

摘 要

248290

本文对二元光学这一前沿学科的发展现状及其在半导体激光器准直等中的应用前景作了综述。对二元光学器件的原理、设计方法和加工工艺及性能评估进行了全面论述。设计并研制了一种二元光学式半导体激光器消象散准直器件样品（光斑发散度 $\beta < 1.5\text{mrad}$ ，焦距 $f_x = 6.05\text{mm}$ 、 $f_y = 6.00\text{mm}$ ，最小线宽 $v = 2.0\mu\text{m}$ ，外径 $R_x = 0.503\text{mm}$ 、 $R_y = 0.50\text{mm}$ ）。建立了二元光学器件的象差及加互误差模型，并应用于二元消象散准直器件的象差及加互误差的分析计算。实验结果证明了理论分析的正确性。还设计了两种新型二元器件：大数值孔径的二元消象散准直器（数值孔径0.5）及焦距可调的二元菲涅耳透镜。编写了二元菲涅耳透镜的设计程序及一般数据格式转换成CIF数据格式的应用软件。

关键词：二元光学，消象散，准直

Design and fabrication of the binary optical elements for compensating astigmatism and enhancing collimation

ABSTRACT

The current research is of a frontier study in optics—binary optics and its application for the laser-diode collimation are reviewed in this dissertation. The principle, design method, fabrication processing and performance evaluation of the binary optical elements (BOE) are comprehensively discussed. A sample of BOE for the laser diode for compensating astigmatism and enhancing collimation (laser beam divergency $\beta < 1.5$ mrad, the focal length $f_x=6.05\text{mm}$ $f_y=6.00\text{mm}$, minimum line width $v=2.0\ \mu\text{m}$, maximum radii $R_x=0.503\text{mm}$ $R_y=0.500\text{mm}$) is designed and fabricated. The models of aberration generated and errors fabricated on the BOE are constructed, and have been used effectively. The experimental results have verified the correctness of the theoretical analysis. Two new kinds of BOE, of which one is a BOE with large Numerical Aperture (NA) for the laser diode to eliminate astigmatism and enhance collimation (NA=0.5), the other is a Fresnel Zone Plate (FZP) with variable focal length, are designed. In addition, two programmes are written, respectively for the design of the binary FZP and for the data transformation from general data format to CIF data format.

Key Words: Binary Optics, Astigmatism, Collimation.

Wang Chao (Optical Instrument)

Directed by: Yan Yingbai (Professor)

目 录

第一章	绪论	
第一节	二元光学的发展概述	(1)
第二节	半导体激光器的市场前景 及目前需要解决的问题	(7)
第三节	课题来源及研究内容	(10)
第二章	二元光学式半导体激光器消象 散及准直器件的设计与研制	
第一节	消象散准直器的实现原理与方案	(12)
第二节	二元光学消象散准直器的设计	(15)
第三节	二元光学器件的制作	(24)
第四节	实验研究	(27)
第三章	二元光学器件的象差及误差分析	
第一节	二元光学器件的象差分析	(39)
第二节	二元光学器件的加工误差分析	(46)
第四章	其它二元光学器件的设计制作	
第一节	大数值孔径二元消象散 准直器件的设计制作	(53)
第二节	焦距可调的二元菲涅耳	(56)

清华大学学位论文用纸

透镜的设计

第五章	设计软件的开发	
第一节	二元菲涅耳透镜的软件设计	(58)
第二节	一般数据格式转换成CIF数据格式的软件设计	(59)
第六章	结束语	(63)
致谢		(65)
参考文献		(66)
附录一	图形分割后生成的数据文件报表	(71)
二	二元菲涅耳透镜设计程序清单	(72)
三	一般数据格式转换成CIF数据格式的应用程序	
1.	完整图形的数据转换程序清单	(74)
2.	被截取图形数据转换程序清单	(82)
四	二元消象散准直器件发散角计算程序清单	(93)

第一章 绪论

§1-1 二元光学的发展概述

随着二十一世纪的到来，科学技术有了飞速地发展，在光学研究领域，出现了一门新兴的学科——微光学 (Micro-Optics)。微光学作为一个新的学科分支其产生与发展是受到现代科学技术的信息化、集成化及智能化的需求所推动的，微光学将以自身的特点在实现上述三化的过程中得到发展。从学科范围来说，它主要包括两个方面：一是经历40年发展的梯度折射率光学 (GRIN)，另外就是近几年新兴的二元光学 (Binary Optics)。二元光学是指依据光的衍射理论，采用超大规模集成电路的制作工艺，在片基或在传统光学器件的表面经刻蚀产生两个或多个深度等级的台阶分布，纯位相，同轴再现，具有极高衍射效率，特征尺寸为波长量级的一类光学衍射元件的设计与制作^[1]。二元光学元件并不泛指那些在光学中广泛存在的一般二元问题，如二元编码、计算全息图。相位等级一般可以表示成 2^n ($n=1, 2, \dots$) 的形式，片基表面刻蚀成 2^n 个与相位对应的台阶分布，此种形式器件即为二元光学器件，按相位的等级情况，二元光学器件通常分成三种类型，即二值型、多值型与混合型，如图1-1所示。

二元光学器件具有以下诸多特点：(1) 可大量复制，造价低廉，结构紧凑，可集中多种功能于一身。(2) 用计

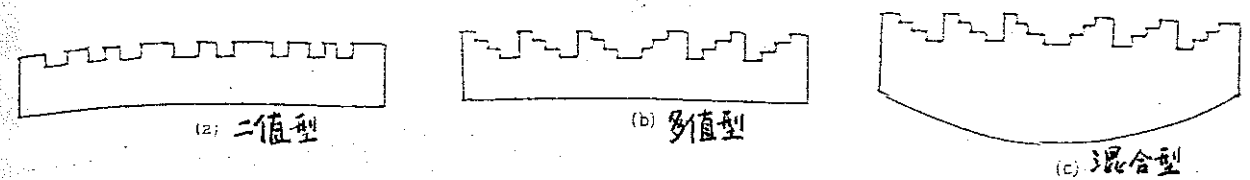


图1-1 二元光学器件类型

计算机产生的微图形可获得任意波阵面，且衍射元件取代光折射元件，特别是非球面光学元件，可实现光学系统微型化、简单化、轻量化、宽带化。(3) 能量利用率高，稳定性好。(4) 光衍射具有与光折射相反的色散性质，适当组合可得到优质象。而许多从传统光学的角度看很难实现的技术与器件，例如制成微透镜阵列、激光微腔、多元光阵列、任意波面校正器等。用二元光学的方法，从设计到工艺都可实现大批量、高质量生产的目的。^[2]

二元光学元件的制作是通过微电子加工工艺中的光束和电子束制版技术，将计算机设计的衍射图样写到感光材料上，再通过离子束刻蚀技术，将感光层上的图案转移到衬底片基上，最终形成深度为亚微米量级的表面刻蚀结构。二元光学元件分为台阶式量化的深度分布和连续式深度分布两类结构。

二元光学元件的制作分为先制作掩模而后曝光刻蚀和无掩模直写两大类。有掩模的制作是通过均匀曝光的光学制版技术，将掩模上的图案印到衬底感光层中，然后通过反应离子刻蚀将二维图形转换成衬底上的三维结构。制作过程首先需要制作单个或多个预先设计的二元掩模，掩模是透过率为0和1的二值振幅图形。制作掩模的常规方法是采用图型发生器曝光技术，也可采用商

业化的桌面制版技术，通过特殊软硬件、激光打印机以及可缩小的光学照相机，实现快捷而廉价的高精度的掩模制作^[3]。

1. 利用掩模制作衍射光学元件

1.1 深紫外线逐级缩小式制版刻蚀法^[4]。图 1-2 给出此方法的具体加工过程。利用准分子激光器发出的深紫外光，通过光学曝光系统将掩模上的图形缩小后投影到衬底上，衬底上面镀有金属层和对紫外光敏感的感光层，曝光后经过烘烤处理和湿显影法，在感光层中形成二维图形，然后通过多步的反应离子刻蚀，最后在衬底上形成所需的三维结构。

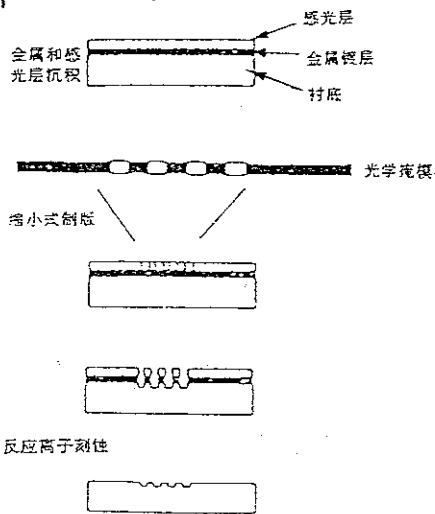


图 1-2 深紫外缩小式制版刻蚀制作衍射光栅的过程

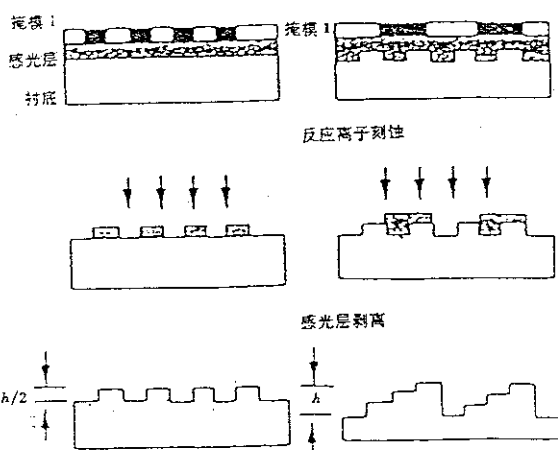


图 1-3 利用光学接触式制版刻蚀法制作二级和高级衍射光栅的加工过程

1.2 光学接触式制版刻蚀法^[4]。这种方法与第一种十分类似，不同之处在于此种方法中掩模和衬底直接接触，掩模图形投影曝光时不缩小，同时所用的感光材料也不同。其加工过程如图 1-3 所示。

利用上述两种有掩膜的光学制版刻蚀方法，可以制

作二台阶或多台阶的衍射相位元件。当制作 2^n 级的元件时，通常需要 n 个掩模和进行 n 次曝光刻蚀过程。而且每次曝光都要求不同掩模间图形位置高精度地对准，通常要求误差不得超过百分之一。

2. 无需掩模制作衍射光学元件

1) 电子束直写制版刻蚀法^[5]。它是通过电子束曝光和反应离子刻蚀工艺将设计的图案形成于衬底中，最终制作出三维的微结构元件。电子束制版有很高的空间分辨率，而且一步刻写，避免了多掩模之间准确定位的困难。

电子束直写刻版方法需要一个电子束系统，它是由带有电子束图形发生器的曝光系统，如图1-4所示，和带有特殊的软硬件的计算机系统组成。

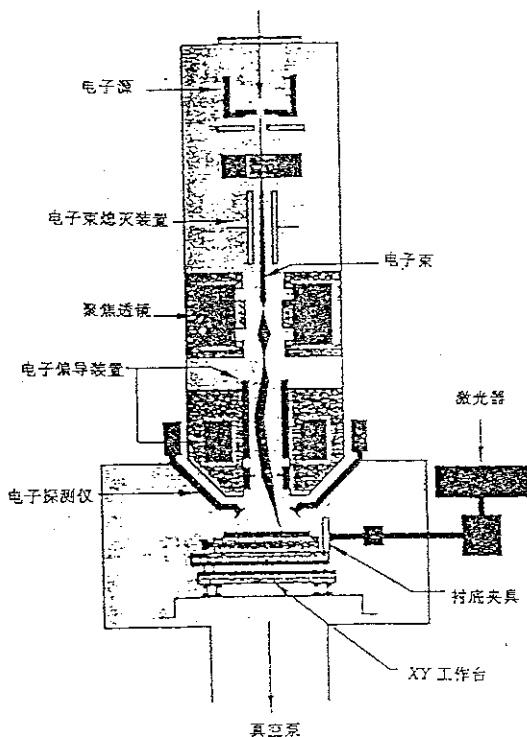


图1-4 电子束曝光系统的示意图

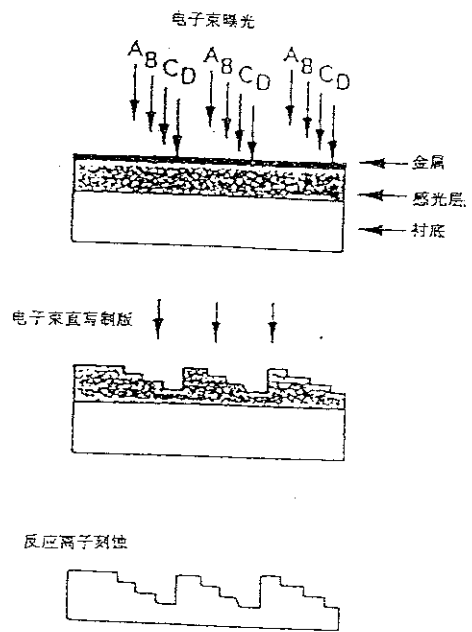


图1-5 电子束直写制版刻蚀方法制作多级衍射光栅的加工过程

图1-5 给出这一加工方法的示意图。衬底片基上先镀上对电子束敏感的感光层，然后在其上再镀上可防止

长时间曝光中出现电荷积累的金属层。通过控制曝光中电子束的强度，从而有效地控制刻蚀深度。一旦通过电子束曝光将图形写到感光层上，便可利用反应离子刻蚀技术将其转移到衬底上，形成三维的台阶式结构。

2. 激光束直写制版刻蚀法⁽⁶⁾。这种制作方法是通过对精密的扫描控制系统，利用激光束直接在感光层中写下连续的深度分布，由于连续深度分布的衍射光学元件比台阶式量化深度分布有着更高的衍射效率，因而这种技术更具有吸引力。

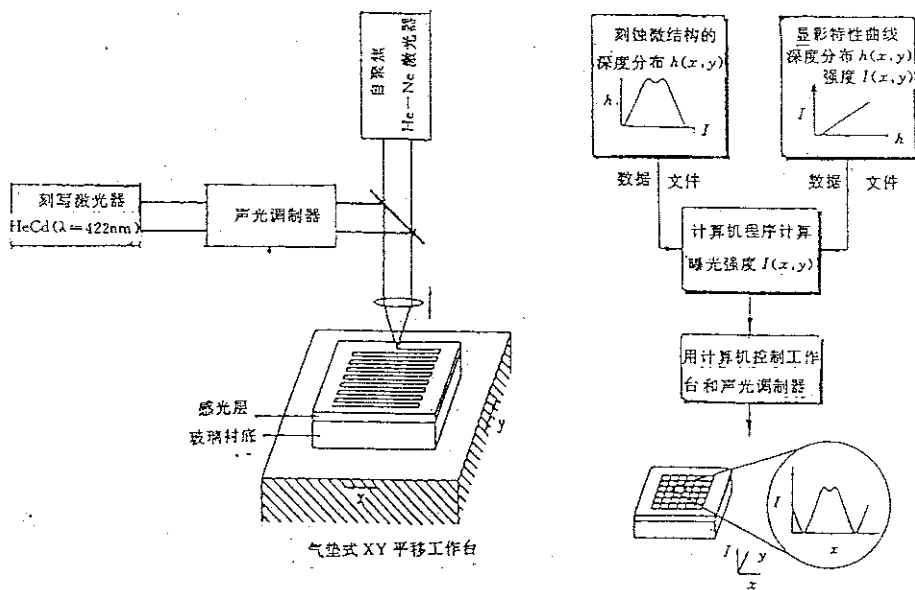


图1-6 激光束直写系统的硬件和软件示意图

图1-6显示了直写控制系统的组成。刻写过程中的曝光量数据是根据最终刻蚀结构的表面深度分布和感光材料的显影特性曲线计算得到的，并输入计算机。通过计算机硬件驱动的声光调制器，在扫描过程中，调制激光束强度，然后经过显影，在感光层中获得所需的图形，再利用反应离子刻蚀方法，在衬底上得到连续深度分布

的衍射元件。

3. 二元光学元件的复制^[6]

二元光学元件的一个很主要的优点是可以复制。进行复制时，首先要制作金属填隙膜片，然后向经过光学或电子束制版的衬底感光层蒸发 100 nm 厚的银膜，制得导电膜层，再电镀镍至标准厚度 $60\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ ，并与感光层分离，从而获得第一代镍填隙模片，称为母模片，再对母模片进行钝化处理及进一步电镀，获得第二、三代产品，通常第三代产品是最适于批量复制的模版。复制技术主要有图1-7所示的三种。

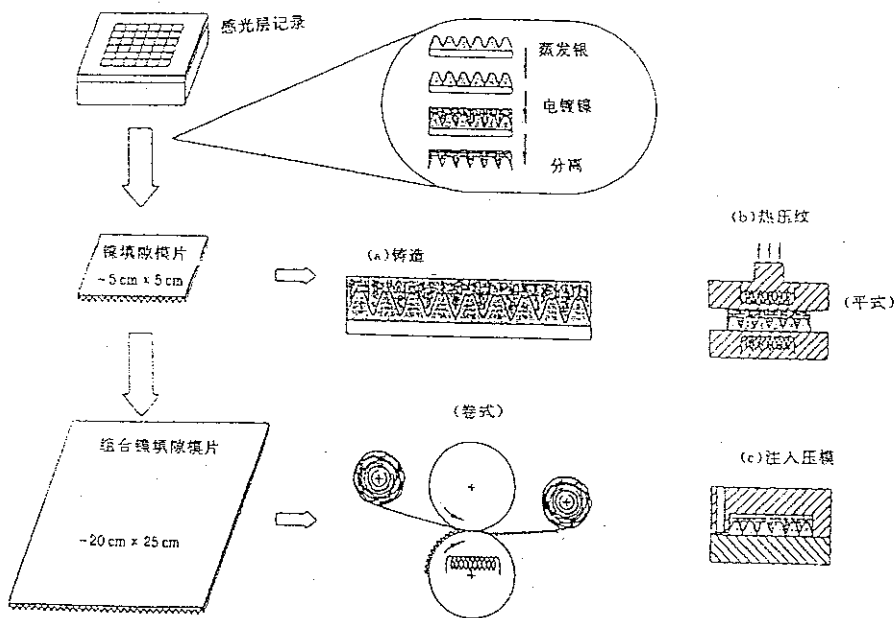


图1-7 衍射光学元件复制的几种技术
(a) 铸造法; (b) 热压纹法; (c) 注入压模法

目前许多研究者的兴趣主要在微精细光学阵列的制造上。二元光学的有效应用之一是通过微光学技术产生光学元件，例如直径范围从几微米到一毫米的微透镜，多路调制器，滤波器阵列等。其形状可为矩形、圆形或

六角形紧密布局的阵列。微透镜的面形不仅不受制造约束条件的限制，而且能使设计者按照应用的要求而设计成如球面、抛物面、非球面、象散和变形分布等^[7,8]。

至于微光学在系统中的应用，尚处于新的开始阶段，主要用于激光二极管光束成形，芯片上的光学操作，焦平面成像，光学传感技术，光学数据处理和存储等。二元光学技术可达 $0.1 \mu\text{m}$ 精度和 $0.5 \mu\text{m}$ 的分辨率，20000 元素/平方厘米的相干微透镜阵列已被实验验证——阵列中各元素的波前误差均方根值在 $\lambda/50$ 之间，衍射效率达 98%，其中每小透镜有 $+1$ 的速度，填充系数为零^[9]。

微光学比较成功的应用还有波面的修正，激光束的相干叠加，折/衍射混合型器件等，把二元光学的理论和技术与实际应用相结合是一个新的而且重要的发展方向，本文就是致力于研究一种新型的二元光学式的半导体激光器的消象散和准直器件，并使之产品化。试图探索出二元光学器件的一个新的应用方面。

§ 1-2 半导体激光器的市场前景 及目前需要解决的问题

七十年代末八十年代初，以光通信和光存储应用为基础发展起来的半导体激光器，在广阔的应用市场和先进的生产技术推动下，迅速实现了产业化。十余年来，随着其制作技术的改进，器件性能的不断提高，成本大幅度下跌，市场竞争能力日益增强，对世界激光市场乃至整个光电技术市场都产生了重大影响。在目前世界销

清华大学学位论文用纸

售的激光器中，其销售数量占95%左右，销售金额占1/4左右(表1-1)⁽¹⁰⁾。由于半导体激光器的增长幅度大于世界激光市场的平均增长，所以比例今后还要提高。

表 1-1 半导体激光器和各种激光器历年(1985~1992)销售情况

年	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
各种激光器总销量(支)	2,415,355	9,862,737	16,408,007	18,933,100	25,109,147	29,805,836	38,165,751	49,558,093
半导体激光器销售量(支)	2,216,230	9,611,424	16,130,273	18,630,843	24,690,000	29,348,800	37,700,000	49,100,000
半导体激光器所占份额(%)	92	97	98	98	92	98	98.7	99
各种激光器总销值(百万美元)	459.6	501.79	570	633.5	882.6	1024.7	1079.1	1156.2
半导体激光器销值(百万美元)	75.8	121	179	180	211	250.3	250.2	286.8
半导体激光器所占份额(%)	17	22	31	28	24	24	23	25

半导体激光器主要用于光纤通信、光存储、激光打印、条码扫描、测量以及医疗等。在研究开发上也有一定市场。从历年来各应用领域的销售状况及增长幅度看，光通信、光存储和信息处理是半导体激光器的主要市场。目前上市的红光半导体激光器(650nm-690nm)可见度高，使用安全方便。红光半导体激光器主要由日本公司开发。目前至少有东芝、日电、日立、三菱电子、索尼和夏普6家公司以批量或样品方式生产670nm波长增益波导结构器件，东芝已有TCLD9200系列5个品种(表1-2)^(10,11)。荷兰飞利浦是第一家生产670nm半导体激光器的非日本公司。1989年6月出售CQL8010型增益波导器件，输出功率3mw。1991年又有几家美国公司加入这一行列。目前共有十几家公司参与红光半导体激光器市场的激烈的竞争。

表 1-2 东芝红光半导体激光器产品序列参数

	TOLD9200(S)	TOLD9201(S)	TOLD9211(S)	TOLD9211(H)	TOLD9215(S)	TOLD9220(S)
管芯结构	增益波导		折 射 率 波 导			
波长(nm)	670	670	670	670	670	660
输出光功率(mW)	3	5	5	5	10	3
阈值(mA)	70	70	40	40	35	75
像散(μm)	40	40	13	13	13	13
光斑纵横比	5	2.8	3.8	3.8	3.5	5
工作温度($^{\circ}\text{C}$)	-10~+50					-10~+40

从上面的分析可以看出，红光半导体激光器不仅有雄厚的科研开发队伍，而且还有广阔的应用市场。下面简介几个应用实例。

1. 半导体激光测距仪^[13]

如图 1-8，可见光半导体激光二极管 1 经准直镜 2 后发出的光束照射于被测物体 5 上，由透镜 3 接受被测物体的反射光，并成像于接受器 (CCD) 4 上。物体位置变化后，在接受器上反映出的是光点的位置，根据几何计算可得出

$$L = \frac{m \cdot k}{k \cdot \tan \theta - x} \quad (1-1)$$

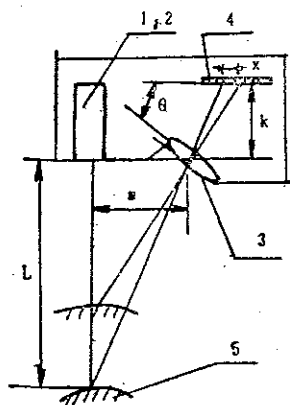


图 1-8 红光半导体激光测距仪

其中 L 为被测距离； m 为激光器与接受透镜中心之距； k 为接受透镜中心与接受器的垂直距离； θ 为透镜与接受器之间的夹角； x 为象点在接收器上偏离中心之位移。该测距仪应用了红光半导体激光器代替

He-Ne 激光器作为光源，用直流 9V 电压干电池驱动，使用方便，特别适用于生产现场、隧道及野外作业等场合。

2. 光通信

红光半导体激光器可进行调制，调制范围达 2KHz-10KHz。在光通信中的使用波长一般为 1.3 μ m 或 1.5 μ m，因为它们光纤传播中损失最小，但由于该波长的二极管价格较高，因而一直未能得到推广。人们注意到，波长 670nm 的红光在几千米光纤传播中，损耗并不很大，价格性能比低，对激光通信的民用普及很有意义。

3. 条形码阅读器

红光半导体激光器的出现不仅使条形码阅读器同时具有了 He-Ne 及红外半导体激光器的各自优点，而且克服了 He-Ne 管体积大和红外半导体激光器对某些颜色反差差的不足。随着红光半导体激光器向更短波长发展，它在条形码阅读器中的应用将愈加占据有利位置。

此外半导体激光器还在军事、医疗、加工和科研等多方面有着广泛的应用，但在所有应用中都要求解决半导体激光器消象散和准直问题。因此对这一课题的研究有着重大的实际意义。

§ 1-3 课题来源及研究内容

本课题是一项国家自然科学基金重点项目中的一部分内容。本论文研究并完成了如下几项工作。

1. 设计并研制了 4 台阶的二元光学式半导体激光器

清华大学学位论文用纸

消象散准直器件，并完成样品设计和调试工作。

2. 设计并制作超细线宽 ($10.7 \mu\text{m}$) 的二元光学式半导体激光器消象散准直器件，并拟采用电子束直写工艺进行加工 (正在试制中)。

3. 设计并制作焦距可变的菲涅耳透镜。

4. 对二元光学器件进行象差、误差分析及建模。

5. 编写二元光学器件设计程序及 CIF 数据格式转换程序。

工要求很高，装配调试也复杂⁽¹⁵⁾。因此制造成本高。清华大学精密系系办工厂针对红外半导体激光器设计了一个由多片透镜组成的准直系统，在5m的距离内光束准直效果良好，数值孔径 $NA=0.5$ ，光利用率 65~70%，但未消象散，只能用于象散较小的红外半导体激光器。上海激光技术研究所研制的高性能的稳功率、准直半导体激光发射头，准直光束发散角为 0.2mrad ，准直物镜如图2-2所示⁽¹⁶⁾。大数值孔径的准直物镜的优点是能量利用率高，但加工装配困难多。

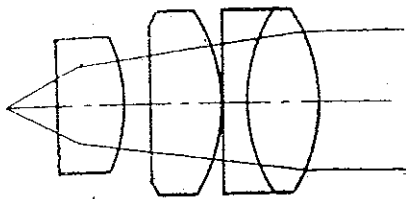


图2-2 $NA=0.60$, $f=6\text{mm}$ 的准直物镜

2. 自聚焦棒构成的准直系统⁽¹⁵⁾

自聚焦棒的结构简单，由纤芯和包层组成，长度小于 10mm ，外径小于 2mm ，光束在具有梯度折射率的光纤中传输，由于其自聚焦作用而使发散光束准直。图2-3所示为光线在光纤中的传播轨迹。

$$r(z) = r_{\max} \sin\left(\frac{g}{\cos\alpha_0} \cdot z + \phi_0\right) \quad (2-1)$$

其中 g 称为折射率分布常数，光线轨迹为一族以 z 轴为对称轴的正弦曲线，空间周期为 $L = 2\pi \frac{\cos\alpha_0}{g}$ ，即正弦曲线的周期长度与初始方向 α_0 有关。当 α_0 较小或只要进入光纤的光线 $L = 2\pi/g$ 时，光线在光纤中的传播轨迹就如图2-3所示。如果自聚焦棒长取周期长度的四分之一，那么在

出光面 C-C 截面，各条光线均应按各种正弦曲线的切线方向传播，而各场线方向平行于 Z 轴，因此起到了准直光束的作用。自聚焦棒可以使光束发散角小于 0.9 mrad 。

利用折射率或梯度型分布的光纤对发散角很大的半导体激光束进行准直，成本低，简单可靠。但它的焦距一般很短，对于已封装好的半导体激光器，玻璃窗到激光芯片的距离已大于自聚焦棒的焦距。因此对于已封装好的半导体激光器，此方案的准直效果不好。此外可以采用拆掉激光器外壳的使用方法，但又将大大影响半导体激光器的使用寿命。

3. 用变形棱镜消象散和准直^[14]

半导体激光器的椭圆形光束截面可通过改变其光束轮廓而得到圆形光束截面。其系统光路如图 2-4 所示。该方案在对光束准直的同时也考虑了消象散，但其结构复杂，元器件多，给调试和使用带来了困难。

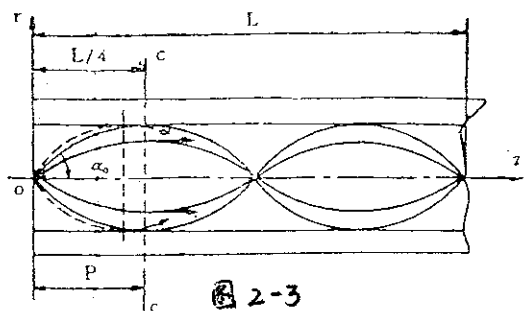


图 2-3

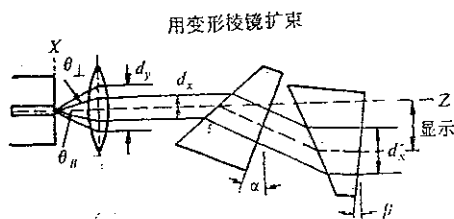


图 2-4

以上几种准直方案中，效果最好的是自聚焦棒。但是该方案使用条件较苛刻。本文研究了采用二元光学器件的方案，与它相比不仅设计简单灵活，而且结构简单，加工装配也不困难，准直和消象散后效果也较好。

§ 2-2 二元光学消象散准直器的设计

一、二元光学菲涅耳透镜的设计原理

目前，在微光学的研究领域之中，小尺寸，大数值孔径的菲涅耳透镜 (Fresnel Zone Plate) 的需求量日益增大，如激光唱机的读数头和光通信系统的耦合透镜等，因此 FZP 具有很高的应用价值。^[32]

研究二元光学器件的理论有标量波和矢量波模型。一般情况下，由于器件特征尺寸远大于波长值，所以可采用标量场近似下的傅氏模型^[17]。当器件的特征尺寸小到可与波长相近时，则需用矢量模型分析计算。

一个 FZP 是由一系列同心圆环带构成的二元振幅图形。第 m 级环带的半径由其级数 m 的平方根决定^[18,19]

$$r_m = \sqrt{m} r_p \quad (2-2)$$

因此，FZP 在 r^2 方向上以 r_p^2 为周期，图 2-5 是 FZP 的 r^2 函数轮廓示意图。

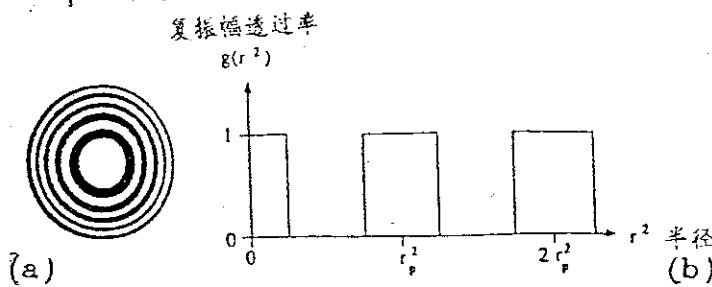


图 2-5. (a) 菲涅耳波带片 FZP (b) 复振幅透过率函数

由惠更斯—菲涅耳原理知，当用平面单色波垂直照射菲涅耳透镜时，在其后可观察到多重会聚和发散光波，未被衍射而直接透过 FZP 的光波构成衍射零级，如图 2-6 所示。^[20]

运用标量衍射理论，推导 FZP 的衍射情形。假定在

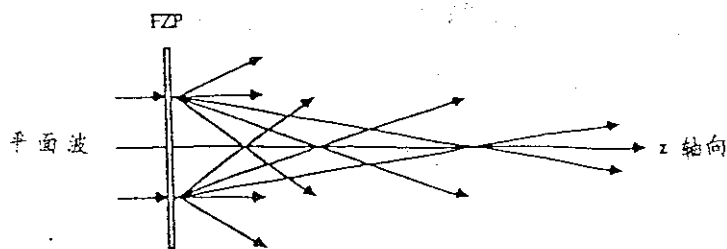


图2-6. 平面波经FZP后的衍射分布

r^2 方向上周期变化的任何器件不加入振幅或位相分布。用 $g(x, y)$ 表示器件的复振幅透过率，则有

$$g(x, y) = g(x^2 + y^2) = g(r^2) = g(r^2 + j r_p^2) \quad (2-3)$$

n 为整数。基于 r^2 的周期性，将 $g(x, y)$ 用傅氏级数表示如下：

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(2\pi i n \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}) \quad (2-4)$$

其中傅氏级数 A_n 为：

$$A_n = (1/r_p^2) \int_0^{r_p^2} g(r^2) \exp(-2\pi i n r^2) d(r^2) \quad (2-5)$$

A_n 代表了 FZP 众多焦点处的振幅值。

将器件置于 $z=0$ 的平面，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：

$$U(x', y', z) = \iint g(x, y) \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z} [(x-x')^2 + (y-y')^2] \right\} dx dy \quad (2-6)$$

上式中略去了一些不重要的因子，积分边界由 $-\infty$ 到 $+\infty$ ，假定 $g(x, y)$ 的范围是无限大，将 (2-4) 式代入 (2-6) 式有

$$U(x', y', z) = \sum A_n \exp\left\{ \frac{j\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2) \right\} \iint \exp\left[2\pi i \left(\frac{n}{r_p^2} + \frac{1}{2\lambda z} \right) (x^2 + y^2) \right] \times \exp\left[2\pi i \left(\frac{xx' + yy'}{\lambda z} \right) \right] dx dy \quad (2-7)$$

上式中当 $n/r_p^2 + 1/(2z\lambda) = 0$ 时，在光轴上 ($x'=0, y'=0$) 可产生一个光强峰值即焦点。焦距为：

$$z = z_n = -r_p^2 / 2n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 3, \dots \quad (2-8)$$

清华大学学位论文用纸

从以上式可以得出 (1) $n > 0$, z_n 为负值, 器件有发散的球面波, (2) $n < 0$ 时, z_n 为正值, 器件有会聚光波, (3) $n = 0$, z_n 为 ∞ , 零级衍射光波(直接透射波)。

广义的复振幅公式为

$$U(x', y', z_n) = A_n \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_n}(x'^2 + y'^2)\right\} \delta\left(\frac{x'}{\lambda z_n}, \frac{y'}{\lambda z_n}\right) + \sum_{m \neq n} A_m \quad (2-9)$$

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。

当考虑器件的大小时, 若器件为矩形(尺寸为 L_x 和 L_y), 则有: (下式中 $w_x = w_y = \sqrt{N} r_p$)

$$U(x', y', z_n) = A_n \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_n}(x'^2 + y'^2)\right\} \text{Sinc}\left(\frac{x' w_x}{\lambda z_n}, \frac{y' w_y}{\lambda z_n}\right) \quad (2-10)$$

由式(2-8)可知, 振幅型菲涅耳透镜有多个焦点, 且其不透光部分遮挡住了一半的光, 从而使FZP的光能利用率很低。若使振幅型FZP变成位相型的二元FZP, 则可增加透光强度, 大大提高器件的衍射效率。

图2-7所示为一个多阶位相的FZP, 其复振幅透过率函数可表示为:

$$g(r^2) = \sum_{k=0}^{N(L-1)} \exp\left(\frac{-2\pi i k}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{r^2 - k r_p^2/L - r_p^2/2L}{r_p^2/L}\right) \quad (2-11)$$

上式中, L 为位相阶数, 并省略了相位因子 $\exp[2\pi i(L-1)/L]$, 假定位相深度等高且为 $2\pi/L$, 将 r_p^2 归一化并将(2-11)式代入(2-5)式, 可得第 N 级衍射光波的振幅值为:

复振幅透过率

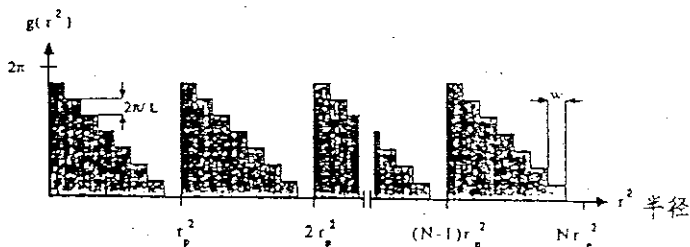


图2-7. 多阶位相型FZP器件的相位结构

$$A_n = \exp\left(\frac{iz_n}{L}\right) \text{sinc}(n/L) \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \exp\left[2\pi i \frac{k(n+1)}{L}\right] \quad (2-12)$$

其中

$$\sum_{k=0}^{L-1} \exp\left[2\pi i \frac{k(n+1)}{L}\right] = \begin{cases} 1 & \text{若 } n+1 = jL \quad j \text{ 为整数} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2-13)$$

由前面的分析可知，在 $z_n = -r_0^2/2n\lambda$ ($n = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$) 处有一系列焦平面， z_n 为器件的焦距，则焦平面的强度值为：

$$I_n = |A_n|^2 = \text{sinc}^2(n/L) \quad (2-14)$$

定义 FZP 的衍射效率为集中于主焦点 ($n=1$) 的光强度。

$$\eta = |A_1|^2 = \text{sinc}^2(1/L) = \left\{ \frac{\text{sinc}(\pi/L)}{\pi/L} \right\}^2 \quad (2-15)$$

从 (2-14) 和 (2-15) 两式可看出，随着位相阶数 L 的增加，二元 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 2-1)。从表中看出，随着 L 的增加，衍射能量经再分配而越来越多地集中到主焦点上，(当 $L=8$ 时， $\eta_8 = 94.9\%$ ， $L=16$ 时， $\eta_{16} = 99.0\%$) 这就是二元 FZP 器件衍射效率提高的内在原因。

表 2-1. 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	×	.080	×	.016
L=8	.011	×	×	×	.949	×	×	×	.019

二. 二元光学式消象散准直器件的设计思想

由于半导体激光器所具有的非对称输出特性，使得在其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 $2:1 \sim 6:1$ ($\theta_{\perp} > \theta_{\parallel}$)，激光器输出光强分布如图 2-8。

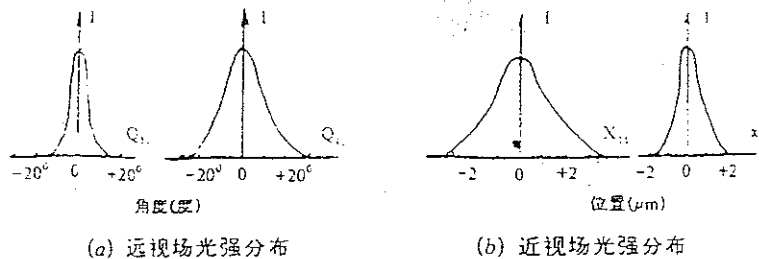


图2-8 半导体激光器输出光束的光强分布图

可以近似认为垂直方向的发光点 A_y 很接近于输出窗，而平行方向的发光点 A_x 远离输出窗(见图2-9)，则输出光束的象散 A_s 可表示为：

$$A_s = A_x - A_y \quad (2-16)$$



图2-9 半导体激光器的辐射特性

为了得到准直的圆形输出光束，需要设计一种在垂直与平行方向焦距差值为 A_s 的透镜。同时为充分利用光能，透镜还需有较大的数值孔径。对传统光学系统来说，满足以上两点难度较大，但二元光学器件却较易实现。基于菲涅耳衍射原理的通常的FZP的透过率函数可以如下表示^[21]：

$$g(r^2) = g(x^2 + y^2) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i2\pi n \frac{x^2}{r_p^2}) \exp(i2\pi n \frac{y^2}{r_p^2}) \quad (2-17)$$

若FZP在x、y方向上的环带半径分别按式(2-17)的规律变化，且将两方向的焦距差值设计为半导体激光器的象散值 A_s ，即可实现半导体激光器的消象散及准直。再将其设计成位相型二元FZP以获得较高的衍射效率^[22-23]。

图2-10所示为二种方案的二元FZP校正象散和准直

光路。显然图 2-10 (a) 为最佳方案。

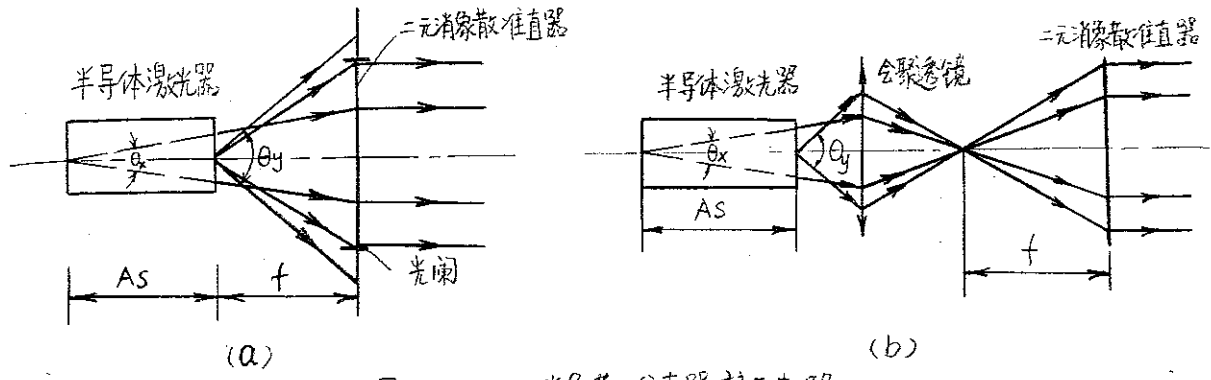


图 2-10 二元消象散准直器校正光路

在保证最小线宽的同时，设计中要满足以下条件：

- 1) 在设计准直系统时，应考虑既将光束准直又将椭圆光斑变为圆形；
- 2) 设计的器件有大的数值孔径和高的光能利用率；
- 3) 在加工条件允许的前提下，制作出性能指标尽可能高的二元消象散准直器件。

三. 二元 FZP 的设计公式

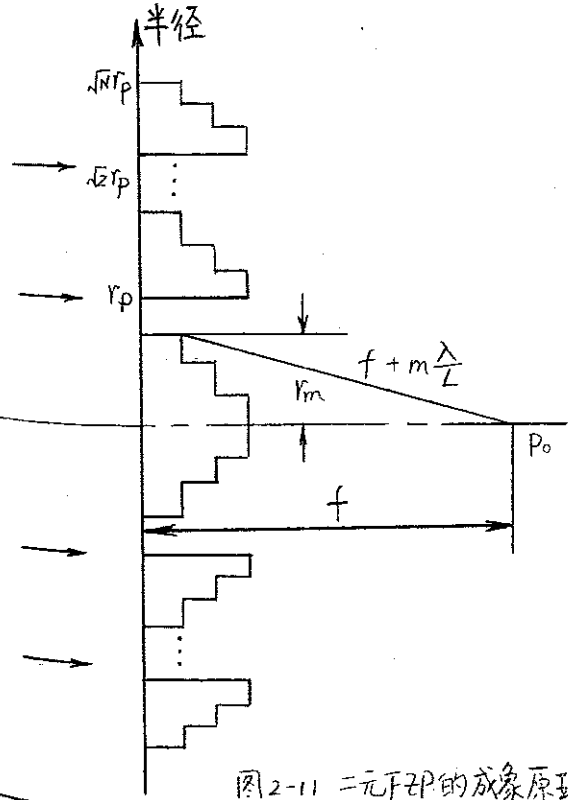


图 2-11 二元 FZP 的成像原理

设定二元 FZP 器件的焦距为 f ，波带片的周期为 N ，台阶数为 L ，环带数 $M (M=NL)$ ，最小线宽 v ，衍射效率 η ，环带半径 r_m ，最大外径 R 。图 2-11 所示为二元 FZP 的成像原理。当用平行光垂直照明时， P_0 点被看作无限远物点的焦点， f 为二元 FZP 的焦距。设计公式是按环带数 M 推导的，考虑了每个周期

清华大学学位论文用纸

内的细节，而不是通常情形下以周期数 N 为基准。按此方法推导的设计公式有一突出的优点，即对于不同台阶数的二元 FZP 器件设计公式和程序都是通用的。

1) 环带半径 r_m

由图 2-11 得：

$$r_m = \sqrt{\left(f + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - f^2} \quad (2-18)$$

在环带数 m 很大且有 $(m^2 \lambda^2) / L^2 \ll (2m\lambda f) / L$ 时

$$r_m \approx \sqrt{2m \frac{\lambda f}{L}} \quad (2-19)$$

2) 焦距 f

由公式 (2-19) 得 $f = \frac{r_m^2 L}{2m\lambda} \quad (2-20)$

当 $m = M$ 时有 $f = \frac{r_M^2 L}{2M\lambda} = \frac{R^2 L}{2M\lambda} \quad (2-21)$

又有 $M = NL$ $f = \frac{R^2}{2N\lambda} \quad (2-22)$

从公式 (2-22) 可得出，当二元 FZP 的台阶数 L 变化时，其焦距 f 不变。对于由一套（多级）掩模版套刻而制得的多相位相型 FZP，其焦距与第一块掩模版的焦距相同。这是因为位相型 FZP 与振幅型 FZP 相比，具有相同的位相周期 N ，而每个周期内的台阶数 L 并不改变这一周期分布（如图 2-7），而是提高了衍射效率。因此其焦距只与 N 、 R 、 λ 有关。

3) 环带数 M

由公式 (2-21) $M = \frac{R^2 L}{2f\lambda} \quad (2-23)$

4) 最小线宽 v

定义最大半径与其相邻半径之差为最小线宽，即

$$\begin{aligned} v &= r_M - r_{M-1} = \sqrt{2Mf\lambda/L} - \sqrt{2(M-1)f\lambda/L} \\ &= r_M \left(1 - 1 + \frac{1}{2M} + \frac{1}{8M^3} + \dots\right) \end{aligned} \quad (2-24)$$

清华大学学位论文用纸

在 M 足够大时

$$v = r_m / 2M = R / 2M \quad (2-25)$$

(5) 数值孔径 NA

定义数值孔径 NA 为器件的最大孔径与其焦距之比，

$$NA = \frac{2r_m}{f} = \frac{2R}{f} \quad (2-26)$$

(6) 衍射效率 η

由上面论证已知：

$$\eta = |A_{-1}|^2 = \text{Sinc}^2(1/2) \quad (2-27)$$

综上所述，位相型 FZP 掩模设计公式如下：

焦 距	$f = R^2 / 2M\lambda$
环带半径	$r_m = \sqrt{2m\lambda f / L}$
环带数	$M = R^2 / 2f\lambda$
最小线宽	$v = \sqrt{2M\lambda f / L} - \sqrt{2(M-1)\lambda f / L} = R / 2M$
数值孔径	$NA = 2R / f$
衍射效率	$\eta = \text{Sinc}^2(1/2)$

四. 二元 FZP 的设计参数

选用日立牌 HL6711G 型可见光(红光)半导体激光器，波长 $\lambda = 670\text{nm}$ ，象散值为 $A_s = 50\mu\text{m}$ ，功率 $P = 5\text{mW}$ ，图 2-12 是其结构图。

实验测得 $\theta_0 = 8^\circ$ ， $\theta_{90} = 34^\circ$ ，根据上述二元 FZP 的掩模设计公式编写计算程序。分别设计了两种不同焦距的 4 台阶的二元 FZP 掩模版，设计参数如下表：

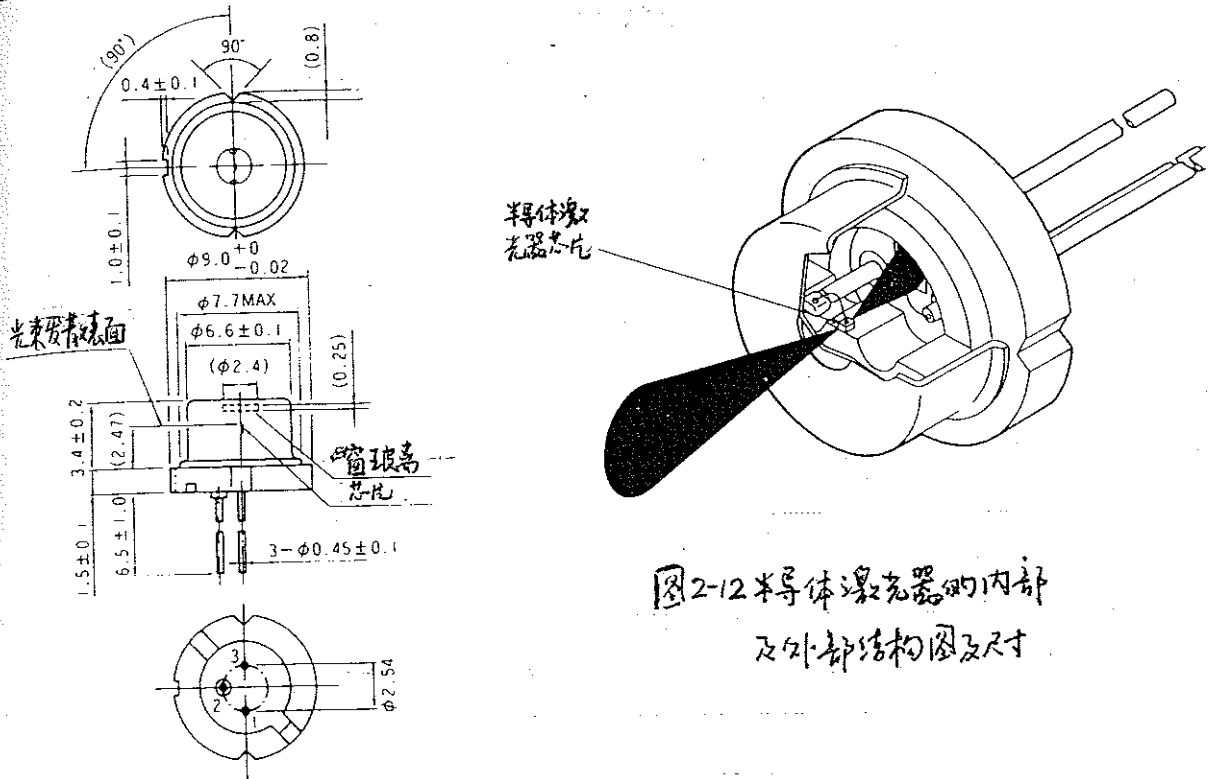


图2-12 半导体激光器的内部及外部结构图及尺寸

表 2-2 大焦距掩模版设计参数

	方向	焦距(mm)	外径(mm)	最小线宽(μm)	数值孔径	环带数
第一块掩模版	X	6.05	0.503	4.059	0.166	62
	Y	6.00	0.500	4.042	0.167	62
第二块掩模版	X	6.05	0.503	2.026	0.166	124
	Y	6.00	0.500	2.017	0.167	124

表 2-3 小焦距掩模版设计参数

	方向	焦距(mm)	外径(mm)	最小线宽(μm)	数值孔径	环带数
第一块掩模版	X	2.38	0.196	4.119	0.165	24
	Y	2.33	0.194	4.075	0.167	24
第二块掩模版	X	2.38	0.196	2.049	0.165	48
	Y	2.33	0.194	2.027	0.167	48

§ 2-3 二元光学器件的制作⁽²⁶⁻²⁹⁾

根据目前国内加工工艺水平和制版设备，本文设计的二元消象散准直器件的图形的最小线宽为 $2\mu\text{m}$ 。我们选定了光刻制版和离子反应刻蚀的制作工艺，流程图如下：

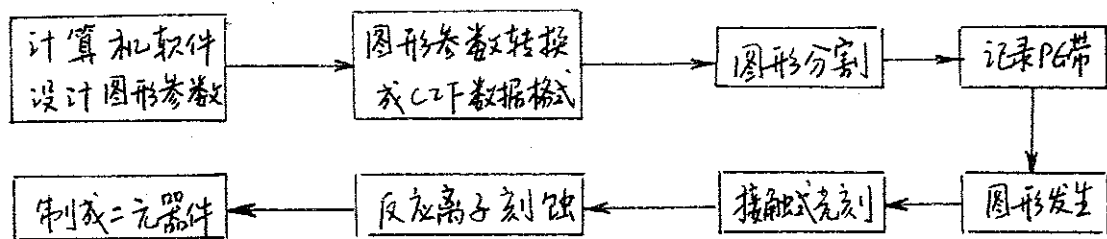


图 2-13 二元器件制作工艺流程图

一. 数据准备

由于采用图形发生器生成图形(模版)，因此要求设计的图形数据都要记录在图形发生器的专用PG带(数据流带)上，而生成PG带的前提条件是图形数据转换成CIF数据格式。为此，编写了将任意格式数据转换成CIF数据格式的程序。

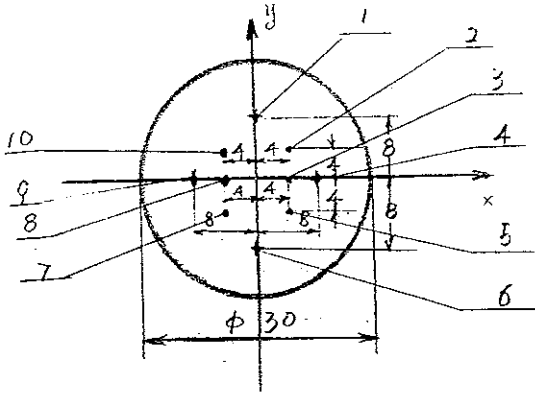
采用清华大学微电子所CAE室的美国Mentor和Compass专用设计软件，可把写成CIF格式的数据转换成GDS2格式，然后按实际数据放大10倍(放大倍数根据所采用的加工工艺而定)进行图形切割，以生成适于图形发生器的小曝光块。将切割成功的数据文件记录在PG带上，同时设计并记录光刻对版标记。

二. 图形发生

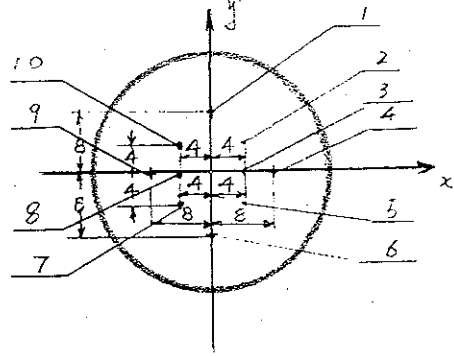
在生成图形时，将所设计的两种不同参数的器件按图2-14排列。考虑到实际加工条件和二元器件的衍射效率的要求，我们设计了两块掩模版，生成4台阶的二元

清华大学学位论文用纸

单位 mm 比例 1:1



第一块版



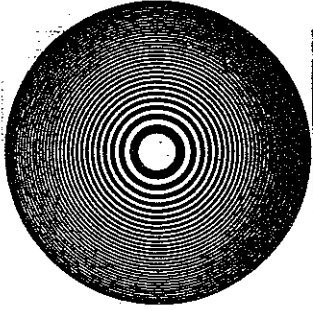
第二块版

1. 标记 m21p. L03
2. 图形 D21. (L06)
3. 图形 D21 (L06)
4. 标记 m12p. L02
5. 图形 D21 (L06)
6. 标记 m22p. L04
7. 图形 D23B. (L08)
8. 图形 D23B. (L08)
9. 标记 m11p. L01
10. 图形 D23B. (L08)

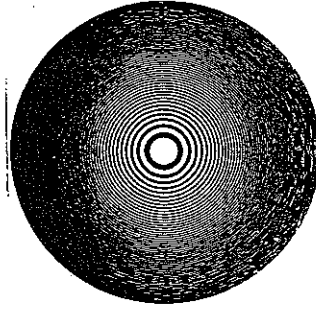
1. 标记 m11p. L01
2. 图形 D41 (L07)
3. 图形 D41 (L07)
4. 标记 m22p. L04
5. 图形 D41 (L07)
6. 标记 m12p. L02
7. 图形 D43B. (L09)
8. 图形 D43B. (L09)
9. 标记 m21p. (L03)
10. 图形 D43B. (L09)

图 2-14 二元消象散准直器件片版图

FZP^[30]。图 2-15 (a) 为其掩模版图，(b) 为对版标记。

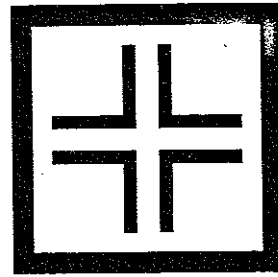
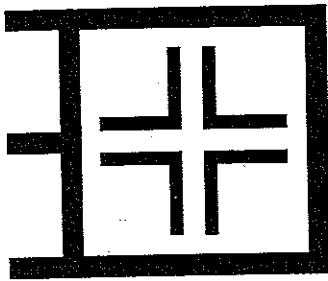


第一块掩模板

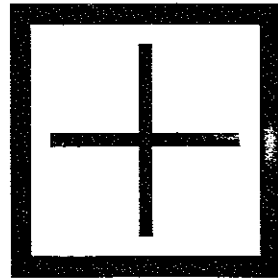
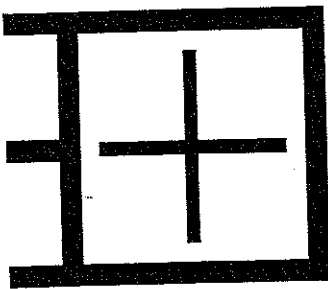


第二块掩模板

图 2-15 (a) 二元振幅掩模板



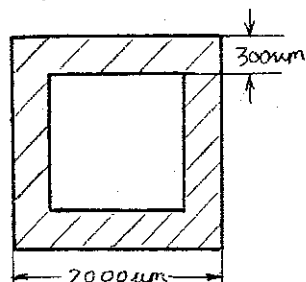
第一块板对准标记



第二块板对准标记

图 2-15 (b) 对板标记

制版是在中科院微电子中心完成的。该中心的图形发生器每小时可以生成 4000 - 5000 曲线曝光块，若是直线则可达 8000 块/小时。制版分阴阳两种，若给出的数据构成的图形是透光的(亮)，则做阴版，反之则为阳版。做阳版还需加图 2-16 形状的光阑。



制版光刻胶分为正胶和负胶。现在一般多用正胶。基底表面透光的部分被腐蚀下去，形成台阶状，不透光的部分被保留。

图 2-16 阳版光阑尺寸

附录 1 为图形分割后生成的 9 个数据

文件报表。制版时，标记和光阑(L01 - L05)为阳版，器件图形(L06 - L09)为阴版。

三、光刻和离子刻蚀

掩模版制备好后，在北大物理系进行光刻和离子刻蚀。腐蚀深度是依据 FZP 的偶数波带和奇数波带的光程差为 $\lambda/2$ (位相差 π) 计算得到的。

$$\text{位相差 } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)t \quad (2-28)$$

$$\text{石英玻璃的折射率 } n = 1.4572 \quad \lambda = 0.67$$

$$\text{位相深度 } t = \frac{\delta \lambda}{2\pi(n-1)} \quad (2-29)$$

则制版时的腐蚀深度为

$$\text{第一次生成 2 台阶的位相深度 } t_2 = 0.7327 \mu\text{m}$$

$$\text{第二次生成 4 台阶的位相深度 } t_4 = 0.3664 \mu\text{m}$$

经光刻和腐蚀，最后制成的二元消象散准直器件的全部微观表面如图 2-17。

图 2-18 是二元器件的台阶扫描图，中间较宽部分的

轮廓正确边缘因线宽太小，扫描探针无法正确反映，由图知，其腐蚀深度和台阶形貌与设计结果相当吻合。

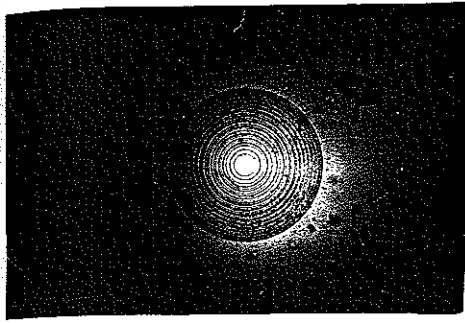


图2-17 二元器件的微观表面照片

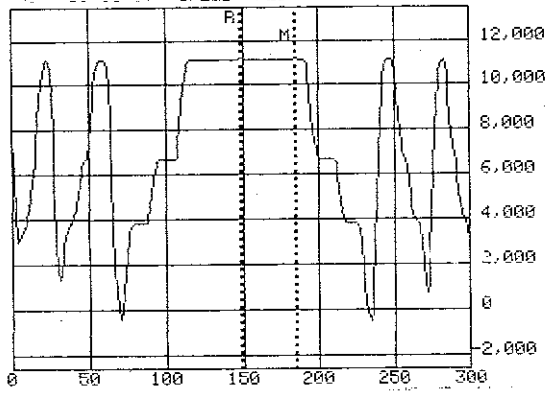


图2-18 二元器件的台阶扫描图

§ 2-4 实验研究

一. 二元器件准直和消象散效果的实验观测

1. 二元器件准直效果的实验观测

按照二元消象散准直器件设计要求，若用一准直的 He-Ne 激光照到该器件上时，应该得到一象散光束，并用如下光路加以验证。

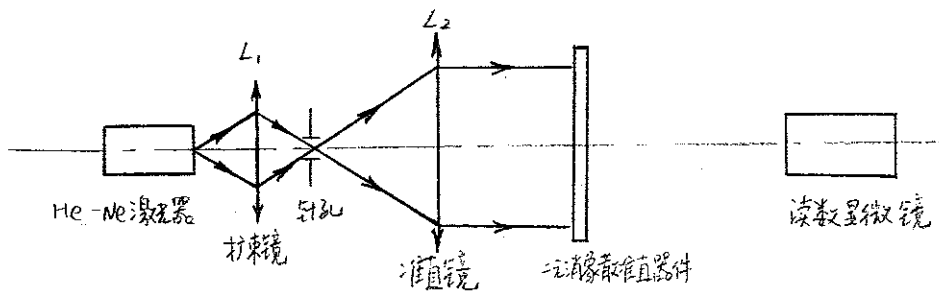


图2-19 验证准直效果实验光路

我们分两次共做了 3 组 4 片二元消象散准直器件，每片上有 6 个二元下EP (见图 2-20)。No. 1, 2, 3 是直径为 $D_x = 1\text{mm}$ 和 $D_y = 1.06\text{mm}$ 的大椭圆二元下EP，No. 4, 5, 6 是直径为 $D_x = 0.388\text{mm}$ 和 $D_y = 0.392\text{mm}$ 的小椭圆二元下EP。

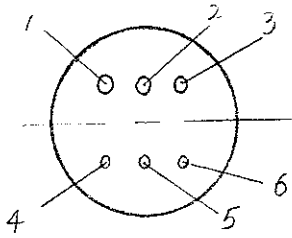


图2-20 二元FZP编号图

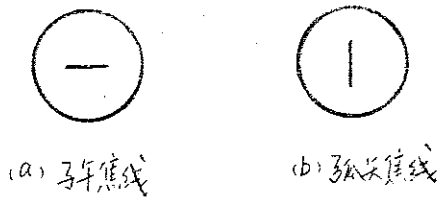
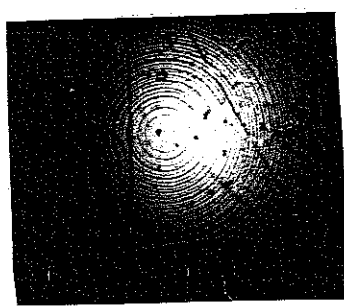


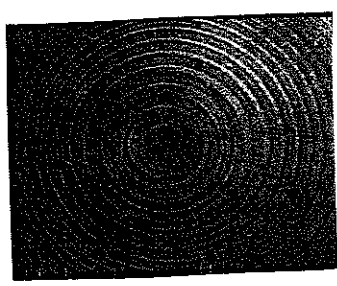
图2-21 象散现象

用1x的显微镜观测1#器件的No.2,看到两对光强近似相等的焦线,如图2-21所示,观察其它的二元FZP器件也可得到同样的结果,即准直的光束变成了象散光束。这两对焦线中的子午焦线到同一基准面的距离为14cm和12.8cm,两者之差为 $\Delta = 12\text{ mm}$,而二元器件的焦距 $f = 6\text{ mm}$, $2f = 12\text{ mm}$ 。因此这两个焦线正是衍射的±1级的焦线。理想的四台阶的二元器件应只有一个最强的焦面,而实际观测到两个,近似于2台阶的结果。

同样观测3#器件,则只看到一对光强很大的焦线。图2-22是1#和3#器件的表面微细结构图。图中显示出,3#器件的对准偏差非常小,基本达到了设计要求,而1#器件由于在制作过程中有较大的对版偏差,因此出现了2台阶的多焦点情形。



3#器件



1#器件

图2-22 二元器件的表面微细结构照片

清华大学学位论文用纸

2. 二元器件象散值的测量

(1) 对器件的象散数据(用20×显微镜测量)

分别对器件上的NO.1-NO.6透镜的象散值进行测量,

下表给出NO.2和NO.5透镜的实验结果。

表2-4 NO.2象散准直透镜的象散参数测试

	1	2	3	4	5	6
光强最大位置(mm)	23.155	23.166	23.111	23.116	23.201	23.192
	23.092	23.111	23.165	23.164	23.152	23.144
象散值(μm)	63	55	54	48	49	48
平均象散值	52.83 μm					
次最大光强位置(mm)	26.296	26.288	26.296	26.347	26.341	26.333
	26.348	26.333	26.342	26.293	26.293	26.289
象散值(μm)	52	45	46	54	48	44
平均象散值	48.16 μm					

表2-5 NO.5象散准直透镜的象散参数测试

	1	2	3	4	5	6
光强最大位置(mm)	36.686	36.686	36.700	36.696	36.784	36.744
	36.750	36.736	36.746	36.748	36.748	36.700
象散值(μm)	64	50	46	52	56	44
平均象散值	52.00 μm					
次最大光强位置(mm)	37.878	37.916	37.908	37.961	37.952	37.953
	37.919	37.959	37.955	37.913	37.909	37.911
象散值(μm)	41	43	47	48	43	42
平均象散值	44.00 μm					

清华大学学位论文用纸

(2) 3#器件的象散数据(用 $20\times$ 显微镜测量)
用同样的方法测量, 实验结果如下。

表2-6 NO.2象散准直透镜的象散参数测试

	1	2	3	4	5	6
光强最大	16.718	16.700	16.740	16.780	16.792	16.812
位置(mm)	16.770	16.760	16.784	16.730	16.736	16.756
象散值(μm)	52	60	44	50	56	56
平均象散值	53.00 μm					

表2-7 NO.5象散准直透镜的象散参数测试

	1	2	3	4	5	6
光强最大	35.694	35.676	35.670	35.592	35.594	35.592
位置(mm)	35.644	35.624	35.626	35.649	35.641	35.642
象散值(μm)	50	52	44	43	53	50
平均象散值	48.67 μm					

实验结果表明, 无论是1#还是3#器件, 其象散值 A_s 与理论值都有很好的吻合。它们都有消象散和准直的作用, 1#由于对准误差的存在, 产生了多焦点的情况, 并使透镜的效率降低, 后面的实验将证明3#器件的效率确实优于1#。

二. 准直消象散效果的实验对比

本文设计的二元消象散准直器件是针对象散值为 $50\mu\text{m}$ 的半导体激光器, 将二元FZP器件与该半导体激光器配合使用进行实验。图2-23(a)、(b)、(c)分别为加入二元消

清华大学学位论文用纸

象散准直器件；加入光阑；不加任何元件三种情况下的光路图。在 $L=50-500\text{ mm}$ 共 6 个位置分别采用三种曝光时间 (1, 2, 4) 拍摄光斑照片。

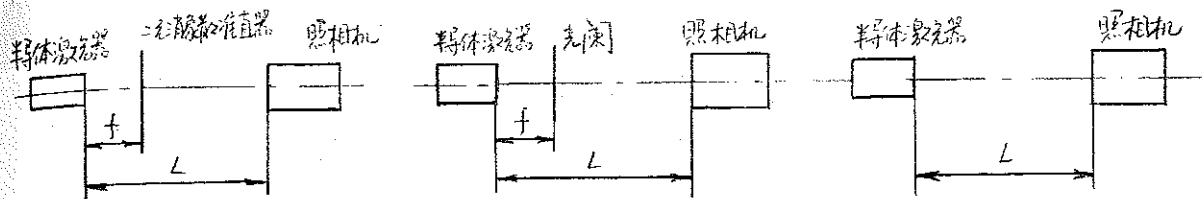
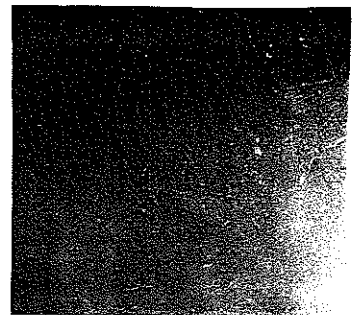
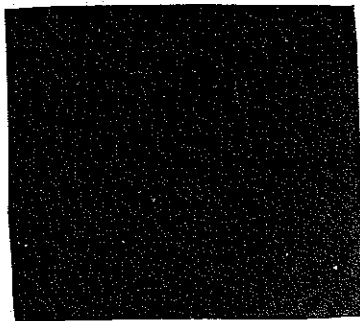
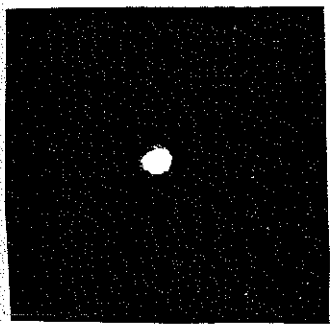


图 2-23 (a) 加入二元消象散准直器 (b) 加入光阑 (c) 不加任何元件

图 2-24 为在 $L=200\text{ mm}$ 处拍下上述三种情况的光斑

照片。



a. 加入消象散准直器

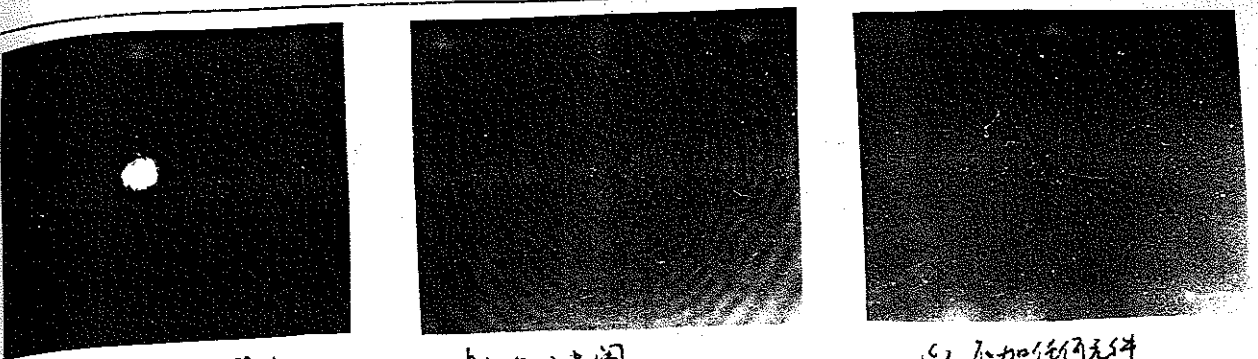
b. 加入光阑

c. 不加任何元件

图 2-24 光斑对比照片

三者的比较可以看出，加入二元消象散准直器件后较好地使发散的光束变成了准直的光束。

将研制的以象散值 $50\text{ }\mu\text{m}$ 为标准的准直器件与象散值为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的激光器配合使用时，按图 2-23 做同样的实验。图 2-25 分别给出了上述三种情况下 $L=200\text{ mm}$ 时的光斑照片。从中可以看出该器件对于象散值略有差别的半导体激光器也能起到一定的消象散和准直作用，因此扩大了器件的使用范围。



(a) 加入消象散准直器件 (b) 加入光阑 (c) 不加任何元件

图2-25 不同激光器与二元消象散准直器件配合使用光斑照片

三. 准直度、衍射效率与能量利用率的测量

1. 准直度的测量

图2-26是测量光束发散角的原理图。在 $L=43-7000\text{ mm}$ 范围内取13个截面，分别测量其上光斑大小，并按如下公式计算发散角 β 。

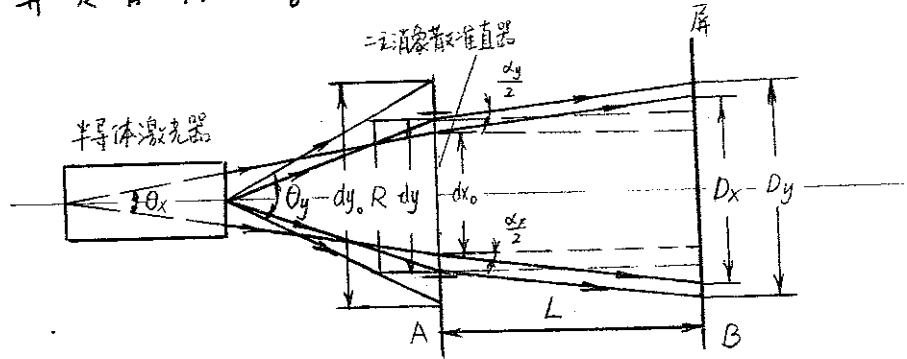


图2-26 光束发散角原理图

已知半导体激光器的发散角为 $\theta_x = 8^\circ$, $\theta_y = 34^\circ$, 象散值 $A_s = 50\ \mu\text{m}$, 在上图A面激光光斑直径为

$$dx_0 = 2f \cdot \text{tg} \frac{\theta_x}{2} = 0.85\ (\text{mm}) \quad dy_0 = 2f \cdot \text{tg} \frac{\theta_y}{2} = 3.67\ (\text{mm})$$

当光路中加入二元器件后，由于器件的半径值为 $R_x = 0.503\text{ mm}$, $R_y = 0.5\text{ mm}$, 因此在二元器件的输出面准直光斑的

直径应为： $dx = dx_0 = 0.9\text{ mm}$ $dy = 2R_y = 1\text{ mm}$. 发散角 β 分

$$\beta_x = \frac{D_x - dx}{L} \quad \beta_y = \frac{D_y - dy}{L} \quad (2-30)$$

清华大学学位论文用纸

由以上公式编程计算，发散角数值如下：

表2-8 x、y方向发散角测试结果

L (mm)	D _x (mm)	β _x (毫弧度)	D _y (mm)	β _y (毫弧度)
43	0.90	0.000	1.00	0.000
100	1.00	1.000	1.10	1.000
200	1.05	0.750	1.15	0.750
400	1.05	0.375	1.20	0.500
600	1.20	0.500	1.25	0.417
800	1.45	0.687	1.30	0.375
1000	1.90	1.000	1.45	0.450
2000	3.50	1.300	2.50	0.750
3000	5.00	1.367	3.00	0.867
4000	7.00	1.525	4.70	0.925
5000	7.80	1.380	6.10	1.020
6000	9.80	1.483	7.00	1.000
7000	10.9	1.429	8.00	1.000

国际上一些大的半导体公司和一些研究单位生产的准直镜的发散角在 $0.2 - 1.6 \text{ mrad}$ ^[31]，与之相比，我们的二元消象散准直器件准直后的光束发散角在 $0.6 - 1.5 \text{ mrad}$ ，较好地使发散角很大的光束变成了发散角较小的接近圆形的准直光束。但与准直度很高的 (0.2 mrad) 半导体激光器以及 He-Ne 激光器相比还有一定的差距，随着加工工艺的改进，制作水平的提高，该器件的性能指标可望得到提高。

与象散 $A_s = 40 \mu\text{m}$ 半导体激光器配合使用时，测试光路与计算公式同上。实验结果如下表：

清华大学学位论文用纸

表2-9 x、y方向发散角测试结果

L (mm)	D_x (mm)	β_x (毫弧度)	D_y (mm)	β_y (毫弧度)
43	0.95	1.163	1.00	0.000
100	1.05	1.500	1.20	2.000
200	1.20	1.500	1.30	1.500
400	1.40	1.250	1.40	1.000
600	1.60	1.167	1.50	0.833
800	1.70	1.000	1.70	0.875
1000	2.00	1.100	1.90	0.900
2000	3.50	1.300	3.20	1.100
3000	5.10	1.400	4.70	1.233
4000	6.70	1.450	5.50	1.125
5000	8.00	1.420	6.70	1.140
6000	9.00	1.350	7.60	1.100
7000	10.9	1.429	9.50	1.214

从上面结果可见，光束的发散角变化不大，再次表明适用于一定的象散范围，并可获得较好的准直光束。

2. 器件功率的测量

△ 3#器件的功率测量采用图2-23的光路，用功率计取代照相机，分别测得：半导体激光器的功率 $P = 5.15 \text{ mw}$ ；加光阑后的光功率 $P_{\text{光}} = 1.08 \text{ mw}$ ；加入二元消象散准直器件的光功率 $P_B = 0.27 \text{ mw}$ 。

△ 1#器件采用相同的实验手段，测得：半导体激光器的功率 $P = 5.14 \text{ mw}$ ；加光阑后的光功率 $P_{\text{光}} = 1.05 \text{ mw}$ ；加入二元消象散准直器件后的光功率 $P_B = 0.13 \text{ mw}$ 。

对比1#和3#器件的光功率知，3#器件由于对准误差小，其光功率是1#器件的2倍。

清华大学学位论文用纸

半导体激光器与二元消象散准直透镜配合使用时，
光利用率 = $\frac{P_0}{P} = 5.24\%$

这是由于受到加工工艺的制约，二元透镜的口径相
小，只截取了半导体激光器光斑中的一小部分并对其
进行准直。因此其光能利用率很低。为提高光能利用率，
我们进一步改进设计，制作了大口径的二元消象散准直
器件，详见第四章。

3. 衍射效率测量

衍射效率的测量光路同上。实际测得半导体激光器
的功率为 $P = 5.10\text{mw}$ 。设定 P_g 为加上小孔光阑后光通过
石英玻璃后的功率， P_f 为光通过二元器件后的功率， P_L
为杂散光功率， η 为衍射效率。

衍射效率的计算公式如下：

$$\eta = \frac{\text{焦点处的实际光强}}{\text{焦点处的衍射受限光强}} = \frac{P_f}{P_g - P_L} \quad (2-31)$$

实验数据如下表：

表 2-10 3#和1#器件的功率测量值

		1	2	3	4	5	6	\bar{P}
3#器件	$P_g(\text{mw})$	0.93	0.94	0.93	0.93	0.92	0.93	0.93
	$P_f(\text{mw})$	0.31	0.32	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31
	$P_L(\text{mw})$	0.44	0.44	0.46	0.44	0.45	0.44	0.45
1#器件	$P_g(\text{mw})$	1.09	1.08	1.07	1.08	1.07	1.08	1.08
	$P_f(\text{mw})$	0.23	0.22	0.23	0.21	0.22	0.22	0.22
	$P_L(\text{mw})$	0.66	0.66	0.64	0.65	0.65	0.63	0.65

由上表计算可得：

3#器件的衍射效率 $\eta_3 = 64.6\%$

1#器件的衍射效率 $\eta_1 = 51.2\%$

可见对准误差小的3#器件的衍射效率明显高于1#器件，但与理论上的81%仍有较大差距，其原因既有加工误差也有测量误差，这将在以后的章节中加以分析。

上述实验和分析，证明了二元消象散准直器件理论和设计上的正确性，同时获得了较好的实验效果。与同类器件相比，其结构简单、轻巧、易装调的优点较为明显，但加工误差的影响是不容忽视的重要问题。

四. 二元消象散准直器件的装配调整

为把二元消象散准直器件与半导体激光器组装在一起，为方便使用，设计了如图2-27所示的组装结构图。

图2-28为其外形照片

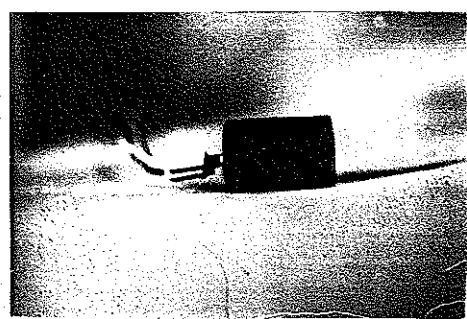


图2-28 二元消象散准直
头外形照片

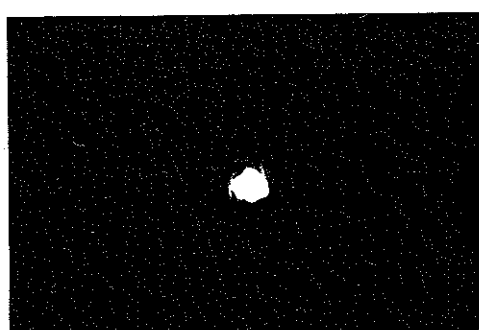
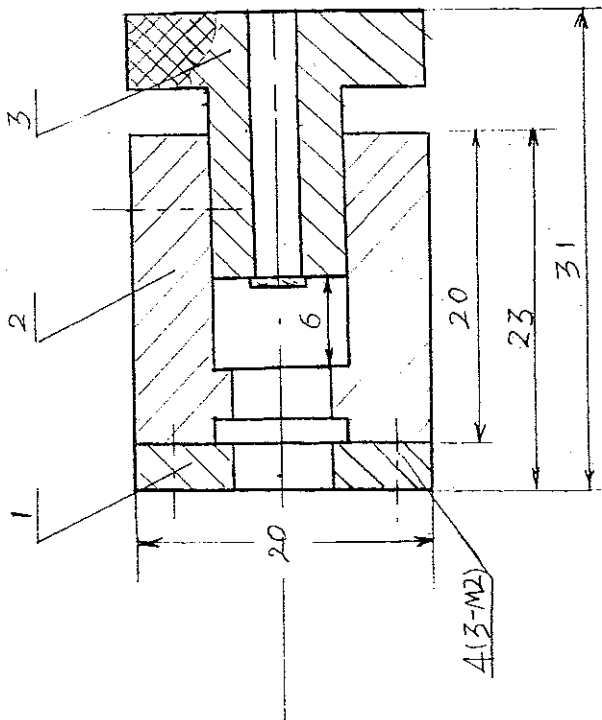


图2-29 二元消象散准直
头光斑照片

在该结构中，通过紧密配合的套筒的转动和滑动来实现二元器件的焦距和中心对准的调整。采用加厚套筒壁厚和增大激光器与套筒的接触面积来加速半导体激光



编号	名称	件数	
1	压盘	1	
2	底座	1	
3	调整件	1	
4	螺钉	3	
			M2

图2-27 半导体激光器准直器装配图

器的散热，以延长其寿命，更换激光器也较方便。图2-29为其光斑照片。

本章对二元消象散准直器件的原理、设计方法、加工工艺及性能参数的测试进行了详细的论证，并初步研制出二元光学式半导体激光器准直头的样品。

第三章 二元光学器件的象差及误差分析

§3-1 二元光学器件的象差分析^[34, 35]

一. 二元器件的初级象差^[33]

通常振幅型菲涅耳波带片透镜(FZP)将入射平面波分解成一系列近似的球面波因子($\exp\{i2\pi m(\sqrt{r^2+f^2}-f)/\lambda_0\}$)的叠加, 但通过多台阶或位相型后, 可以做到基本上只留下一个球面波聚焦于一个焦点, 从而起到普通透镜的作用。因此下面只考虑一级对点物成像的情况。图3-1中, 假定衍射透镜位于XY平面内, 任意点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 发出波长为 λ 的球面波在XY平面上的复振幅分布为:

$$U_{in}(x, y) = (A/r_0) \exp\{i(2\pi/\lambda)r_0\} \quad (3-1)$$

$$r_0 = [(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2 + z_0^2]^{1/2} \quad (3-2)$$

上式中 A 为光波的振幅。一般情况下 r_0 总是远大于孔径, 因此公式中的 $1/r_0$ 因子可以认为是常数, 则有:
 $A' = A/r_0$ 。所以透过衍射透镜在XY平面后的出射波复振幅分布如下式:

$$U_{out} = A' \exp\{i(2\pi/\lambda)r_0\} \exp\{-i2\pi(\sqrt{r^2+f^2}-f)/\lambda_0\} \quad (3-3)$$

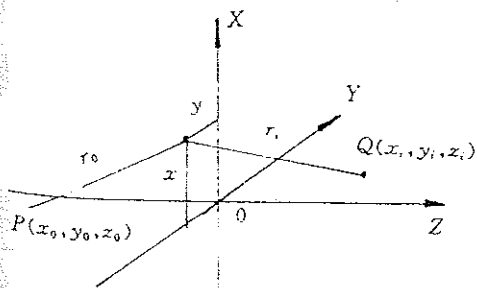


图3-1 衍射透镜成像分析示意图

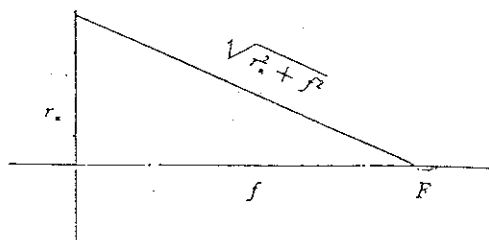


图3-2 菲涅耳波带片

清华大学学位论文用纸

上式是在假定波带片的中心环带是透光的，其设计波长为 λ_0 的条件下推导得到的。如图 3-2。

$$t(r) = \begin{cases} 1 & r_{2n} \leq r < r_{2n+1} \\ 0 & r_{2n+1} \leq r < r_{2n+2} \end{cases} \quad (3-4)$$

(3-4) 式中， $t(r)$ 为 FZP 的透过率函数， r_n 是波带片第 n 个圆环的半径，满足如下条件，

$$\sqrt{r_n^2 + f^2} - f = n\lambda_0/2 \quad (3-5)$$

若选取变量 $\xi = (\sqrt{r^2 + f^2} - f)/\lambda_0$ 。则有：

$$t(r) = t(\xi) = \begin{cases} 1 & n \leq \xi < n + 1/2 \\ 0 & n + 1/2 \leq \xi < n + 1 \end{cases} \quad (3-6)$$

由上可知 $t(r)$ 是 ξ 的周期函数，其周期为 1，展开成傅里叶级数

$$\begin{aligned} t(r) = t(\xi) &= \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} C_m \exp(i2\pi m \xi) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} C_m \exp\{i2\pi m (\sqrt{r^2 + f^2} - f)/\lambda_0\} \end{aligned} \quad (3-7)$$

$$C_m = \int_0^1 t(\xi) \exp(-i2\pi m \xi) d\xi \quad (3-8)$$

由透镜的傅里叶变换特性知

$$U_{out}(x, y) = U_{in}(x, y) t(x, y) \quad (3-9)$$

同时考虑 -1 级对点物成像 ($m = -1$)

$$t(x, y) = \exp\{-i2\pi (\sqrt{r^2 + f^2} - f)/\lambda_0\} \quad (3-10)$$

其中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。把 (3-10) 和 (3-1) 式代入 (3-9) 式即可得到透过衍射透镜在 XY 平面后的出射波复振幅分布。

假定 P_0 点通过衍射透镜成像于 $Q(x_i, y_i, z_i)$ 点，则会聚于 Q 点的理想球面波 $U_{idea}(x, y)$ 在 XY 平面后的复振幅分布为：

$$U_{idea}(x, y) = A' \exp\{-i2\pi/\lambda_0 r_i\} \quad (3-11)$$

清华大学学位论文用纸

$$r_i = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + z_i^2]^{1/2} \quad (3-12)$$

通过以上分析可得波象差

$$\Delta u = u_{out} - u_{idea} \quad (3-13)$$

对 $r_j = [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + z_j^2]^{1/2}$ ($j=0, i$) 进行台若展开有

$$\begin{aligned} r_j &= z_j + (1/2z_j)(x_j^2 + y_j^2) + (1/2z_j)[(x^2 + y^2) - 2x_jx - 2y_jy] \\ &\quad - (1/8z_j^3)[(x^2 + y^2)^2 + (x_j^2 + y_j^2)^2 + 4(xx_j + yy_j)^2 + 2(x^2 + y^2)(x_j^2 + y_j^2) \\ &\quad - 4(x^2 + y^2)(xx_j + yy_j) - 4(xx_j + yy_j)(x_j^2 + y_j^2)] + \dots \end{aligned} \quad (3-14)$$

假定 $z_i > 0$ (对 $z_i < 0$ 仅相差一个负号)

同样 $\exp\{-i2\pi(\sqrt{r^2 + f^2} - f)/\lambda_0\}$ 可以如下分解

$$\exp\left\{-i2\pi\left(\frac{x^2 + y^2}{2\lambda_0 f} - \frac{(x^2 + y^2)^2}{8\lambda_0 f^3} + \dots\right)\right\} \quad (3-15)$$

把(3-14), (3-15)式代入(3-11), (3-3)式可得:

$$\begin{aligned} u_{out}(x, y) &= A' \exp\left\{-i(2\pi/\lambda)\left[z_0 + (1/2z_0)(x_0^2 + y_0^2) + (1/2z_0)[(x^2 + y^2) - 2x_0x - 2y_0y] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1/8z_0^3)[(x^2 + y^2)^2 + (x_0^2 + y_0^2)^2 + 4(x_0x + y_0y)^2 + \dots]\right\} + \dots \\ &\quad \exp\left\{-i2\pi\left(\frac{x^2 + y^2}{2\lambda_0 f} - \frac{(x^2 + y^2)^2}{8\lambda_0 f^3} + \dots\right)\right\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} u_{idea}(x, y) &= A' \exp\left\{-i(2\pi/\lambda)\left[z_i + (1/2z_i)(x_i^2 + y_i^2) + (1/2z_i)[(x^2 + y^2) - 2x_ix - 2y_iy] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1/8z_i^3)[(x^2 + y^2)^2 + (x_i^2 + y_i^2)^2 + 4(x_ix + y_iy)^2 + \dots]\right\} + \dots \end{aligned} \quad (3-17)$$

忽略高次项, 比较(3-16), (3-17)两式得:

$$-\frac{[(x^2 + y^2) - 2x_0x - 2y_0y]}{2z_0\lambda} - \frac{x^2 + y^2}{2\lambda_0 f} = -\frac{[(x^2 + y^2) - 2x_ix - 2y_iy]}{2z_i\lambda} \quad (3-18)$$

$$\frac{1}{z_i} - \frac{1}{z_0} = \frac{(f/\lambda_0)}{f} \quad (3-19)$$

$$\frac{x_0}{z_0} = \frac{x_i}{z_i} \quad (3-20)$$

$$\frac{y_0}{z_0} = \frac{y_i}{z_i} \quad (3-21)$$

清华大学学位论文用纸

上式(13-19) - (13-21)即为衍射透镜的成像公式。(13-16) (13-17)

式中高次项的偏差即为波象差。Welford认为初级波象差可以如下表示：

$$W(y, \rho, \omega\phi) = \frac{1}{8} S_I \rho^4 + \frac{1}{2} S_{II} y \rho^3 \omega\phi + \frac{1}{2} S_{III} y^2 \rho^2 \omega^2 \phi^2 + \frac{1}{4} (S_{III} + S_{IV}) y^2 \rho^2 + \frac{1}{2} S_V y^3 \rho \omega\phi \quad (13-22)$$

其中 ρ, ϕ 为瞳面座标 (ρ 为归一化光束半径, 相当于入射高度 h), y 为归一化物高。同样采用归一化座标, 并且假设 $x_0 = 0$, 可以得到,

$$\text{初级球差系数 } S_I = \frac{h^4}{f^3} \left\{ \frac{1+3T^2}{4} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^3 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \right\} \quad (13-23I)$$

$$\text{初级彗差系数 } S_{II} = -\frac{h^3 \bar{u}}{f^2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \cdot T \quad (13-23II)$$

$$\text{初级象散系数 } S_{III} = \frac{h^2 \bar{u}^2}{f} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \quad (13-23III)$$

$$\text{初级场曲系数 } S_{IV} = 0 \quad (13-23IV)$$

$$\text{初级畸变系数 } S_V = 0 \quad (13-23V)$$

上述表达式中各参数的意义如图 3-3 所示。其中 $T = (u+u')/(u-u')$

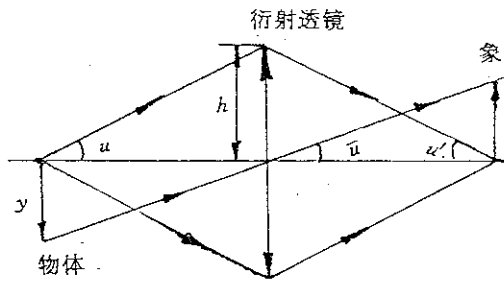


图3-3 衍射透镜成像各参数示意图

从(13-19)式可以看出, 衍射透镜的焦距为 $(\lambda/\lambda_0)f$ (λ 为入射光波长, λ_0 为设计光波长)。它与波长 λ 成反比, 这就造成了严重的色差, 但这种色差与一般折射透镜的色差刚好相反, 称为衍射色差, 利用这一特点, 可以把衍射透镜与普通透镜配合使用, 以使色差降到最低。当入射波长 λ 与设计波长 λ_0 的偏差较大时, 将出现其它级次衍

射光，即多个焦点，也会降低成像的效率和质量，因此衍射透镜主要适用于单色或频带较窄的场合。

我们研制的二元消象散准直器件设计与使用波长均为 $\lambda = 670 \text{ nm}$ ，避免了衍射色差的产生。器件参数 $R = 0.5 \text{ mm}$ ， $t = 6.0 \text{ mm}$ ，以物距 $z_0 = 9 \text{ mm}$ ，像距 $z_i = 18 \text{ mm}$ 为例，则有：
 $h = p = 0.5 \text{ mm}$ ， $y = 0.3 \text{ mm}$ ， $u = 0.055$ ， $u' = 0.028$ ， $\bar{u} = 0.033$
 $T = 3.07$ ， $\lambda/\lambda_0 = 1$ ，把数据代入 (3-23) 计算得：

$$S_I = 0.0018 \quad S_{II} = 0.00035 \quad S_{III} = 0.00004 \quad S_{IV} = S_V = 0$$

把上述初级象差系数代入 (3-22) 式，可知初级波象差小到忽略不计。上述计算结果与实验结果基本吻合。另外对二元菲涅耳透镜偏角较小时进行实验观察，其象差现象不明显；当偏转角大于 20° 时，则有较明显的彗差和象散。理论与实验表明，在小视场或小数值孔径的情形下，象差的影响微乎其微。

二、二元消象散准直器件的基版的象差分析^[36]

用于制作二元光学器件的基版一般都是石英玻璃或普通玻璃的平行平板。平行平板的象差如 (3-24) 所示：

$$\text{初级球差系数} \quad \Sigma S_{Ip} = \frac{1-n^2}{n^3} u_1^4 \cdot d \quad (3-24I)$$

$$\text{初级彗差系数} \quad \Sigma S_{IIp} = \frac{1-n^2}{n^3} u_1^3 u_{z_1} \cdot d \quad (3-24II)$$

$$\text{初级象散系数} \quad \Sigma S_{IIIp} = \frac{1-n^2}{n^3} u_1^2 u_{z_1}^2 \cdot d \quad (3-24III)$$

$$\text{初级场曲系数} \quad \Sigma S_{IVp} = 0 \quad (3-24IV)$$

$$\text{初级畸变系数} \quad \Sigma S_{Vp} = \frac{1-n^2}{n^3} u_1 u_{z_1}^3 \cdot d \quad (3-24V)$$

其中 d 为平行平板厚度， n 为其折射率， u_1 为孔径角， u_{z_1} 为轴外点光束与光轴的夹角。由上式可知，当把

清华大学学位论文用纸

平行平板放置于平行光路中($u_1=0$)时, 不产生象差。故在使用二元光学透镜时, 应尽可能使其放置于平行光路中, 例如光互连, 多通道成像等。

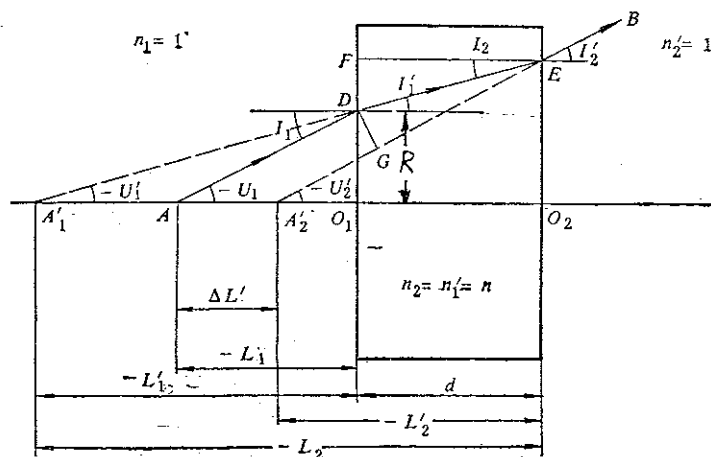


图3-4 平行平板产生轴向位移原理图

图3-4是器件基板置于实际光路中。从象点 A_2' 到物点 A 的距离为轴向位移 $\Delta L'$ 。

$$\Delta L' = d \left(1 - \frac{\cos I_1}{n \cos I_1'} \right) = d \left(1 - \frac{\text{tg } I_1'}{\text{tg } I_1} \right) \quad (3-25)$$

我们设计的二元消象散准直器件的石英玻璃片的厚度 $d = 0.8 \text{ mm}$, 折射率 $n = 1.4572$, $L_1 = +$ 。

$$I_{1x} = u_{1x} = \arctg \left(\frac{0.503}{6.05} \right) = 4.75^\circ \quad (3-26)$$

$$I_{1y} = u_{1y} = \arctg \left(\frac{0.5}{6} \right) = 4.76^\circ \quad (3-27)$$

由于 $\sin I_1 = n \sin I_1'$, 所以 $I_{1x}' = 3.26^\circ$, $I_{1y}' = 3.26^\circ$ 则

$$\frac{\cos I_{1x}}{\cos I_{1x}'} = \frac{\cos I_{1y}}{\cos I_{1y}'} = 0.998 \approx 1$$

此时近似于无限细光束近轴成像。由于 I_1 角很小, (3-25)式可改写成如下形式

$$\Delta L_x' = \Delta L_y' = d \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (3-28)$$

计算得 $\Delta L_x' = \Delta L_y' = 0.25 \text{ mm}$ 。因此可知近轴光线, 其

清华大学学位论文用纸

轴向位移只和平板的厚度 d 及折射率 n 有关，而与入射角无关。所以物点以近轴光经平行平板成像是完美的， x 、 y 两方向轴向位移的距离相等，对二元器件设计参数无影响。

由上分析可知，二元器件的基板被置于近轴光路中，因此可以不考虑轴外点成像产生的彗差、象散等象差，只考虑其初级球差。

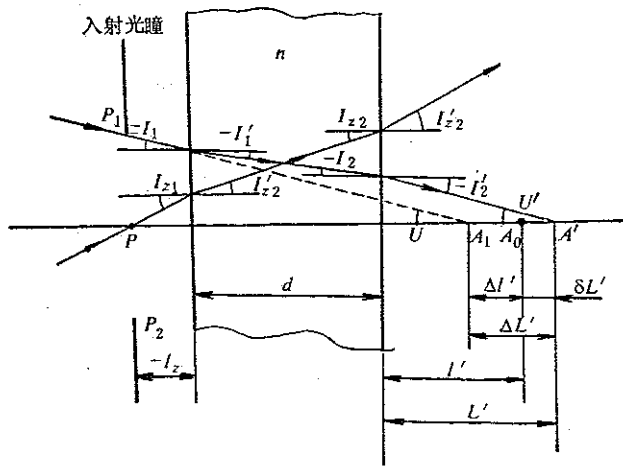


图 3-5 平行平板产生初级球差原理图

如图 (3-5) 所示，当有一中心在光轴上的同心光束入射到与光轴垂直的平行平板上时，不同孔径的光线具有不同的轴向位移，小孔径的情形下，只考虑其初级球差。

$$\delta L_p' = -\frac{1}{2n_1^2 u_1^2} \sum S_{2p} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} u_1^2 \cdot d \quad (3-29)$$

由上式可得二元消象散准直器件的初级球差 $\delta L_p' = a.1 \mu m$ ，其值很小，可忽略不计。

以上的情况是在 d 很小，近轴光下讨论计算的。若平行平板很厚，光线的入射角很大，应按公式 (3-24) 和 (3-25) 进行严格地计算分析。

三. 半导体激光器的窗玻璃的象差分析

由图 2-12 可以看出, 封装好的半导体激光器的芯片前都加有大约 0.25mm 厚的小玻璃片。

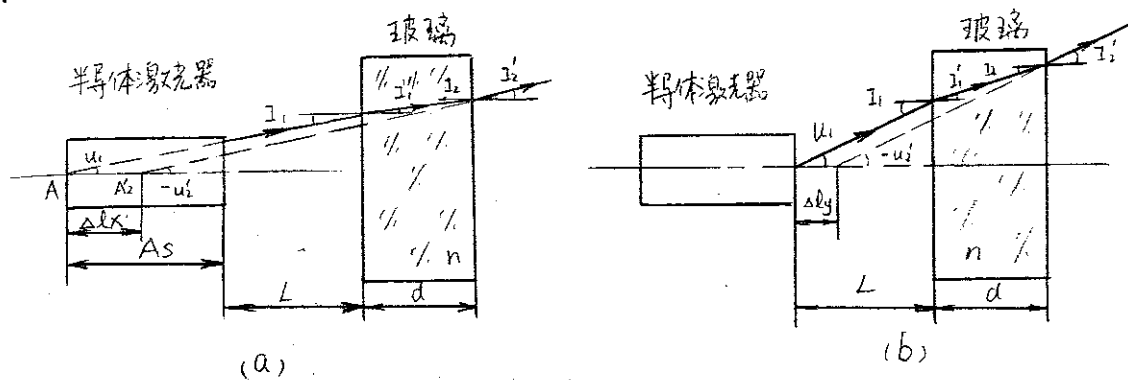


图 3-6 窗玻璃象差分析图

从图 3-6 知, 光经过平板玻璃后, 子午和弧矢光线将沿轴向有一位移 $\Delta l_x, \Delta l_y$ 。

已知 $u_{1x} = 4^\circ, d = 0.25 \text{ mm}, A_s = 50 \mu\text{m}, L = 1 \text{ mm}, n = 1.4572$

则 $i_{1x} = 4^\circ, i'_{1x} = 1.7^\circ \quad (\sin i_1 = n \sin i'_1)$

$$\Delta l_x = d \left(1 - \frac{\cos i_{1x}}{n \cos i'_{1x}} \right) = 0.0787 \text{ (mm)}$$

已知 $u_{1y} = 17^\circ, d = 0.25 \text{ mm}, A_s = 50 \mu\text{m}, L = 1 \text{ mm}, n = 1.4572$

则 $i_{1y} = 17^\circ, i'_{1y} = 11.57^\circ$

$$\Delta l_y = d \left(1 - \frac{\cos i_{1y}}{n \cos i'_{1y}} \right) = 0.0825 \text{ (mm)}$$

经过平行平板后的象散值 A'_s

$$A'_s = A_s - \Delta l_x + \Delta l_y = 53.8 \mu\text{m}$$

由于窗玻璃的折射, 使其象散值仅有很小的改变, 不予考虑。同样分析可知, 其它象差也可忽略。

§ 3-2 二元光学器件的加工误差分析

二元光学器件的一个重要特性是衍射效率, 其影响因素很多, 但最主要的来源是制版时多次套刻产生的对

准误差和刻蚀深度误差^[37-40]。根据加工方法的特点及光学的工艺水平，可以建立以下的误差模型。

一、工艺模型与误差模型

设一半径为 R 的二元器件，使波长为 λ 的平行光会聚于焦点 f 处，器件材料为石英玻璃。作为理想情况，采用常用的二元光学制作工艺，用一套二元模版来刻蚀石英玻璃以得到多台阶的浮雕表面。使用几个模版可得刻 $L = 2^n$ 个位相台阶^[41]。对于聚焦元件有表达式

$$\sqrt{(R_m^2 + f^2)} - f = \frac{m\lambda}{2^n} = \frac{m\lambda}{L} \quad (3-30)$$

m 是环带数， R_m 是环带半径。理想的模版是有旋转对称性。

在理想的制作过程中，作如下假定：首先基片（石英玻璃）的刻蚀深度正确，第二刻蚀后台阶边缘垂直，第三所有的模版准确且其对准无偏差。但在实际的制作过程中，存在着误差，其误差可分为两类。

纵向误差（刻蚀误差 *etch errors*）和横向误差（*Lateral errors*）。纵向误差包括系统误差（*systematic etch errors*）和随机误差（*random etch errors*）。横向误差由线宽误差（*line errors*）和对准误差（*alignment errors*）组成。如图 3-7。

纵向系统误差是指在片基上刻蚀深度的系统变化。这种变化受环带刻蚀宽度的影响（中心宽边缘窄），是制作过程中产生的一种固有的不稳定的离子刻蚀结果。这一误差可以看成是与刻蚀深度成线性变化的误差模型。设理想的刻蚀深度是 $0.5\mu\text{m}$ ，最大的系统刻蚀误差是 15%，

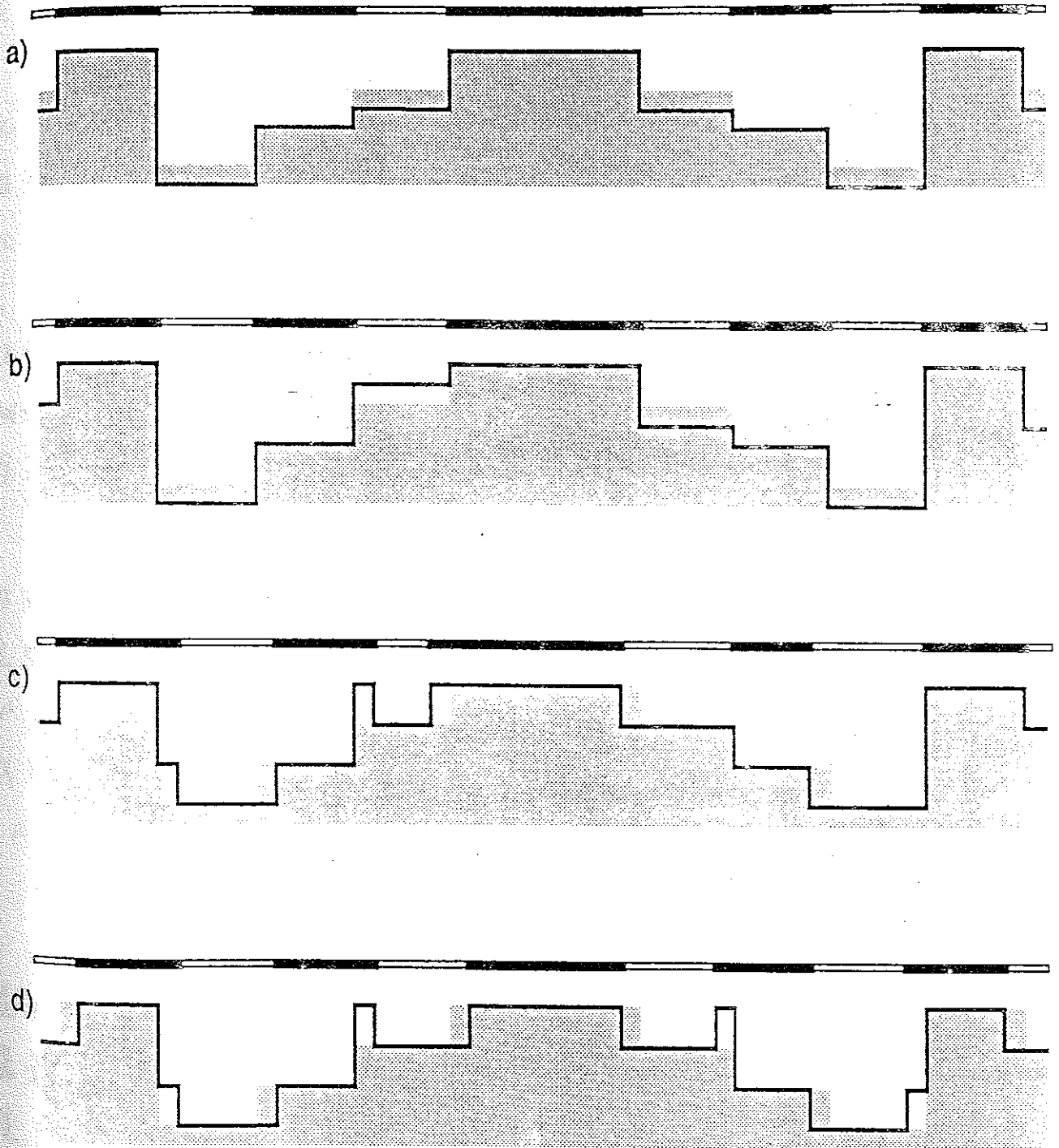


图 3-7 二元器件误差模型图

(a) 纵向系统误差 (b) 纵向随机误差 (c) 线宽误差 (d) 对准误差

清华大学学位论文用纸

那么中心环带的刻蚀深度将是 $0.575\mu\text{m}$ ，而边缘环带的刻蚀深度则是 $0.425\mu\text{m}$ 。根据目前工艺条件，纵向系统误差一般在刻蚀深度的 $1\% - 15\%$ 的范围内。

纵向随机误差反映了相邻环带的腐蚀深度的随机变化，可以把它们看成均匀随机变化的误差模型。因为一般最大的纵向随机误差是纵向系统误差最大值的 5% ，因此主要的纵向误差来源于系统误差。仍就上面的例子而言，最大的随机误差 $=0.5 \times 15\% \times 5\% = 0.00375\mu\text{m}$ 。所以，中心环带的刻蚀深度为 $0.575 \pm 0.00375\mu\text{m}$ ，边缘环带的刻蚀深度为 $0.425 \pm 0.00375\mu\text{m}$ 。综上所述，纵向随机误差的变化范围是刻蚀深度的 $0.05\% - 0.75\%$ 。

一个掩模版的图形是由一些环形波带片构成的，这些环带的半径值由方程(3-30)确定。线宽误差则是反映这些半径位置的随机误差，也是均匀随机变化模型。例如，设一个掩模版的环带半径 R 为 $12\mu\text{m} < R < 13\mu\text{m}$ ，最大线宽误差为 $0.3\mu\text{m}$ ，则实际刻蚀出的半径值将为 $(12 \pm 0.3)\mu\text{m}$ 或 $R < (13 \pm 0.3)\mu\text{m}$ 。一般线宽误差范围在 $0.01\mu\text{m} \sim 0.03\mu\text{m}$ 。

对准误差是指掩模版套刻时所产生的随机误差。这一误差模型不是确定为两块掩模版之间的平移偏差，而是归结为一块掩模版总的线宽误差。对于上面的例子，若最大的对准误差是 $0.1\mu\text{m}$ ，那么实际的对准误差的范围是 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。假若对准随机误差取为 $0.05\mu\text{m}$ ，则最终的环带刻蚀宽度为 $(12.05 \pm 0.3)\mu\text{m} < R < (13.05 \pm 0.3)\mu\text{m}$ 。一般对准误差的范围在 $0.01 \sim 0.20\mu\text{m}$ 。

需要注意的是，上述误差模型都是在假设刻蚀过程中

产生的台阶边缘垂直，且器件图形是圆对称的基础上建立的。

三. 实验检验

我们共做了34片二元消象散准直器件，前后两次分别制作出1#、2#和3#、4#，后者较前者质量好。以1#和3#器件作为分析比较对象。他们的表面轮廓和刻蚀深度扫描图如下。

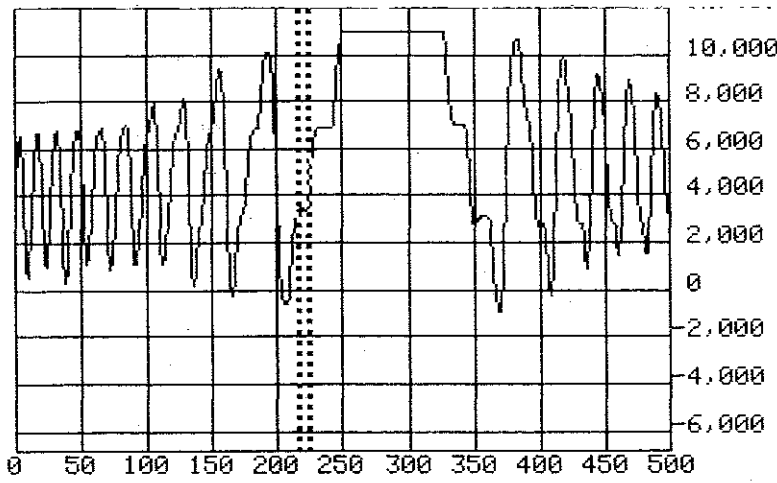


图3-8 1#器件表面轮廓和刻蚀深度扫描图

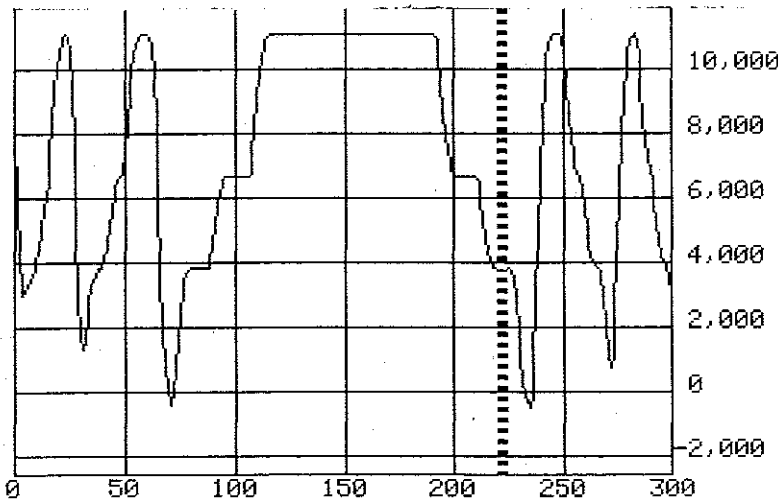


图3-9 3#器件表面轮廓和刻蚀深度扫描图

1#和3#器件的刻蚀深度的实际值与理论值列于表3-1。

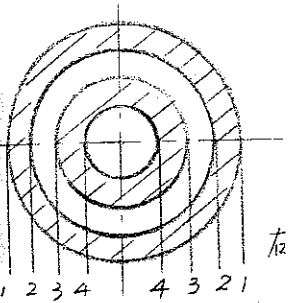
刻蚀深度的误差变化范围在 $0.004 \mu\text{m} \sim 0.04 \mu\text{m}$ 。一般为其标称深度的 $0.5\% \sim 7\%$ 。与前面所建立的纵向误差模型相

清华大学学位论文用纸

此外，3#器件的刻蚀深度的误差明显小于1#器件，误差模型分析，3#器件的衍射效率高于1#器件。从第二章可知，3#器件的衍射效率为 $\eta_3 = 64.6\%$ ，1#器件的衍射效率为 $\eta_1 = 51.16\%$ 。实际结果与理论分析是一致的。

表3-1 1#和3#器件的刻蚀深度的实际值与理论值

	4台阶刻蚀深度		差值	2台阶刻蚀深度		差值
	实际值	理论值		实际值	理论值	
1#器件	3414Å	3664Å	0.025um	6898Å	7327Å	0.0429um
3#器件	3831Å	3664Å	0.0167um	7827Å	7327Å	0.004um



测量线宽和对准偏差数据时，测量基准如图3-10。理想情况下，左右两边相对应的环带宽应相等。两者实际之差即为对准偏差。线宽误差是根据实际线宽与理论计算线宽之差计算而得。

表3-2 线宽和对准偏差的测量数据

	1#器件				3#器件			
	1	2	3	4	1	2	3	4
右边半径位置(um)	0.2815	0.2572	0.2635	0.2512	0.3091	0.2892	0.2722	0.2592
左边半径位置(um)	0.3803	0.3982	0.4152	0.4274	0.4071	0.4260	0.4441	0.4585
右边环带宽(um)	24.3	-6.3	12.3		19.9	17.0	13.4	
左边环带宽(um)	17.9	13.0	12.2		18.9	18.1	14.4	
对准偏差(um)	3.2	10.0	0.5		0.5	0.5	0.7	
中心环带宽(um)	45.6				44.4			
标准中心环带宽(um)	44.8				44.8			
线宽偏差(um)	0.6				0.4			

清华大学学位论文用纸

从上表可知，1#器件有严重的对准偏差。这一点，由图2-22可以很明显的看出。测量结果也证明其对准误差已超出了误差模型的范围，因此它没能达到4台阶器件的性能指标，衍射效率仅略高于2台阶的 $\eta_1=51.16\% > 40.5\%$ （2台阶的最大衍射效率）。3#器件的对准误差虽比1#的小，但也不在误差范围内（ $0.01-0.02\mu\text{m}$ ），其衍射效率也没达到理论值，实验测得， $\eta_3=64.6\% < 81.0\%$ （4台阶的最大衍射效率）。

1#和3#的线宽误差也偏大，同样也影响了器件的衍射效率。我们看到，由于对准和线宽误差的存在，使得边缘最细线条不能刻蚀出来，因此透镜的实际数值孔径也会比设计值小。所以我们又考虑采用新的加工工艺，减小制作误差，以达到所要求的数值孔径。

在二元光学器件的加工中，正确对版是保证加工质量的关键。对版误差的降低以及准确控制刻蚀深度，将会使其衍射效率有较大的提高。

本章对二元光学器件的象差和加工误差进行了理论分析和计算，建立了象差计算和误差分析模型，并完成了对二元消象散准直器件的象差和加工误差的分析与计算。

第四章 其它二元光学器件的设计制作

§4-1 大数值孔径二元消象散准直器件的设计制作^[42]

第二章中介绍的二元消象散准直器件由于受到加工方法的限制, 数值孔径只有0.2, 使得光能利用率很低。为了能充分利用半导体激光器的能量, 又设计制作了一个大数值孔径的二元消象散准直器件。设计与前面的器件相同。设计参数见表4-1。

表4-1 大数值孔径二元器件的设计参数

		焦距(mm)	半径(mm)	最小线宽(μm)	数值孔径	环带数
第一块版	X	4.04	0.919	1.474	0.455	312
	Y	4	0.915	1.467	0.458	312
第二块版	X	4.04	0.919	0.737	0.455	624
	Y	4	0.915	0.733	0.458	624

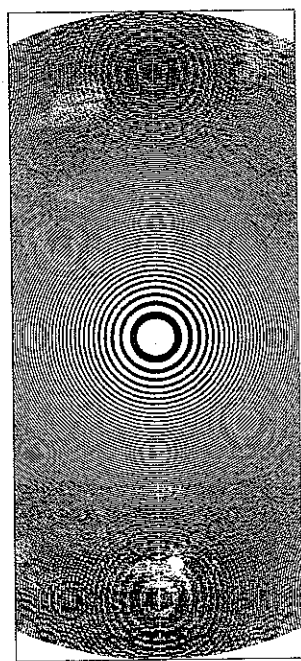
从上面的设计参数可以看出, 数值孔径NA将近0.5, 在国内外同类器件中已达到了较高的水平。该器件的最小线宽为0.7 μm, 达到同等水平的二元光学器件还未见报。其象散值取为 $A_s = 40 \mu\text{m}$ 。经查阅大量厂家生产的不同型号的(可见光)的半导体激光器的性能指标, 象散值一般都在40 μm左右。为了使该器件有更广泛的应用, 同时§2-4的实验也已表明, 一个二元器件可应用于一定象散变化范围, 故选定 $A_s = 40 \mu\text{m}$ 。

本器件的最小线宽为0.7 μm, 与波长相近。按标量波理论设计的这一器件的衍射规律将有什么变化? 是否应

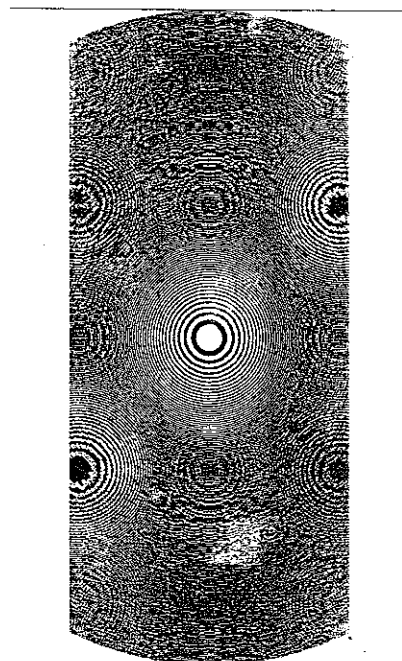
清华大学学位论文用纸

考虑矢量波理论？这正是我们所关心的一个问题。本器件的设计与制作将为实验及分析提供条件。

在许多应用场合中，要求激光束光斑准直且功率大，对于其形状无特殊要求。为了使准直光束散后的光束有较大的光功率，此次设计在保证 x 方向的光斑全部通过二元器件的情形下，在 x 方向上有截取（如图4-1），其主要目的是减少图形数据量，从而降低图形曝光块的个数，减少制作难度，节省经费。若要求使用光斑为圆形，则在本器件后加一圆形光阑即可得到。



第一块掩模版



第二块掩模版

图4-1 大数值孔径二元器件掩模版

x 方向的截取半径可由下图的计算得到。

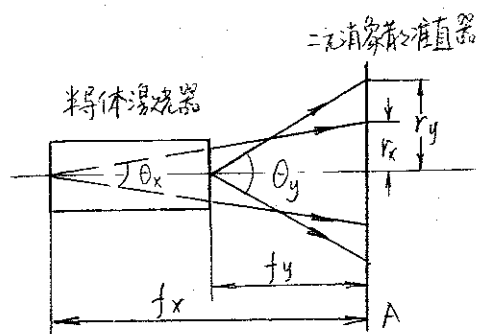


图4-2 半导体激光器原理图

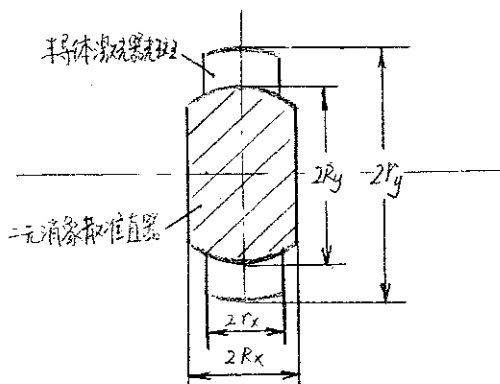


图4-3 半导体激光器光斑形状

已知 $f_x = 4 \text{ mm}$, $f_y = 4.04 \text{ mm}$, $\theta_x = 8^\circ$, $\theta_y = 4.04 \text{ mm}$
 则计算可得 $r_y = 1.223 \text{ mm}$, $r_x = 0.283 \text{ mm}$ 。在 A 处光斑直径在 x、y 两方向的比率近似为 1:4 (如图 4-3), 因此若想让 y 方向的光尽可能多的被利用, 则二元器件 x 方向的半径 R_x 完全没有必要和 y 方向的半径 R_y 相等, 其值只要满足 $R_x > r_x$ 即可。故我们选取二元器件 $R_x = 0.4 \text{ mm}$, $R_y = 0.915 \text{ mm}$ 。

半导体激光器的光斑可近似看成如图 4-3 所示形状, 则近似计算可得:

未被截取的光斑面积 $S_0 \approx 4r_x r_y = 1.384 (\text{mm}^2)$

被截取的光斑面积 $S_J \approx 4R_y r_x = 1.0360 (\text{mm}^2)$

不考虑光通过石英玻璃的损失, 则光的利用率可达

$$\beta_{td} = \frac{S_J}{S_0} = 74.84\%$$

同样的方法可以计算已制作去的二元消象散准直器件的光利用率,

$$r_y = 6 \text{ tg } 17^\circ = 1.834 (\text{mm})$$

$$r_x = 6.05 \text{ tg } 4^\circ = 0.423 (\text{mm})$$

$$S_0 \approx 4r_x r_y = 3.103 \text{ mm}^2$$

$$S_J \approx 4R_y r_x = 0.846$$

$$\beta_{es} = S_J / S_0 = 27.3\%$$

清华大学学位论文用纸

新器件的制作工艺与前不同，它采用的是电子束制版。对版不再是人工，而完全由机器找准，因此不再需要设计对版标记。由于电子束制版的后续工艺是投影光刻即通过光学曝光系统将掩模上的图案缩小后投影到衬底上，所以制作的掩模与实际尺寸不是1:1而是5:1的比例。在做PG带时，数据不是放大10倍，而应该是5倍。若器件的制作达到了设计标准，我们将会得到一个无象散、准直、高功率的可见光的半导体激光光斑。

§4-2 焦距可调的二元FZP的设计

半导体激光器的生产厂家很多，同一产品的型号繁多，这就使其象散值是在一定的范围内变化的。前面设计制作的二元消象散准直器件的焦距是固定的，尽管它可以与不同的半导体激光器配合使用，但其应用范围也是受到限制的。若透镜的焦距可变，则此问题将会迎刃而解。

根据电光效应的原理，改变按一定图形附着在液晶盒上的I₂O导电膜上的电压，使无序分布的液晶分子按一定方向排列，则有其折射率发生 Δn 的变化，因此带来焦距的变化。^[43,44]

配合本组博士后的工作，承担了在I₂O膜上设计图形的任务。考虑到与已设计制作的二元消象散准直镜的配合使用，以及半导体激光器y方向的发散度比x方向下的多，因此首先利用它来压缩y方向的光束，使之孔径变小，然后再进行消象散和准直，这样可以减轻二元

消象散准直器件的负担。

根据加工和使用的要求，设计了一直线图形的二元F2P（起柱面透镜的作用）。由于国内加工单位对于直线图形的制作工艺比较成熟，不套刻的情形下，最小线宽可以做到 $0.5\ \mu\text{m}$ ，再者在上膜上刻蚀加工较难，因此我们设计了二台阶的二元F2P，最小线宽 $0.7\ \mu\text{m}$ ，焦距 $F=3.0\ \text{mm}$ ，半径 $R=1.435\ \text{mm}$ ，数值孔径 $NA=0.96$ ，环带数 $M=1024$ 。

该透镜正在加工，预计与二元消象散准直器件配合使用将有较好的效果。

本章采用二元器件的设计方法，设计制作了二种新型的二元F2P器件，并选用电子束制版工艺进行加工。

第五章 设计软件的开发

§5-1 二元菲涅耳透镜的软件设计^[45]

正确、快速、方便地设计二元FEP是推广应用中一个主要问题。本论文中，在大量阅读资料，分析比较各种方法的基础上，并结合自己的设计经验，编写了二元FEP设计软件。图5-1是其流程图^[46]。程序初始值为入，焦距F，半径R，台阶数N；计算结果，V为最小线宽，NA为数值孔径，M为环带数。最小线宽的预定值由使用者根据设计要求而定。程序清单见附录2。

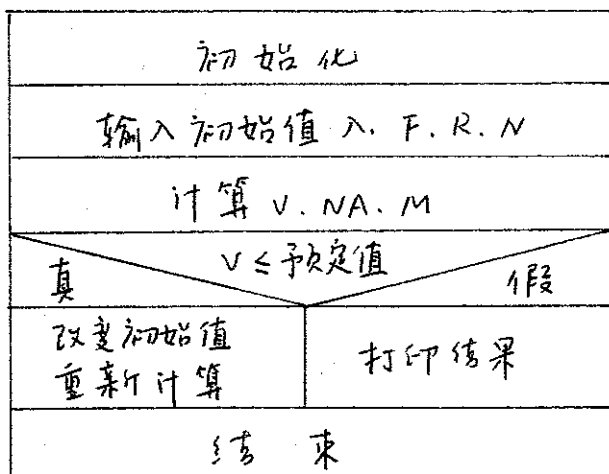


图5-1 二元FEP设计程序流程图

此程序可设计圆形、椭圆形、直线等多种形式的二元FEP器件。设计二元消象散准直器件的实践证明，该程序性能可靠。课题组的其他同学应用它设计了柱面透镜也获得了满意的结果。

§ 5-2 一般数据格式转换成CIF数据格式的软件设计

二元光学器件的掩模版的制作通常采用大规模集成电路的制造工艺^[49]，如光刻和电子束曝光等技术。从第二章的制作工艺的分析中可知，一般数据格式转换成CIF数据格式是制作工艺中的一个重要步骤。只有把数据按CIF格式正确地书写，才能生成正确的图形掩模版。

CIF数据格式最早是在集成电路的设计中使用的。后来随着大规模集成电路(LSI)的制作技术的飞速发展以及微光学、微电子、微机械相互结合，使得一些光学元件象二元TIP、Damman光栅等也开始借助于大规模集成电路的加工手段，从而使CIF数据格式也开始在光学领域中应用。

集成电路设计的图形多为规则图形，如图、直线、三角形等。而在二元光学的设计中，图形多为复杂的椭圆、抛物线、任意曲线等。这就给数据格式的转换增加了难度。有关直线、圆等规则图形的CIF格式书写比较简单，下面重点介绍复杂图形的CIF数据格式的书写的规则和规定。^[50]

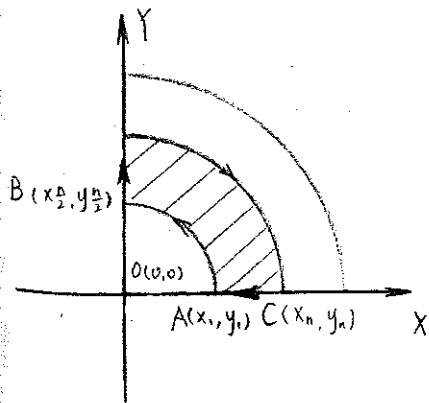


图5-2 CIF格式书写示意图

设计制作的二元消象散准直器件是一个椭圆形的环带，只能用多边形来近似每一环带。对于椭圆一类的对称图形^形只需写出1/4图形的CIF数据，然后调用该单元数据即可写出完整的椭圆环带的CIF数据。如图5-2。阴影部分为第

清华大学学位论文用纸

要写成 CRT 数据格式的椭圆环，则有

```
1 DS 1 ;  
2 9 D23B0 ;  
3 L1 ;  
  :  
4 P X1 Y1 X2 Y2 ... Xn Yn ;  
  :  
5 DF ;  
6 DS 2 ;  
7 9 D23B ;  
8 C 1 T 0 0 ;  
9 C 1 MX T 0 0 ;  
10 C 1 MY T 0 0 ;  
11 C 1 R -1 0 T 0 0 ;  
12 DF ;  
13 E
```

上面即是一段完整的 CRT 数据格式。1-5 行是基本单元，是 $1/4$ 椭圆环带的 CRT 数据，名字为 D23B。6-12 行是调用该单元，写出完整的椭圆环带的 CRT 数据。8 行为第一象限的图形，9 行为第四象限的图形，10 行为第二象限的图形，11 行为第三象限的图形。最后一行为结束标志。

需要注意的是：(1) 每行的数据不能超过 80 个字符，(2) 每个图形的点数一般不超过 100 个点（即 P 后面的数据不超过 200 个，有的机器也可到 400 个数据），(3) 代表图形的字母（如 P）以及层号、结束符等必须是大写字母，(4) 数据段最开始以 L1 层开始，(5) 数据段结束以 E 为标志，(6) 数

清华大学学位论文用纸

据的最小单位精确到 $0.01 \mu\text{m}$ ，(多边形首末点不重合即多边形最后一点的坐标与起始点坐标不同)，可自动地进行图形封闭。

按照 CDF 数据格式的书写规则编写了设计程序，图 5-3 为其流程图，程序清单见附录 3。

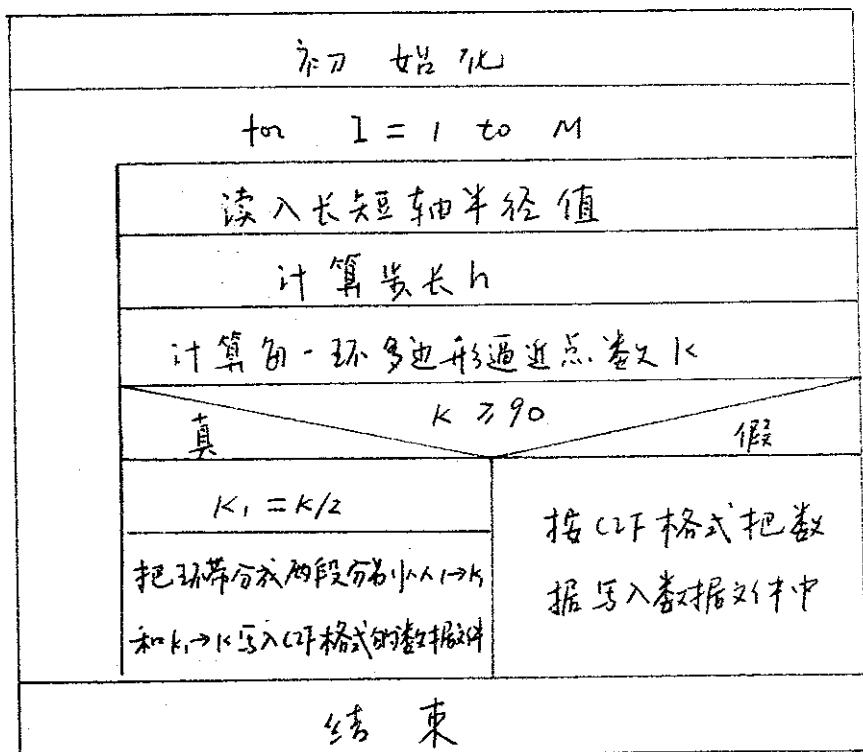


图 5-3 CDF 数据格式转换设计程序流程图

由第二章可知写成 CDF 格式的数据文件还需转成 GDS2 格式，用专用软件分割成小曝光块，曝光块越多，机时越多，费用也越高。因此在编写程序时，一定要选择适当的步长，太小分割出的曝光块数量大；太大则达不到要求的精度。一般图形尺寸较大，步长可选大一些 ($20 \sim 30 \mu\text{m}$)，反之，步长要小一些。

此软件已在课题组中应用，把三种不同形状的图形

清华大学学位论文用纸

数据转换成了 CTF 格式，并已切割成 PG 带，做出了掩模版。该软件既可用于椭圆、任意曲线等复杂图形的数据格式转换，同样也可对直线、圆等规则图形进行转换。但直线和圆等规则曲线一般还是采用标准的 CTF 书写格式比较方便、简练。实践证明，该软件在二元光学及计算全息等器件的设计与制作中有较好的应用价值。

本章主要介绍了二元 FEP 的设计程序及一般数据格式转换成 CTF 数据格式的应用软件的编写。实践证明，它们具有较好的应用价值。

第六章 结束语

本论文对于二元光学器件的理论、设计方法及加工制作进行了研究，取得了如下研究成果。

- 设计并制作出二元光学式半导体激光器消象散准直头样品。
- 对二元光学器件的象差和加工误差建立了分析模型，并完成了对其象差和加工误差的分析与计算。
- 设计制作了二种新型二元 FZP 器件：大数值孔径的二元消象散准直器件及焦距可变的二元菲涅耳透镜。
- 编写了二元 FZP 的设计软件和一般数据格式转换成 CIF 数据格式的应用程序，已在应用中很好地解决了一些实际问题。

共发表了三篇论文，参加了“全国纳米及科学技术”会议并做了大会发言。此外还协助老师做了辅助教学工作和技术鉴定工作。

论文名称：

1. 王超，尹璞白，鄂敏贤，金国藩，用于波面校正的几种二元光学器件，仪器仪表学报，1995，Vol.16，No.1，P356
2. 王超，尹璞白，鄂敏贤，金国藩，二元光学式半导体激光器准直头，1995年全国光学学会会议录，已被录用。

清华大学学位论文用纸

数据转换成了 C2F 格式，并已切割成 PG 带，做出了掩模版。该软件既可用于椭圆、任意曲线等复杂图形的数据格式转换，同样也可对直线、圆等规则图形进行转换。但直线和圆等规则曲线一般还是采用标准的 C2F 书写格式比较方便、简练。实践证明，该软件在二元光学及计算全息等器件的设计与制作中有较好的应用价值。

本章主要介绍了二元 FEP 的设计程序及一般数据格式转换成 C2F 数据格式的应用软件的编写。实践证明，它们具有较好的应用价值。

第六章 结束语

本论文对于二元光学器件的理论、设计方法及加工制作进行了研究，取得了如下研究成果。

- 设计并制作出二元光学式半导体激光器消象散准直头样品。
- 对二元光学器件的象差和加工误差建立了分析模型，并完成了对其象差和加工误差的分析与计算。
- 设计制作了二种新型二元 FZP 器件：大数值孔径的二元消象散准直器件及焦距可变的二元菲涅耳透镜。
- 编写了二元 FZP 的设计软件和一般数据格式转换成 CIF 数据格式的应用程序，已在应用中很好地解决了一些实际问题。

共发表了三篇论文，参加了《全国纳米及科学技术》会议并做了大会发言。此外还协助老师做了辅助教学工作和技术鉴定工作。

论文名称：

1. 王超，尹璞白，鄂敏贤，金国藩，用于波面校正的几种二元光学器件，仪器仪表学报，1995，vol.16，NO.1，P356
2. 王超，尹璞白，鄂敏贤，金国藩，二元光学式半导体激光器准直头，1995年全国光学学会会议录，已被录用。

清华大学学位论文用纸

3. 尹璞白, 金国藩, 邹淑贤, 王超, 多位相微光学阵列发生器的设计与研制, 光子学报, 1994, vol.23, no.22, p53.

对下一阶段工作的展望

- 进一步完善二元光学式半导体激光器消脊散准直头的设计, 并使之产品化。
- 研制折/衍射混合型二元器件。
- 分析当二元器件线宽与波长相近时的标量设计理论是否适用? 并提出新的设计理论。
- 发展和研究集成光学元件, 使器件功能多元化。

致谢

经过二年半的学习、研究，在严璞白教授的悉心指导下顺利地完成了硕士论文工作。通过学习，打下了坚实的理论基础；通过做课题，培养了科学研究的工作能力。同时，在各方面也取得了不小的进步，这一切的取得都是与老师们的帮助和教导分不开的。

在这，我要再次感谢我的导师严璞白教授以及金国藩院士、邹敏贤教授，从他们那里不仅得到了丰富的知识，亲切的关怀，更学到了严谨的学风，做人的准则。同时还要感谢姚长坤老师、赵子英老师、姜培兰老师、王山师傅以及教研组的所有老师给予地帮助。特别还要对黄国亮、冯文毅、王文陆等同学的支持与协助表示谢意。

参考文献

- (1), G. J. Swanson, Binary optics technology: the theory and desing of multilevel diffractive optical elements, Lincoln Lab. Tech. Rep, August 1989, 854.
- (2), M. W. Farn, M. B. Stern, and W. B. Veldkamp, The making of binary optics, Optics & Photonics News, 1992, No. 5, P20.
- (3), 董碧珍, 衍射光学研究的新进展, 光子学报, 1994, vol. 23, NO. 22, P123.
- (4), S. J. Walker, et al., Appl. Opt., 32 (1993), 2494.
- (5), D. H. Raguin and G. M. Morris, Appl. Opt., 32 (1993), 2582.
- (6), M. T. Gale, et al., Appl. Opt., 32 (1993), 2526.
- (7), Annamaria M. Scheggi Chair / Editor., "Micro-Optics", SPIE., 1988, Vol. 1014.
- (8), J. Leger, M. Scott, et al., Astigmatic Wavefront Correction of a Gain-guided Laser Diode Array Using Anamorphic Diffractive Microlenses, SPIE, 1988, Vol. 884, P82.
- (9), 王玉堂, 李育林, 微光学的发展及其战略对策, 光子学报, 1994, vol. 23, NO. 22, P1.
- (10), 何兴仁, 国外半导体激光器的市场状况与趋势。
- (11), J. Motodate et al; Photonics Spectra, 1991, No. 5, P157.
- (12), T. Mahony; Photonics Spectra, 1991, NO. 1, P103.
- (13), 赵建新, 红光半导体激光器的的发展及其应用, 1993, vol. 23, NO. 1, P26.

清华大学学位论文用纸

- [14], 带准直镜激光二极管的应用, 国外激光, 1992. 5, P30
- [15], 王世华、周卫东、周肇飞, 半导体激光束的准直技术, 应用激光, 1992, vol.12, NO.4, P178。
- [16], 曹沛其、沈冠群等, 高性能的稳功率、准直半导体激光发射头, 1991, vol.11, No.6, P259。
- [17], J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, Chapter 4, McGraw-Hill Press, San Francisco, 1968
- [18], Jürgen Jahns and Susan J. Walker, Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition, Appl. Opt., 1990, vol.29, No.7, P931.
- [19], 王旭, 二元光学器件的设计与制作 硕士论文, 1993。
- [20], 严璋白, 应用物理光学, 1990, 第一版, 机械工业出版社, 北京。
- [21], Kristopher S. Unguikart, Hamid Farhoosh, and Sing H. Lee
Diffractive lenses utilizing orthogonal cylindrical
Fresnel Zone Plates, SPIE 1990, vol.1211, P184
- [22], James J. Snyder and Patrick Reichert Fast, inexpensive, diffraction limited cylindrical microlenses, SPIE, 1991, vol.1544, P146
- [23], Eero Noponen, Tari Turunen and Antti Vasara, Electromagnetic theory and design of diffractive-lens arrays, J. Opt. Soc. Am., 1993, vol.10, No.3, P434.
- [24], Michael Bernhardt, Frank Wyrowski, and Olof Bryngdahl
Iterative techniques to integrate different optical functions
in a diffractive phase element, Appl. Opt., 1991, vol.30,
NO.32, P4629.

清华大学学位论文用纸

- [25], James S. Foresi, Joseph L. Levy, John E. Jackson, Intensity redistribution and collimation of laser diode arrays using binary optics. SPIE, 1990, vol. 1211, P253.
- [26], Yvonne A. Carls, Microelectronic methods push binary optics frontiers, Laser Focus World, 1992, No. 2, P87.
- [27], P. Langlois, H. Jerominek, L. Leclerc, J. Pan, Diffractive optical elements fabricated by laser direct writing and other techniques, SPIE, 1992, vol. 1751, P2.
- [28], James Logue, Fabrication of binary optics using electron beam lithography, SPIE, 1988, vol. 884, P95.
- [29], Steven M. Arnold, Electron beam fabrication of computer-generated holograms, Optical Engineering, 1985, vol. 24, No. 5, P 803.
- [30], 王超, 严瑛白, 鄂敏贤, 金国藩, 用于波面校正的几种二元光学器件, 仪器仪表学报, 1995, vol. 16, No. 1, P356.
- [31], Thor's Guide to Laser Diodes, 1995, THORLABS, U. S. A.
- [32], 严瑛白, 金国藩, 鄂敏贤, 王超, 多位相微光学阵列发生器的设计与研制, 光子学报, 1994, vol. 23, NO. 22, P53.
- [33], 国光亚, 侯西云, 杨国光, 微透镜的衍射成像分析, 光子学报, 1994, vol. 23, No. 22, P157.
- [34], 叶钧, 杨国光, 二元透镜的像差容限判据, 光子学报, 1994, vol. 23, No. 22, P95.
- [35], 张强, 杨大任, 一种新型微准直透镜, 应用光学, 1993, vol. 14, No. 2, P11.
- [36], 张以谟, 应用光学, 1982, 第一版, 机械工业出版社, 北京。

清华大学学位论文用纸

- [37], S. Brinkmann, Th. Dresel, J. Schwiden, "Fabrication and Characterization of 8-level fresnel zone Lenses" *Angewandte Optik*, 1993, D-91058 Erlangen, Fed. Rep. of Germany.
- [38], Michael W. Farn, Joseph W. Goodman, "Effect of VLSI fabrication on kinoform efficiency", *SPIE*, 1990, Vol. 1211, P125.
- [39], N. Emerton, "Manufacturing Tolerances for Blazed Diffractive Optical Elements", *Acta Polytechnica Scandinavica: Applied Physics Ph-149*, 1985, 308-311.
- [40], K. M. Flood and J. M. Finlan, "Multiple phase Level Computer - Generated Holograms Etched in Fused Silica", *Proc. SPIE*, 1988, vol. 1052, P91.
- [41], M. L. Chisholm and J. E. Logue, "General Approaches to Mask Design for Binary Optics", *Proc. SPIE*, 1989, vol. 1052, P163.
- [42], H. W. Lau, N. Davies, M. McCormick, "Microlens Array Fabricated in Surface Relief with High Numerical Aperture", *SPIE*, 1991, vol. 1544, P178.
- [43], C. D. SHARP, K. M. JOHNSON, H. J. MASTERSON and D. DOROSKI "Smectic Liquid Crystal Tunable Filters", *Ferroelectrics*, 1991, Vol. 114, P55.
- [44], Etron, et al, *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, B/Vol. 3, No. 2, P247
- [45] 谭浩强, *C程序设计*, 1991, 第一版, 清华大学出版社, 北京。
- [46], 周杉, 王忠, 晓夏, 武仁编译, *最新Microsoft Quick C 使用大全*, 1990, 中科院希望高级电脑技术公司, 北京
- [47], (美) Herbert Schildt 著, 郭兴社等译, *C语言大全*, 1990, 电子工业

清华大学学位论文用纸

出版社，北京。

- [48], 郑人杰, 实用软件工程, 1991, 第一版, 清华大学出版社, 北京。
- [49], Wilfrid B. Veldkamp, *Miniature and Micro - Optics: Fabrication and System Applications*, SPIE, 1991, vol. 1544, P287.
- [50], *Implementing Integrated System Design*, chapter 5.

清华大学学位论文用纸

附录一. 图形分割后生成的数据文件报表

PG REPORT

```
=====
# PRIMARY      = mark
# OUTMAG       = 10
# MASK COUNT   = 5
=====
```

No	OUTPUT FILE	LAYER NUMBER	OUTPUT FLASHCOUNT
1	L01	1	28
2	L02	2	26
3	L03	3	23
4	L04	4	21
5	L05	5	24

```
=====
# PRIMARY      = d21
# OUTMAG       = 10
# MASK COUNT   = 1
=====
```

No	OUTPUT FILE	LAYER NUMBER	OUTPUT FLASHCOUNT
6	L06	1	6614

```
=====
# PRIMARY      = d41
# OUTMAG       = 10
# MASK COUNT   = 1
=====
```

No	OUTPUT FILE	LAYER NUMBER	OUTPUT FLASHCOUNT
7	L07	1	13790

```
=====
# PRIMARY      = d23b
# OUTMAG       = 10
# MASK COUNT   = 1
=====
```

No	OUTPUT FILE	LAYER NUMBER	OUTPUT FLASHCOUNT
8	L08	1	12207

```
=====
# PRIMARY      = d43b
# OUTMAG       = 10
# MASK COUNT   = 1
=====
```

No	OUTPUT FILE	LAYER NUMBER	OUTPUT FLASHCOUNT
9	L09	1	24542

附录二. 二元菲涅耳透镜设计程序清单 (CHF.C)

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

main()
{
    float YCC();
    int N,M,I;
    long int x[500],y[500];
    float NA,V;
    float RRx[500],RRy[500];
    float L,Fx,Fy,Rx,Ry;
    printf("This program is used to design the Fresnel Zone Plate.\n");
    printf("1. Please input the wavelength(um):\n");
    scanf("%f",&L);
    printf("\n");
loop: printf("2. Please input the focal length(mm):(Fx,Fy)\n");
    printf("Fx=");
    scanf("%f",&Fx);
    printf("\n");
    printf("Fy=");
    scanf("%f",&Fy);
    printf("\n");
    printf("3. Please input the maximum radius(mm):(Rx,Ry)\n");
    printf("Rx=");
    scanf("%f",&Rx);
    printf("\n");
    printf("Ry=");
    scanf("%f",&Ry);
    printf("\n");
    printf("4. Please input the step levels:(N)\n");
    printf("\n N=");
    scanf("%d",&N);
    printf("\n");
    M=CC(L,Fx,Rx,RRx,M,N);
    CC(L,Fy,Ry,RRy,M,N);
}
```

清华大学学位论文用纸

```
CC(L,F,R,RR,M,N)
float L,F,R,RR[1000];
int N,M;
{
  int I,K;
  float NA,V;
  float RC[800];
  M=(R*R*N/(2*L*F))*1000;
  NA=2*(R/F);
  K=M-1;
  V=(sqrt(2*M*L*F/(1000*N)))*1000-(sqrt(2*(M-1)*L*F/(1000*N)))*1000;
  if(V>0)
  { printf("The original FZP's parameter:\n");
    printf("F(mm)=%f, R(mm)=%f, V(um)=%f, NA=%f, m=%d\n\n",F,R,V,NA,M);
    printf("The last mask's radius values:\n");
    for(I=1;I<=M;I++)
    {
      RR[I]=sqrt(2*I*L*F/(1000*N))*1000;
      printf("R[%4d]=%8.2f um ",I,RR[I]);
      if(I%4==0) {printf("\n");/*getch();*/}
    }
    printf("\n");
    for(I=1;I<=M-1;I++)
    {
      RC[I]=RR[M]-RR[I];
      printf("RC[%4d]= %5.1f um ",I,RC[I]);
      if(I%4==0) {printf("\n");}
    }
  }
  else
  { printf("The NA value(%f) is too big for producing the FZP\n",NA);
    printf("Please input the new parameters.");
    exit(0);
  }
  return(M);
}
```


附录三. 一般数据格式转换成C语言数据格式的应用程序

1. 完整图形的数据转换程序清单 (CH.C)

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

main()
{
    FILE *fp;
    /*enum BankType bank=greenBank;*/
    float YCC();
    int i,k,k1,n,j=0,a;
    int N,M,I;
    long int x[500],y[500];
    float NA,V,z,m,h,s=0,g;
    float RRx[500],RRy[500];
    float L,Fx,Fy,Rx,Ry;
    printf("This program is used to design the Fresnel Zone Plate.\n");
    printf("1. Please input the wavelength(um):\n");
    scanf("%f",&L);
    printf("\n");
loop: printf("2. Please input the focal length(mm):(Fx,Fy)\n");
    printf("Fx=");
    scanf("%f",&Fx);
    printf("\n");
    printf("Fy=");
    scanf("%f",&Fy);
    printf("\n");
    printf("3. Please input the maximum radius(mm):(Rx,Ry)\n");
    printf("Rx=");
    scanf("%f",&Rx);
    printf("\n");
    printf("Ry=");
    scanf("%f",&Ry);
    printf("\n");
    printf("4. Please input the step levels:(N)\n");
    printf("\n N=");
    scanf("%d",&N);
    printf("\n");
```

```

if((fp=fopen("dq.dat","w"))==NULL)
{
printf("cannot open the output file");
exit(0);
}
M=CC(L,Fx,Rx,RRx,M,N);
CC(L,Fy,Ry,RRy,M,N);
printf("%d", M);

fprintf(fp,"L1;");
fprintf(fp,"\n");
/*printf("save\n");*/
for(n=1;n<=M;n=n+2)
{
fprintf(fp,"P ");
for(I=n;I<=n+1;I++)
{
a=0;
s=1;
h=1;
z=2*3.14159*RRy[I]/360;
/*printf("%f",z);*/
lp1: if(z<=9)
{z=z*2;
s=s*2;
h=s;
/*printf("%f,%f",z,h);*/
goto lp1;
}
if(s>1) {s=s;}
else {s=1;}
lp2: if(z>18)
{
z=z/2;
s=s/2;
h=s;
goto lp2;
}
/*printf("%f %f",RRx[I],RRy[I]);*/
j=0;
/*printf(" %f %f",h,z);*/
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{ j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
}
}

```

```

}
if((m-90)<=h)
{m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}

g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
printf("%d ",k);
if(k<=90)
{
printf(" %d ",I);
if(I%2!=0)
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(i%5==0)
{
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp," ");
}
}
fprintf(fp,"\n");
}
if(I%2==0)
{
fprintf(fp," ");
for(i=k;i>=1;i--)
{
a=a+1;
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(a%5==0)
{
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp," ");
}
}
fprintf(fp,";\n");
}
}
}
}

```

```

else
{
if(I%2==0)
{
h=h*2;
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{ j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
printf("%d %d ",k,I);
fprintf(fp, " ");
for(i=k;i>=1;i--)
{
a=a+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(a%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
fprintf(fp, "\n");
n=n+2;
fprintf(fp, "P ");
}
goto lp3;
}
}
}
lp3: for(n=n;n<=M;n=n+2)
{
for(I=n;I<=n+1;I++)
{

```

```

s=1;
h=1;
z=2*3.14159*RRy[I]/360;
lp4: if(z<=9)
{z=z*2;
s=s*2;
h=s;
goto lp4;
}
if(s>1) {s=s;}
else {s=1;}
lp5: if(z>18)
{
z=z/2;
s=s/2;
h=s;
goto lp5;
}
g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
if(k%2==0) {k1=k/2;}
else {k1=k/2+1;}
printf("%d ",k);
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{
j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{
m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
printf(" %d ",I);
if(I%2!=0)
{
for(i=1;i<=k1;i++)
{
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);

```

```
if(i%5==0)
{
    fprintf(fp, "\n");
    fprintf(fp, " ");
}
}
fprintf(fp, "\n");
}
else
{
    a=0;
    fprintf(fp, " ");
    for(i=k1; i>=1; i--)
    {
        a=a+1;
        fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
        if(a%5==0)
        {
            fprintf(fp, "\n");
            fprintf(fp, " ");
        }
    }
    fprintf(fp, ",");
}
}
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, "P ");
for(I=n; I<=n+1; I++)
{
    s=1;
    h=1;
    z=2*3.14159*RRy[I]/360;
lp6: if(z<=9)
    {
        z=z*2;
        s=s*2;
        h=s;
        goto lp6;
    }
    s=1;
lp7: if(z>18)
    {
        z=z/2;
        s=s/2;
        h=s;
        goto lp7;
    }
}
```

```

}
g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
if(k%2==0) {k1=k/2;}
else {k1=k/2+1;}
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{
j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{
m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if(I%2!=0)
{
for(i=k1;i<=k;i++)
{
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
if(i%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
fprintf(fp, "\n");
}
else
{
a=0;
fprintf(fp, " ");
for(i=k;i>=k1;i--)
{
a=a+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
if(a%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
}
}
}
}

```

清华大学学位论文用纸

```
        fprintf(fp, " ");
    }
}
fprintf(fp, ";");
}
}
fprintf(fp, "\nP ");
}
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, "E ");
fclose(fp);
getchar();
}

CC(L,F,R,RR,M,N)
float L,F,R,RR[1000];
int N,M;
{
int I,K;
float NA,V;
M=(R*R*N/(2*L*F))*1000;
NA=2*(R/F);
K=M-1;
V=(sqrt(2*M*L*F/(1000*N)))*1000-(sqrt(2*(M-1)*L*F/(1000*N)))*1000;
if(V>0)
{ printf("The original FZP's parameter:\n");
  printf("F(mm)=%f, R(mm)=%f, V(um)=%f, NA=%f, m=%d\n\n",F,R,V,NA,M);
  printf("The last mask's radius values:\n");
  for(I=1;I<=M;I++)
  {
    RR[I]=sqrt(2*I*L*F/(1000*N))*1000;
    printf("R[%4d]=%8.2f um ",I,RR[I]);
    if(I%4==0) {printf("\n");}
  }
  printf("\n");
}
else
{ printf("The NA value(%f) is too big for producing the FZP\n",NA);
  printf("Please input the new parameters.");
  exit(0);
}
return(M);
}
```


2. 被截取图形数据转换程序清单 (CHJ.C)

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

main()
{
    FILE *fp;
    float YCC();
    int i,k,k1,n,j=0,a,b;
    int N,M,I;
    long int x[1000],y[1000];
    float NA,V,z,m,h,s=0,g;
    float RRx[1000],RRy[1000];
    float L,Fx,Fy,Rx,Ry;
    printf("This program is used to design the Fresnel Zone Plate.\n");
    printf("1. Please input the wavelength(um): \n");
    scanf("%f",&L);
    printf("\n");
loop: printf("2. Please input the focal length(mm):(Fx,Fy)\n");
    printf("Fx=");
    scanf("%f",&Fx);
    printf("\n");
    printf("Fy=");
    scanf("%f",&Fy);
    printf("\n");
    printf("3. Please input the maximum radius(mm):(Rx,Ry)\n");
    printf("Rx=");
    scanf("%f",&Rx);
    printf("\n");
    printf("Ry=");
    scanf("%f",&Ry);
    printf("\n");
    printf("4. Please input the step levels:(N)\n");
    printf("\n N=");
    scanf("%d",&N);
    printf("\n");
    if((fp=fopen("d1.dat","w"))==NULL)
    {
```

```

printf("cannot open the output file");
exit(0);
}
M=CC(L,Fx,Rx,RRx,M,N);
CC(L,Fy,Ry,RRy,M,N);
printf("%d", M);

fprintf(fp,"L1;");
fprintf(fp,"n");
for(n=1;n<=M;n=n+2)
{
fprintf(fp,"P ");
for(I=n;I<=n+1;I++)
{
a=0;
s=1;
h=1;
z=2*3.14159*RRy[I]/360;
lp1: if(z<=12)
{z=z*2;
s=s*2;
h=s;
goto lp1;
}
if(s>1) {s=s;}
else {s=1;}
lp2: if(z>24)
{
z=z/2;
s=s/2;
h=s;
goto lp2;
}
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{ j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{m=90;
x[j+1]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
}

```

```

printf("cannot open the output file");
exit(0);
}
M=CC(L,Fx,Rx,RRx,M,N);
CC(L,Fy,Ry,RRy,M,N);
printf("%d", M);

fprintf(fp,"L1;");
fprintf(fp,"\n");
for(n=1;n<=M;n=n+2)
{
fprintf(fp,"P ");
for(I=n;I<=n+1;I++)
{
a=0;
s=1;
h=1;
z=2*3.14159*RRy[I]/360;
lp1: if(z<=12)
{z=z*2;
s=s*2;
h=s;
goto lp1;
}
if(s>1) {s=s;}
else {s=1;}
lp2: if(z>24)
{
z=z/2;
s=s/2;
h=s;
goto lp2;
}
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{ j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
}

```

```
g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
printf("%d ",k);
if(k<=90)
{
printf(" %d ",I);
if(I%2!=0)
{
if(RRx[I]<=400)
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(i%5==0)
{
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp," ");
}
}
}
else
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
if(x[i]>40000&& x[i+1]<=40000)
{
printf("x %ld ",x[i]);
x[i]=40000;
y[i]=RRy[I]*sin(acos(400/RRx[I]))*100;
printf("y %ld ",y[i]);
m=i;
b=0;
goto w1;
}
}
}
w1: for(i=m;i<=k;i++)
{
b=b+1;
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(b%5==0)
{
fprintf(fp,"\n");
}
}
}
```

```
fprintf(fp, " ");
}
}
}
}
fprintf(fp, "\n");
}
if(I%2==0)
{
fprintf(fp, " ");
if(RRx[I]<=400)
{
for(i=k;i>=1;i--)
{
a=a+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
if(a%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
}
}
else
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
if(x[i]>40000&& x[i+1]<=40000)
{
x[i]=40000;
y[i]=RRy[I]*sin(acos(400/RRx[I]))*100;
m=i;
b=0;
goto w2;
}
}
}
w2: for(i=k;i>=m;i--)
{
b=b+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
if(b%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
}
```

```

    }
    fprintf(fp, "\n");
}
else
{
    if(I%2==0)
    {
        h=h*2;
        j=0;
        for(m=0;m<=90;m=m+h)
        { j=j+1;
          x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
          y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
        }
        if((m-90)<=h)
        {m=90;
          x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
          y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
        }
        g=90.0/h-((int) (90.0/h));
        if(g==0)
        {k=90/h+1;}
        else
        {k=90/h+2;}
        printf("%d %d ",k,I);
        fprintf(fp, " ");
        if(RRx[I]<=400)
        {
            for(i=k;i>=1;i--)
            {
                a=a+1;
                fprintf(fp, "%-6ld%-6ld", x[i], y[i]);
                if(a%5==0)
                {
                    fprintf(fp, "\n");
                    fprintf(fp, " ");
                }
            }
        }
        else
        {
            for(i=1;i<=k;i++)
            {
                if(x[i]>40000&& x[i+1]<=40000)

```

清华大学学位论文用纸

```
{
  x[i]=40000;
  y[i]=RRy[I]*sin(acos(400/RRx[I]))*100;
  m=i;
  b=0;
  goto w3;
}
}
w3: for(i=k;i>=m;i--)
  {
  b=b+1;
  fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
  if(b%5==0)
  {
  fprintf(fp,"\n");
  fprintf(fp," ");
  }
  }
  }
  fprintf(fp,";\n");
  n=n+2;
  fprintf(fp,"P ");
  }
  goto lp3;
}
}
}
lp3: for(n=n;n<=M;n=n+2)
  {
  for(I=n;I<=n+1;I++)
  {
  s=1;
  h=1;
  z=2*3.14159*RRy[I]/360;
lp4: if(z<=12)
  {z=z*2;
  s=s*2;
  h=s;
  goto lp4;
  }
  if(s>1) {s=s;}
  else {s=1;}
lp5: if(z>24)
  {
  z=z/2;
```

```
s=s/2;
h=s;
goto lp5;
}
g=90.0/h-((int) (90.0/h));
if(g==0)
{k=90/h+1;}
else
{k=90/h+2;}
printf("%d ",k);
j=0;
for(m=0;m<=90;m=m+h)
{
j=j+1;
x[j]=(long int)(RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j]=(long int)(RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
if((m-90)<=h)
{
m=90;
x[j+1]=(long int) (RRx[I]*cos(m*3.141592654/180)*100);
y[j+1]=(long int) (RRy[I]*sin(m*3.141592654/180)*100);
}
printf(" %d ",I);
if(I%2!=0)
{
if(RRx[I]<=400)
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(i%5==0)
{
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp," ");
}
}
}
else
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
if(x[i]>40000&&x[i+1]<=40000)
{
x[i]=40000;

```


清华大学学位论文用纸

```
y[i]=RRy[I]*sin(acos(400/RRx[I]))*100;
m=i;
b=0;
goto w4;
}
}
w4: for(i=m;i<=k;i++)
{
b=b+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(b%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
}
fprintf(fp, "\n");
}
else
{
a=0;
fprintf(fp, " ");
if(RRx[I]<=400)
{
for(i=k;i>=1;i--)
{
a=a+1;
fprintf(fp, "%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
if(a%5==0)
{
fprintf(fp, "\n");
fprintf(fp, " ");
}
}
}
}
else
{
for(i=1;i<=k;i++)
{
if(x[i]>40000&&x[i+1]<=40000)
{
x[i]=40000;
y[i]=RRy[I]*sin(acos(400/RRx[I]))*100;
m=i;

```

清华大学学位论文用纸

```
    b=0;
    goto w5;
}
}
w5: for(i=k;i>=m;i--)
{
    b=b+1;
    fprintf(fp,"%-6ld%-6ld",x[i],y[i]);
    if(b%5==0)
    {
        fprintf(fp,"\n");
        fprintf(fp," ");
    }
}
fprintf(fp,"");
}
}
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp,"P ");
}
fprintf(fp,"\n");
fprintf(fp,"E ");
fclose(fp);
getchar();
}

CC(L,F,R,RR,M,N)
float L,F,R,RR[1000];
int N,M;
{
    int I,K;
    float NA,V;
    float RC[1000];
    M=(R*R*N/(2*L*F))*1000;
    NA=2*(R/F);
    K=M-1;
    V=(sqrt(2*M*L*F/(1000*N)))*1000-(sqrt(2*(M-1)*L*F/(1000*N)))*1000;
    if(V>0)
    { printf("The original FZP's prameter:\n");
      printf("F(mm)=%f, R(mm)=%f, V(um)=%f, NA=%f, m=%d\n\n",F,R,V,NA,M);
      printf("The last mask's radius values:\n");
      for(I=1;I<=M;I++)
      {
```

清华大学学位论文用纸

```
RR[I]=sqrt(2*I*L*F/(1000*N))*1000;
printf("R[%4d]=%8.2f um ",I,RR[I]);
if(I%4==0) {printf("\n");/*getch();*/}
}
printf("\n");
for(I=1;I<=M-1;I++)
{
RC[I]=RR[M]-RR[I];
printf("RC[%4d]= %5.1f um ",I,RC[I]);
if(I%4==0) {printf("\n");}
}
}
else
{ printf("The NA value(%f) is too big for producing the FZP\n",NA);
printf("Please input the new parameters.");
exit(0);
}
return(M);
}
```

附录四. 二元消象散准直器件发散角计算程序清单 (CX.C)

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

main()
{
    FILE *fp,*fg;
    float T[200],A[200],H[200];
    int n,i,j,l;
    float dy,dx,t,a,b,h;
    printf("Please input the number(n):\n");
    printf("n=");
    scanf("%d",&n);
    printf("\n");
    if((fp=fopen("dx.dat","w"))==NULL)
    {
        printf("cannot open the output file");
        exit(0);
    }
    fprintf(fp,"The result of the test:\n");
    fprintf(fp,"  l  dx  t  a  2a  h  \n");
    if((fg=fopen("dy.dat","w"))==NULL)
    {
        printf("cannot open the output file");
        exit(0);
    }
    fprintf(fg,"The result of the test:\n");
    fprintf(fg,"  l  dy  t  a  2a  h  \n");
    for(i=1;i<=n;i++)
    {
        printf("Please input the distance(mm):\n");
        printf("l=");
        scanf("%d",&l);
        printf("\n");
        printf("Please input the Radius dy(mm):\n");
        printf("dy=");
        scanf("%f",&dy);
        printf("\n");
        printf("Please input the Radius dx(mm):\n");
```

清华大学学位论文用纸

```
printf("dx=");
scanf("%f",&dx);
printf("\n");

T[i]=(dx-1)/(2*1);
H[i]=atan(2*T[i])*1000;
A[i]=(H[i]*180)/(2*3.14*1000);
fprintf(fp,"%6d %5.3f %8.6f %8.6f %8.6f %5.3f\n",l,dx,T[i],A[i],2*A[i],H[i]);
/*fprintf(fp,"\n");*/

T[i]=(dy-1)/(2*1);
H[i]=atan(2*T[i])*1000;
A[i]=(H[i]*180)/(2*3.14*1000);
fprintf(fg,"%6d %5.3f %8.6f %8.6f %8.6f %5.3f\n",l,dy,T[i],A[i],2*A[i],H[i]);
/*fprintf(fg,"\n");*/
}
fclose(fp);
fclose(fg);
}
```