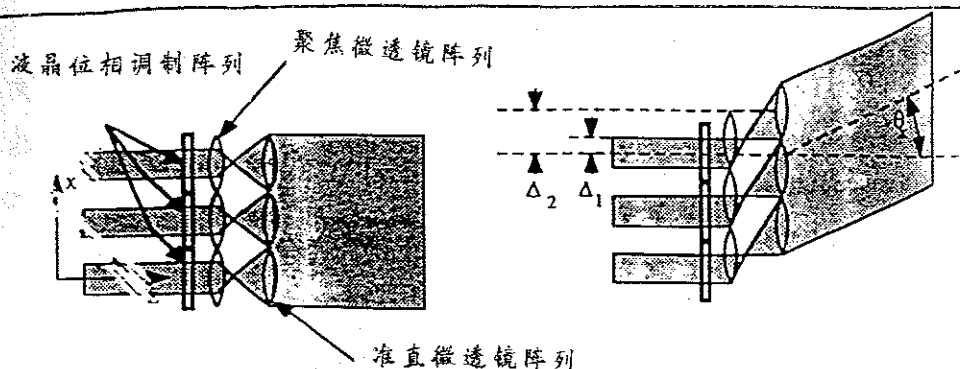


图1-6. 两微透镜阵列组成的灵巧扫描器

②由微透镜阵列组成透镜光栅系统。^[9]在透镜光栅的傅里叶变换平面上可获得光强分布更均匀的光点阵列且在一些特定的菲涅耳衍射面上可获得比微透镜本身数目多得多的均匀光点阵列。^[10](详见本论文第二章第五节)

③折/衍射混合型组件。它由多位相型二元光学元件与传统的折射光学器件组合而成,即将片基表面做成多位相型器件而将片基本身或另一块与此相配的片基做成折射光学元件,这种组件的优点除了极高的同轴衍射效率和对偏振方向不敏感外,还可以在宽带光下使用(因为衍射与折射二者的色散作用在一定程度上互相补偿,使得整个组件对波长变化不敏感),所以应用性能更好,适用范围更广。

5. 光盘和光互联

二元相位计算全息图CGH已成功地用于高密度的光盘存储及激光视盘中,其功能有三点:分光;聚焦;误差探测。其中误差探测的跟踪可使光盘中半导体激光器的波长变化影响消除而获得高的S/N。光盘的读数头装置也属二元光学器件,它具有大数值孔径、极轻的重量、可进行偏振方向选择的优越性。

二元相位CGH用于光互联时,成功地实现了三种功能:通讯调制器中的光集中;存储模式与处理元件之间的蝶式互联;光学系统输出信号的预处理。这些功能都是一般光学方法所不易实现的。此外在光互联中,使用微透镜阵列还可实现混洗操作。^[11]

6. 光栅型等光强分束器

①Dammann光栅。它是对普通二元位相光栅的周期结构进行调制即改变

清华大学学位论文用纸

位相突变点的位置以得到合乎要求的高效率并使中心处若干个衍射级的光强相等。〔12〕目前该器件已广泛用作光计算中的扇出元件、互联元件及采样编码元件，国外许多机构开展了优化设计算法、制作及应用的研究，〔13〕〔14〕本教研组在863计划七五期间制作的器件阵列达 40×40 以上，衍射效率接近80%，居世界水平，已提供给美、英、芬兰等国的六个研究机构及国内的一些单位使用。〔15〕

②位相型Talbot光栅。该器件基于Talbot效应，不仅能完成等光强分束功能而且还具有一些新颖的性质。（详见本论文第三章第二节）

7. 菲涅耳型微透镜

这种二元光学器件在光信息处理、光计算以及光学数字图像处理系统中有着广阔的应用前景，目前国内外有关这类器件的报导很多，可归纳如表1-1所示。

表1-1. 国内外微透镜研究的现状

阵列数	透镜直径	焦距	衍射效率	制作者	制作方法
10×10	1.5 mm	47 mm	91%	美国贝尔实验室	薄膜沉积法〔8〕
2×4 1×5	125 μm 100 μm	0.88mm 0.75mm	74%	日本 Matshita 公司	电子束刻蚀 印刷术〔16〕
8×8 8×8	1.2 mm 2.9 mm	20 mm 31 cm	30% 34%	美国 Bellcore 公司	离子束磨削〔17〕 LCTV产生法〔18〕
$\times$	0.16 mm	0.4 mm	25%	美国Corn 研究小组	光热化法〔19〕
几十万个	50 ~ 200 μm	40 ~ 400 μm	$\times$	英国国家 物理 实验室	三光束干涉〔20〕
18×18 ~ 380×490	0.04 ~ 0.6 mm	0.14 ~ 0.24mm	$\times$	中国西安 光机所	离子交换法〔21〕
6×7	15.8 μm	36 μm	接近衍 射受限	加拿大Xe -rox中心	热塑成形法〔22〕

综观二元光学的发展现状，可以看出其研究已按三个层次展开，即单个器件的研制；阵列器件的研制；二元光学的进一步发展。它的发展

方向大致有以下四点：①将特征尺寸缩小到10nm量级而开拓可见光波长结构设计的新方向。②开拓三维体集成组装元件，这对掩膜精度和装配技术提出了更高要求。③进一步开发CAD系统，最终将二元光学与电子学结合起来。④开发非大规模集成技术如模压等，以复制元件降低成本。

三、工艺水平

二元光学技术研究的一个重要方面就是它的制作工艺研究，而其中掩膜制作和蚀刻技术的工艺水平在很大程度上决定了器件的质量。

1. 振幅型掩膜的制作

由CAD的数据制作掩膜时，微图形的尺寸由衍射波面的精度要求而定，一般情况下，所提出的微图形尺寸大致为 $0.5 \sim 15 \mu\text{m}$ ，位置精度为 $\pm(0.1 \sim 1.5 \mu\text{m})$ ，可供选择的工艺方法及设备主要有三种：

①光刻掩膜图形发生器。在线宽大于 $5 \mu\text{m}$ 时采用，与投影光刻机配合使用可获得 $1 \mu\text{m}$ 的线条。用于二元掩膜制作时，效率及精度均受到一定限制，它是目前国内开展二元光学研究的主要设备。

②电子束光刻设备。它是利用最小会聚直径为 $0.05 \mu\text{m}$ 的电子束进行光刻的设备。电子束由计算机控制，在 $1 \text{mm} \times 1 \text{mm}$ 的范围内可产生 20000×20000 个图形点。这是国外制作二元光学器件的主要设备，在国内这种设备尚属研制阶段。

③激光书写绘图设备。它是利用光点尺寸为 $0.5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 的激光进行扫描而直接绘制二元掩膜的设备，激光束由计算机控制，可获得高分辨率和高精度的微图形。美国Texas仪器公司的激光书写绘图仪制作一块尺寸为 5×5 英寸、线宽 $5 \mu\text{m}$ 的二元掩膜约需时5分钟，图1-7为其原理图。[23]

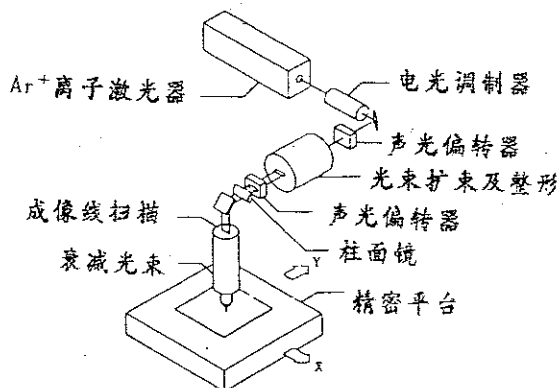


图1-7. 激光书写绘图设备的五作原理

由于光学上普遍是轴对称形式，图形采用极坐标表示最为适宜，所以，MIT/LL开发了一种极坐标式激光绘图仪专门用于二元光学器件的制作，图1-8为其原理图，它可在直径为3英寸的平面基板上做出 $1\mu\text{m}$ 以下线宽，位置精度达 $0.1\mu\text{m}$ 量级。[24]

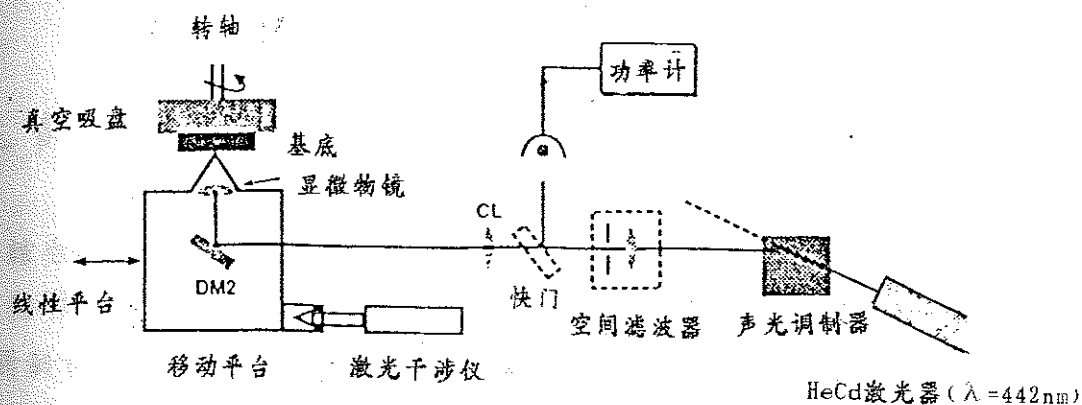


图1-8. 极坐标式激光绘图仪的互作原理

2. 蚀刻技术

制作出一套(多级)高精度二元掩膜版后，就可在基底上进行蚀刻，其中最重要的是前后两块掩膜版的对准精度。由于二元光学器件需蚀刻出具有不同相位水平的三维阶梯轮廓，所以蚀刻的深度也需十分严格。目前可供选择的互艺方法有以下三种：

- ① 离子束刻蚀。它是二元光学器件蚀刻的最常用方法，美国 Perkin-Elmer公司之离子刻蚀机的蚀刻精度可保持在 1nm 左右，国内中科院微电子中心之离子刻蚀机的蚀刻精度则保持在 10nm 左右。[26][28]
- ② 离子磨削。它也是二元光学器件蚀刻的常用方法，在制作波导微透镜时显得特别简单和实用，美国 Bellcore公司之离子磨削机的蚀刻精度约为 20nm 左右，国内对这种互艺的研究才刚刚起步，离实用阶段尚有较大差距。
- ③ 化学腐蚀法。此法对制作器件的最小线宽有一定限制(大于 $5\mu\text{m}$)，而且蚀刻精度也不够高，但成本低廉制作方便，不失为目前国内制作二元光学器件较为折衷的方法。(详见本论文第二章第三节)

通过上面的介绍可以看出，我国的光刻互艺水平还远远不及国外的

清华大学学位论文用纸

发展水平，特别是缺少一些关键工艺设备如电子束光刻设备、高精度外延设备等，因此要想在国际竞争中占有一席之地，必须在工艺研究方面迎头赶上。

第三节 本课题的预期目标及完成情况

结合863计划八五期间的目标及国家自然科学基金重大项目的要求，我们根据教研组现有条件，提出了以下的课题研究指标：

1. 研制出多位相型菲涅耳微透镜阵列并开展其应用研究。
2. 研制出基于Talbot效应的非门器件和多位相型Talbot光栅。
3. 研制开发一台CCD采样存储仪，为二元光学器件的检测提供一套有力的工具。

经过两年多的实验研究，我们研制成功了上述三类器件和一台仪器，先后发表了8篇学术论文(详见后)，很好地完成了课题工作。

第二章 菲涅耳型微透镜的研制

第一节 理论基础

一、引言

菲涅耳透镜早在50多年前就被用来在航标灯中准直光束,近年来已广泛运用于反射式照相机的取景器及飞行员头盔聚焦镜,这些菲涅耳透镜大多具有相对大的尺寸、小数值孔径。目前,小尺寸、大数值孔径之菲涅耳透镜的需求量日益增大,如激光唱机的读数头和光通讯系统的耦合透镜等,所以菲涅耳透镜的应用前景十分广阔。[27]

对于一个普通透镜,当要求焦距固定而想增大口径时,往往使透镜更厚更重,而菲涅耳透镜则不然。它是由许多具有起伏折回分离的圆环带构成,光学性质与单透镜一样。微透镜一般可分为两类:折射型与衍射型,前者包括普通的凸透镜、梯度折射率透镜等;后者包括全息透镜、波带片等。菲涅耳型微透镜介于这两种类型之间,其中间部分象折射型(尺寸远大于波长值),边缘部分则象衍射型(尺寸与波长值可比拟);而且它很依赖于波长值,当用非设计波长照射时,其色差和球差比一般凸透镜大得多。因此,一般将菲涅耳型微透镜归为衍射型器件。

二、数学模型

研究二元光学器件的数学模型按等级分有以下几类:①严格的数值解[28]②全矢量方程[29]③瑞利-Sommerfeld积分方程④菲涅耳近似⑤夫朗和费近似[30]。其中后三类均为标量场近似,统称为傅氏模型;前两类则统称为严格模型。

严格的数值解是基于电磁场理论,无瑞利假设,要求用无限传导理论对深光栅进行计算,并用麦克斯韦方程对光栅的闪耀进行推导。当器件的特征尺寸小到可与波长值相比拟时,就需借助这一模型才能得到有意义的结论。一般情况下,由于器件特征尺寸远大于波长值,所以可用标量场近似下的傅氏模型。两种模型的比较如表2-1所示

表2-1. 严格模型与傅氏模型的比较

严格模型	傅氏模型
矢量理论 (有全偏振效应)	标量理论 (无偏振效应)
表面深度不能忽略 (在所有级次有确定的衍射效率)	表面深度可忽略 (在许多级次的衍射效率为0)
对于[波长/光栅周期]敏感	独立于[波长/光栅周期]
计算强度大	计算容易

傅氏光学理论隐含惠更斯与基尔霍夫定理假设，属标量理论，且夫朗和费近似常被指定为傅氏理论。对于一个周期光栅结构，第N级的衍射效率是光栅单元结构傅氏级数展开项第N项系数的平方值，所以傅氏理论在衍射光栅的分析中应用广泛，但它也有一定的适用范围。MIT/LL的G. J. Swanson研究了这一问题并发现：对于菲涅耳型微透镜，当 $f/1$ 到 $f/2$ 时，傅氏理论不再适用而需使用严格的数值解理论。

三, 理论的建立

1. 理论公式的推导

一个菲涅耳型微透镜 (Fresnel Zone Plate) 是由一系列同心圆环带构成的二元振幅图形，第m级透过环带的半径由其级数m的平方根决定。

即 $r_m = \sqrt{mr_p}$ (2-1)

因此，菲涅耳型微透镜 (FZP) 在 r^2 方向上以 r_p^2 为周期，图2-1是FZP的 r^2 函数轮廓示意图。

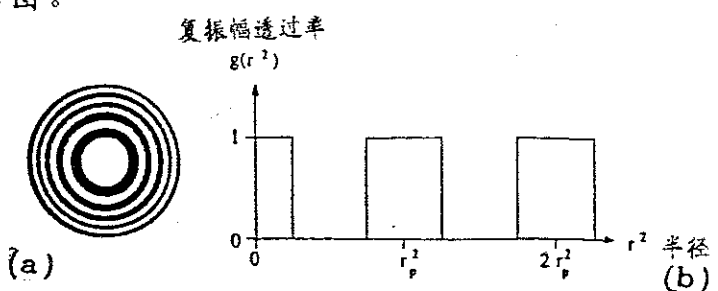


图2-1. (a)菲涅耳波带片FZP (b)复振幅透过率函数

当FZP被一平面单色光波 λ 照明时，在FZP后可观察到多重会聚和发散光波，其中每个光波代表一个衍射级次，其振幅和焦距由FZP的图形决定，未被衍射而直接透过FZP的光波构成衍射零级。如图2-2所示：

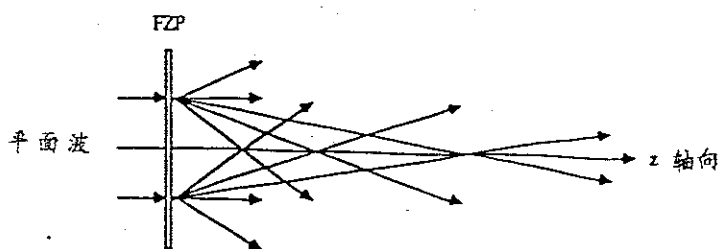


图2-2. 平面波经FZP后的衍射分布

运用标量衍射理论，可以推导FZP的衍射情形。首先讨论任何在 r^2 方向上周期变化的器件而不加入振幅或位相分布的进一步假定。

用 $g(x, y)$ 表示器件的复振幅透过率，由器件在 r^2 方向的周期性有

$$g(x, y) = g(x^2 + y^2) = g(r^2) = g(r^2 + j r_p^2) \quad j \text{ 为整数} \quad (2-2)$$

注意到上式中的 r^2 扩展到了负值，这是为了方便问题的数学处理，因为 r^2 的负值在物理上没有什么意义，所以它不影响推导的结果。

基于 r^2 的周期性，将 $g(x, y)$ 用傅氏级数表示如下：

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\left(2\pi i n \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}\right) \quad (2-3)$$

其中傅氏级数 A_n 为 $A_n = (1/r_p^2) \int_0^{r_p^2} g(r^2) \exp(-2\pi i n r^2) d(r^2)$ (2-4)

它们代表着器件众多焦点处的振幅值。

将器件置于 $Z=0$ 平面，用单色平面波照明，则在 $Z>0$ 的任一平面处，其复振幅 $u(x', y', z)$ 可由菲涅耳积分公式表示为：

$$u(x', y', z) = \iint g(x, y) \exp\left\{\frac{ix}{\lambda z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx dy \quad (2-5)$$

上式中略去了一些不重要的因子，积分边界由 $-\infty$ 到 $+\infty$ （假定 $t(x, y)$ 的范围是无限大），将式(2-3)代入(2-5)式有

$$u(x', y', z) = \sum_{(n)} A_n \exp\left[\frac{ix}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right] \iint \exp\left[2\pi i \left(\frac{n}{r_p^2} + \frac{1}{2\lambda z}\right) (x^2 + y^2)\right] \exp\left[2\pi i \left(\frac{xx'}{\lambda z} + \frac{yy'}{\lambda z}\right)\right] dx dy \quad (2-6)$$

从上式得知，当 $n/r_p^2 + 1/2z\lambda = 0$ 时，在光轴上($x'=0, y'=0$)可产生一个光强峰值即所谓焦点。此时，焦距为

$$Z = Z_n = -r_p^2 / 2n\lambda \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2-7)$$

当 $n>0$ 时， Z_n 为负值，说明器件有发散的球面光波；当 $n<0$ 时， Z_n 为正值，器件有会聚光波；当 $n=0$ 时， Z_n 为 ∞ ，表示零级衍射光波（直接透射波）。

式(2-6)也可改写为： $u(x', y', z_n) = A_n \exp\left[\frac{ix}{\lambda z_n} (x^2 + y^2)\right] \delta\left(\frac{x'}{\lambda z_n}, \frac{y'}{\lambda z_n}\right) + \sum_{m \neq n} A_m$ (2-8)

上式中第二项 $m \neq n$ ，表示衍射聚焦到其它平面 $Z=Z_m$ 的光波对 Z_n 面上光场的影响。式(2-8)对于任何 r^2 方向上呈周期变化的无限大器件均适用，属广义公式。当考虑器件的大小时，如器件呈矩形（尺寸为 L_x 和 L_y ），则

该式中 δ 函数被 Sinc 函数代替而得下式:

$$u(x', y', z_n) = A_n \exp\left[\frac{ix}{\lambda z_n}(x'^2 + y'^2)\right] \text{sinc}\left(\frac{x'w_x}{\lambda z_n}, \frac{y'w_y}{\lambda z_n}\right) + \sum_{m \neq n} A_m \quad (2-9)$$

下面讨论 FZP 的衍射情形。一个多相位位的 FZP (如图 2-3 所示), 其复振幅透过率可表示为 [80]

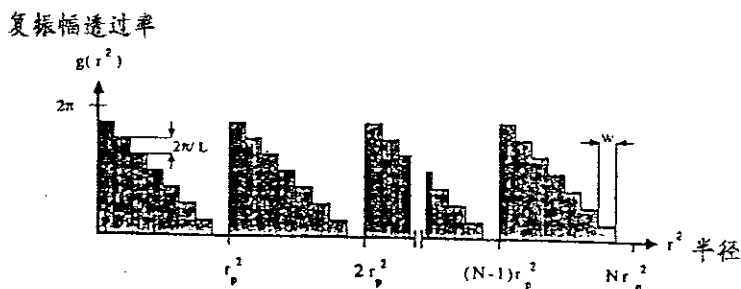
$$g(r^2) = \sum_{k=0}^{N(L-1)} \exp\left(\frac{-2\pi i k}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{r^2 - kr_p^2/L - r_p^2/2L}{r_p^2/L}\right) \quad (2-10)$$


图 2-3. 多相位型 FZP 器件的相位结构

上式中, L 为位相阶数, 并省略了常位相因子 $\exp[2\pi i(L-1)/L]$, 假定位相深度均等高且为 $2\pi/L$, 将 r_p^2 归一化并将式 (2-10) 代入式 (2-4) 可

得到第 N 级衍射光波的振幅值为:

$$A_n = \exp\left(\frac{i\pi n}{L}\right) \text{sinc}(n/L) \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \exp\left[2\pi i \frac{k(n+1)}{L}\right] \quad (2-11)$$

其中
$$\sum_{k=0}^{L-1} \exp\left[2\pi i \frac{k(n+1)}{L}\right] = \begin{cases} L & \text{若 } n+1 = jL \quad j \text{ 为整数} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2-12)$$

结合式 (2-7) 可知, 在 $Z_n = -r_p^2/2n\lambda$ ($n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$) (2-13)

处有一系列焦平面, 且产生会聚和发散两种作用. Z_n 即为器件的焦距, 此焦平面上的强度值为 $I_N = |A_N|^2 = \text{Sinc}^2(N/L)$ (2-14)

主级次焦点 ($N=1$) 的衍射效率为 $\eta = |A_1|^2 = \text{Sinc}^2(1/L)$ (2-15)

它被定义为 FZP 的衍射效率。

2. 多相位相对 FZP 器件性能的影响

(1) 衍射效率的变化

从式 (2-14) 和 (2-15) 可看出, 随着位相阶数 L 的增加, FZP 器件的衍射效率也随着增加, 而且主焦点衍射效率的增加较次焦点要快得多. (见表 2-2) 从表中还可看出, 随着 L 的增加, 衍射能量进行了再分配而越来越集中到主焦点上, 这就是 FZP 器件衍射效率提高的内在原因。

清华大学学位论文用纸

表2-2. 衍射效率与位相阶数的关系

N	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5	7
L=2	.005	.008	.016	.045	.405	.405	.045	.016	.008
L=4	.010	×	.032	×	.811	×	.090	×	.016
L=8	.011	×	×	×	.949	×	×	×	.019

(2) 焦距的变化

如图2-4所示, 当L有所变化时, FZP每一环带的 r_p^2 情况未变, 据式(2-13)即 r_p^2 、 n 、 λ 均未改变, 所以 Z_0 应保持不变, 即对于由一套(多级)掩膜版套刻而制得的多阶位相型FZP, 其焦距与第一块掩膜版的焦距相同。

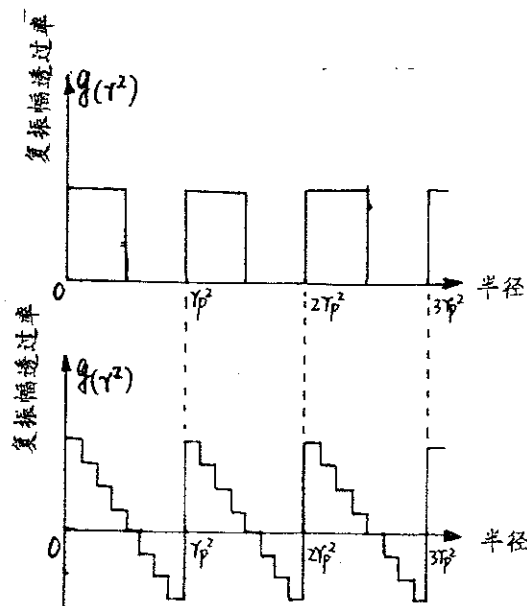


图2-4. FZP器件的环带半径 r 与位相阶数 L 的变化关系

另一方面, 我们还可以作如下理解。图2-4所示的位相结构虽可以认为是折射透镜之二次位相曲面的近似, 但应看到FZP的作用机理是衍射而不是折射, 这就意味着出射波前只由器件的横向尺寸决定(如不同圆环透过点处的座标等), 而与纵向尺寸(如多阶位相的深度变化等)无关, 这正是标量衍射理论所立足之处。所以若有一个完美的图形产生和光刻工艺过程, 当用平面波照射图2-4所示器件时就能产生完美的球面波而不会因为器件位相的多台阶结构产生任何变形。因此从这个角度也说明, 器件的几何光学参数(如焦距等)不会因位相的多阶结构而改变。

第二节 设计方法

一、位相移动函数

如图2-5所示, 当用一平面波照射FZP时, 由于透镜有一位相延迟 $\Psi(r)$ 而使该平面波变成会聚波, 其位相项为 $e^{j[\omega t - \Psi(r)]}$ 。

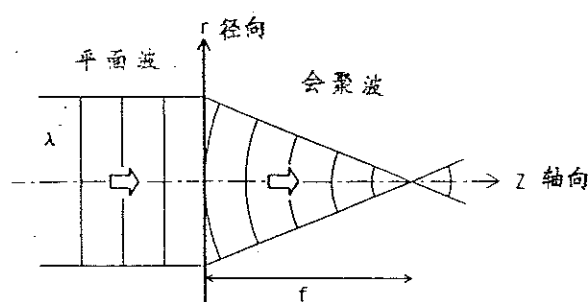


图2-5. 位相移动函数

其中, r 为离光轴的径向距离, $\Psi(r)$ 是会聚波的位相分布, 可表示为

$$\Psi(r) = k_0(f - \sqrt{f^2 + r^2}) \quad \text{其中 } k_0 = 2\pi / \lambda. \quad (2-16)$$

当 $f \gg r$ 时, 上式近似为 $\Psi_a(r) = -\pi r^2 / f \lambda$ (2-17)

比较式(2-16)与(2-17), $\Psi(r)$ 是位相移动函数, 无象差产生; 而 $\Psi_a(r)$ 含有会聚波中的球差, 两者的误差为 $\Delta \Psi = \Psi_a(r) - \Psi(r)$ (2-18)

由瑞利判据, 可忽略的位相误差应满足以下条件:

$$|\lambda \Delta \Psi / 2\pi| < \lambda / 4 \quad (2-19)$$

满足上式边界条件的半径值为 $r_b = \sqrt{2\lambda f^3}$ (2-20)

用f-number表示($F = f / 2r_b$)有 $2r_b = 32\lambda F^3$ (2-21)

对于 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ $F/5$ 对应的 $2r_b = 2.5\text{mm}$, $F/3$ 对应的 $2r_b = 0.6\text{mm}$, 这说明 F 较小时, 须用 $\Psi(r)$ 代替 $\Psi_a(r)$ 。

二、设计公式的推导 [31]

1. 焦距 f

图2-6显示了普通透镜向菲涅耳透镜及多阶位相型 FZP变化的过程, 可以看出, FZP器件有一 2π 位相调制, 具体表示如图2-7所示(我们以菲涅耳透镜来讨论, 其原理同FZP)

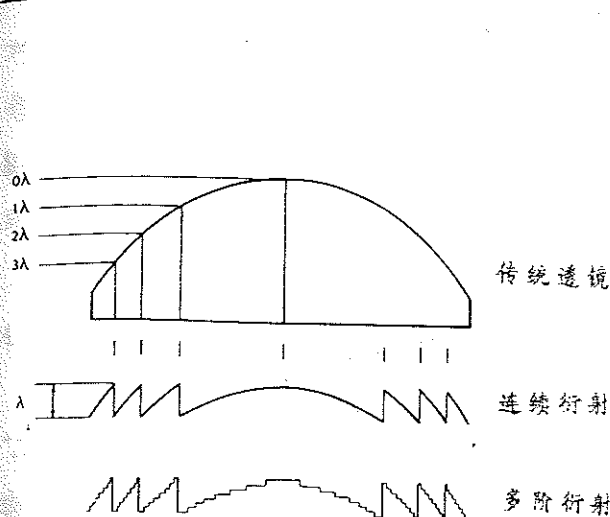


图2-6. FZP器件的演变过程

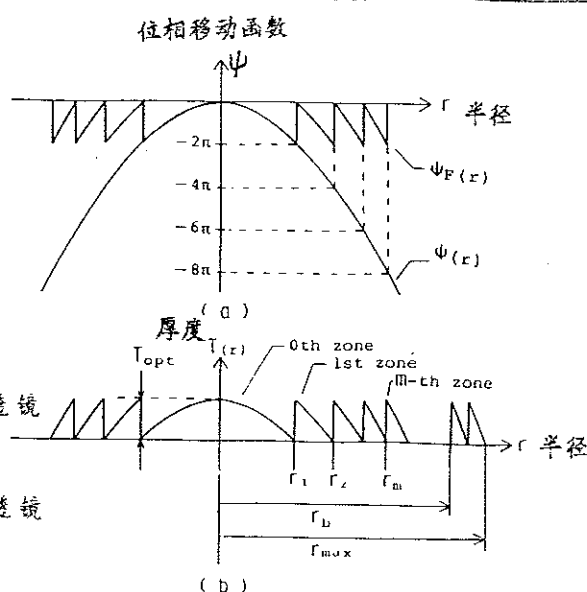


图2-7. (a) FZP器件的位相调制函数

(b) 菲涅耳透镜的厚度分布

FZP的位相移动函数为 $\Psi_F(r) = \Psi(r) + 2m\pi$ $r_m < r < r_{m+1}$ (2-22)

r_m 为第 m 级环带的半径, $\Psi(r)$ 以式(2-16)代入可得FZP的焦距设计公式:

$$f = [r_m^2 - (m\lambda)^2] / 2m\lambda \quad (2-23)$$

若对于大的 F , 则须用 $\Psi_m(r)$ 代替 $\Psi(r)$ 而得 $f = r_m^2 / 2m\lambda$ (2-24)

2. 位相深度 T

FZP的位相延迟由下式表示 $\Delta\Psi = \Delta n T / \lambda$ (2-25)

其中 T/λ 为器件材料的相对厚度, Δn 为器件材料折射率与空气折射率的差值. 由上式可知, 通过改变 Δn 或位相深度 T 就可获得位相移动.

显然后者自由度更大. 如图2-7(b)所示, FZP的位相深度结构可由下式表示 $T(r) = T_{opt} [1 + \Psi_F(r) / 2\pi]$ 其中 $T_{opt} = \lambda / \Delta n$. (2-26)

由于锯齿状位相深度结构在制作工艺上有较大难度, 一般采用矩形逼近法来制作(图2-6清楚显示了逼近过程). 对应于 π 位相延迟, 其位相深度为 $T = \lambda / 2\Delta n$.

3. 环带数 M

对于半径为 R , f -number为 F 的FZP, 其总环带数 M 用下式表示

$$M = \frac{R}{\lambda} (\sqrt{1 + 4F^2} - 2F) \quad (2-27)$$

对于大的F, $M=R/4\lambda F$ (2-28)

借助于F与数值孔径NA的关系 $F=\frac{\sqrt{1-NA^2}}{2NA}$, 式(2-27)可表示为

$$M=\frac{R}{\lambda} \frac{(1-\sqrt{1-NA^2})}{NA} \quad (2-29)$$

对于大的F(即小的NA), $M=R \times NA/2\lambda$ (2-30)

4. 最小环带线宽 $\Delta_{\min}$

$$\Delta_{\min}=r_m-r_{m-1}=R\left(1-\sqrt{1-\frac{2\lambda f+(2M-1)\lambda^2}{2M\lambda f+(M\lambda)^2}}\right) \quad (2-31)$$

$$\because M \gg 1 \quad \therefore \Delta_{\min}=\lambda(f+M\lambda)/R=\lambda/NA \quad (2-32)$$

由上式看出, $\Delta_{\min}$ 与R无关, 仅与NA成反比, 所以制作大NA的FZP对工艺要求较高, 如NA=0.3, $\lambda=0.633\mu\text{m}$ 时, $\Delta_{\min}\approx 2.11\mu\text{m}$ 。目前, 运用化学腐蚀法只能制作 $\Delta_{\min}$ 大于5 μm 的器件, 相应的最大NA值为0.13。(使用波长为0.6328 μm)

5. 衍射效率 η ——式(2-15)即为FZP器件的衍射效率计算公式。

6. 焦点光斑

当一平面波入射时, 在FZP的后焦面上光强分布可由下述艾里函数表示: $I(p)=[2J_1(p)/p]^2$ 其中 $p=(2\pi R/\lambda f)r$ (2-33)

衍射受限点直径(即光强衰至峰值 $1/e^2$ 处的光斑直径)为

$$2W_{1/e^2}=1.64\lambda F \quad (2-34)$$

半宽度(即光强衰至峰值1/2处的光斑直径)为

$$2W_{1/2}=1.03\lambda F \quad (2-35)$$

从上两式可知, 对于小的F可得到小的焦点光斑, 而允许的最小F为

$$F_{\min}=\frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{\lambda}{\Delta_{\min}}\right)^2-1} \quad (2-36)$$

至此, 在理论上, 根据上述的这些公式就可以进行参数设计了。但在实际设计掩膜的过程中还需知道每一环带内黑、白掩膜的各自宽度, 所以要对上述公式进行修正。由于对掩膜而言均属 π 位相起伏调制, 所以将环带的半径定义改为对圆环线条的半径定义, 如图2-8所示。

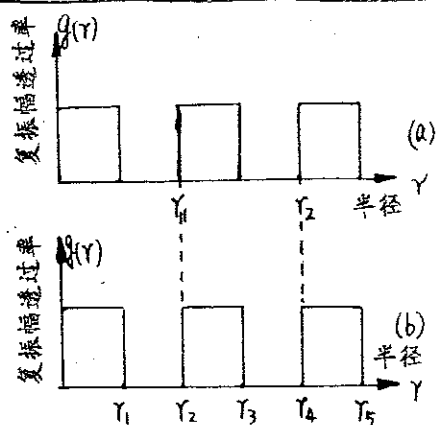


图2-8. FZP器件的环带半径(a)与 圆环线条半径(b)

可见(a)中原定义的 r_1 在(b)中修改为 r_2 , 而(a)中 r_2 在(b)中修改为 r_4 , 即对半径的定义加倍。经修正后, FZP器件的掩膜设计公式组如下:

$$r_m = \sqrt{m\lambda f}$$

r_m : 第 m 级圆环的半径

$$f = r_m^2 / m\lambda$$

f : 焦距

$$T = \lambda / 2\Delta n$$

T : 位相深度

$$M = R / 2\lambda F$$

M : 圆环数目

$$\Delta_{\min} = \lambda / 2NA$$

$\Delta_{\min}$: 最小线宽

$$\eta = |\text{Sinc}(\pi/N)|^2$$

η : 衍射效率 N : 位相阶数

第三节 制作工艺

一、引言

二元光学器件的制作过程是: 首先根据使用要求(波长、孔径、焦距、分辨率等)经CAD确定器件表面的相位分布, 按刻蚀次数设计成 N 个振幅型掩膜, 然后运用微电子技术工艺与设备制作这些掩膜, 最后经光刻、显影、离子刻蚀、去胶而得到器件。其典型工艺过程如图2-9所示。



图2-9. 二元光学器件的制作工艺过程

清华大学学位论文用纸

为制作出高质量的FZP, 我们建立了从制版、光刻到刻蚀、测试一整套的工艺流程(如图2-10所示)。运用这套工艺与设备, 我们制作了2、4、8三种位相阶数的FZP阵列 16×16 和 6×6 。

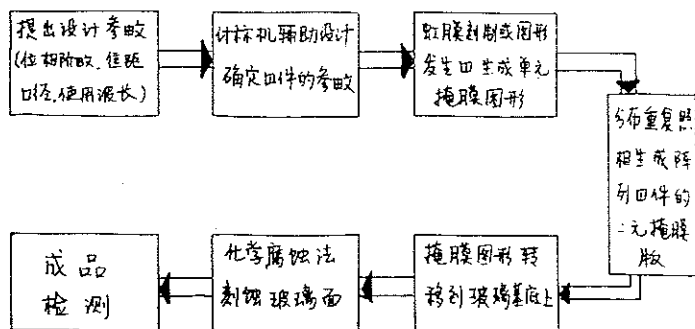


图2-10. FZP器件的制作工艺流程图

二, 计算机辅助设计 (CAD) 确定器件的参数

FZP器件的CAD是不难实现的, 我们根据上一节的公式组编制了 CAD 软件, 其程序框图如图2-11所示, 程序清单见附录1。

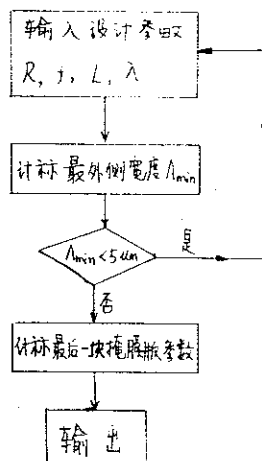


图2-11. FZP器件的CAD程序框图

注意在程序中, 我们只给出了最后一块掩膜版的参数。这是因为随着位相阶数的加倍, 掩膜环带也呈加倍的变化, 从最后一块掩膜版就可方便地知道前几个掩膜版的参数。

三, 单元及阵列器件掩膜版的生成

由上述设计生成的参数就可以开始制作单元透镜的掩膜。我们采用虹膜刻制+照相缩版法, 即先用虹膜刻制一张放大的图形, 然后使用分步重复相机逐次缩至所需尺寸。它操作简单、成本低, 而且由于使用了

计算机控制的刻图仪，提供了高度的自由性和可观的精确度（通常刻图误差在2mm范围内可保持为10μm左右）。

为充分利用透镜的空间作用区域，将单元掩膜图形由圆形扩展为方形，即在四个角域也填充了圆环波带，这些波带仍遵循FZP的环带分布规律。（如图2-12）

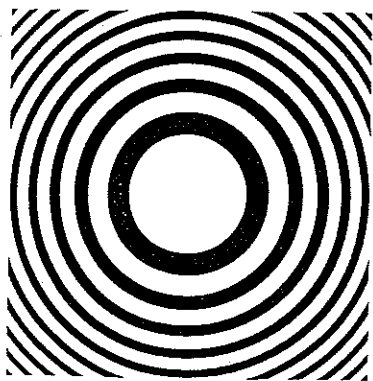


图2-12. FZP器件的环带分布情况

在得到单元掩膜图形后，对其照相粗缩，然后运用高精度分步重复相机进行精缩，通过控制分步重复的步数和步距可得到所需阵列器件的掩膜图形。16×16阵列器件的步数为16，步距为1mm；6×6阵列的步数与步距分别为6和7mm。

四、刻蚀工艺

在制得器件的掩膜版后，就可以开始运用刻蚀工艺制作器件了。目前国外主要用电子束或离子束刻蚀法作为刻蚀工艺，由于这些方法对设备要求较高，国内的工艺水平还远远落后，所以基于现有条件，我们采用光刻对准+化学腐蚀的刻蚀工艺方法。其工艺流程如图2-13所示：

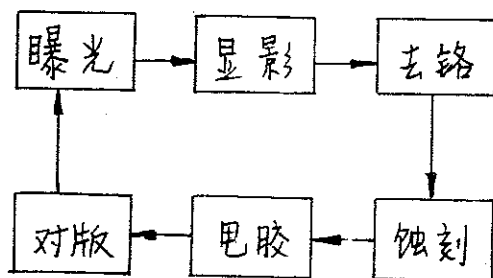


图2-13. 化学腐蚀法的工艺流程

清华大学学位论文用纸

1. 曝光 (又称图形转移)

运用涂有光刻胶 (AZ-1350 正性光刻胶) 的铬版, 进行接触式曝光, 掩膜版的药面与铬版的药面相对。(如图 2-14)

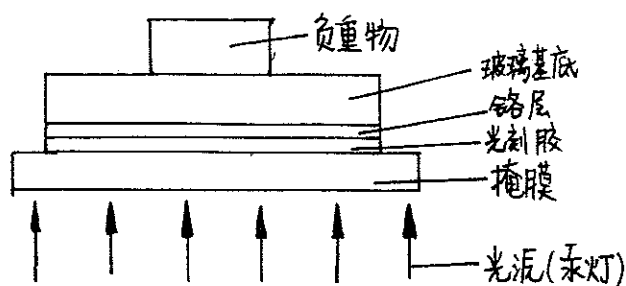


图 2-14. 曝光系统示意图

光源采用高压汞灯, 曝光开始前应预热 30 分钟以上。曝光时间约为 1 分 10 秒 ~ 1 分 40 秒, 对于线宽小的图形要减曝光, 线宽大的图形要加曝光。

2. 显影

显影液采用 7%-8% 的 NaOH 水溶液, 由于使用的是正性光刻胶, 所以感光的胶层被显去。显影时间一般为 8 秒左右, 当看到铬版表面有棕红色物质溶解时洗涤基片一两次即可。对于曝光不足或过头的基片, 可通过延长或减少显影时间来进行补偿。

3. 去铬

去铬溶剂是由硝酸四铵水溶液加入高氯酸配制而成, 浓度为 17% 左右。将显影后的基片放入溶剂中, 等到未被光刻胶覆盖着的铬层去掉即可。注意此过程时间不能太长, 否则会吃掉被光刻胶覆盖着的铬层。

4. 蚀刻

腐蚀剂由一份氢氟酸加上一份磷酸配制而成, 使用时还需加一倍左右的水进行稀释。酸的浓度越低, 蚀刻深度越易控制, 但相应的腐蚀时间也越长, 因此必须试验出最佳的酸浓度。

腐蚀深度的控制借助于干涉显微镜来进行。^[82] 正确调整好仪器后, 视场里可同时看到被测量表面和由于加互或划痕而引起弯曲的干涉条纹 (如图 2-15)

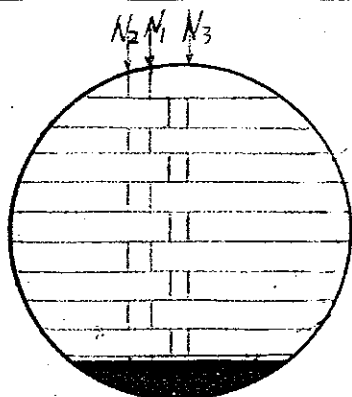
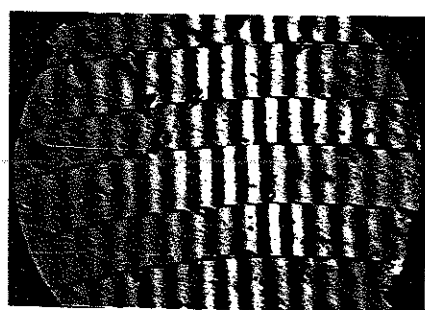


图2-15. 干涉条纹示意图

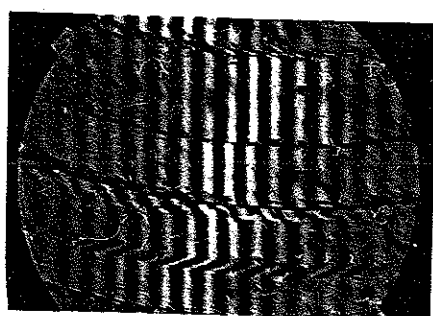
首先测量出干涉条纹之间的间隔 $|N_2 - N_1|$ ，然后测量出条纹的弯曲量 $|N_3 - N_1|$ ，最后可根据下式计算表面深度 t 。

$$t = 0.27 |N_3 - N_1| / |N_2 - N_1| \text{ um} \quad (2-37)$$

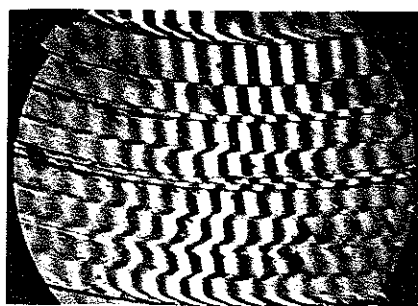
由于诸如温度、湿度等外界因素对腐蚀精度的影响较大，一般在每次正式腐蚀器件前均要进行试腐蚀，即先用同样质地的废玻璃基片测量出一段时间内对应的一些腐蚀深度值，然后根据这一标准来掌握腐蚀时间以达到控制位相深度的目的。图2-16为研制的2、4、8阶位相型FZP器件的干涉条纹照片。



(a)



(b)



(c)

图2-16. FZP器件的干涉条纹照片 (a)2阶 (b)4阶 (c)8阶

其中上图(a)所示器件的实测深度为 $t = 0.27 \times 2.3 = 0.621 \text{ um}$ ，而理论值

为 $t = \lambda / 2 \Delta n = 0.6328 / (2 \times 0.5163) = 0.613 \text{ } \mu\text{m}$, 相对误差为 1.3%。

蚀刻完成后若接着进行去胶、去铬, 则可获得一个二阶位相型 FZP 器件。制作位相阶数为 $L=2^N$ 的 FZP 则需 N 块掩膜版, 套刻 $N-1$ 次才能实现, 例如 8 阶位相 FZP 需要 3 块掩膜版套刻 2 次而得 (如图 2-17), 所以制作多阶位相型 FZP 需要继续进行下述的互艺过程。

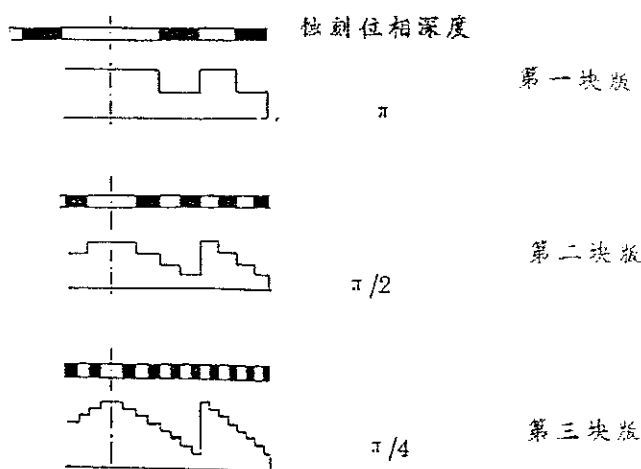


图 2-17. 掩膜版的光刻互艺过程

5. 甩胶

将制得的二阶 FZP 器件清洗干净后固定在甩胶机的转盘上, 待离心泵转速均匀后, 滴上 3-4 滴 AZ-1350 光刻胶甩上 1 分钟即可, 胶膜厚度约为 $10 \mu\text{m}$ 左右。这一步操作的关键是基片洁净、甩胶均匀。

6. 对版套刻

将甩好胶的 2 阶 FZP 与第二块掩膜版精确对准后光刻, 经曝光、显影、去铬、蚀刻等互艺而制得 4 阶 FZP, 对于 2^N 阶 FZP 器件需重复上述步骤 $N-1$ 次才能制得。

套刻互艺的难点在于获得高的对准精度。我们采用的方法是在掩膜版两侧制作对版标记, 利用它们的对准来实现前后两块掩膜版的套刻, 限于设备条件, 我们在小型互具显微镜上用手互方法来完成标记的对准, 虽费时费力, 但仍制作出了 8 阶位相型 FZP 器件。

四, 互艺误差的讨论

综上所述互艺, 在一基底上制作出台阶状的位相起伏结构需要以下过程: 掩膜图形的产生; 掩膜图形的传递和光刻胶显影; 各向异性刻蚀。

以上三步均会产生加互误差, 分别定义为掩膜对版误差; 线宽误差(产生于曝光不足或过头); 刻蚀深度误差。图2-18和图2-19 分别表示了线宽误差和对版误差的情况。[88]

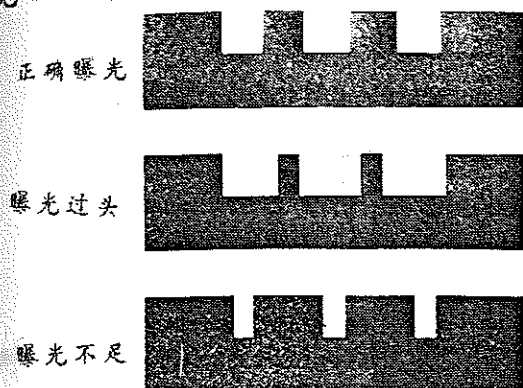


图2-18. 线宽误差示意图

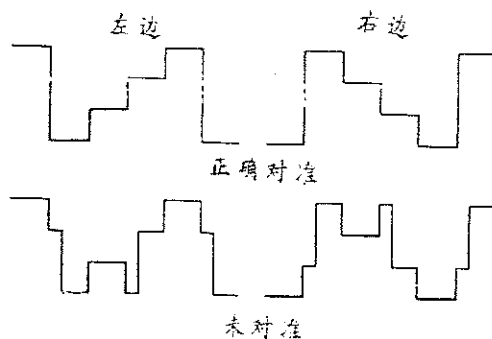


图2-19. 对版误差示意图

对于2阶位相结构, 它没有对版误差, 可用来检查深度误差和线宽误差的敏感性。图2-20显示了深度误差的敏感性, 可以看出, 2阶FZP的深度误差对衍射效率没有很大影响, 同样4阶 FZP第一块版深度不够时, 可通过第二块版的深度过头来补偿, 所以也不会大幅度地影响衍射效率。

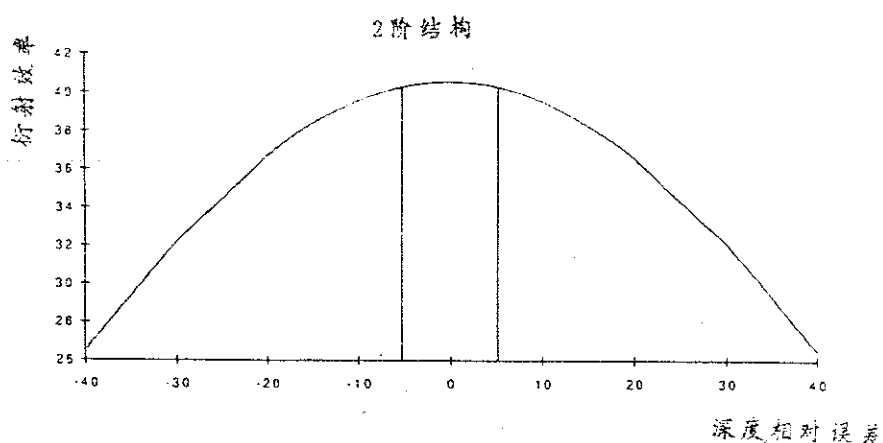


图2-20. 深度误差与衍射效率的关系

线宽误差敏感性的实验观察是对光刻胶显影不足进行的, 研究表明, 对于指定的线宽误差, 在元件中心处可获得接近理想的衍射效率而在外环带有5%的损失, 所以也可认为线宽误差对衍射效率没有很大影响。

对于4阶位相结构, 可用来检验对版误差的敏感性(设此模型只有对版误差), 图2-21为研究结果, 可以看出, 相对较小的对版误差会导致衍射效率的大幅度下降(从中心的5%到边缘的19%)。

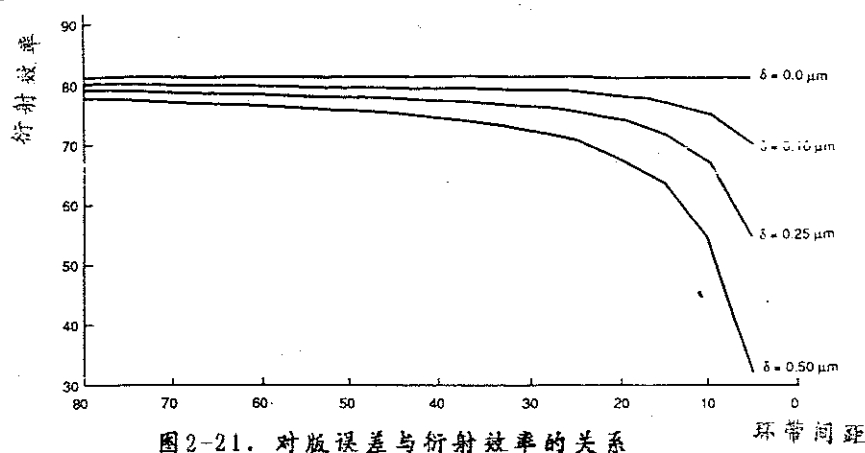


图2-21. 对版误差与衍射效率的关系

综上三种误差，对版误差对衍射效率的影响最为显著，因此控制好对版精度对制作出高质量的器件有着重要的意义。

第四节 检测结果

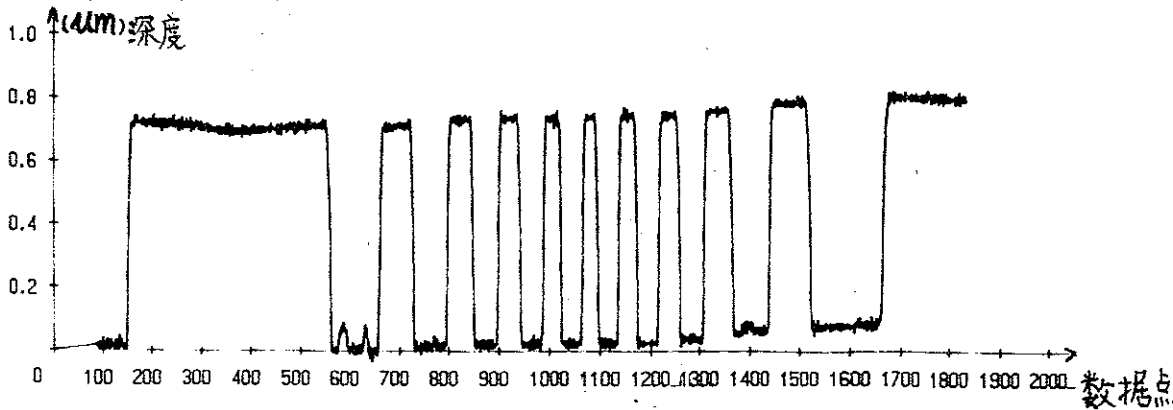
对于所研制的三类FZP型器件，我们从表面形貌、光点性能和衍射特性三个方面完成了检测工作。器件的具体设计参数如表2-3所示：

表2-3. 三种FZP器件的设计参数表

阵列数	单元尺寸	焦 距	位相阶数	使用波长
16×16	1 mm×1 mm	39.5 mm 79 mm	2 阶 4、8 阶	0.6328 μm
6×6	直径D=4.5 mm	172.9 mm	2、4 阶	0.488 μm
1×1	长L=1.005 mm 宽W=1 mm	长f=5.058 mm 宽f=5.008 mm	2、4、8 阶	0.785 μm

一、表面形貌

我们运用台阶仪对器件的剖面位相结构进行了测量，经数据处理绘图软件(见附录2)，借助于Roland DY-800A型绘图仪即可得到2、4、8阶FZP的位相结构(如图2-22)。



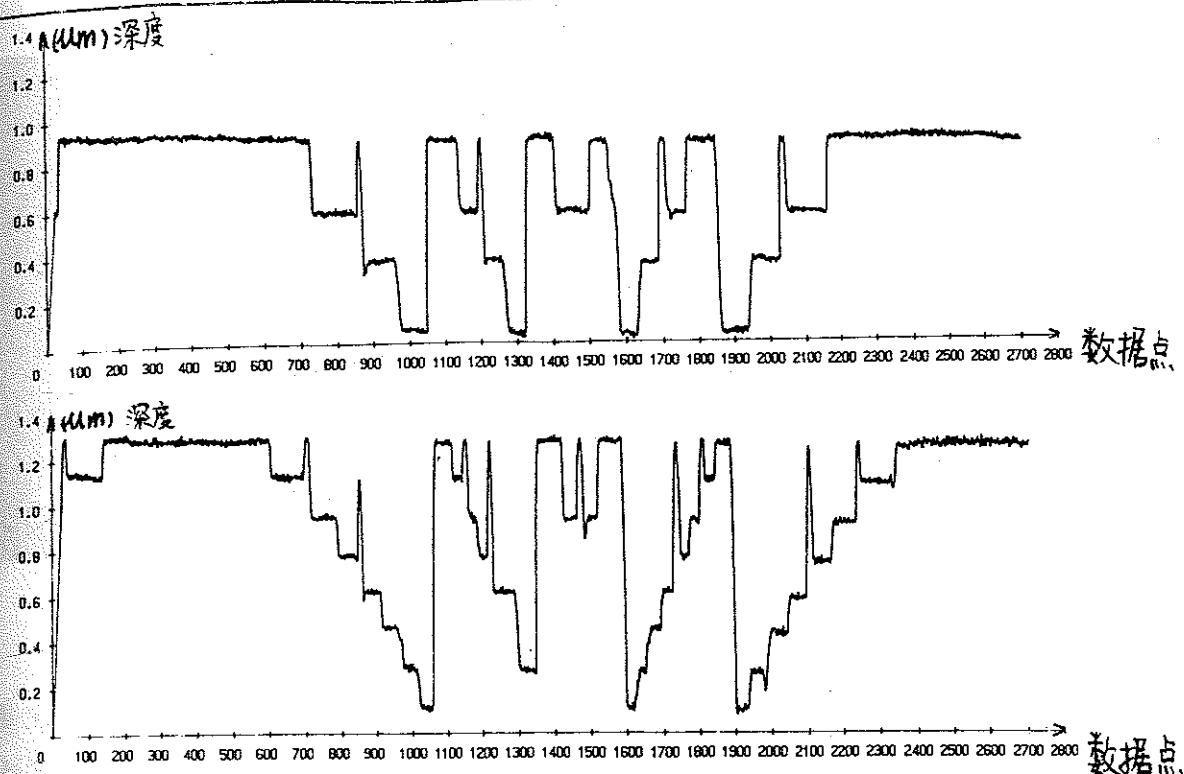


图2-22. FZP器件的表面位相结构 (a)2阶 (b)4阶 (c)8阶

注意到8阶结构中分别在第2和第4阶位相有突起，它们分别是由第一次和第二次对版的误差所产生，这一现象在4阶结构中也可清楚看出。图2-23为所研制的8阶 16×16 阵列FZP器件的表面微观结构照片。

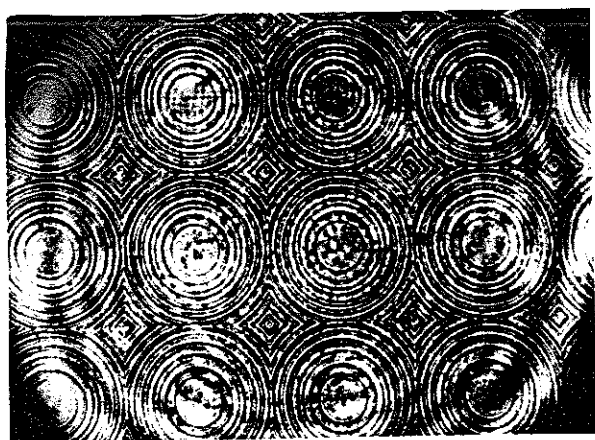


图2-23. FZP器件的表面微观结构照片

借助于美国WYKO公司的TOPO-3D表面形貌检测仪(其外观与原理图如图2-24, 2-24所示)，对所研制的2阶和8阶FZP器件进行了测量。

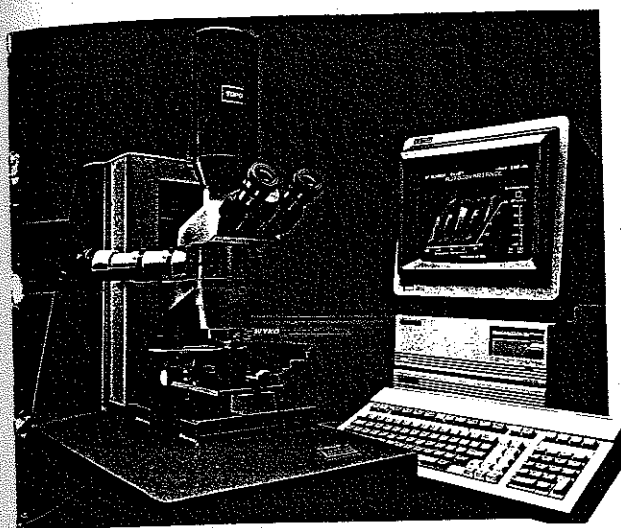


图2-24. TOPO-3D形貌仪的外观图

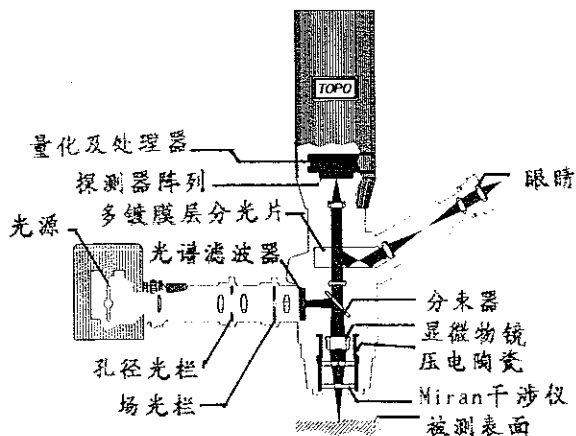
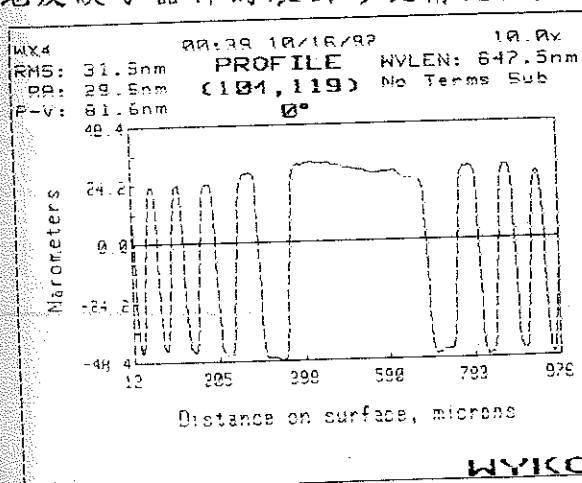
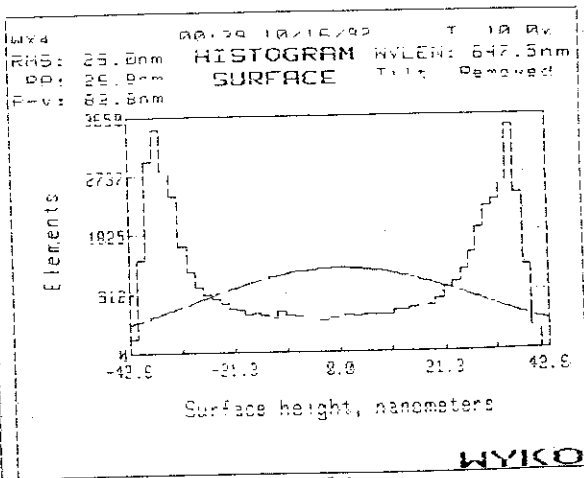


图2-25. TOPO-3D形貌仪的原理图

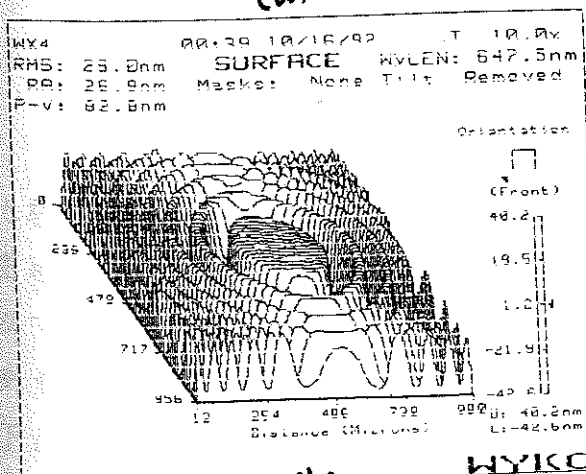
测量结果如下(注意下述图例均为示意图而不是精确测量图, 这是因为测量前未进行标定, 数据只有相对的意义, 但这些测试结果仍清楚地反映了器件的表面形貌情况。)



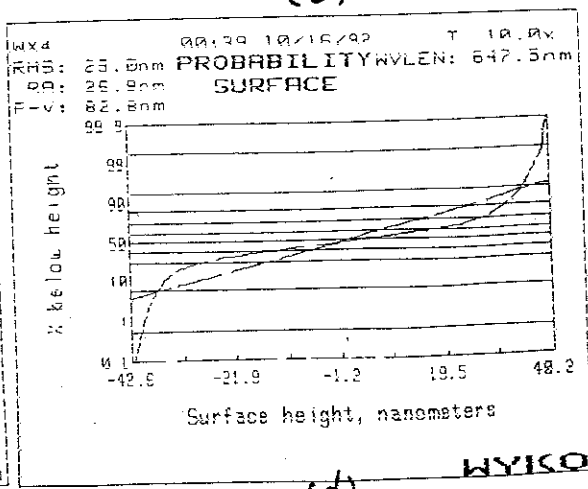
(a)



(c)



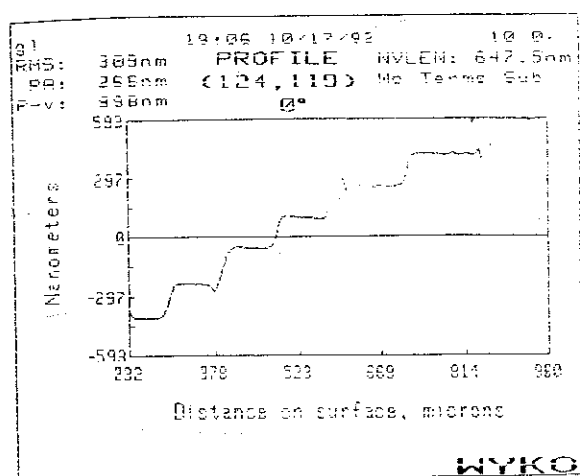
(b)



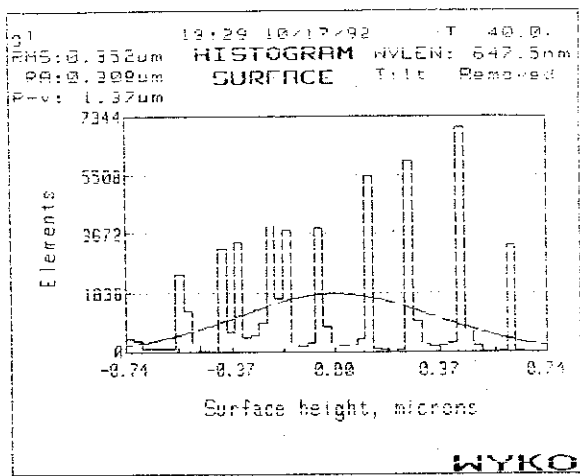
(d)

图2-26. 2阶FZP的位相结构测量图

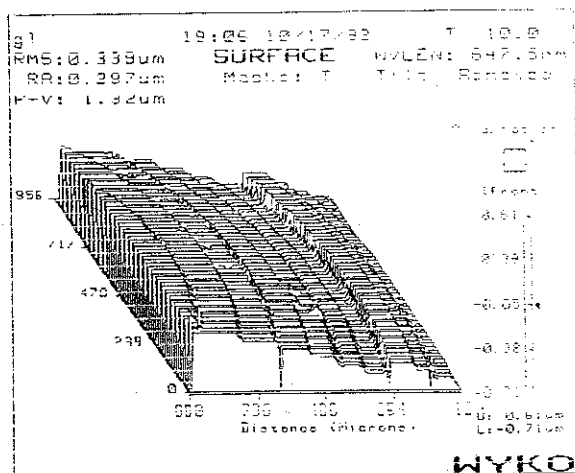
2阶器件的测量情况如图2-26所示, 其中(a)2维剖面结构 (b)3维表面形貌 (c)测量时采样点数据分布的直方图(其中~线为理想情况) (d)槽形深度的分布图(其中直线/为理想情况) 8阶器件的测量情况如图2-27所示, 其(a)~(d)含义均同图2-26。



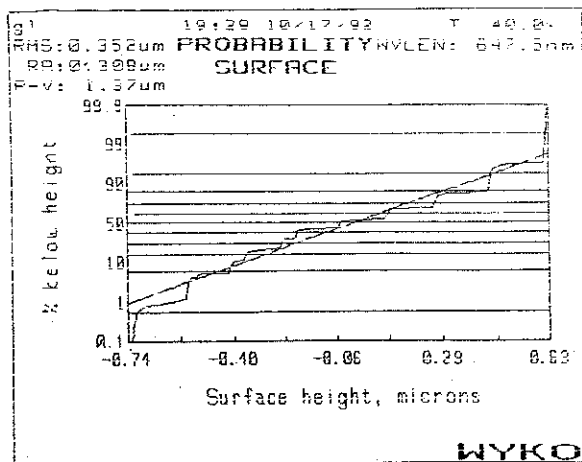
(a)



(c)



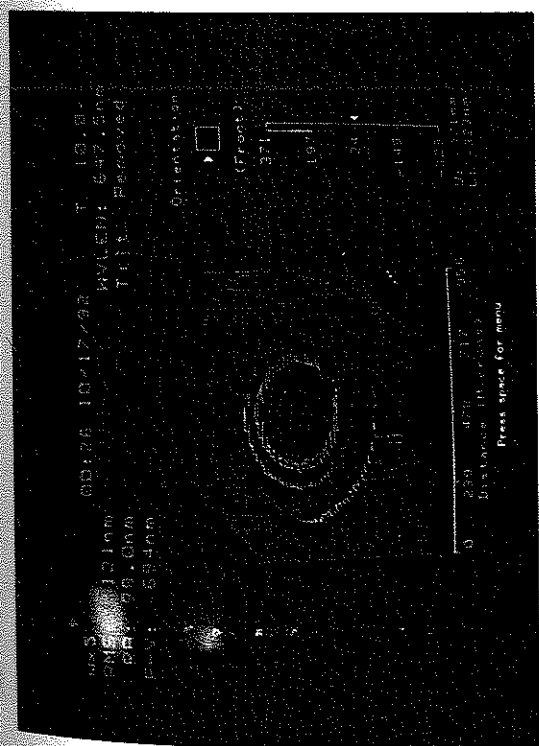
(b)



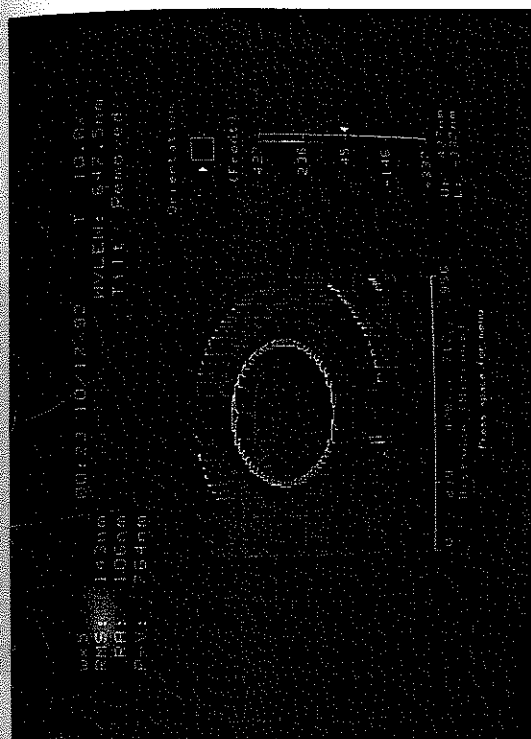
(d)

图2-27. 8阶FZP的位相结构测量图

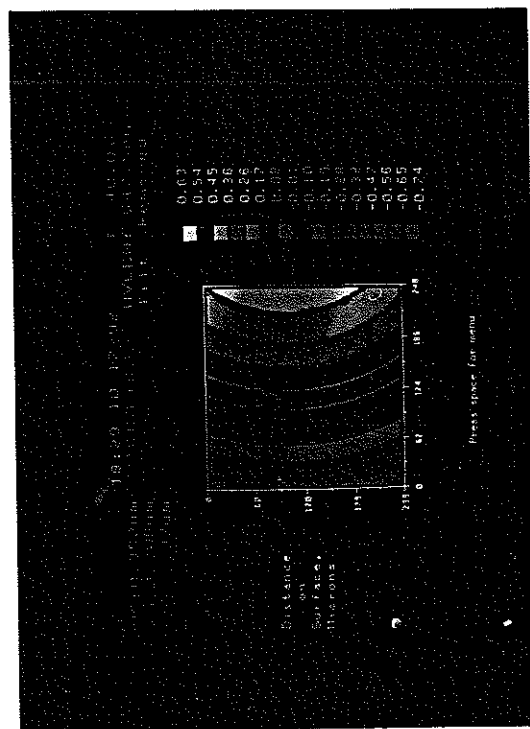
比较图2-26与图2-27的(c)、(d)可看出, 8阶器件的直方图和槽深分布图较2阶器件更接近理想情况。为清楚地看出器件的表面形貌, 拍摄了以下照片(如图2-28), 注意照片中的不同颜色代表不同位相深度, 由于测量时视场的限制, 8阶器件只测出了7个位相台阶(中心零平面未记录下来)。



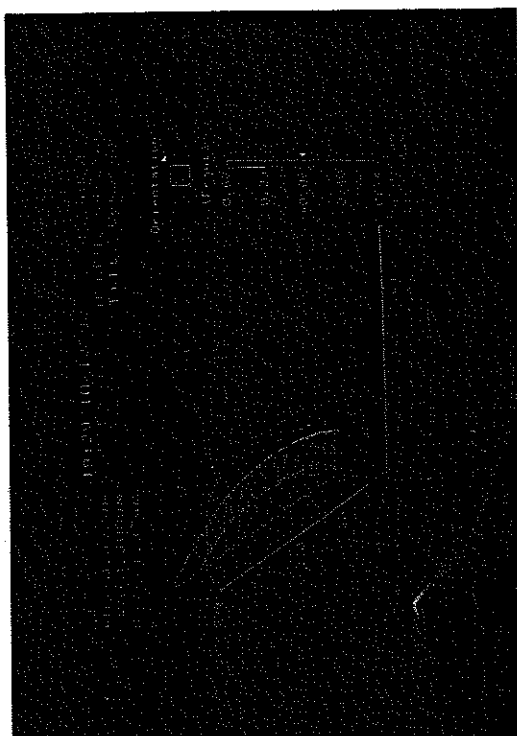
(a)



(b)



(c)



(d)

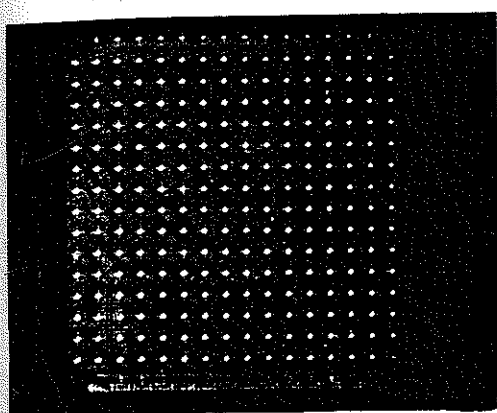
图2.28. FZP器件表面形貌的彩色照片

清华大学图书馆 (Tsinghua University Library) 100084 北京 (Beijing, China)

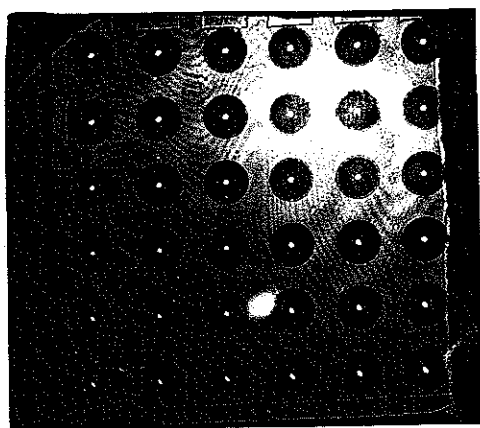
二, 光点性能

1. 点阵的不均匀性

16×16 阵列和 6×6 阵列FZP生成的点阵如图2-29所示, 图2-30为 16×16 阵列FZP的示波器扫描波形。



(a)



(b)

图2-29. 点阵照片 (a) 16×16 (b) 6×6

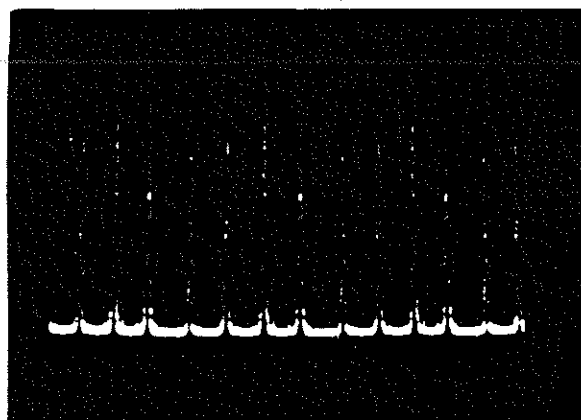


图2-30. 16×16 FZP的扫描波形

运用所研制的CCD采样存储仪(详见第四章)可将光点强度量化, 经处理而得点阵的不均匀性。表2-4为检测结果。

清华大学学位论文用纸

表2-4. 点阵之不均匀性的检测结果

器件	位相阶数	测量值 (%)			平均不均匀性 (%)
		第一次	第二次	第三次	
6x6	2	32.2	33.1	31.8	32.4
16x16	2	22.1	21.6	21.7	21.8
	4	24.8	26.1	25.6	25.5
	8	31.1	29.8	30.4	30.4

2. 单个光点分布

图2-31为16×16阵列FZP单个光点的示波器扫描波形，相应的单光斑照片如图2-32所示。

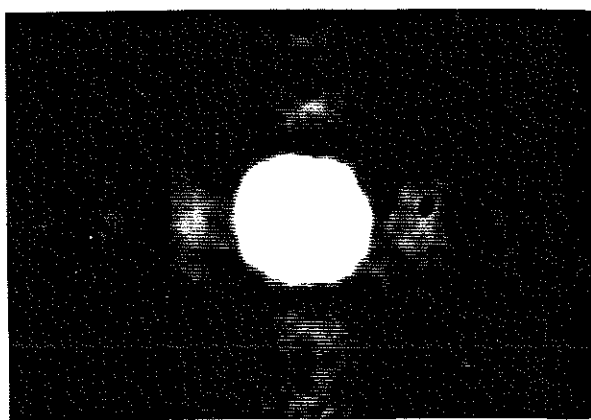
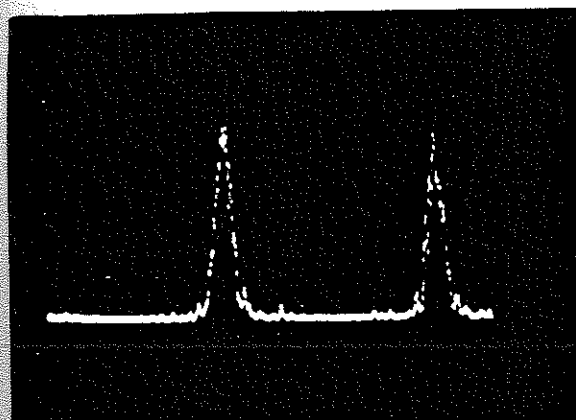


图2-31. FZP器件单光点的扫描波形

图2-32. FZP器件的单光斑照片

运用CCD采样存储仪进行数据采集及处理可获得单光斑的衍射受限直径 $2W_{1/e^2}$ 与半宽度 $2W_{1/2}$ 。

理论上对于16×16阵列， $f=80\text{mm}$ ， $D=1\text{mm}$ ，所以 $2W_{1/e^2}=83\mu\text{m}$ ， $2W_{1/2}=52\mu\text{m}$ ；而检测结果为 $2W_{1/e^2}=91\mu\text{m}$ ， $2W_{1/2}=52\mu\text{m}$ 。对于6×6阵列， $f=86.45\text{mm}$ ， $D=4.5\text{mm}$ ，故 $2W_{1/e^2}=15.3\mu\text{m}$ ，由于CCD最小像素为13μm，难以分辨这一直径，所以未得到检测结果。

三. 衍射性能

如图2-33所示，衍射效率的定义为 $\eta = (I_a - I_b) / I_a$ (2-38)

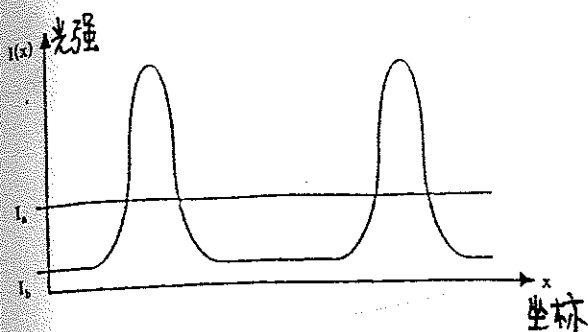


图2-33. 衍射效率的定义示意图

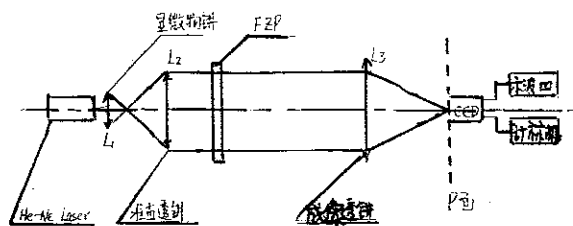


图2-34. 衍射效率的测量光路图

其中 I_a 为不加器件时的光强常量, I_b 为加入器件后在焦点光斑之间的背景光强值, 为补偿菲涅耳反射与折射损失, 在测量 I_a 时加入了一块同样口径的白玻璃片。2、4、8阶 16×16 阵列器件衍射效率的测量光路如图 2-34, 测量结果如表 2-5。

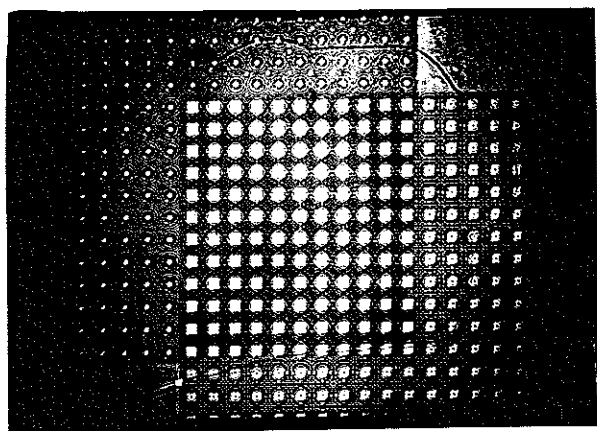
表 2-5. 器件衍射效率的检测结果

	2 阶 (uw)			4 阶 (uw)			8 阶 (uw)		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
I_a	0.49	0.47	0.50	0.53	0.48	0.51	0.45	0.43	0.40
I_b	0.30	0.30	0.31	0.24	0.21	0.23	0.15	0.15	0.14
η	38.8%	36.2%	38.0%	54.7%	56.3%	54.9%	66.7%	65.1%	65.0%
平均	37.7 %			55.3 %			65.6 %		

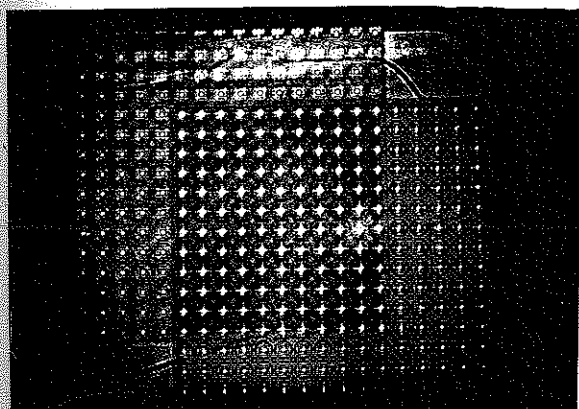
在测量光路中, 由于光点及光点间距均很小, 为满足测量时一次只记录一个光点强度值, 在功率计探头上加了一个大小合适的光栏。

关于位相阶数与衍射效率变化的内在机理可作如下理解: 对于 2 阶 FZP, 有 ± 1 级两个主焦点(一个为实、一个为虚), 因此它既是一个正透镜又是一个负透镜。对于 4 阶和 8 阶 FZP, 基本上去掉了虚的主焦点而只剩下一个实的主焦点, 所以只能作为正透镜, 并且由于其它焦点的能量也集中到了这一主焦点上而使衍射效率得以大幅度提高。在制作 4 阶 16×16 阵列 FZP 的过程中, 有意错位对版(只对了 12×12 阵列)而得到一片 2、4 阶混合器件。由于该器件有两个不等的焦距值, 这给上述的讨论提供了一个极好的检测互具。2 阶 FZP (由第二块掩膜版未经对版而产生) 的

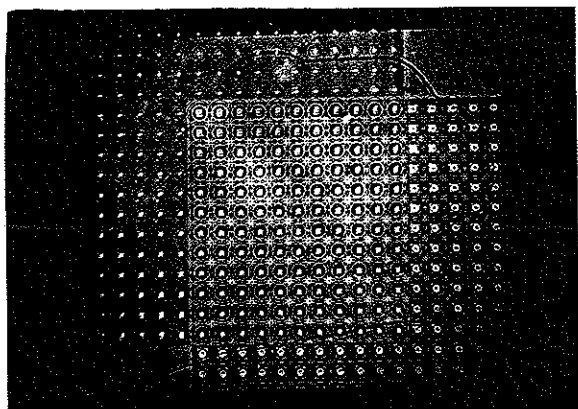
$f = \pm 39.5 \text{ mm}$, 有两个焦面; 4阶FZP(对版产生)的 $f = 79 \text{ mm}$, 只有一个焦面。图2-35表示了这些焦面的变化情况。



$f = 39.5 \text{ mm}$ 面上的光点阵列



$f = 79 \text{ mm}$ 面上的光点阵列



$f = -39.5 \text{ mm}$ 面上光点阵列的成像

图2-35. 2、4阶混合器件的焦面变化情况

第五节 应用研究

一、光学神经网络关联记忆系统

人互神经网络是由大量的简单神经元元件（模拟电子元件、光学元件等）广泛互连而成的复杂网络，其最重要的两个特征是大规模互连能力和并行处理能力^[84]。关联记忆是神经网络理论的应用之一，具有传统的地址存储器所无法比拟的联想及容错功能。神经网络的实现技术主要包括光学方法、电子学方法及光电混合技术。在速度和大规模互连方面光学技术颇有前途，而电子技术在通用性、灵活性方面有一定优势，就当前而言，致力于光电混合技术的研究是最具有应用前景的方向。

运用研制的 6×6 阵列器件作为二维神经元之间的三维互连，可实现光电混合式二维可编程关联记忆。图2-36为其系统原理图。^[85]

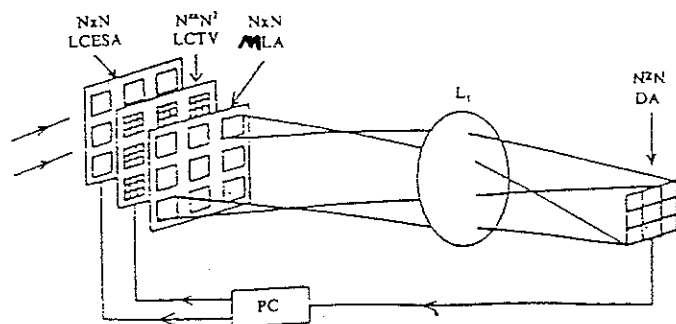


图2-36 可编程二维关联记忆系统

其中液晶电光开关阵列 (LCESA) 用作可控寻址输入器件，液晶电视 (LCTV) 用于存储量化的互连权重矩阵。对于一个 $N \times N$ 关联记忆系统，需要实现 N^2 互连，常用的光学互连器件是体全息透镜阵列，但制作高衍射效率、均匀的体全息透镜阵列的困难随着阵列中子透镜数目的增加而明显加大，为此我们研制了一种新型的互连器件——微透镜阵列 (MLA) 以实现二维神经元之间的 N^2 互连。系统的最后输出模式由光电探测阵列器件 (DA) 来接收并反馈、阈值操作采用光电混合方法完成，整个系统由一台微机控制运行。

二、多重成像系统

1. 概述

在平行处理中,有许多情形都要求系统具有把非相干光或相干光照明下的输入图形分割成许多微图形即多重成象的功能,例如在多通道空间变处理、矩阵矢量相乘、光计算及图形识别等应用^[86]中。目前已有位相光栅^[87]、光纤光栅^[88]、针孔阵列^[89]及全息光学元件^[40]等多种多重成像的器件及系统,但都存在着一些不足之处,如位相光栅难以获得均匀光强分布,而全息光学元件不能获得高分辨率,同时再生产性也是一个问题。我们运用研制的 6×6 FZP 器件实现了一种新型的多重成像系统^[41],它具有其它一些多重成像系统所没有的特点。

2. 实验系统与原理

图2-37所示为系统原理图,全系统由两个微透镜阵列 L_1 和 L_4 及两个普通透镜 L_2 和 L_3 所组成。

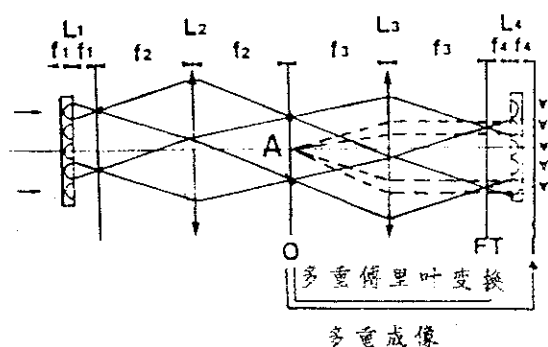


图2-37 多重成像系统原理图

微透镜 L_1 由平行的相干光照明,被处理的图形A置于 L_2 的后焦面上。由几何光学原理不难理解,由于不同方向的准直光束照明图形A,因而在 L_3 的后焦面上产生图形A的多重付里叶变换,多个变换频谱的位置与微透镜阵列 L_1 中多个单透镜位置一一对应。只要输入图形的最高频率不是很高而不致使相邻频谱发生重迭,那么该系统就可实现空间频率面上的光学处理。为得到输入图形A的多重像,实现像空间的处理,可加入一微透镜阵列 L_4 ,经第二次付氏变换,在 L_4 的后焦面上得到A的多重像。

这样,我们就同时获得了多重像与多重谱。本系统具有以下特点:

- ① 系统是基于几何光学成像原理而不是卷积或衍射,因此具有调节灵活的特点。
- ② 在传统的多重成像系统中,多重像的排列一定是周期性的,而本系统

由于使用微透镜阵列，多重像的排列形式可以是任意的或非周期性的，从而可适用于不同的场合。

③微透镜阵列中每个单元相互独立，可单独设计。例如当阵列中两个单元的焦距设计成不相等时，可以把多重像和多重谱成在同一平面上。如图2-38所示，此时用一个光学系统，在同一平面上得到空间不变性的谱和空间变性的实像，这一特点在光信息处理中极有应用前景。

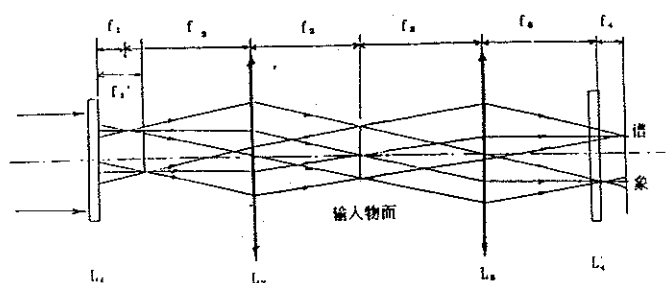


图2-38 改进的多重成像系统原理图

④系统中每个成像光路的光轴都是平行的，所以它的多重像输出可以作为下一系统的输入，易实现级联。

3. 实验结果

图2-39为实验光路图（为缩小体积，采用了多次转折的结构），系统的参数如下：微透镜阵列 6×6 ，单元尺寸4.5mm，单元间距7mm，焦距为86.45mm；大透镜，焦距308mm，相对孔径为1/5。

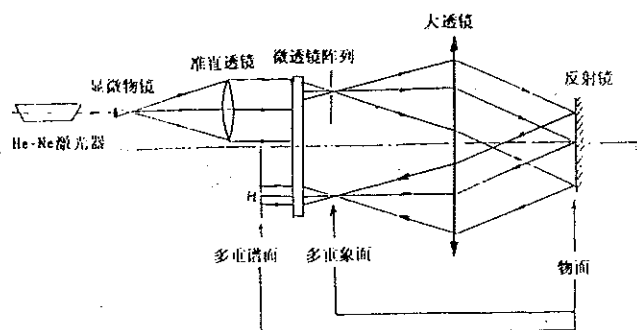


图2-39 多重成像系统的实验光路图

多重像的实验结果如图2-40所示（实验中输入图形为H），实验装置的实物照片如图2-41所示。

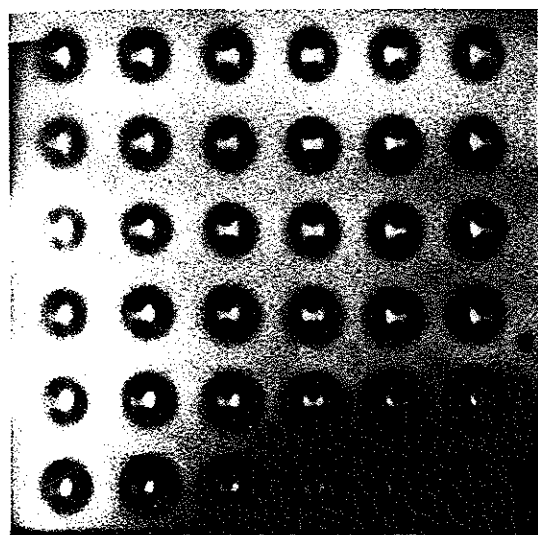


图2-40. 多重像的实验结果

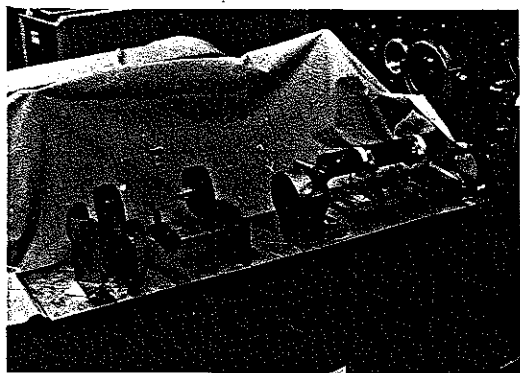


图2-41. 多重成像装置

实验效果不是很理想，其原因主要有两个：

- ①系统输入图形的轴外照明不完全同于轴上照明，会产生象差而影响了象质。解决的办法可以通过设计单元滤波掩膜来进行校正补偿。
- ②使用的微透镜只有2阶位相，其衍射效率不够高，而影响了成像质量。随着位相阶数的提高，器件性能的改善，可望获得好的象质

三、半导体激光器的象散校正系统

半导体激光器以其体积小、重量轻、结构简单、易于集成等优点而在光通、光盘、全息照相术、激光准直、测距等方面得到了广泛应用并已开始在光信息处理、光存储和光计算等领域^[42]发挥积极作用，但半导体激光器严重的象散极大地限制了它在更多方面的应用。运用我们设计的多阶位相型奇异菲涅耳波带片作为消象散准直器件可以有效地校正半导体激光器的象散，获得高度准直的输出光束^{[43][44]}。

首先考察半导体激光器的辐射特性。所有的半导体激光器有一共同的非对称输出特性，即在垂直和平行于结面方向上激光光束的发散角不同。这是因为衍射作用使得在输出面上较窄的垂直尺寸引起的光束发散角比平行方向大，通常两角度之比为2:1~6:1， $\theta_{\parallel} = 10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ， $\theta_{\perp} = 30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ($\theta_{\perp} > \theta_{\parallel}$)，激光器输出光束之光强分布如图2-42所示。

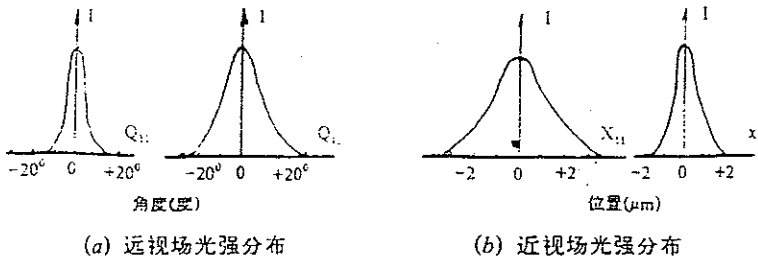


图2-42 半导体激光器输出光束的光强分布图

可以近似认为垂直方向的发光点 A_y 很接近于输出窗，而在平行方向的发光点 A_x 远离输出窗。（如图2-43）则输出光束的象散 A_s 可表示为

$$A_s = A_x - A_y \tag{2-39}$$



图2-43 半导体激光器的辐射特性

为得到准直的输出光，需要设计一种在垂直与平行方向上焦距差值为 A_s 的透镜；同时由于激光器发散角较大，为防止能量损失，需采用数值孔径较大的透镜。这两点给传统工艺带来了较大难度，但二元光学技术可以克服这一困难。

FZP器件的透过率函数为：

$$g(r^2) = g(x^2 + y^2) = g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\left(2\pi i n \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}\right) \tag{2-40}$$

式中二次球面波因子可以转换为两个一维因子的乘积，即

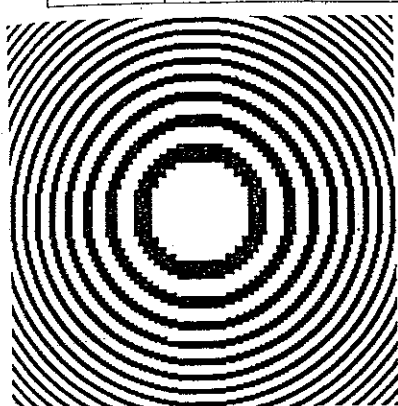
$$\exp[2i\pi N(x^2 + y^2)/r_p^2] = \exp(2i\pi N x^2/r_p^2) \exp(2i\pi N y^2/r_p^2) \tag{2-41}$$

因此可以在X、Y两方向上分别设计具有不同尺度的线性图形，而在每个方向上仍然遵循FZP的原理，只要将X与Y两方向上的焦距差值设计为半导体激光器的象散值，就可以达到校正波面的目的。为使这一设计思想在工艺上易于实现，即为节省图形发生器绘制掩膜图形的时间，可将椭圆线条的逼近生成简化为直线线条的直接生成而制得奇异菲涅耳波带片。

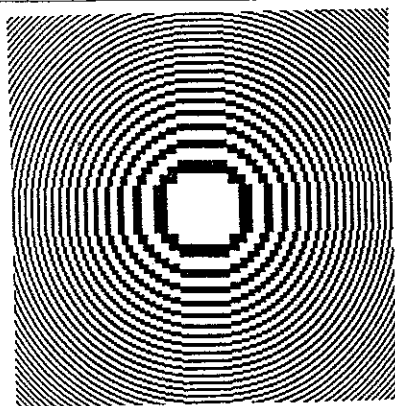
日本Sharp公司生产的LT022MD型半导体激光器^[46]，其工作波长785nm，发散角 $\theta_{//1} = 11^\circ$ ， $\theta_{\perp} = 33^\circ$ ，象散值为50 μm 。设计的8阶位相器件参数如表2-6所示。三块掩膜版的图形如图2-44所示。

表2-6. 消象散准直器件的设计参数

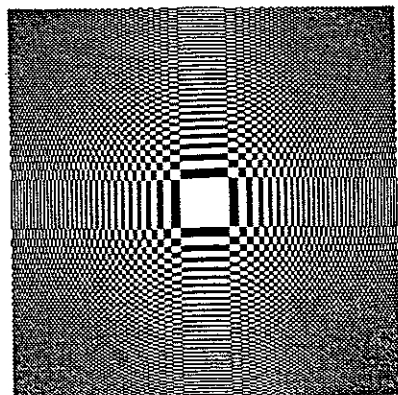
	长 度	焦 距	环带数	最小线宽	相对孔径	象散校正角度
X方向	1mm	5.008mm	64	$3.926\ \mu\text{m}$	0.1997	11.4°
Y方向	1.005mm	5.058mm	64	$3.945\ \mu\text{m}$	0.1987	11.35°



第一块版



第二块版



第三块版

图2-44. 消象散准直器件的掩膜版图形

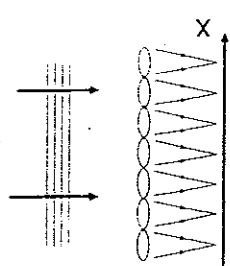
四、透镜光栅系统

1. 点阵发生器

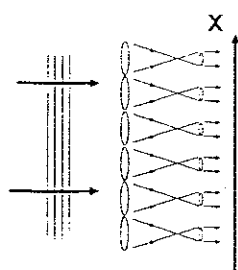
当一光束通过某一光学元件时，若被分割成许多微阵列光斑，则称此器件为点阵发生器。这种器件充分发挥了光学处理的高速性及高并行性的优点，可以进行光功率分配，多通道互连及微图形传输等五作，此外在光通讯、光学数据存贮、空间变图像处理及光电混合处理等领域有着广阔的应用前景。[46][47][48]

目前已有的多种点阵发生器，大致可分为以下四类：

- ① 成像平面点阵发生器：[49][60] 使用一特殊器件将点阵产生在像面上。图2-45为其示意图。



(a) 透镜阵列



(b) 望远镜阵列

图2-45 两种平面成像点阵发生器

②菲涅耳平面点阵发生器：^[61]由特殊元件的菲涅耳衍射而产生点阵。图2-46为其示意图。

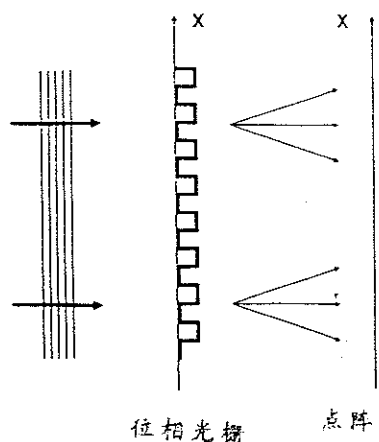


图2-46. 基于分数Talbot效应的菲涅耳平面点阵发生器

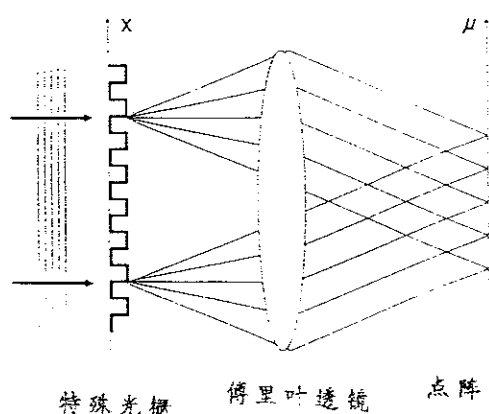


图2-47. 基于特殊光栅的付氏平面点阵发生器

③付里叶平面点阵发生器：^[62]由特殊元件的夫朗和费衍射或付里叶变换而产生点阵。图2-47为其示意图。

④级联型点阵发生器：^[63]通过几个器件依次级联将光斑逐次分束而形成大数目的点阵。图2-48为其原理图。

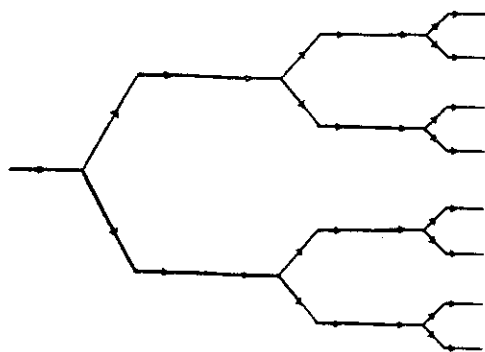


图2-48 级联型点阵发生器的示意图(分束比为2)

2. 透镜光栅^[64]

若把透镜阵列作为成像平面点阵发生器时，光点阵列的均匀性直接受到入射光束的影响，而把透镜阵列作为付里叶型点阵发生器时（如图2-49），则在付氏平面上的点阵比传统的透镜阵列所产生的点阵要小得多（这是因为此点阵由一个比单透镜大得多的孔径产生），而且点阵强度分布可以在一个大的区域内保持较均匀的状态。

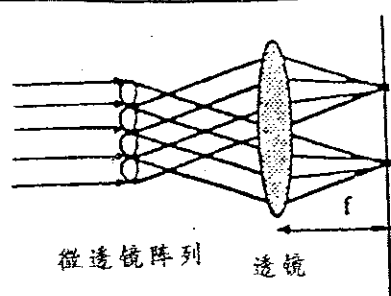


图2-49. 付里叶型点阵发生器

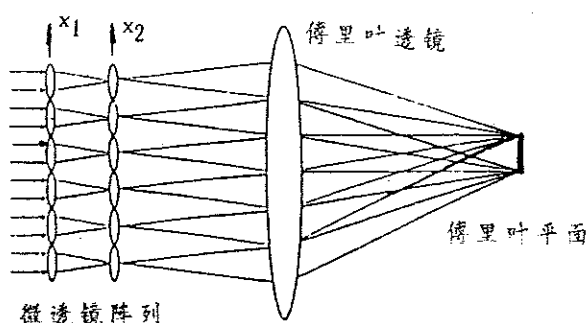


图2-50. 透镜光栅型点阵发生器

同时应注意到, 由于下述指数位相函数的影响, 其强度分布仍然可能不很均匀。

透镜阵列中单个透镜的复振幅透过率函数可表示为:

$$h(x_1) = \text{rect}(x_1/d) \exp(-i\pi x_1^2/\lambda f_1) \quad (2-42)$$

其中 d 为透镜阵列的周期, f_1 为单透镜直径。焦平面上的复振幅分布为:

$$g(x_2) = \exp(i\pi x_2^2/\lambda f_1) \text{Sinc}(dx_2/\lambda f_1) \quad (2-43)$$

上式中, Sinc函数是由透镜之矩形孔径的衍射产生, 可以设想, 如果上式中球面位相因子不存在, 则具有 $g(x_2)$ 分布的一个点阵的付氏变换将是一个具有 rect 函数包络的点阵分布。为实现这一目的, 有两种方法:

- ① 在透镜阵列的后焦面上放置一个针孔光栅。其直径足够小以致于透过每个针孔的位相变化可以忽略, 而不引起衍射效率的损失。制作这一针孔光栅的方法是将一干板放置在透镜阵列的后焦面上进行曝光而获得。
- ② 在透镜阵列的后焦面上再使用一个焦距同样为 f_1 的透镜阵列 (如图2-50)。其中第二个透镜阵列作为场镜阵列, 其透过率函数由 $g'(x_2)$ 表示:

$$g'(x_2) = \exp(-i\pi x_2^2/\lambda f_1) \text{rect}(x_2/d) \quad (2-44)$$

则紧靠在场镜阵列后的场分布为 $g^*(x_2) = g(x_2) \cdot g'(x_2)$, 由式 (2-43)

$$(2-44) \text{ 得: } g''(x_2) = \text{rect}(x_2/d) \text{Sinc}(dx_2/\lambda f_1) \quad (2-45)$$

所以若除去第二个透镜阵列的边缘衍射效应 (即去掉上式中的 rect 函数项), 则 $g^*(x_2)$ 的付氏变换将产生一个 rect 函数, 即所生成点阵的光强呈平顶分布状态, 从而保证了点阵的均匀性。

实验中, 两个透镜阵列均采用8阶位相 16×16 阵列的FZP器件, 两阵列精确对准并组合成一个器件。在器件衍射过程中, 可以产生多于透镜阵列数本身的光点阵列。(如图2-51)

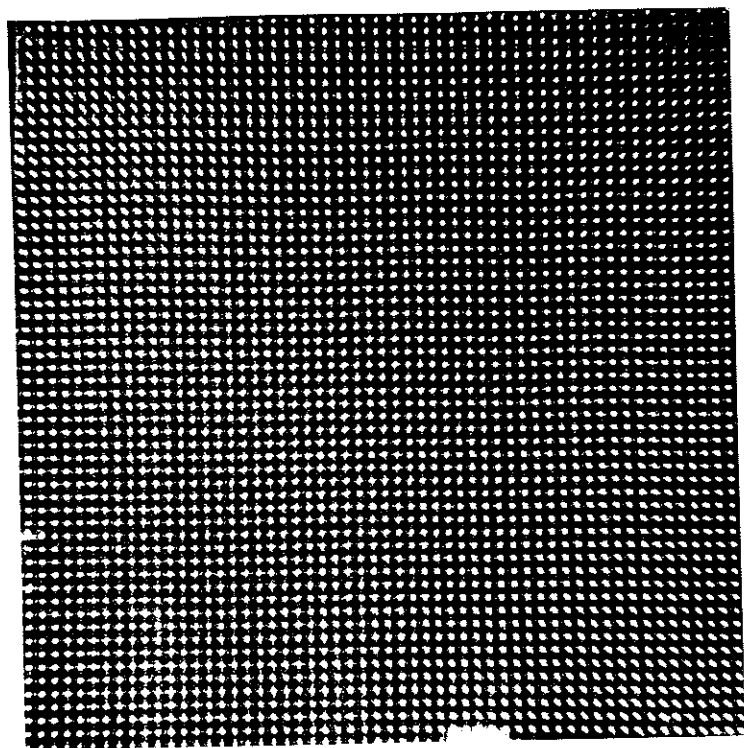


图2-51. 多光点阵列

经研究, 此点阵最大数目 K 由 rect 函数的宽度和光点阵列的周期决定, 且满足下式:

$$K = 2[df_2/f_1]/[\lambda f_2/d] = 4d^2/r_p^2 = 4N_r \quad (2-46)$$

其中 f_2 是付氏透镜的焦距, r_p^2 是 x_1 面上透镜阵列的周期, N_r 代表每个FZP器件的周期数。从式(2-46)看出, K 不等于透镜阵列的个数而一般都比它大得多, 这为大数目点阵发生器的制作提供了一种简便的方法。

本章小结:

本章详细论述了菲涅耳型微透镜(FZP)器件的理论基础、设计方法、制作工艺, 对三种FZP器件的各项性能参数进行了检测, 并运用这些器件在关联记忆系统、多重成像系统、半导体激光器象散校正系统及透镜光栅等四个方面开展了应用研究, 从而建立了一整套从理论、设计、工艺到检测、应用的技术手段, 完成了菲涅耳型微透镜器件的研制工作。

第三章 基于Talbot效应之器件的研制

第一节 Talbot效应的概述

一、研究发展的历程^[55]

1836年 H.F. Talbot首次发现自成像现象即后来的Talbot效应。

1881年 Lord Rayleigh首次解释了自成像现象，并推导出自成像与原物体之间距离的计算公式。这以后80多年一直没有人再对此进行理论研究。

1957年 Cowley及Moodie首次研究了二维周期物体(矩形及正方形单元结构阵列)的自成像理论，将自成像分为傅里叶像与其间的菲涅耳像两种类型。

1962年 Roger对二维周期物体的菲涅耳像进行了大量实验研究。

1965年 Winthrop及Worthington将二维周期物体的研究扩展到正六边形单元阵列。

1967年 Montgomery研究了自成像产生应满足的条件。

1970年~至今 自成像效应的简单性和完美性吸引着众多的研究者。

二、基本原理的叙述^[56]

当用一单色球面波和平面波照明一周周期物体(如图3-1中的光栅 G_1)时，将在 G_1 之后某些平面上重复出现光栅的清晰影象，即不用任何透镜而得到了光栅的像，这种现象称为Talbot效应或自成像现象。

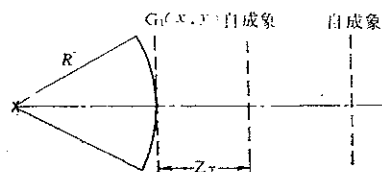


图3-1. Talbot效应示意图

设 G_1 的透过率函数为 $g_1 = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{i 2\pi \frac{n}{d} x}$ ， d 为光栅周期，以球面波 $e^{i \frac{2\pi}{\lambda} (\frac{x^2+y^2}{2R})}$ 照明 G_1 (R 为球面波半径)，则在 G_1 之后的光场分布为：

$$u(x, y, 0) = e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2+y^2}{2R}} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{i 2\pi \frac{n}{d} x} \quad (3-1)$$

在仅考虑 $n=0, 1, -1$ 的情形下, 有

$$u(x, y, 0) = A_0 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2R}} + A_1 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\left(x + \frac{\lambda R}{d}\right)^2 + y^2}{2R} - \frac{\lambda^2}{2d^2} R \right]} + A_{-1} e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\left(x - \frac{\lambda R}{d}\right)^2 + y^2}{2R} - \frac{\lambda^2}{2d^2} R \right]} \quad (3-2)$$

可见, 球面波经 G_1 衍射之后, 变成了三个独立的半径为 R 的球面波, 再传播距离 Z 之后, 球面波半径变为 $R+Z$, 其光场分布为:

$$u(x, y, z) = A_0 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{2(R+z)}} + A_1 e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\left(x + \frac{\lambda R}{d}\right)^2 + y^2}{2(R+z)} - \frac{\lambda^2}{2d^2} R \right]} + A_{-1} e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\left(x - \frac{\lambda R}{d}\right)^2 + y^2}{2(R+z)} - \frac{\lambda^2}{2d^2} R \right]}^* \quad (3-3)$$

设 $A_1 = A_{-1}$, 得光强分布为:

$$I(x, y, z) = A_0^2 + 2A_1^2 + 4A_0 A_1 \cos 2\pi \left(\frac{\lambda R}{2d^2} \frac{z}{R+z} \right) \cos \frac{2\pi}{d} \frac{R}{R+z} x + 2A_1^2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{2\lambda R x}{(R+z)d} \right] \quad (3-4)$$

式 (3-4) 表示的仍然是一个周期分布函数, 令 $Z = Z_T$, 则 $2\pi \left(\frac{\lambda R}{2d^2} \cdot \frac{z}{R+z} \right) = m\pi$

$$\text{即 } RZ_T / (R+Z_T) = md^2 / \lambda \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (3-5)$$

时, $I(x, y, z)$ 具有最好的对比度。由式 (3-4) 与 (3-5) 得

$$I(x, y, z_T) = (A_0 \pm 2A_1 \cos 2\pi f_x x)^2 \quad (3-6)$$

$$\text{这就是一个以空间周期: } D_T = 1/f_x = (1+Z_T/R)d \quad (3-7)$$

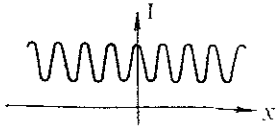
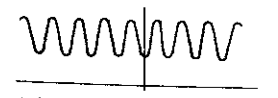
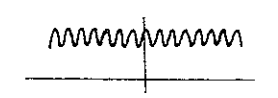
分布的光栅的清晰影象, 即 Talbot 自成像。满足式 (3-5) 的 Z_T 称为 Talbot 自成像距离。

当分别以发散、会聚球面波及平面波照明时, 则分别以 $R>0$, $R<0$ 以及 $R \rightarrow \infty$ 代入以上各式, 得 Talbot 效应的规律如表 3-1。当 m 取不同值时, 自成像的光强分布变化如表 3-2 (以平面波照明为例)。

表 3-1. Talbot 效应的规律

照明光波	自成象距离 z_T	自成象周期 D_T	设 $\lambda = 0.5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ $d = 0.1 \text{ mm}$, $m = 1$	
			z_T (mm)	D_T (mm)
发散球面波 $R > 0$	$\frac{Rz_T}{R+z_T} = \frac{md^2}{\lambda}$	$\left(1 + \frac{z_T}{R}\right)d$	> 20	> 0.1
会聚球面波 $R < 0$			< 20	< 0.1
平面波 $R \rightarrow \infty$	$z_T = \frac{md^2}{\lambda}$	d	$= 20$	$= 0.1$

表3-2. 自成像的光强分布规律 (以平面波照明为例)

自成像位置 z_r	光 强 分 布	
	(公 式)	(曲 线)
$\frac{2md^2}{\lambda}$	$(A_0 + A_1 \cos 2\pi f_x x)^2$ 正自成象	
$(2m+1)\frac{d^2}{\lambda}$	$(A_0 - A_1 \cos 2\pi f_x x)^2$ 负自成象	
$(2m + \frac{1}{2})\frac{d^2}{\lambda}$	$(A_0^2 + A_1^2 \cos^2 2\pi f_x x)$ 频率加倍	

三、两个必要的补充

1. 自成像物体的横向周期性是Talbot效应产生的必要条件。

在标量衍射理论的假设下, 衰减波的方程为

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (3-8)$$

其中 $K=2\pi/\lambda$, λ 为波长, u 为三维波场函数。

若 u 沿 Z 轴以周期 ΔZ 变化, 则它可以用付里叶级数表示为

$$u(x, y, z) = \sum_m v_m(x, y) \exp(i2\pi m z / \Delta z) \quad (3-9)$$

$$\text{边界条件为: } u(x, y, 0) = \sum_m v_m(x, y) = f(x, y) \quad (3-10)$$

其中 $f(x, y)$ 为物体的振幅透过率, 将 $u(x, y, z)$ 代入式 (3-8) 有

$$\frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} + k^2 \left[1 - \left(\frac{m\lambda}{\Delta z} \right)^2 \right] v_m = 0 \quad (3-11)$$

$$\text{引入付氏变换: } v_m(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{v}_m(\xi, \eta) \exp[i2\pi(x\xi + y\eta)] d\xi d\eta \quad (3-12)$$

其中“~”号表示付氏变换, 则我们可以在空间频域将式 (3-11) 表示为

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{v}_m(\xi, \eta) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] \times \left\{ -(2\pi)^2(\xi^2 + \eta^2) + k^2 \left[1 - \left(\frac{m\lambda}{\Delta z} \right)^2 \right] \right\} d\xi d\eta = 0 \quad (3-13)$$

若 $\tilde{v}_m(\xi, \eta) = 0$ 或括号 { } 中的项为 0 时, 式 (3-13) 成立。

$$\text{此时 } \xi^2 + \eta^2 = 1/\lambda^2 - m^2/\Delta z^2 = \rho_m^2 \quad (3-14)$$

这说明, 自成像物体的空间频率是离散的, 而且在以半径为 ρ_m 的环带上, 式 (3-14) 即所谓Montgomery环带方程。其中 m 应满足下式

$$0 \leq m \leq m_{max} \leq \Delta z / \lambda \quad (3-15)$$

可以看出, 在频率面上等距环带 (对应于圆环光栅) 与等距点 (对应于

线光栅)，对应于Montgomery环时， $n=0, 1, 4, 9 \dots m^2$ ，即横向周期性物体只是能够实现自成像物体的一个子集，所以自成像物体的横向周期性只是Talbot效应产生的必要条件而不是充分条件。

2. 分数Talbot效应

实验中，我们在平面 $Z_n = 2nd^2/\lambda$ (n 为整数)之间还可以观察到不少Talbot平面，只是空间频率有所改变，根据Roger的建议，Winthrop及Worthington将自成像距离公式推广为：

$$Z = 2d^2/n\lambda \quad n = 2N/P, \quad N, P \text{ 均为整数} \quad (3-16)$$

它就是所谓分数Talbot效应公式。图3-2所示为一些Talbot平面的分布情况。例如在 $1/3Z_T$ 与 $2/3Z_T$ 处的Talbot面上，可产生原物体的3倍频像，而在 $1/2Z_T$ 处则产生2倍频像。(具体理论将在下节叙述)

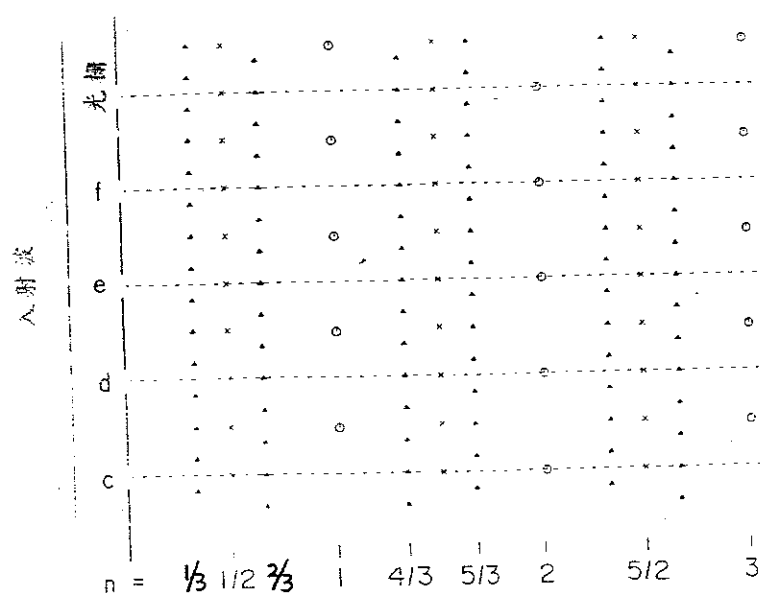


图3-2. Talbot平面的分布情况

四 应用研究的现状

目前Talbot效应的应用研究很多，大致可分为以下四类：

1. 图象的处理和合成

Packross等人运用Talbot效应，实现了图象的加操作^[67]，由字符L和F，在 $Z=d^2/2\lambda$ (倍频位置)处，获得了字符E。如图3-3所示：

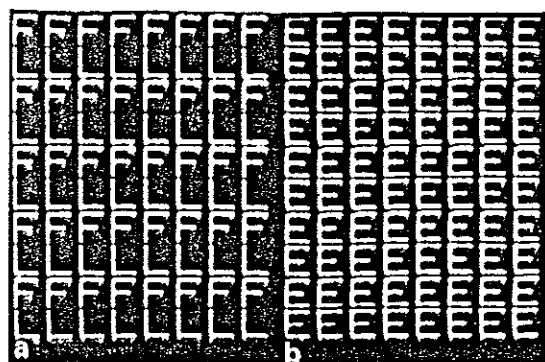


图3-3. 图象的加操作实验结果

2. 光学元件的互工艺技术

运用光学重叠(双衍射系统)可以制作开口比从0到1的线性及十字形光栅。图3-4为其光学系统图, 其中 $Z_1 = 2d^2/\lambda$, 而 $Z = d^2/2\lambda$, G_1 、 G_2 为两相同光栅, OP为记录平面。图3-5为记录结果, 其中 a、b、c 为线性光栅, d、e、f 为十字形光栅。

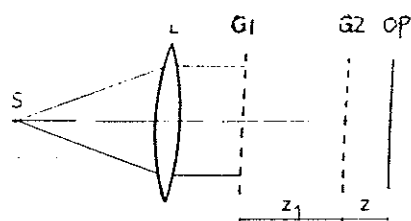


图3-4. 双光栅衍射系统

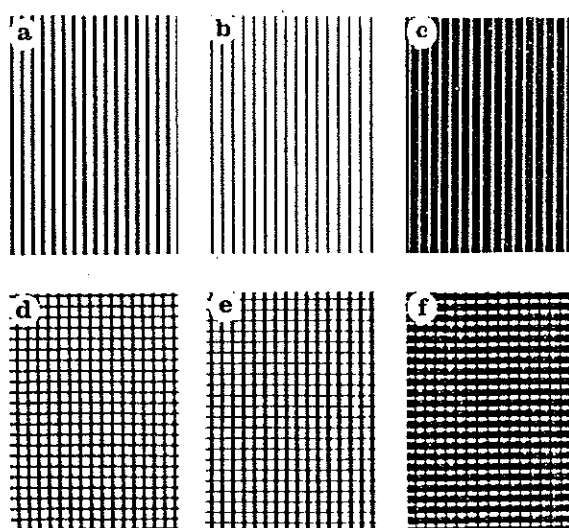


图3-5. 线性衍射光栅(a、b、c)
及十字形光栅(d、e、f)

3. 光学检测

运用Talbot效应可以制作Talbot干涉仪, 图3-6为其示意图, 观察

是通过两光栅 G_1 、 G_2 形成的干涉条纹来进行的。图3-7是一个例子，此时 O 为一个蜡烛火绒。

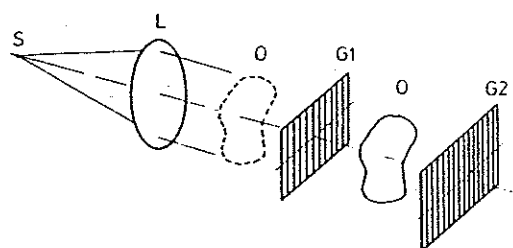


图3-6. Talbot干涉仪的示意图

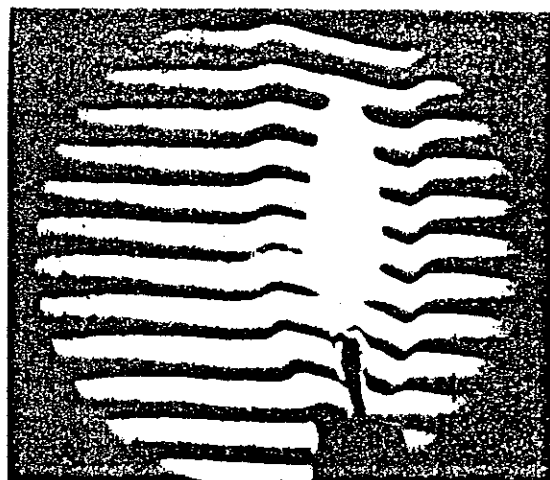


图3-7. 蜡烛火绒的莫尔条纹

4. 光学计量学

美国Chavel及Strand基于Talbot效应提出一种测量3维物体范围的方法^[68]。其原理图如图3-8所示：

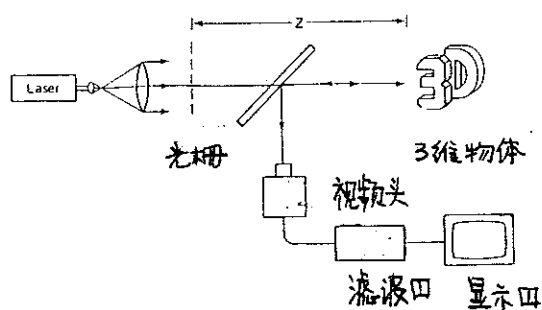


图3-8. 运用Talbot效应测量3维物体

第二节 多相位相型Talbot光栅器件的研制

清华大学学位论文用纸

一、引言

基于Talbot效应, 可以制作位相型Talbot光栅, 它有一些新颖的性质。如使用中勿须加透镜、系统简单; 只要改变照明光束的发散角就可以改变传输阵列光斑的位置、大小和扩展率; 能实现振幅/位相型光栅转换、对比度反转及疵病自愈等。国外对此种器件研究较多的是德国Erlangen-Nuremberg大学的A. W. Lohmann研究小组和美国MIT/LL的J. R. Leger等人。前者制作了 30×30 的点阵, 压缩比为1:9, 点阵均匀性 $<10\%$; [69] 后者利用分数Talbot效应制得多阶位相型Talbot光栅, 在一维填充因子为25%时获得了 128×128 点阵, 转换效率高达98.8%。[60] 本教研组也研制了 $\pi/2$ 及 $2\pi/3$ 两种二元位相Talbot光栅, 在500mm传输距离内, 光束的扩展率 $<1\%$, 自成像的光强分别是相应振幅光栅光强的2倍和3倍。[61] 本节介绍多阶位相型Talbot光栅器件的研制。

二、基本原理

从上节分数Talbot效应的讨论可知, 在Talbot距离的分数段平面处可产生一些类似于原物体的图样。例如在 $Z_t/4$ 处(如图3-2所示), 产生倍频像, 其中一个与原物体准直, 另一个则相对于原物体移动半个周期。根据分数Talbot效应理论[62]有以下结论:

- ①在平面 $Z_t/2N$ ($N \geq 1$) 处, 有 N 个原物体的多重像(等间距分开), 这些像与原物体准直(N 为偶)或移动 $1/2N$ 个周期(N 为奇)。
- ②在平面 $Z_t/(2N-1)$ ($N \geq 1$) 处, 有 $2N-1$ 个原物体的多重像(等间距分开), 均与原物体准直。

在两种情况下, 单个像的位相不变, 但多重像之间的位相是变化不等的。在一个周期内有 N 个相位分布, 且有:

$$\Psi = \pi I^2 / N \quad -N/2 \leq I \leq N/2 \quad I \text{ 为整数} \quad (3-17)$$

根据推导可知, 对于填充因子为 $1/N$ (一维)的方形孔径点阵, 在其后 Z_0 处, 由于多重像的产生而可获得均匀照明(均匀光强分布), 此时

$$Z_0 = Z_t / 2N = d^2 / N \lambda \quad (3-18)$$

根据光路可逆性原理, 将此现象反过来使用即设计一个多阶位相变化的多重像器件, 当用一均匀光照明时, 则可获得填充因子为 $1/N$ (一维)的点阵, 这为设计、制作任意压缩比的二维点阵提供了一个很好的方法。

三、设计与制作

这种器件之单元结构的透过率函数由 $t(I, J)$ 表示:

$$t(I, J) = \exp[-j\pi(I^2 + J^2)/N] \quad (3-19)$$

该式给出了组合位相延迟, 因此由所要求的压缩比 $1/N$, 据上式即可确定组合位相而构成单元结构, 然后通过分布重复相机生成所需阵列数 $P \times Q$, 这样就可以制得压缩比为 $1/N$ (一维) 的 $P \times Q$ 二维点阵发生器。

设计参数如下: 压缩比为 $1/6$ (一维), 单元周期 $d=0.6\text{mm}$, 阵列数为 32×32 , 使用波长 $0.6328\mu\text{m}$, 生成光点大小 $a=100\mu\text{m}$, Talbot 距离 $Z_0=1137.8\text{mm}$, 均匀光强平面 $Z_0=94.8\text{mm}$ 。

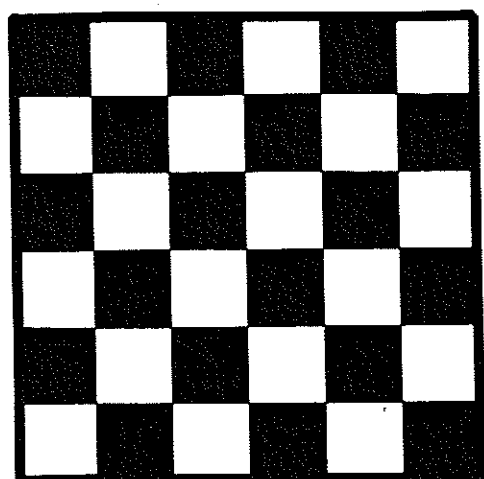
结构单元的位相分布为 $\Psi = \pi I^2/N = \pi I^2/6 \quad (-3 \leq I \leq 2)$

所以 $\Psi = \{3\pi/2, 2\pi/3, \pi/6, 0, \pi/6, 2\pi/3\}$, 二维组合位相图 (即结构单元的位相分布图) 如表 3-3 所示。

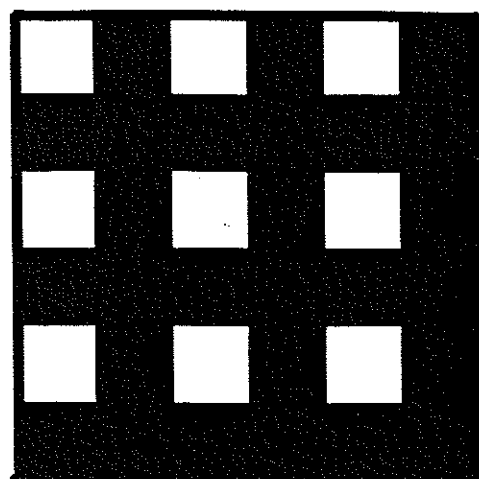
表 3-3. 结构单元的位相分布图

	$3\pi/2$	$2\pi/3$	$\pi/6$	0	$\pi/6$	$2\pi/3$
$3\pi/2$	π	$\pi/6$	$10\pi/6$	$9\pi/6$	$10\pi/6$	$\pi/6$
$2\pi/3$	$\pi/6$	$8\pi/6$	$5\pi/6$	$4\pi/6$	$5\pi/6$	$8\pi/6$
$\pi/6$	$10\pi/6$	$5\pi/6$	$2\pi/6$	$\pi/6$	$2\pi/6$	$5\pi/6$
0	$9\pi/6$	$4\pi/6$	$\pi/6$	0	$\pi/6$	$4\pi/6$
$\pi/6$	$10\pi/6$	$5\pi/6$	$2\pi/6$	$\pi/6$	$2\pi/6$	$5\pi/6$
$2\pi/3$	$\pi/6$	$8\pi/6$	$5\pi/6$	$4\pi/6$	$5\pi/6$	$8\pi/6$

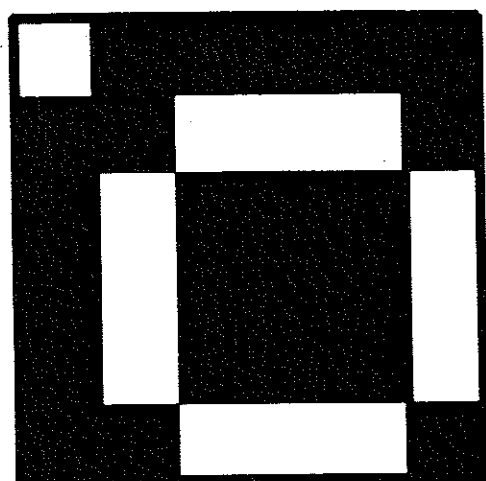
从上表可知共生成 $0, \pi/6, 2\pi/6, 4\pi/6, 5\pi/6, \pi, 8\pi/6, 9\pi/6, 10\pi/6$ 等 9 个位相阶数, 将此位相分布图拆解为四次对版套刻实现, 这四块掩膜版的图形见图 3-9 (其中 ■ 表示该部分不透光), 刻蚀的位相深度依次为 $\pi/6, 2\pi/6, 4\pi/6, 8\pi/6$ 。



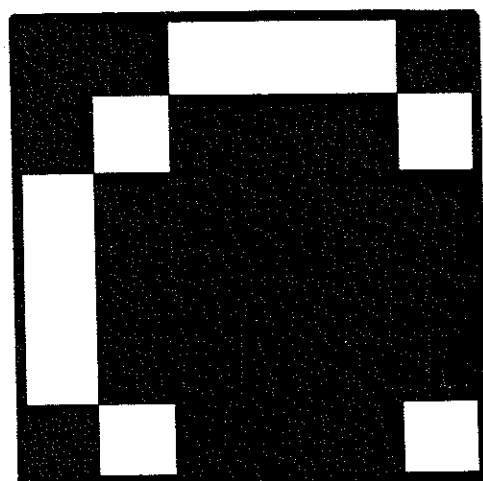
第一块版



第二块版



第三块版



第四块版

图3-9. 掩膜版的图形结构

在制得上述四块掩膜版(32×32阵列)后, 运用第二章中所论述的工艺流程, 经三次对版光刻即可制得压缩比为1/36(二维)的9阶位相Talbot光栅。

四、讨论

1. 衍射效率

在傍轴近似下, 对于无限大阵列, 该器件的衍射效率可达100%。对于有限大小阵列, 因为边缘效应会减少一些效率; 而对于非傍轴近似, 会有误差产生。

自由空间传递函数为

$$H(u) \approx \exp(j2\pi Z/\lambda) \exp(-j\pi \lambda Zu^2) \exp(-j\pi Z \lambda^3 u^4/4) \quad (3-20)$$

其中 u 为空间频率 ($u=n/d$ $0 < n < N$)。上式中第一、二项为傍轴近似, 第三项则为影响 Talbot 效应的误差项。

将 Z 以 Z_0 代入, u 以 u_{max} 代入, 则式 (3-20) 中第三项为:

$$\exp(-j\pi Z \lambda^2 u^2 / 4) = \exp(-j\pi \lambda^2 N^2 / 4d^2) \quad (3-21)$$

又因光点直径 $W=d/N$, 则式 (3-21) 可表示为:

$$\exp(-j\pi \lambda^2 N^2 / 4d^2) = \exp(-j\pi \lambda^2 N / 4W^2) \quad (3-22)$$

根据瑞利判据, 位相误差 $\leq \lambda/4$ 即可忽略, 则此时 $\lambda^2 N / 4W^2 \leq \pi/2$ 即 $W \geq \lambda (N/2)^{1/2}$ 所以当生成光点直径大于 $\lambda (N/2)^{1/2}$ 时, 非傍轴近似不影响衍射效率。

2. 多阶位相型 Talbot 光栅与菲涅耳微透镜的比较

将多阶位相型 Talbot 光栅与前面所讨论的 FZP 器件作一比较, 可得到一些有意思的结论。

① Z_0 类似于 f , 均在此平面获得点阵阵列。

② 位相延迟函数相同。

$$\text{Talbot 光栅: } t(I, J) = \exp[-j\pi (I^2 + J^2) / N] \quad -N/2 \leq I, J \leq N/2 - 1 \quad (3-23)$$

$$\text{FZP 器件: } t(x, y) = \exp[-j\pi (x^2 + y^2) / \lambda f] \quad (3-24)$$

因为 $f = Z_0 = d^2 / \lambda N$, 而 $x = dI/N$, 故式 (3-24) 与式 (3-23) 一致。

③ 波带数 M

$$\text{Talbot 光栅: } M' = d^2 / f \lambda = 4M$$

$$\text{FZP 器件: } M = d^2 / 4 \lambda f$$

④ 最小线宽 Δ_{min}

$$\text{Talbot 光栅: } \Delta_{min} = d/N = d \lambda f / d^2 = \lambda / (d/f) = \lambda (f/\#)$$

$$\text{FZP 器件: } \Delta_{min} = \lambda / 2NA = \lambda / (d/f) = \lambda (f/\#)$$

由于多次对版时, FZP 器件的 Δ_{min} 依次减半而 Talbot 光栅的 Δ_{min} 保持不变, 故后者的制作难度大大降低。另外, Talbot 光栅有较高的衍射效率, 在相等的衍射效率下, FZP 器件的 Δ_{min} 小于 Talbot 光栅的 Δ_{min} 。

说明一点, 以上诸多相似之处的内在原因是两种器件均基于菲涅耳衍射原理的基础之上。

五, 检测结果

9阶位相型Talbot光栅的点阵照片如图3-10所示, 运用CCD采样存储仪对光点的检测结果如表3-4所示。

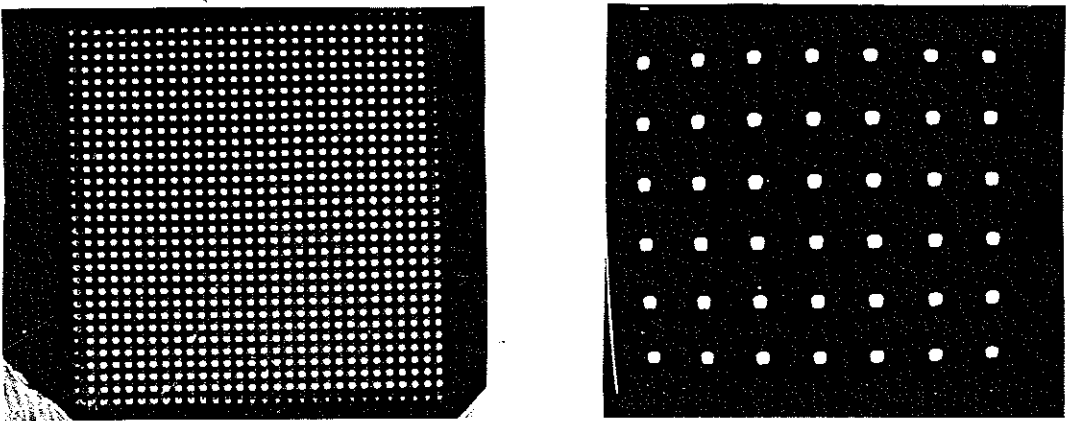


图3-10. 9阶位相型Talbot光栅的点阵照片 (a)30×30 (b) 检测点阵7×6

表3-4. 9阶位相型Talbot光栅的测量结果

	衍射效率	不均匀性	光点直径	光点间距
第一次	50.0%	17.1%	96.1 μm	576.6 μm
第二次	51.1%	18.1%	102.5 μm	608.6 μm
第三次	48.7%	17.4%	99.3 μm	608.6 μm
平均	49.9%	17.5%	99.3 μm	597.9 μm

从上表可看出, 该器件的压缩比(一维)为 $99.3/597.9=16.61\%$, 与设计值($=1/6$)的相对误差为 3.5%。比较表2-4与表3-4还可发现, 该器件的不均匀性比FZP器件的不均匀性要好, 图3-11清楚地说明了这一点。

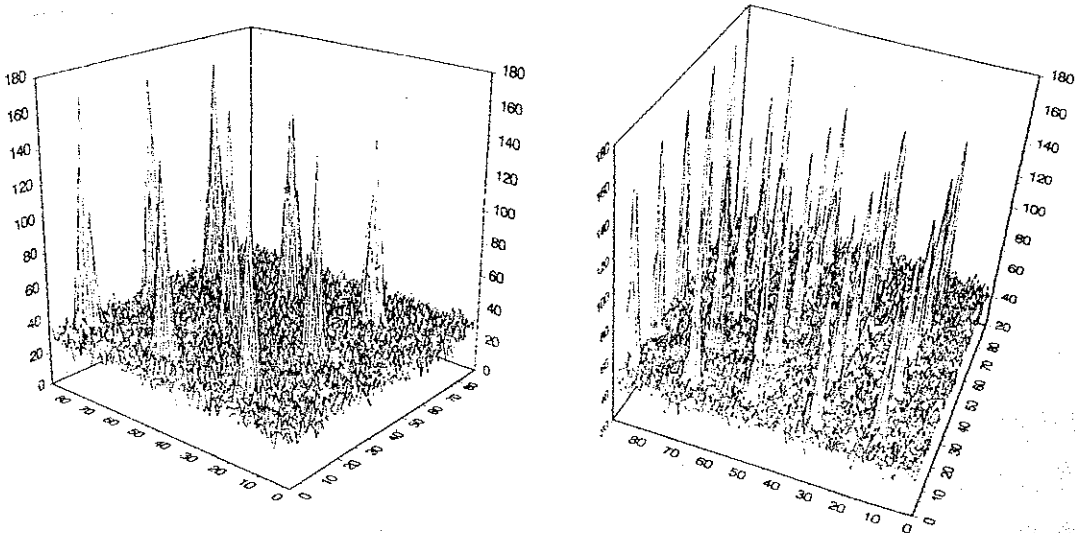


图3-11. (a)2阶位相型FZP的点阵光强分布 (b)9阶位相型Talbot光栅的点阵光强分布

第三节 非门器件的研制

基于周期物体的光学性能, 我们运用两种方法(即Talbot 效应法和滤波技术法)研制了非门器件而获得对比度反转, 这两种方法均能推广到单个非周期物体对比度反转的实现上。

一、理论基础 [6a]

周期物体采用矩形网格, 其振幅透过率函数为

$$t(x, y) = t_c(x, y) \otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - ma, y - na), \quad (3-25)$$

其中, m, n 为整数, a 为网格间距, $\otimes$ 表示卷积, $t_c(x, y)$ 为黑白结构单元的透过率函数, 其值为 0 (黑) 或 1 (白)。

1. Talbot 效应法

将具有透过率函数为 $t(x, y)$ 的物体放在平面 $(x, y, z=0)$ 处 (如图 3-12)

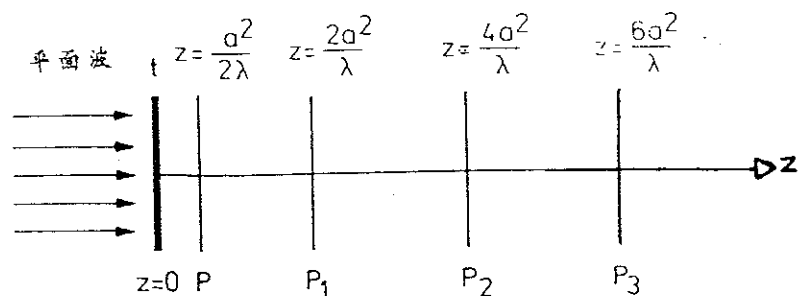


图 3-12. Talbot 效应法示意图

用波长为 λ 的单色光照明时, 可在其后平面 $Z=2Na^2/\lambda$ ($N=1, 2, \dots$) 处可得到物体的精确再现像, 这些像由衍射光形成而称为傅里叶像。另外在这些精确再现像之间还有一些物体的再现像 (只是空间频率有所改变), 这些像称为菲涅耳像。它们由物体的结构单元构成, 但单元之间具有不同位相且分开的距离也小于周期 a , 故会重叠而产生干涉。此法正是利用这一干涉来实现对比度反转的。

由菲涅耳成像理论 [64], 如图 3-12 所示光路中, 在平面 $(x_0, y_0, z=a^2/2\lambda)$ 的光场分布为 $t_0(x_0, y_0) = \frac{1}{2}\{t_c(x_0, y_0) + i[t_c(x_0 + a/2, y_0) + t_c(x_0, y_0 + a/2)]$

$$-t_c(x_0 + a/2, y_0 + a/2)\} \otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - ma, y_0 - na) \quad (3-26)$$

由上式可知, 在脐点 $(x_0 = ma, y_0 = na)$ 处可形成四个像, 它们仅是有一位相因子有异。此法需要一特殊形式的单元结构 (如图 3-13), 它包含两个

长度为 $a/2$ 的正方形并有一共同顶点。

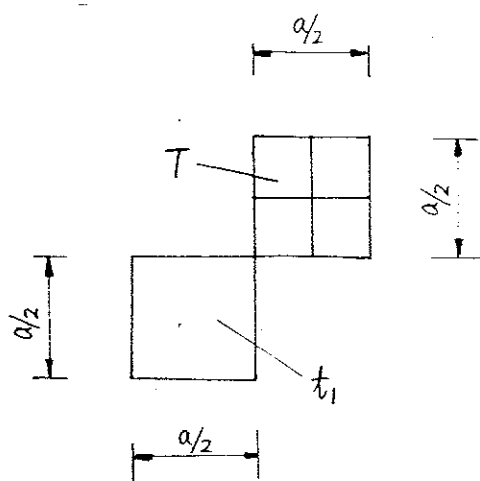


图3-13. 非门器件的单元结构示意图

其中, 白正方形的透过率为 $t_1(x, y) = \text{rect}(2x/a) \text{rect}(2y/a)$ (3-27)

而另一正方形(黑背景下的白十字)的透过率为 $T(x, y)$, 此时结构单元的

透过率为 $t_0(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x + \frac{a}{4}}{a/2}\right) \text{rect}\left(\frac{y + \frac{a}{4}}{a/2}\right) + T\left(x - \frac{a}{4}, y - \frac{a}{4}\right)$ (3-28)

将式(3-28)代入式(3-26)可得到平面 $Z = a^2/2\lambda$ 处之菲涅耳像的强度

$$I_0(x_0, y_0) = |t_0(x_0, y_0)|^2 = \frac{1}{4} \left[I_1\left(x_0 - \frac{a}{4}, y_0 - \frac{a}{4}\right) + I_2\left(x_0 - \frac{a}{4}, y_0 + \frac{a}{4}\right) + I_2\left(x_0 + \frac{a}{4}, y_0 - \frac{a}{4}\right) + I_1\left(x_0 + \frac{a}{4}, y_0 + \frac{a}{4}\right) \right] \otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x_0 - ma, y_0 - na) \quad (3-29)$$

其中,

$$I_1(x, y) = |1 - T(x, y)|^2 \text{rect}\left(\frac{x}{a/2}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a/2}\right)$$

$$I_2(x, y) = |1 + T(x, y)|^2 \text{rect}\left(\frac{x}{a/2}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a/2}\right)$$

因为 $T=0$ 或 1 , 则上式可写为 $I_1(x, y) = [1 - T(x, y)] \text{rect}\left(\frac{x}{a/2}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a/2}\right)$ (3-30)

从上式可看出, 具有透过率 $I_1(x_0, y_0)$ 的正方形是具有透过率 $T(x, y)$ 的正方形之反转像。

2. 滤波技术法

式(3-25)的傅氏变换形式为

$$F(fx, fy) = \frac{1}{a^2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_c(fx, fy) \delta\left(fx - \frac{m}{a}, fy - \frac{n}{a}\right) \quad (3-31)$$

其中 $F_c(fx, fy)$ 是 $t_c(x, y)$ 的傅氏变换, 从上式可知, 只有在 $(fx = m/a, fy = n/a)$ 处, $F(fx, fy)$ 才为非零。

清华大学学位论文用纸

因为二维周期物体傅氏变换的光学实现可通过一会聚透镜来完成, 此法采用图3-14所示光路(4f系统)。

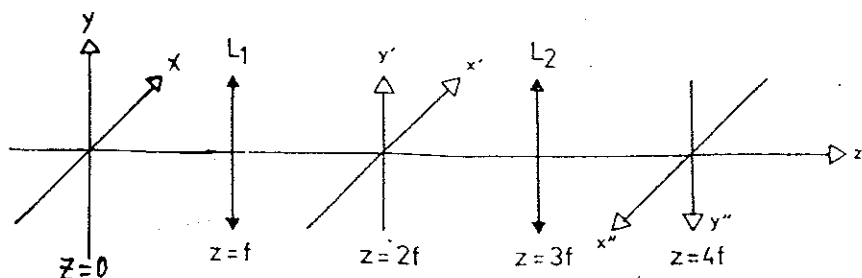


图3-14.滤波技术法示意图

具有透过率函数 $t(x, y)$ 的二元物体可分为两部分 R_1 、 R_2 , 其中 R_1 为物体的白色部分, R_2 为黑色部分, 则透过率可表示为

$$t(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in R_1 \\ 0 & (x, y) \in R_2 \end{cases} \quad (3-32)$$

在 $Z=0$ 平面上放置周期物体, 则在 $Z=2f$ 面上获得函数 $t(x, y)$ 的傅里叶谱

$$u'(x', y') = \frac{\lambda f}{ia^2} F_c \left(\frac{x'}{\lambda f}, \frac{y'}{\lambda f} \right) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta \left(x' - \frac{m\lambda f}{a}, y' - \frac{n\lambda f}{a} \right) \quad (3-33)$$

它是离散谱, 仅在 $(x' = m\lambda f/a, y' = n\lambda f/a)$ 等处产生。

在 $4f$ 平面上可获得物体的精确像, 由函数 $u''(x'', y'')$ 表示

$$u''(x'', y'') = -t(x'', y'') \quad (3-34)$$

由式(3-33), $Z=2f$ 面上中心点处的光强分布为

$$u'(x'=0, y'=0) = f\lambda / ia^2 F_c(0, 0) \delta(0, 0) \quad (3-35)$$

其中 $F_c(0, 0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} t(x, y) dx dy = S$, 显然 S 为结构单元中白色部分的面积。

从式(3-35)可看出, $u'(x'=0, y'=0)$ 是一个具有复振幅 $\lambda f S / ia^2$ 之球面波的光源, 透镜 L_2 将此球面波变为平面波, 可在 $Z=4f$ 面上获得一振幅为 A 的均匀光场, 且 $A = -S/a^2 = -\alpha$ 。由于 a^2 系结构单元的总面积, 所以 α 是结构单元中白色部分面积与结构单元总面积之比。

运用滤波技术, 在 $Z=2f$ 面上中心处将 $u'(x'=0, y'=0)$ 滤去, 则在 $Z=4f$ 平面处获得的光场为

$$u_f(x'', y'') = u''(x'', y'') - A = -[t(x'', y'') - \alpha] \quad (3-36)$$

$$\text{而 } u_f(x'', y'') \text{ 的强度分布为 } I(x'', y'') = |u_f(x'', y'')|^2 \quad (3-37)$$

$$\text{由式(3-32)可知, } I(x'', y'') = \begin{cases} (1-\alpha)^2, & (x'', y'') \in R_1 \\ \alpha^2, & (x'', y'') \in R_2 \end{cases} \quad (3-38)$$

则当 $(1-\alpha)^2 < \alpha^2$ 时, 即 $\alpha > 1/2$ 时, 可实现对比度反转。

此法中，若在 $Z=2f$ 平面中心处放置一块 π 位相延迟板，则可改进对比度反转的可见度。此时：

$$u_f(x'', y'') = -[t(x'', y'') - 2\alpha]$$

$$I(x'', y'') = |t(x'', y'') - 2\alpha|^2$$

$$I(x'', y'') = \begin{cases} (1-2\alpha)^2 & (x'', y'') \in R_1 \\ 4\alpha^2 & (x'', y'') \in R_2 \end{cases}$$

推得： $\alpha > 1/4$ 时即可实现反转。

二、设计参数

设计的是 32×32 阵列，其单元结构如图3-15，单元周期 $a=0.8\text{mm}$ 。
器件(a)的 $\alpha=0.86$ ，器件(b)的 $\alpha=0.39$ 。

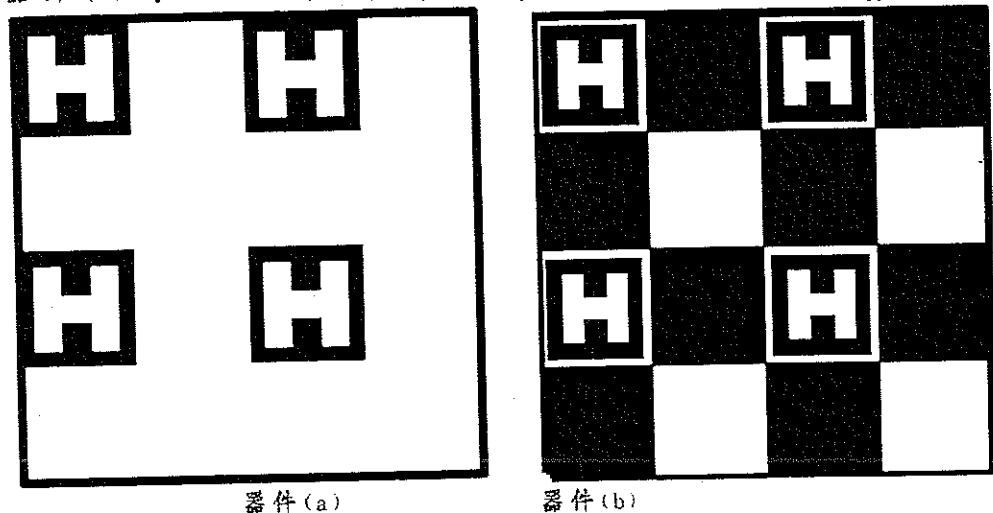
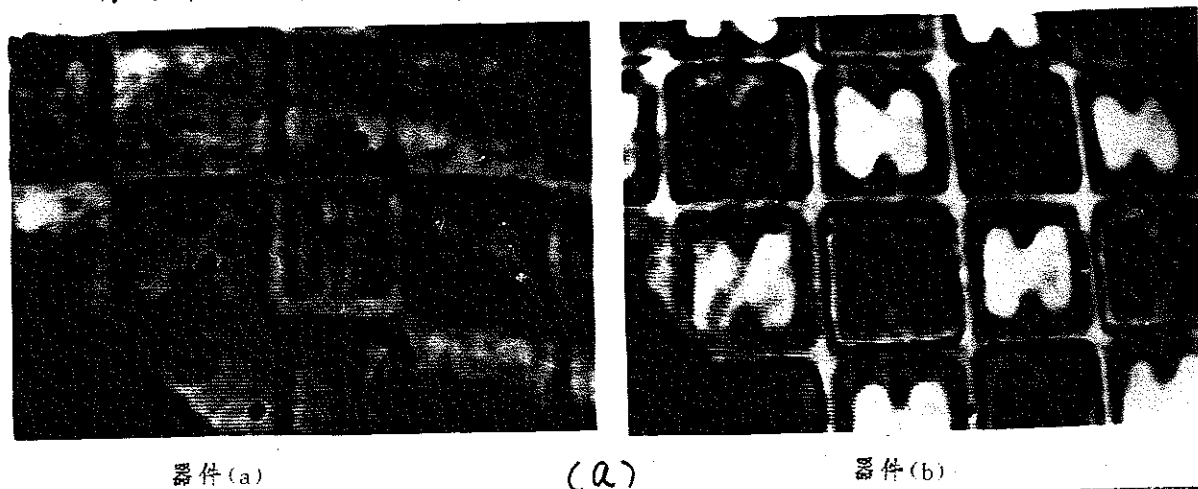
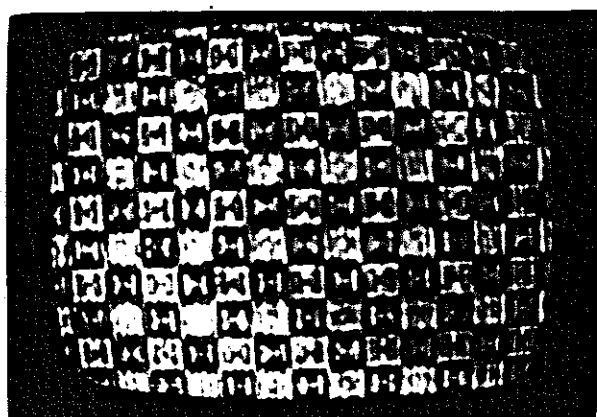


图3-15. 非门器件的结构单元示意图

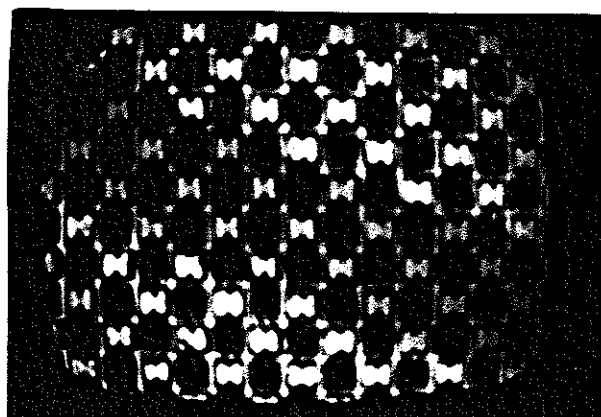
三、实验结果

将两种器件分别用两种方法进行观察，实验结果如图3-16所示。





器件(a)



器件(b)

(b)

图3-16. 非门器件的实验结果(a)方法1 (b)方法2

本章小结:

本章首先对Talbot效应进行了讨论, 介绍了分数Talbot效应的原理, 然后运用这一原理研制了两种新型二元光学器件: 多阶位相型Talbot光栅和非门器件, 并对制作的器件进行了性能参数的检测, 最后将器件应用到一些实验中, 获得了与理论分析相吻合的结论

第四章 CCD采样存储仪的研制

第一节 引言

CCD (Charged-Coupled Device) 即电荷耦合器件, 是近年来发展起来的新型半导体器件, 其应用十分广泛。基于CCD 的输出电压与其所接收的光强和其曝光时间的乘积成正比这一特性, 当选定曝光时间后, 则CCD的输出电压就与所接收的光强成正比, 即可将CCD作为一种光强接收器。采用这种接收器有着普通的光电器件所无法比拟的优点: 通过对CCD 各微小象元的输出信号进行分析处理就可以得到光强的分布曲线以及实际应用中所需要的各种有用数据, 如光强峰值、峰间距、半宽度、衍射受限宽度和均匀性等。

虽然我们可以将CCD 的输出信号直接输入示波器来观察光强分布曲线, 但无法得到确定的数据; 或者我们也可以利用市场上开发的CCD 系统进行互作, 但其采样板是利用计算机的DMA 通道进行数据的采集和传输, 它要求在测量现场配置计算机才能互作, 这些都使我们感到极不方便。从计算机和单片机对数据实行掉电保护得到启发, 我们提出了“脱机采样, 联机处理”的观点, 既充分利用了计算机的高速运算能力, 又摆脱了必须在互作现场配置计算机的负担。

第二节 硬件电路的设计

我们使用的是美国Fairchild公司生产的线阵CCD^[66], 其象元个数为1024, 并配有控制单元。该控制单元驱动CCD并能对CCD的视频时钟频率 (Video Clock) 和曝光时间 (Exposed Time) 连续可调, 以适应各种照射光而获得最佳输出; 该控制单元还有视频时钟信号和开始扫描信号 (Start of Scan) 也称同步扫描信号 (SYN), 输出端与 TTL 电平相匹配。CCD信号经射随输出, 最大输出截止1V, 输出阻抗75 Ω 。

我们主要是用开始扫描信号 (SYN) 和手控开关共同决定控制视频时钟信号的输入。视频时钟信号用于触发A/D转换器, 并触发计数器给存储器提供存储地址。CCD的接收信号经放大处理后输入高速A/D转换器, 将模拟量转换为数字量存储, 同时为监测采样存储过程的准确性, 将数字

量经D/A转换后输出进行对比。存储的数据通过PC机通用I/O接口板输入计算机中进行处理而获得所需的数据与结果。

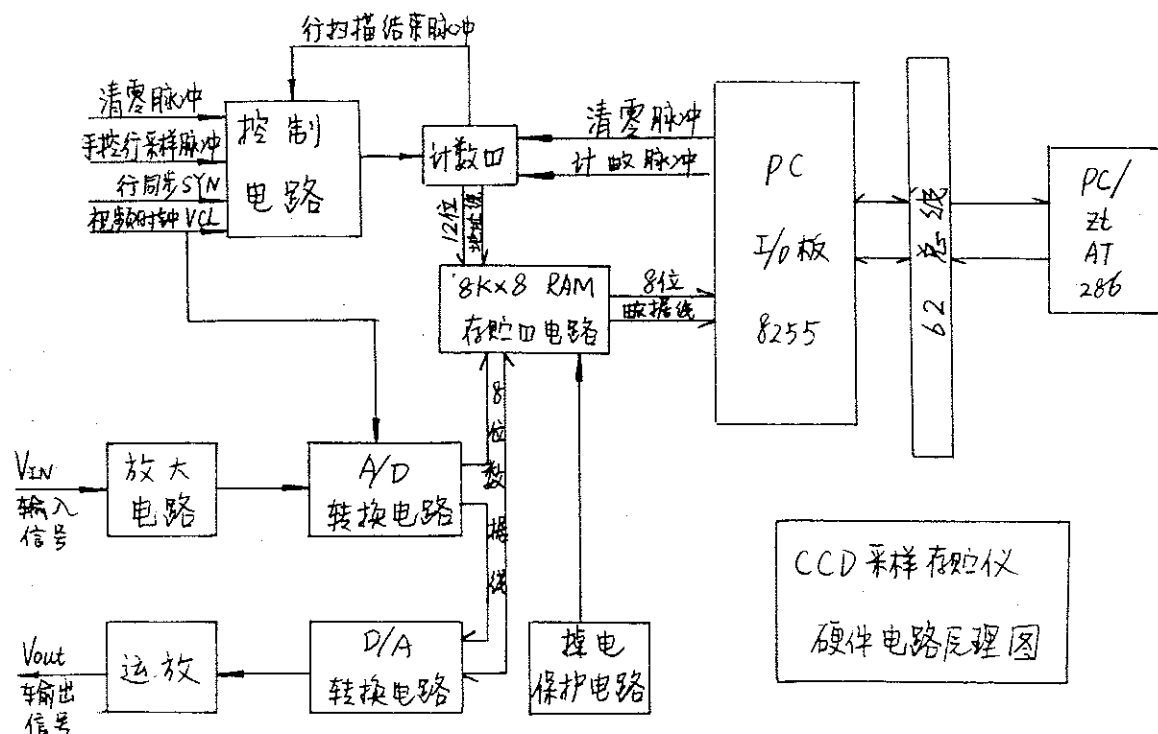


图4-1. 硬件电路的总体原理框图

电路的总体原理框图如图4-1所示。其中：

1. 放大电路：其核心——运算放大器选用高速宽带运算放大器LM318。
2. A/D转换电路：本采样仪的关键部分，选用美国RCA公司最新推出的视频闪烁高速A/D芯片CA3318。
3. 存储器及掉电保护电路：RAM芯片选用日本日立公司的HM6264LP，利用该芯片中专门用于掉电保护的引脚，可在电源掉电状态下自动保护RAM中的数据。
4. 控制电路：它包括下列几个电路
 - ①控制开始采样电路——由一个简单的二级J-K触发器组成，可完成控制开始采样时序的功能。
 - ②计数器电路——由四片74LS393串接而成，完成采样脉冲的计数功能。
 - ③复位电路——其核心器件为8选1模拟开关CD4501和3-8译码器74LS138，

清华大学学位论文用纸

该电路的功能是：在采完一定数目（即CCD象元个数）后，可立即将计数脉冲锁住，从而准确地进行采样存储。

④延迟电路——其核心器件为NE555延时器，可确保不会因按键抖动而产生误操作。

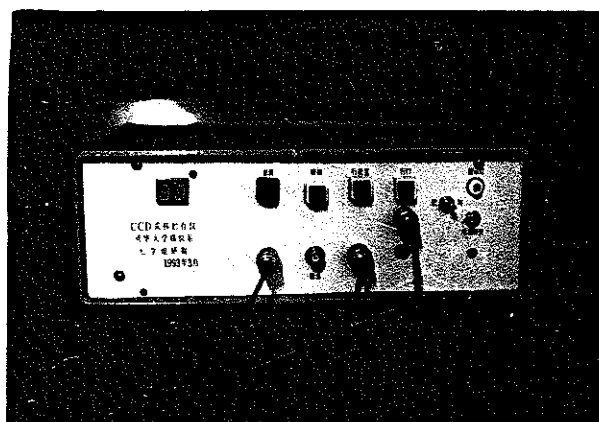
实际电路中，计数器的输入端还增加了存储器的读写控制信号以及用于监测的模拟脉冲信号，可实现在读状态下的监测和行地址设置功能。

5. 与计算机的接口系统：其核心为通用I/O接口板，它由两片通用可编程接口芯片8255A构成，由微机的CPU通过I/O指令控制8255A的五作方式来实现数据的输入与输出操作。

6. 监测电路：它包括D/A转换电路和显示电路。前者以D/A转换芯片DAC0800为核心，可将采样结果输出，并与输入信号进行对比；后者将行复位脉冲通过计数器和BCD七段译码器输出到LED上，可记下相应点所对应的采样行，这给数据处理提供了方便。

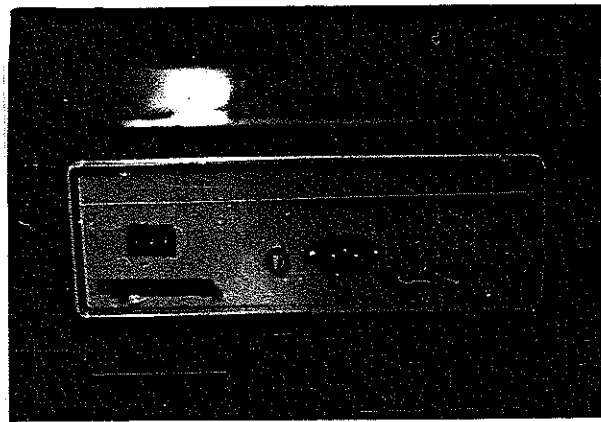
7. 整机电源：采用三端固定集成稳压块7805, 7815和7915生成本仪器所需的+5V和 $\pm 15V$ 三种电源，其中7805所带负载较多而须加散热片。

以上介绍了CCD采样存储仪的硬件装置及功能，仪器的全部电路结构如图4-2所示，其实物照片如图4-3所示，该仪器的使用说明见本论文的附录3。



(a)

(a) 仪器的前面板



(b)

(b) 仪器的后面板

图4-3. CCD采样存储仪的实物照片

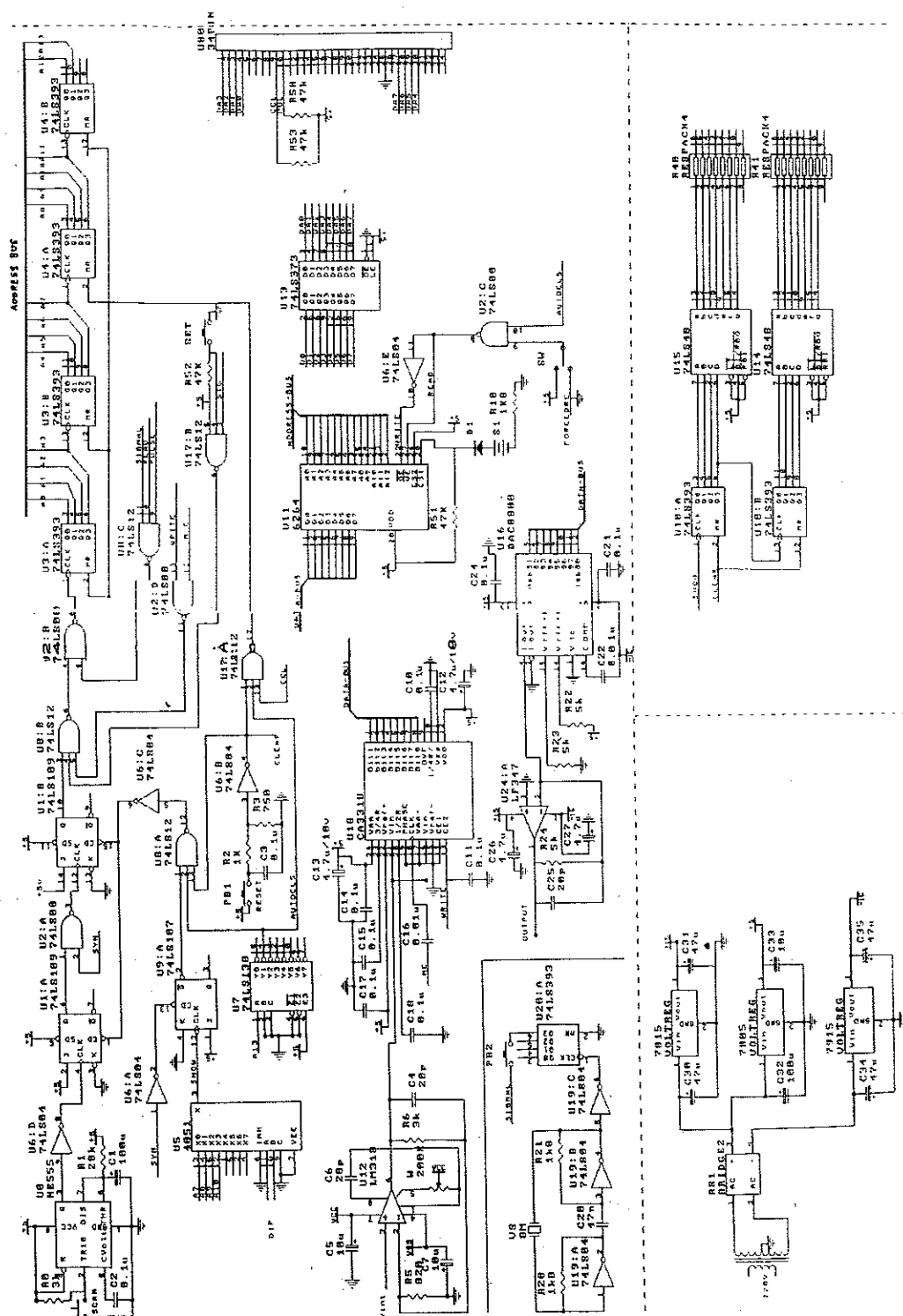


图 4 2. CCD 采样与保持电路的电路总图

第三节 软件程序的编制

该软件的编制主要是为了与CCD存储采样仪配套使用,它首先必须完成的任务是将存储仪中8K RAM所存的测量数据准确无误地传入计算机内,并以数据文件的形式保存下来。其次它必须具备一些数据处理的能力,可完成采样行之光强分布曲线图的绘制,并能对峰值进行一些处理。

该软件用C语言编制,具有模块化的优点,可移植性和可读性都较强,运算速度快,容错性好,并由于采用人机对话的方式引导操作,使用十分方便。

该软件的主程序框图、采样子程序框图、峰值处理子程序框图分别如图4-4, 4-5, 4-6所示。其中采样子程序完成采样及数据传递功能,峰值处理子程序可对采样数据进行一些处理而得到光点的峰值、峰间距、单光斑的半宽度和衍射受限宽度以及光点的不均匀性。软件的源程序清单见论文附录4。

本章小结:

本章系统地介绍了所研制的CCD采样存储仪之工作原理、硬件与软件功能,并提供了该仪器的使用说明和数据处理软件源程序。通过联机装调与实测表明,该仪器性能可靠、使用方便,具有较大的实用价值

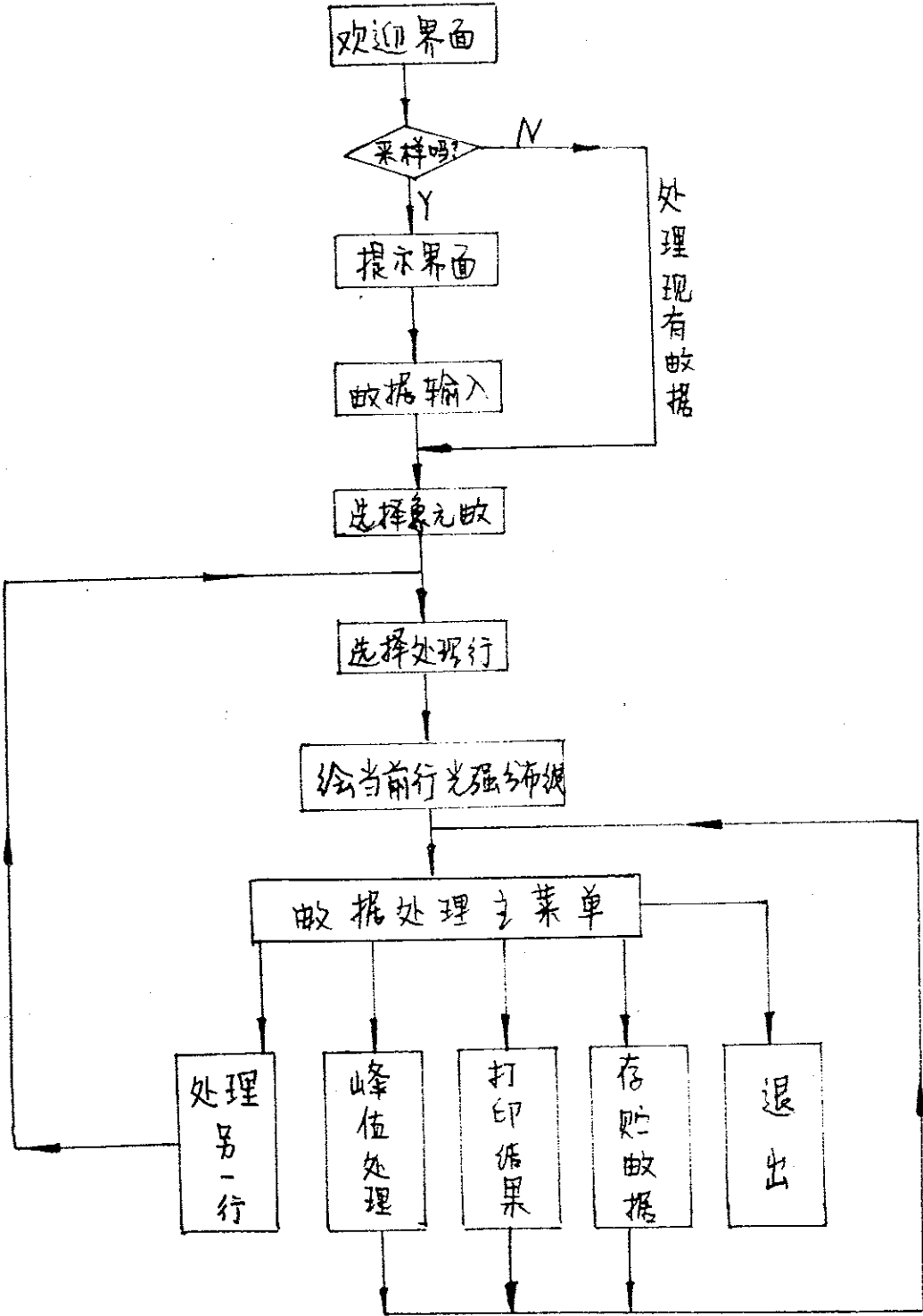


图4-4. 主程序框图

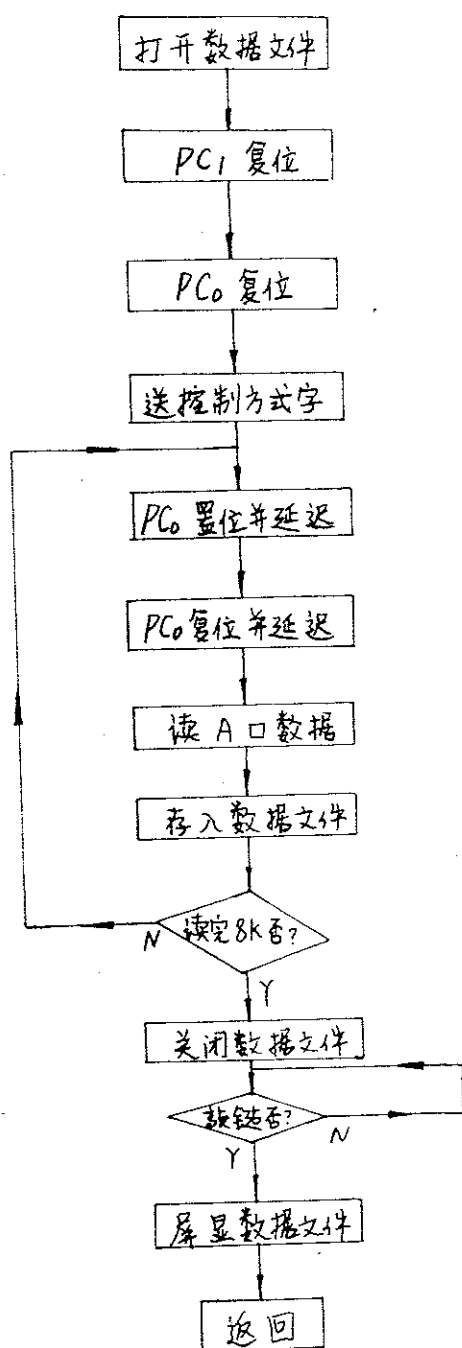


图 4-5. 采样子程序框图

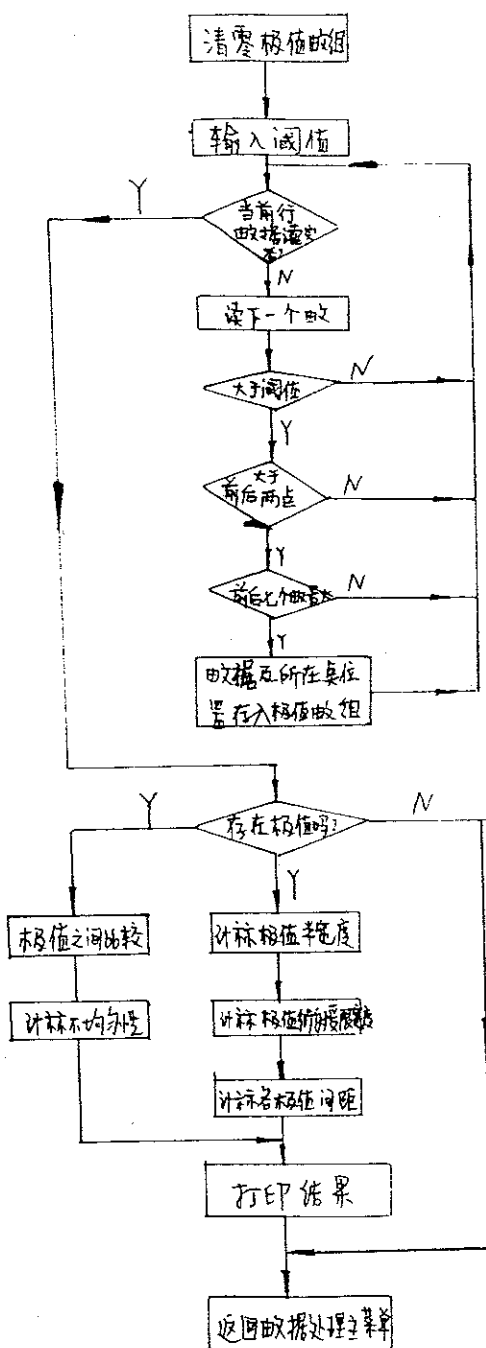


图 4-6. 峰值处理子程序框图

第五章 课题互作小结与建议

本课题研究主要完成了以下几项互作：

- 1, 查阅了大量文献资料, 为开展二元光学的研究互作打下了坚实基础。
- 2, 研制了FZP型器件 (16×16 , 6×6) 并建立了一整套器件设计、制作与检测的互艺流程, 并运用所研制的器件开展了一些应用研究。其中8阶位相型FZP在国内尚未见到有关报导, 将FZP作为半导体激光器的消象散准直器件亦属创新, 居国内领先水平。
- 3, 基于Talbot效应, 研制了非门器件和多阶位相型Talbot光栅器件, 这两种器件均属新型二元光学器件, 有着广阔的应用前景。其中9阶位相型Talbot光栅的设计思想新颖, 设计指标超出国外报导的水平。
- 4, 提出了“脱机采样, 联机处理”的观点, 并基于此而研制开发了一台CCD采样存储仪, 仪器性能可靠、实用方便, 是二元光学器件检测的有力互具。

对进一步的研究互作做了以下一些设想(仅供参考):

- 1, 研制其它类型的FZP型器件如斜入射式、反射式FZP等。
- 2, 开展离子束刻蚀互艺制作二元光学器件的研究。
- 3, 完成所研制器件的象差检测。
- 4, 完成半导体激光器象散校正板的加互及应用研究。
- 5, 将FZP型器件应用到新的领域中。

清华大学学位论文用纸

致 谢

本课题的研究自始至终都是在严瑛白副教授的精心指导之下进行的。严老师经常亲临实验室帮助解决各种问题，不仅在科研上给予了极大的指导与帮助，而且在生活中也给予了宝贵的关心与支持。

金国藩教授、邬敏贤教授对课题的选定、研究方向的选择以及实验的进行均给予了很多的关怀与指导，姚长坤实验工程师在五艺的研究中给予了各方面的指导与配合，赵子英老师、姜培兰老师、章恩耀副教授、郑燕飞副教授、李克兰副教授在课题的进行过程中给予了诸多帮助，王山师傅在机械加工中给予了很多帮助。

许蕴慧同学、袁弋飞同学配合完成了CCD采样仪的开发工作。器件的掩膜版由机电部北京自动化所及中科院微电子中心等单位制作。

谨向以上老师和同学，以及三年来所有关心、帮助我的老师、同学、朋友表示衷心的感谢！

清华大学学位论文用纸

攻读硕士学位期间所发表的论文:

- 1, Yan Yingbai, Wang Xu, Yao Changkun, Jin Guofan, Wu Minxian,
"Fabrication of lenslet grating with multilevel phase",
SPIE, Vol. 1720, p522-529, 1992
- 2, Jin Guofan, Yan Yingbai, Wang Xu, Li Zheng, Wu Minxian,
"High efficiency multiple phase level lenslet array",
SPIE, Vol.1751, to be published.
- 3, 王旭, 严瑛白, 邬敏贤, 全国藩, 姚长坤, "多灰阶位相型消象散准直器
件的研制", <<光子学报>>, Vol.21, No.5, p268-272, 1992
- 4, 严瑛白, 温志庆, 王旭, 全国藩, "神经网络关联记忆及其光电实现技术
的研究", <<光电子·激光>>, Vol.3, No.6, p333-339, 1992
- 5, 温志庆, 严瑛白, 王旭, 全国藩, "伪逆算法关联记忆及其光学实现",
<<光子学报>> Vol.21, No.5, p259-262, 1992
- 6, Jin Guofan, Yan Yingbai, Wang Xu, Wu Minxian, "The design
and fabrication of a lenslet array with multilevel phases",
Technical paper for OSA annual meeting, Sept., 1992, U.S.A
- 7, 严瑛白, 李铮, 王旭, 邬敏贤, 全国藩, "多位相型微透镜阵列的研制及
多重成像系统的实现", <<光子学报>>, Vol.21, No.5, p278, 1992
- 8, Jin Guofan, Yan Yingbai, Wang Xu, Wu Minxian, Yuan Yifei,
"Multi-phase micro lenslet for generating beam array",
Technical paper for MODMM'93 (The international conference
on Modern Design, Manufacturing and Measurement), May, 1993.

清华大学学位论文用纸

参 考 文 献

- 1, M.W.Farn, M.B.Stern, and W. B. Veldkamp, "The making of binary optics", *Optics&Photonics News*, No.5, p20, 1992
- 2, *Journal of Lincoln Laboratory*, MIT Press, 1988
- 3, T.J.McHugh and H.A. Levenstein, "An overview of binary optics at the Perkin-Elmer corporation", *SPIE*, Vol.884, p100, 1988
- 4, J.A.Cox, "Overview of diffraction optics at Honeywell", *SPIE*, Vol.884, p127, 1988
- 5, Thomas J.McHugh and D.A.Zweig, "Recent advances in binary optics", *SPIE*, Vol.1052, p85, 1989
- 6, Jurgen Jahns and S.J.Walker, "2- D array of diffraction microlenses fabricated by thin deposition", *Appl Opt*, Vol.29, No.7, p931, 1990
- 7, "Diffraction optics and its application in IR systems", *SPIE*, Vol.750, p138, 1987
- 8, Kevin M.Flood, et al., "Continuous wide angle beam steering using translation of binary microlens array and a liquid crystal phased array", *SPIE*, Vol.1211, p296, 1990
- 9, 严瑛白, 王旭, 姚长坤, 全国藩, 郭敏贤, "Fabrication of lenslet grating with multilevel phase", *SPIE*, Vol.1720, p522, 1992
- 10, 全国藩, 严瑛白, 王旭, 郭敏贤, 袁弋飞, "Multi- phase micro lenslet for generating beam array", <<MODMM'93>>, p271, 1993
- 11, De-Gui Sun and Zhao-Heng Weng, "Butterfly interconnection implementation for an N-bit parallel ripple carry full adder", *Appl Opt*, Vol.30, No.14, p1781, 1991
- 12, H.Dammann and E.Klotz, "Coherent optical generation and inspection of 2-D periodic structures", *Optica Acta*, Vol.24, No.4, p505, 1977
- 13, S.J.Walker and Jurgen jahns, "Array generation with multilevel phase grating", *J.Opt.Soc.Am.*, Vol. 7, No. 8, p1509, 1990
- 14, D.H.Frank, et al., "Optimization and fabrication of grating beamsplitter in Silicon Nitride", *Appl Phys Lett*, Vol.54, No.16, p1492, 1989

清华大学学位论文用纸

- 15, <<光矩阵数值运算及阵列光束传输与控制技术研究五作报告>>, (863-307-08-04鉴定文件), 清华大学精仪系, 1991
- 16, Teruhiro Shiono, et al., "Rectangular-apertured micro-Fresnel lens arrays fabricated by E-beam lithography", *Appl Opt*, Vol.26, No.3, p587, 1987
- 17, Kasra Rastani, et al., "Binary phase Fresnel lenses for generation of 2-D beam arrays", *Appl Opt*, Vol.30, No. 11, p1347, 1991
- 18, J.S. Patel and K. Rastani, "Electrically controlled polarization-independent liquid crystal Fresnel lens arrays", *Opt Lett*, Vol.16, No.7, p532, 1991
- 19, N.F. Borrelli and D.L. Morse, "Microlens arrays produced by a photolytic technique", *Appl Opt*, Vol.27, No.3, p476, 1988
- 20, M.C. Hutley, "Optical techniques for the generation of microlens arrays", *Journal of Modern Optics*, Vol.37, No.2, p253, 1990
- 21, 朱传贵, 刘德森, 薛鸣球, 阎国安, "高密度微小透镜面列阵研制", <<光子学报>>, Vol.21, No.4, p310, 1992
- 22, Z.D. Popovic, et al., "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays", *Appl Opt*, Vol.27, No.7, p1281, 1988
- 23, S. Charles Baber, "Application of high resolution laser writer to CGHs and binary diffractive optics", *SPIE*, Vol.1052, p66, 1989
- 24, "Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication", *SPIE*, Vol.1211, p137, 1990
- 25, James Logue and Thomas McHugh, "Current trends in binary optics at Perkin-Elmer", *SPIE*, Vol.1168, p74, 1989
- 26, <<多位相多光束分束器件的鉴定报告>>, 北京邮电学院应用科技系, 1992
- 27, D. Intani, T. Baba and K. Iga, "Planar microlens relay optics utilizing lateral focusing", *Appl Opt*, Vol.31, No.25, p5255, 1992
- 28, Y.L. Kok, N.C. Gallagher, R. W. Ziolkowski, "Dual series solution to the scattering of plane waves from a binary conducting grating", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Vol.AP-37, No.7, p901, July 1989
- 29, T.K. Gaylord and M.G. Moharam, "Analysis and applications of

清华大学学位论文用纸

- optical diffraction by gratings", *Proceedings IEEE*, Vol.73, No.5, p894, 1985
- 30, J.W.Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Chapter 4, McGraw-Hill Press, San Francisco, 1968
- 31, "Micro-Fresnel lenses", *Prog.of Opt*, 1987
- 32, <<6JA型干涉显微镜说明书>>, 上海光学仪器厂
- 33, J.A.Cox, et al., "Diffraction efficiency of binary optical elements", *SPIE*, Vol.1211, p116, 1990
- 34, D.E.Rumeihart and J.L. Meclelland, *Paralled Distributed Processing*. (MIT Press, Cambridge Mass, 1986), Vols 1 and 2.
- 35, 严瑛白, 温志庆, 王旭, 金国藩, "神经网络关联记忆及其光电实现技术的研究", <<光电子.激光>>, Vol.3, No.6, p333, 1992
- 36, I.Glaser, "Noncoherent parallel optical processor for discrete 2-D linear transformations", *Opt Lett*, Vol.5, No.10, p449, 1980
- 37, L.P.Boivin, "Multiple imaging using various types of simple phase gratings", *Appl Opt*, Vol.11, No.8, p1782, 1972
- 38, H.Machida, et al., "High- efficiency fiber grating for producing multiple beams of uniform intensity", *Appl Opt*, Vol.23, No.2, p330, 1984
- 39, A.Kolodziejczyk, "Realization of Fourier image without using a lens by sampling the optical object", *Opt Acta*, Vol.32, No.6, p741, 1985
- 40, A.S.Kumar and R. M. Vasu, "Multiple imaging with an aberration optimized hololens array", *Opt Eng*, Vol.28, No.8, p903, 1989
- 41, 严瑛白, 李铮, 王旭, 郭敏贤, 金国藩, "多位相微透镜阵列的研制及多重成像系统的实现", <<光子学报>>, Vol.21, No.5, p278, 1992
- 42, S.C.Wang, "Commerical laser diodes for optical signal processing applications", *SPIE*, Vol.936, p2, 1988
- 43, 王旭, 严瑛白, 郭敏贤, 金国藩, 姚长坤, "多灰阶位相型消象散准直器件的研制", <<光子学报>>, Vol.21, No.5, p268, 1992
- 44, K.S.Urquhart, H.Farhoosh and Sing. H. Lee, "Diffractive lenses utilizing orthogonal cylindrical Fresnel zone plates", *SPIE*, Vol.1211, p184, 1990
- 45, Sharp Company, <<Sharp laser Diode user's Manual>>
- 46, K.H.Brenner, Allen Huang and N.streibl, "Digital optical

- computing with symbolic substitution", *Appl Opt*, Vol.25, No.18, p3054, 1986
- 47, P.Asthana, et al., "Graded-index lens array matched filtering", *Opt Lett*, Vol.13, No.2, p84, 1988
- 48, B.Hill, et al., "Polycube optical memory: a 6.5×10^7 bit read-write and random access optical store", *Appl Opt*, Vol.14, No.11, p2607, 1975
- 49, A.W.Lohmann and F.Sauer, "Holographic telescope arrays", *Appl Opt*, Vol.27, No.14, p3003, 1988
- 50, A.W.Lohmann, et al., "Array illuminator based on phase contrast", *Appl Opt*, Vol.27, No.14, p2915, 1988
- 51, A.W.Lohmann, "An array illuminator based on the Tablot effect", *Optik*, Vol.79, No.1, p41, 1988
- 52, J.C.Kirsch, et al., "Design of photopolymer holograms for optical interconnect applications", *Opt Eng*, Vol.27, No.4, p301, 1988
- 53, F.B.McCormick, et al., "Generation of large spot array from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings", *Opt Eng*, Vol.28, No.4, p299, 1989
- 54, 全国藩, 严瑛白, 王旭, 李铮, 邱敏贤, "High efficiency multiple phase level lenslet array", *SPIE*, Vol.1751, to be published.
- 55, "The theory and applications of the self-image effect", *Opt Progress*, 1988
- 56, Paul Latimer and R.F.Crouse, "Tablot effect reinterpreted", *Appl Opt*, Vol.31, No.1, p80, 1992
- 57, Bernd Packross, et al., "Imaging synthesis using self imaging", *Opt comm*, Vol.56, No.6, p394, 1986
- 58, P.Chavel and T.C.Strand, "Range measurement using Tablot diffraction imaging of gratings", *Appl Opt*, Vol.23, No. 6, p862, 1984
- 59, A.W.Lohmann and J.A.Thomas, "Making an array illuminator based on the Tablot effect", *Appl Opt*, Vol. 29, No. 29, p4331, 1990
- 60, J.R.Leger and G.J. Swanson, "Efficient array illuminator using binary optics phase plates at fractional-Tablot planes", *Opt Lett*, Vol.15, No.5, p233, 1990

清华大学学位论文用纸

- 61, <<基于Tablot效应的光栅阵列器件的研究技术报告>>, (863- 307-08-04鉴定文件), 清华大学精密系, 1991
- 62, G.J.Swanson and W.B.Veldkamp, "Diffraction optical element for use in IR system", *Opt Eng*, Vol.28, No.6, p605, 1989
- 63, Andrzej Kolodziejczyk, "Contrast reversal of a binary periodic object", *Optical Acta*, Vol.33, No.7, p867, 1986
- 64, J.T.Winthrop and C. R. Worthington, "Theory of Fresnel images I: plane periodic objects in monochromatic light", *J.Opt.Soc.Am*, Vol.55, No.4, p373, 1965
- 65, Fairchild Company(U.S.A), << CCD imaging and signal processing catalog>>
- 66, 许蕴慧, 毕业设计论文, 1992
- 67, 冯世常 译 <<美国电子电路精选>>, 1989, 电子工业出版社
- 68, (美) Herbert Schildt 著, 郭兴社等译, <<C语言大全>>, 1990, 电子工业出版社
- 69, 叶欣编著, <<Turbo C2.0 用户手册及参考手册>>, 1990, 北京中科院希望电脑公司
- 70, <<GRAFTOOL 3.0-3.3用户指南>>, 1992, 北京中科院希望电脑公司
- 71, 周明德著, <<PC(o520)计算机的原理与应用>>, 1991, 清华大学出版社
- 72, <<AUTOCAD计算机绘图软件>>, 1991, 北京中科院希望电脑公司

清华大学学位论文用纸

附录 1. 菲涅耳型微透镜的 CAD 程序 (WXFZP. BAS)

```
10 DIM RR(500)
20 PRINT "*****"
30 PRINT "* This program is used to design the Fresnel Zone Plate *"
40 PRINT "*****"
50 PRINT ""
60 PRINT "1. Please input the wavelength(um):"
70 INPUT L
80 PRINT "2. Please input the focal length(mm):"
90 INPUT F
100 PRINT "3. Please input the maximum radius(mm):"
110 INPUT R
120 PRINT "4. Please input the phase levels:"
130 INPUT N
140 M=R*R*N/(L*F)*1000
150 FF=F/R*.5
160 NA=1/SQR(1+4*FF*FF)
170 V=L/(NA*N)
180 IF V<5 GOTO 300
190 PRINT "-----"
200 PRINT "F(mm)="; F, "R(mm)="; R, "V(um)="; V, "NA="; NA
210 PRINT "-----"
220 PRINT ""
230 PRINT "The last mask's radius values:"
240 PRINT ""
250 FOR I=1 TO M
260 RR(I)=SQR(I*L*F*2/(1000*N))
270 PRINT "R("; I; ")="; RR(I); "mm",
280 NEXT I
290 GOTO 330
300 PRINT "The NA value is too big for producing the FZP"
310 PRINT "Please input the new parameters"
320 GOTO 80
330 END
```

清华大学学位论文用纸

附录 2. 器件表面形貌测量数据的绘图程序 (WXHUITU. BAS)

```
10 PRINT "*****"
20 PRINT "* This program is used to plot the FZP's phase profile *"
30 PRINT "*****"
40 PRINT ""
50 PRINT "Please input the phase levels:"
60 INPUT L
70 DIM A(2800)
80 DIM B(1400)
90 IF L>4 GOTO 150
100 IF L<4 GOTO 130
110 OPEN "C:\FOR031.dat" FOR INPUT AS #1
120 GOTO 160
130 OPEN "c:\for027.dat" FOR INPUT AS #1
140 GOTO 200
150 OPEN "c:\for030.dat" FOR INPUT AS #1
160 FOR I=1 TO 2800
170 INPUT #1,A(I)
180 NEXT I
190 GOTO 230
200 FOR I=1 TO 1400
210 INPUT #1,A(I)
220 NEXT I
230 LPRINT "J2"
240 LPRINT "LO"
250 LPRINT "M200,200"
260 LPRINT "X1,120,28"
270 LPRINT "M200,200"
280 LPRINT "X0,150,7"
290 LPRINT "M150,120"
300 READ C$
310 LPRINT "P";C$
320 DATA 0
330 Y=120
340 FOR T=1 TO 28
350 X=T*120+155
360 LPRINT "M":X:",";Y
370 READ A$
380 LPRINT "P";A$
390 NEXT T
400 DATA 100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000,1100,1200,1300,1400,1500
410 DATA 1600,1700,1800,1900,2000,2100,2200,2300,2400,2500,2600,2700,2800
420 X=90
430 FOR H=1 TO 7
440 Y=H*150+180
```

清华大学学位论文用纸

```
450 LPRINT "M90,";Y;",";X
460 READ B$
470 LPRINT "P":B$
480 NEXT H
490 DATA 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4
500 LPRINT "J0"
510 LPRINT "J1"
520 LPRINT "L0"
530 LPRINT "H"
540 LPRINT "M200,200"
550 X=200
560 FOR I=1 TO 2800
570 X=X+1
580 IF A(I)=0 GOTO 690
590 IF L<8 GOTO 620
600 Y=(A(I)+1.05)*700
610 GOTO 680
620 IF L<4 GOTO 650
630 Y=(A(I)+1.2)*700
640 GOTO 680
650 Y=(A(I)+.3)*700
660 LPRINT "D":X*1.5;",";Y
670 GOTO 690      RUN
680 LPRINT "D":X*1.15;",";Y
690 NEXT I
700 LPRINT "J0"
710 END
```

附录3. CCD采样存储仪的使用说明

一、仪器的运行环境

该仪器具有脱机采样、联机处理的优点。

脱机采样的运行环境：线阵CCD 配套使用并要求提供视频时钟信号和同步扫描信号。

联机处理的运行环境：PC/ZT、AT 等通用计算机并要求该机配置有通用I/O接口板，微机屏显为EGA或VGA。

二、线阵CCD象元个数的选择

该仪器可适用于象元个数为256~2048的线阵CCD，仪器主板上的二位DIP开关与线阵CCD的象元个数相对应，其具体关系如下表所示：

DIP1	DIP2	象元个数
ON	ON	256
OFF	ON	512
ON	OFF	1024
OFF	OFF	2048

三、仪器的功能

1. 手控按钮式行扫描。
2. 具有总清零和强制读写功能。
3. 具有行地址设置功能。
4. 可以随时调整和实时校核采样结果。

四、仪器的操作说明

1. 采样操作步骤

- ① 开机。(CCD控制器、采样存储仪)

清华大学学位论文用纸

- ②检查读写开关应置于“读”方，模拟信号开关处于“关”状态。（即该键未按下）
- ③按总清键将计数器清零。
- ④将CCD对准测量目标，用示波器监测仪器的输入与输出是否一致。
- ⑤调节CCD控制器的VCL和SYN旋钮至示波器上的波形满意为止。
- ⑥按行扫键开始采样，约2秒后LED显示该行行数，说明此行已采完。
- ⑦重新对准一行，依以上④、⑤、⑥步进行再次采样。
- ⑧当LED恢复显示00时，表示全部8K内存已采满，此时将读写开关置于“写”状态。
- ⑨关机。

2. 行地址设置

在采样过程中，利用行地址设置功能可以随意设止扫描行。方法如下：在有SYN输入时，将读写开关置于“写”状态并按下行设置键后，按行扫键选择扫描行，然后将读写开关置于“读”状态并关闭行设置键开始采样。

3. 观察存储内容

将读写开关置于“写”状态，按下模拟信号开关就可以用示波器来观察存储内容。

4. 联机处理步骤

- ①将仪器的输出端口与计算机的I/O接口板正确连接。
- ②开机。（计算机、采样存储仪）
- ③检查读写开关应置于“写”方。
- ④在计算机上运行配套软件，根据菜单的提示即可完成采样数据的传输及处理。
- ⑤记录并输出采样数据的处理结果。
- ⑥关机。

清华大学学位论文用纸

附录 4. CCD 采样存储仪的数据传输与处理程序 (WXCCD.C)

```
#include <stdio.h>
#include <graph.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <io.h>
#include <stdlib.h>
#include <process.h>
#include <malloc.h>
int port;
int pixel, line;
int bus[2050];
main()
{
    int choice=0, choose;
    char chol;
    void welcome();
    void note();
    int MENU(int choose);
    welcome();
    printf("Do you have the DATA files(Y/N)?\n");
WAIT1: chol=getch();
    switch(chol)
    {
        case 'Y': goto PATH2;
        case 'y': goto PATH2;
        case 'N': goto PATH1;
        case 'n': goto PATH1;
        default : goto WAIT1;
    }

PATH1: _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
    note();
    inaddress();
    transmit();

PATH2: PIXEL();
AA: LINE();
    huitu();

LOOP: choice=MENU(choose);
    switch(choice)
    {
        case '1': { goto AA; }
        case '2': { _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
                    peak();
                    while(!kbhit());
                    goto LOOP; }
        case '3': { _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
                    print();
                    while(!kbhit());
                    goto LOOP; }
        case '4': { system("copy data A:");
                    while(!kbhit());
                    goto LOOP; }
        case '5': break;
    }
}
```

清华大学学位论文用纸

```
        default :   goto LOOP;
    )
    _setvideomode(_DEFAULTMODE);
)

void welcome()
{
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
    _setbkcolor(1%16);
    _setcolor(5%16);
    _floodfill(20,20,1%16);
    _setcolor(1%16);
    _wrapon(_GWRAPOFF);
    _settextposition(4,31);
    _outtext(" WELCOME! ");
    _settextposition(8,25);
    _outtext("This program is used to");
    _settextposition(10,22);
    _outtext("process the CCD line scan data");
    _settextposition(13,29);
    _outtext("Designed by");
    _settextposition(17,25);
    _outtext("Optical Computing Group");
    _settextposition(19,22);
    _outtext("Dept. of Precision Instruments");
    _settextposition(21,27);
    _outtext("Tsinghua University");
    _settextposition(26,23);
    _outtext(" Press any key to go on...");
    while(!kbhit());
    _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
}

void note()
{
    char cho2;
    _setcolor(14%16);
    _settextwindow(2,2,10,25);
    _wrapon(_GWRAPOFF);
    _rectangle(_GFILLINTERIOR,100,30,200,90);
    _setcolor(4%16);
    _setbkcolor(4%16);
    _rectangle(_GFILLINTERIOR,110,40,190,80);
    _settextposition(7,15);
    _outtext(" NOTE ");
    _settextwindow(15,1,25,50);
    _settextcolor(14%16);
    _settextposition(2,1);
    _outtext("Before using this program, you should\n");
    _outtext("          be sure to know\n");
    _outtext("the address of the 8255 Parallel Port\n");
    _outtext(" which you use to transmit your data.");
    _setbkcolor(5%16);
```

清华大学学位论文用纸

```
_rectangle(_GFillInterior,30,162,116,190);
_rectangle(_GFillInterior,197,162,277,190);
_setcolor(0x16);
_rectangle(_GFillInterior,34,166,112,186);
_rectangle(_GFillInterior,200,165,273,186);
_settextwindow(20,1,50,50);
_settextposition(3,6);
_outtext(" [Yes]");
_settextposition(3,26 );
_outtext(" [No] ");
_settextposition(4,6);
_outtext(" Continue");
_settextposition(4,26);
_outtext(" Exit ");
WAIT2: cho2=getch();
switch(cho2)
{ case 'Y' :break;
  case 'y' :break;
  case 'N' :abort();
  case 'n' :abort();
  default :goto WAIT2;
}
_clearscreen(_GCLEARSCREEN);
}

inaddress()
{ char buffer[20],Address[10], *input,ch;
  int p,i;
  buffer[0]=20;
ERROR1: printf("\n\n Input the CONTROL Port Address: (61BH) ");
  input=cgets(buffer);
  i=1;
  do { ch=*input++;
      if(ch!=isspace(ch)) Address[i++]=ch;
  }
  while(ch!='\0');
  if(buffer[i]==0) { port=1563; goto END; }
  port=0;
  for(i=1;i<=3;i++)
  { p=pow(16,3-i);
    if(Address[i]<='F' && Address[i]>='A')
      { port+=(10+Address[i]-'A')*p; break; }
    if(Address[i]<='f' && Address[i]>='a')
      { port+=(10+Address[i]-'a')*p; break; }
    if(Address[i]<='9' && Address[i]>='0')
      port+=(Address[i]-'0')*p;
    else {printf("\n The input is wrong, Try again!\n");
          goto ERROR1; }
  }
END: printf("\n Address=%d \n ",port);
}
```

清华大学学位论文用纸

```
transmit()
{
    int apor, byte, numb, dat, i;
    FILE *point;
    char cho3;
    _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
    printf("\n Waiting! Data are being transmitted.\n");
    apor=port-3;
    point=fopen("data", "w");
    byte=144;
    outp(port, byte);
    byte=3;
    outp(port, byte);
    numb=1;
    do {
        byte=1;
        outp(port, byte);
        for(i=1; i<=20; i++);
        byte=0;
        outp(port, byte);
        for(i=1; i<=100; i++);
        byte=1;
        outp(port, byte);
        for(i=1; i<=80; i++);
        dat=inp(apor);
        fprintf(point, "%4d\t", dat);
        numb++;
    }
    while(numb<=8149);
    fclose(point);
    printf("\n The transmission is finished! \n");
    while(!kbhit());
    printf("Do you want to show sample data?(Y/N)\n");
WAIT3: cho3=getch();
    switch(cho3)
    {
        case 'Y' : goto PATH3;
        case 'y' : goto PATH3;
        case 'N' : goto PATH4;
        case 'n' : goto PATH4;
        default : goto WAIT3;
    }
PATH3: system("type data");
    if (getch()) getch();
PATH4: ;
}

PIXEL()
{
    int cho4, ch;
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
    _settextcolor(14%16);
    _settextwindow(3,3,40,50);
    _settextposition(4,26);
    _outtext("CCD pixel number:");
```

清华大学学位论文用纸

```
_settextposition(7,20);
_outtext(" 1---256          2----512  ");
_settextposition(9,20);
_outtext(" 3---1024         4----2048 ");
_settextcolor(15%16);
_settextposition(13,22);
_outtext("Your choice(3): ");
WAIT4: cho4=getch();
switch(cho4)
{ case '\r': { pixel=1024;break; }
  case '1' : { pixel=256;break; }
  case '2' : { pixel=512;break; }
  case '3' : { pixel=1024;break; }
  case '4' : { pixel=2048;break; }
  default : goto WAIT4;
}
_clearscreen(_GCLEARSCREEN);
}

LINE()
{
    int totalline;
    totalline=8192/pixel;
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
    _setcolor(15%16);
    _settextwindow(3,1,40,35);
    _settextposition(2,1);
    printf("There are %d lines data to be processed.",totalline);
    _settextposition(8,1);
ERROR2: printf(" Which line do you want to process?\n");
    printf("(1<=No.<=%d) : \t",totalline);
    scanf("%d",&line);
    if(line>totalline||line<1)
    { printf("\n Input is wrong, try again!\n");
      goto ERROR2; }
    printf("\n Line=%d\n",line);
}

huitu()
{
    FILE *point;
    int offset;
    int page,x,y,pot,i,l;
    point=fopen("data","r");
    offset=(line-1)*pixel+l;
    fseek(point,offset,SEEK_SET);
    for(i=1;i<=pixel;i++) fscanf(point,"%d",&bus[i]);
    fclose(point);
    while(!kbhit());
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
    page=0;
    do { _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
        _setcolor(15%16);
```

清华大学学位论文用纸

```
_settextcolor(14%16);
_setcliprgn(0,10,600,300);
_setlinestyle(0xffff);
_settextwindow(20,1,40,80);
_settextposition(4,15);
_outtext(" PIXEL NUMBER ");
_settextposition(10,2);
_outtext(" Press any key to next page...");
_rectangle(_GFillInterior,50,44,600,300);
_setcolor(5%16);
for(i=1; i<=10; i++)
{ _moveto(50*i+50,300);
  _lineto(50*i+50,290);
  _settextposition(1.6*i+7);
  printf("%d",page*500+i*50); }
_settextwindow(1,1,20,4);
for(i=1; i<=6; i++)
{ _moveto(50,50*(i-1));
  _lineto(60,50*(i-1));
  _settextposition(3*i+1,2);
  printf("%d",250-(i-1)*50); }
_setcolor(1%16);
for(i=1; i<=500; i++)
{ pot=page*500+i;
  if(pot>=pixel) goto BB;
  x=i+50; y=300-bus[pot];
  _setpixel(x,y); }
for(l=1; l<=5; l++)
{ for (i=1; i<=5; i++); }
if (getch()) getch();
page++;
}

while(pot<pixel);
BB:  if (getch()) getch();
    _setvideomode(_DEFAULTMODE);
}

MENU(int choose)
{
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
    _settextcolor(14%16);
    _settextwindow(2,2,40,60);
    _settextposition(4,23);
    _outtext(" DATA PROCESSING MENU ");
    _settextcolor(15%16);
    _settextposition(7,18);
    _outtext(" 1-----PROCESS ANOTHER LINE ");
    _settextposition(9,18);
    _outtext(" 2-----PROCESS THE PEAK ");
    _settextposition(11,18);
    _outtext(" 3-----PRINT THE CURRENT LINE DATA ");
    _settextposition(13,18);
    _outtext(" 4-----SAVE THE SAMPLE DATA ");
}
```

清华大学学位论文用纸

```
_settextposition(15,18);
_outtext(" 5-----EXIT TO DOS                ");
_settextposition(20,20);
_outtext(" YOUR CHOICE:");
choose=getche();
return(choose);
```

peak()

```
{
    FILE *stream, *point;
    int max[30], halfwidth[30], airydiameter[30], p[30], DC[30], threshold;
    int MAXMUM, MINMUM, Hopt, Lopt, hhmax, hlmax, Emax, Emin, i, ii, j, offset;
    float hmax, E, UNEVENNESS;
    printf("Please input the threshold value:\t");
    scanf("%d",&threshold);
    point=fopen("data","r");
    offset=(line-1)*pixel+1;
    fseek(point,offset,SEEK_SET);
    for(i=1; i<=pixel; i++) fscanf(point,"%d",&bus[i]);
    fclose(point);
    while(!kbhit());
    printf("\n Waiting for finding the peak!\n");
    j=0;
    for(i=0; i<=30; i++)
    {max[i]=0; p[i]=0; DC[i]=0; halfwidth[i]=0; airydiameter[i]=0;}
    for(i=1; i<=pixel; i++)
    { if (bus[i]>threshold)
        { if (bus[i+1]<=bus[i]&&bus[i-1]<bus[i])
            { if (bus[i+2]<=bus[i+1]&&bus[i-2]<=bus[i-1])
                { if (bus[i+3]<=bus[i+2]&&bus[i-3]<=bus[i-2])
                    { p[j]=i; max[j++]=bus[i]; }
                }
            }
        }
    }
    }
    if (j==0)
    {printf("\n\n No Peak Found!\n\n");
    printf("press any key to return DATA PROCESSING MENU...");
    while(!kbhit());
    goto CC; }
    MAXMUM=max[0];
    Hopt=p[0];
    MINMUM=max[0];
    Lopt=p[0];
    for(i=1; i<=j-1; i++)
    { if (max[i]>MAXMUM) {MAXMUM=max[i]; Hopt=p[i];}
      if (max[i]<MINMUM) {MINMUM=max[i]; Lopt=p[i];} }
    UNEVENNESS=1.0*(MAXMUM-MINMUM);
    UNEVENNESS=UNEVENNESS*100.0/MAXMUM;
    for(i=0; i<=j-1; i++)
    { DC[i]=(p[i+1]-p[i])*13;
      hmax=0.5*max[i];
```

清华大学学位论文用纸

```
E=0.135*max[i];
ii=p[i];
do --ii;
while(bus[ii]>hmax);
hlmax=ii;
ii=p[i];
do --ii;
while(bus[ii]>E);
Emin=ii;
ii=p[i];
do ++ii;
while(bus[ii]>hmax);
hhmax=ii;
ii=p[i];
do ++ii;
while(bus[ii]>E);
Emax=ii;
halfwidth[i]=(hhmax-hlmax)*13;
airydiameter[i]=(Emax-Emin)*13;
}

stream=fopen("result","w+");
for(i=0;i<=j-1;i++)
{ fprintf(stream," %d\t\t%d\t\t%d\t\t",p[i],max[i],DC[i]);
  fprintf(stream,"%d\t\t%d\n",halfwidth[i],airydiameter[i]); }
fclose(stream);
printf("\n\nPeak Spot\tIntensity\tDistance\tHalfwidth\tAirydiameter\n");
system("type result");
printf("\n\n Peak Intensity Max=%d\t Peak Spot=%d\n",MAXMUM,Hopt);
printf("\n\n Peak Intensity Min=%d\t Peak Spot=%d\n",MINMUM,Lopt);
printf("\n\n Current Line Unevenness(%)=%f\n",UNEVENNESS);
if (getch()) getch();
CC:
}

print()
{
    int choice,offset,j;
    _setvideomode(_VRES16COLOR);
DD:    _clearscreen(_GCLEARSCREEN);
    _settextwindow(2,2,40,60);
    _settextposition(4,25);
    _settextcolor(14%16);
    _outtext(" PRINT MENU ");
    _settextcolor(15%16);
    _settextposition(7,20);
    _outtext(" 1----- TO THE SCREEN ");
    _settextposition(9,20);
    _outtext(" 2----- TO THE DISK A: ");
    _settextposition(11,20);
    _outtext(" 3-----EXIT TO MAIN MENU");
    _settextposition(14,22);
    _outtext(" YOUR CHOICE: ");
    choice=getche();
```

清华大学学位论文用纸

```
switch(choice)
{ case '1' : { _clearscreen(_GCLLEARSCREEN);
               system("type result");
               while(!kbhit());
               goto DD ;   }
  case '2' : { _clearsoreen(_GCLLEARSCREEN);
               system("type result>prn");
               while(!kbhit());
               goto DD; }
  case '3' :   break;
  default :   { printf("\n INPUT IS WRONG !\n"); goto DD;}
}
```