

二元光学——90年代的光学技术

陈 岩 松

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

二元光学是在计算全息与相息图研究发展的基础上新兴的一个光学学科分支。在光的衍射原理的基础上,通过计算机设计与微电子加工技术,人们研制成二元光学器件。它是一种片基表面深度为亚微米级的台阶形分布的纯相位器件,可以微型阵列化与集成化。它在激光波面校正、激光相干合成、微透镜阵列、红外光系统、光雷达、光通信、光互连与光计算等方面有非常良好的应用前景。

Abstract

Binary optics is a new branch of optics that has developed from research on computer-generated holograms and kinoforms. Based on the optical diffraction principle, a binary optics device is produced by means of computer design and microelectronic technology, and can be fabricated in micro-array or as an integrated device. Its surface appears to be covered with an array of sub-micron deep steps. Promising applications are envisaged in the field of laser phase correction, laser coherent synthesis, microlenses, infra-red systems, ladar, optical communications, optical interconnections and optical computing.

近年来,在光学领域中诞生了一个新兴的学科分支——二元光学,它被人誉称为90年代的光学技术。二元光学是随着计算机精密光学设计和半导体微电子学技术工艺的发展而迅速兴起的。二元光学器件以光的衍射为其工作原理,采用光学波面设计和采用微电子工艺技术研制而成。这类器件具有其他光学器件不可比拟的特点:微型化与轻型化,可复制,价格低廉,可设计制作任意形状的波前器件,可把多种功能集中于一个器件等。因此,二元光学的发展必将促进光学设计从折射向衍射发展,光学元件从宏观与散件向微型与集成发展。基于二元光学的这种特性与发展势头以及良好而广泛的应用前景,二元光学这一新兴的学科分支必将迅速发展。为了促进二元光学在我国的兴起与发展,本文试图将有关二元光学这个目前尚不为人们所熟悉的学科的基本内容向读者作一介绍。

多少年以来,光学一直以透镜、反射镜、棱

镜等基本元件作为其基础,且这些元件均是以光的反射和折射原理为理论基础进行工作的,然而,自从全息术出现以后,以衍射原理为基础的光学及其元件迅速发展,特别是计算全息的出现,使得衍射光学及其元件的设计有了变革性的进展。采用计算全息手段,可以设计产生任何形状的光波波前元件,这是以前任何方法所不能做到的。但是,计算全息与光学全息一样,一般都使用离轴的一级衍射光,这不仅限制了视场,而且光的利用效率一般都不甚高,因此使它在许多实际问题中的应用受到限制。

于是,光学研究工作者面临的任务是,寻找一种同轴的、能充分利用光能且能产生任意形式光波波前的衍射光学元件。这种衍射光学元件的早期雏形就是所谓的相息图(kinoform)^[1-3],即用透明物体(如玻璃)的表面起伏直接(并且仅仅)表征光波的相位。相息图除片基的吸收与反射损耗外,所有光波均极其理想地衍射到像上去。所以,它是一种同轴再现波

前、具有极高衍射效率(理论上可达100%)的
光学元件,是一种理想的光学元件。但是,研制
它的技术工艺十分复杂,要求也很高,因此进展
一直比较缓慢。

最近几年来,美国麻省理工学院林肯实验
室与珀金-埃尔默公司等机构^[4-6]利用高速发展
起来的半导体微电子技术工艺与设备(电子束
与离子束曝光刻蚀,精密定位对准设备等),研
制成功了用于激光束扫描的二元微透镜列阵和
改变校正波面相位等各种二元光学器件。他们
的研究工作,为二元光学学科的形成与发展作
出了贡献。

一、原理

研制二元光学器件,一般是通过计算机设
计波面相位,用微电子工艺技术在片基表面经
刻蚀产生二个或多个深度等级的台阶分布,是
纯相位和同轴再现的,具有极高衍射效率的一
类光学器件的设计与研制。在这个意义上,它
涉及的问题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等。让
我们用一维相位分布的图示形式(见图1)形象
地说明二元光学的含义。

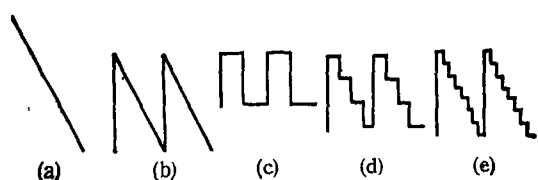


图1 相位的二元表示

(a) 线性相位分布; (b) 相息图; (c) 2^1 个相位等
级; (d) 2^2 个相位等级; (e) 2^3 个相位等级

图1(a)是一线性相位分布,波前以 2π 相
位周期往来折回,形成相息图,见图1(b); 每
一相位周期如以两个等级表示,见图1(c),则
为两值型器件;如以四个等级[图1(d)],八
个等级[图1(e)]……表示,则为多值型器件。
相位等级一般可以表示成 2^n ($n = 1, 2, \dots$) 的
形式;与此相应的是,一般二元光学器件表面的

台阶深度等级数目也是 2^n 。

二元光学器件表面的台阶形分布是对连续
波面相位的分等量化表示。在物理上,这个连
续波面相位在空间经过衍射传播,在预定空间
获得实际所需要的光场分布;在设计确定这个
连续波面相位的问题上,正好是此过程的逆过
程,即从实际所需的光场求出器件表面的波面
相位分布。然而,二元光学器件表面的台阶形
分布,即连续波面相位的量化表示,使这个问
题变得有些复杂了。在理论上,这种台阶形的
边界条件,尤其是当台阶的几何尺度与光波长
相当时,问题的解决需要从求解麦克斯韦方程
入手。据报道,美国麻省理工学院的一个小组
已发展了一种在这种条件下求解麦克斯韦方程
的新数字解法。

二元光学器件的衍射效率一般是直接同表
面相位的台阶等级数相关的。用光学的标量衍
射理论计算得到的零级衍射效率表达式为

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

式中 $N = 2^n$, $n = 1, 2, \dots$ 。显然,随着相位分
等数目的增加,衍射效率也随之增加。当 $N =$
 16 时,理论衍射效率可高达 98.7% 。

按照表面相位的等级分等情况,二元光学
器件一般分成三种类型,即二值型、多值型与混
合型,如图2中(a), (b), (c)所示。二值型
器件顾名思义相位只有 0 与 π 两个相位值,表
面起伏高度与空间周期同光波长相当。且在大

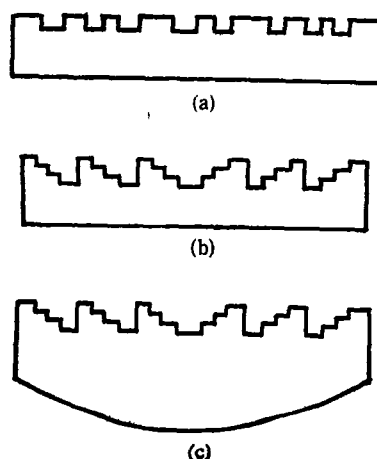


图2 二元光学器件类型

多数情况下,相位 0 与 π 的占空比是不规则的。例如 Damman 光栅^[9,10],其占空比是由衍射波前的人为要求决定的。Damman 器件虽然有高的衍射效率,但却是离轴衍射,且只能在单色光下使用,对光的偏振方向也是敏感的。此外,在此顺便提及振幅的二值型器件,这种器件的透射率(或反射率)只有二个状态值,即 0 与 1,亦即振幅为 0 与 1,如二元振幅型波带片。这种器件的衍射效率一般不高,因此只在某些特定情况下使用。

多值型器件的相位等级在 2π 范围内按 $N = 2^n$ 的形式划分,即多值型器件的相位等级可以是 4, 8, 16...。这类器件的表面台阶深度均小于光波长,空间周期却可以大于光波长。因此,它可以在准单色光下使用,并且具有极高的同轴衍射效率,对偏振方向也不敏感。

混合型器件是由多值型器件与传统的折射光学器件组合而成,即片基的一个表面做成多值型器件,而片基本身或另一块与此相配的片基则做成折射光学器件,如图 2(c) 所示。这种器件的优点除了有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。由于衍射与折射二者的色散作用在一定程度上互相补偿,整个器件对波长的变化变得更不敏感。因此,这类器件的应用性能更好些,应用范围也更广些。

二、二元光学器件的设计与研制

二元光学器件的设计与制造过程是建立在现代计算机设计与微电子工艺的高技术基础上的^[11,12]。图 3 是这一过程的流程框图。

第一步,按照实际使用要求(包括波长范围、孔径、焦距、分辨率等),通过计算机设计确定器件表面的相位分布。第二步,按照相位的分等数 N ,通过半导体集成电路制版工艺等方法,研制 n 个二元振幅型掩膜。这 n 个振幅型掩膜的空间分布是按照这种方式设计的,即在第三步中使用它们时可以产生出 N 个相位等级的表面台阶分布。第三步,把掩膜覆盖于涂了

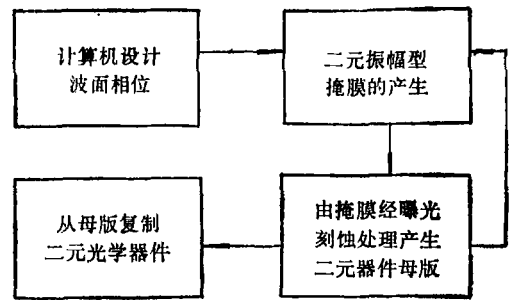


图 3 研制二元光学器件的流程框图

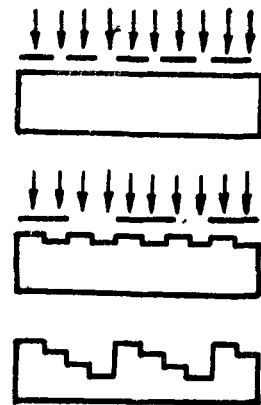


图 4 二个掩膜产生四个相位等级

感光层的片基上,并对其进行曝光与处理,然后,通过由计算机控制的电子束或离子束刻蚀机,在片基上产生符合设计要求的表面台阶起伏。这一过程对 n 个掩膜要重复做 n 次,并且每次掩膜的位置都要求严格地定位与对准,最终才能产生出符合要求的具有 N 个相位等级的母版。图 4 是 $n = 2$ 时这个框图程序过程的简单示意。最后一步,通过母版复制大量的二元光学器件。从上面叙述的步骤中不难看出,二元光学对技术工艺和仪器设备的要求是很高的,例如片基表面刻蚀深度的精度要达几个 nm 数量级,掩膜的定位对准精度要达到 $0.1\mu\text{m}$ 左右。因此,要设计和研制出高质量的二元光学器件并非易事。

三、应用例子

二元光学器件的应用将是十分广泛的,这

是因为它具有如下优点：可大量复制，可集多种功能于一身，可产生任意形状的波面元件，可充分利用光能，可提供价廉物美的器件等。然而，由于它是一种衍射型器件，势必与光波长密切相关，且相位分等量化也会造成一些噪音，因此尽管它将有广泛、良好的应用前景，将来它也不能完全代替传统的折射光学元件。下面简单介绍二元光学器件的几种应用。

1. 激光束灵巧扫描器^[13,14]

这是一个由二元正微透镜列阵和二元负微透镜列阵组成的扫描器（见图5）。由图5可见，两个列阵以共焦形式组合，当其中之一作横向移动时，透过它们的激光束被扫描。该扫描器的各参数如下：微透镜直径为 $200\mu\text{m}$ ，焦距为 $990\mu\text{m}$ ，相位等级数为8，衍射效率95%，每个列阵包含约60000个微透镜，扫描视场角为 11.5° ，扫描速率为35Hz。

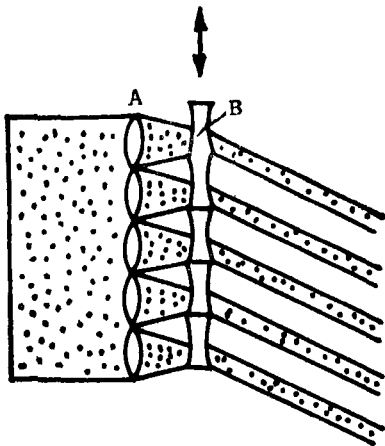


图5 激光灵巧扫描器
A——正微透镜列阵； B——负微透镜列阵

2. 激光束波面像差校正器^[15-17]

使用二元光学器件校正激光束波面像差的例子较多。其一，利用二元微透镜列阵消除半导体激光器列阵输出的激光束像差，使各激光器的输出光束达到相干叠加，从而能够得到高功率平行光输出。由于激光器列阵中各半导体激光器的像差在 x 和 y 两个方向上的焦距一般都是不同的，所以与此对应的每个微透镜必须是各有差异的椭圆透镜。用这种方法使七个半

导体激光器的列阵相干叠加获得高功率输出。图6是这种工作原理的示意图，其中使用的二元微透镜的相位等级为4，衍射效率81%，椭圆率为0.37。其二，在施密特望远镜中配置二元光学校正板（相位等级为8），能很好地消除球面像差，校正前后的波面干涉图表明，校正后的球差已基本消除。其三，在 CO_2 激光雷达光束中加进二元相位衍射光栅（相位等级为2），使高斯型分布激光束变换成中心均匀分布的激光束，从而改善了激光雷达的性能，其中光的转换效率约为90%。

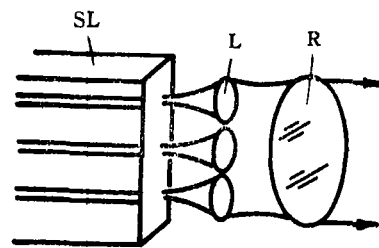


图6 二元微透镜阵列用于半导体激光阵列
SL——半导体激光阵列； L——微透镜阵列；
R——输出腔镜

3. 纯二元相位滤波器

在用相关方法的模式识别中，最近对纯相位二值滤波器的研究很多，论文、报道内容十分丰富，用它能提高信噪比和光的使用率。由于这方面内容丰富，适宜于另文详述，不再此赘述。

4. 一些其他方面的应用举例^[18]

(1) 莱福枪上的二元光学夜视器：其主要性能是可宽带使用和具有大数值口径；优点是低成本（可大量复制），携带轻便。

(2) 飞行员头盔显示器：其特点是重量轻，单色显示且显示清晰，光能损耗小等。

(3) 光盘的读出头：它的优点是有大数值孔径，重量极轻，可进行偏振方向选择。

(4) Damman 光栅分束器：其光能利用率高，各光束强度均匀性好。

[1] L. B. Lesem et al., *IBM J. Res & Develop.*, 13 (1969), 150.

[2] 陈岩松等, *激光*, 6-10(1979), 28.

[3] 陈岩松等, *光学学报*, 1(1981), 411.

第四届北京分析测试学术报告会简讯

第四届北京分析测试学术报告会于1991年10月19日至22日在北京科学会堂举行。这是一次国际性的盛会。参加会议的有25个国家和地区的400多位学者,其中我国大陆以外的参加者有100余人。学术报告会分为电子显微学、质谱学、光谱学、色谱学、波谱学和电化学六个专业分别进行。国内外的55名著名学者在会上作了特邀报告,反映了分析测试领域内最活跃的前沿研究课题的新进展。特邀报告内容包括分析测试新方法、新仪器及其在物理、化学、生物学、医学等学科中的新应用。会议的论文摘要(英文稿)编入相应的六本书中,已由科学出版社出版。与学术报告会同

时,在北京展览馆还举行了分析测试仪器的展览会。有13个国家与地区的110多家仪器厂商参加了展览会,展出了先进的、适用的分析测试仪器与设备。值得提出的是,我国参展的仪器设备数量上有较大增长,质量上也有很大的提高,显示了我国仪器技术水平的迅速提高。展览会上,参展厂商派出他们的专家举办了42场专题技术交流报告会,介绍了分析测试仪器的最新技术与最新产品。展览会期间还出版了二期BCEIA快报。会议宣布,第五届国际北京分析测试学术报告会及展览会(BCEIA)将于1993年10月11日至16日在北京举行。(孟庆安)

第21届国际穆斯堡尔谱学会议在南京召开

经国际纯粹和应用物理联合会(IUPAP)、国际纯粹和应用化学联合会(IUPAC)、联合国国际原子能委员会(IAEA)和国际理论物理中心(ICTP)批准,第21届国际穆斯堡尔谱学会议(ICAME'91)于1991年9月16日至20日在南京举行,会议由南京大学和江苏省科学技术协会主办。出席会议的有来自32个国家和地区的270位代表,其中70位代表来自我国。

穆斯堡尔谱学是一个新兴的交叉领域。它研究伽玛射线的无反冲共振吸收。它是从核物理领域发展起来的,虽然只有短短30年历史,但已广泛应用于核物理、固体物理、化学、分子生物学、地质学、材料科学等领域。它是迄今能量分辨本领最高的物理手段,便于研究原子核与核外环境间的超精细相互作用。

穆斯堡尔谱学是目前一个活跃的科学领域。国际穆斯堡尔谱学会议是在该领域的最高水平的学术会议,每二年一届。此外还有国际穆斯堡尔谱学工业应用系列会议,以及各大洲的区域性国际会议,可见该领域之兴旺。自70年代起,我国穆斯堡尔谱学研究发展很快,现有80余个实验室,无论是基础研究还是应

用研究,都取得了显著成果,在国际上已居于前列。

本次国际会议的主题包括:穆斯堡尔谱学理论和实验的新发展,穆斯堡尔谱学和其他方法的关系,以及穆斯堡尔谱学的应用。在应用领域有以下方面内容:(1)化学结构和化学键;(2)磁学和磁性材料;(3)金属和合金;(4)非晶材料;(5)催化、腐蚀和表面;(6)辐照损伤和离子注入;(7)矿物学、地质学和考古学;(8)晶格动力学和相变;(9)弛豫和扩散;(10)超导;(11)核嬗变的后效应;(12)生物体系;(13)相干现象;(14)低维体系和晶簇;(15)工业应用。大会收到论文600余篇,经评选其中48篇被列为大会报告。我国科学家作了六篇大会报告,其中二篇为大会特邀报告。会议论文将选出其中400篇,由国际著名杂志“*Hyperfine Interactions*”分四卷于1992年五月出版。

这是一次成功的大会。国际著名穆斯堡尔谱学专家U. Gonser教授作了大会总结。第22届国际穆斯堡尔谱学会议(ICAME'93)将于1993年8月在加拿大温哥华市举行。

(夏元复)

- [4] T. J. McHugh et al., *SPIE*, **884**(1988), 100.
[5] S. C. Baber, *SPIE*, **1052**(1989), 166.
[6] K. M. Flood et al., *SPIE*, **1052**(1989), 91.
[7] P. A. Mokry, *SPIE*, **1052**(1989), 163.
[8] R. W. Smith et al., *SPIE*, **1052**(1989), 77.
[9] H. Damman and K. Gortler, *Opt. Commun.*, **3** (1971), 312.
[10] J. N. Mair, *SPIE*, **1052**(1989), 41.
[11] J. Logue and M. L. Chisholm, *SPIE*, **1052** (1989), 19.
[12] T. A. Fritz and J. A. Cox, *SPIE*, **1052** (1989),

25.
[13] W. Goltsov and M. Holz, *Opt. Eng.*, **29** (1990), 1392.
[14] W. Goltsov and M. Holz, *SPIE*, **1052**(1989), 131.
[15] J. R. Leger et al., *SPIE*, **884**(1988), 82.
[16] T. J. McHugh and D. A. Zweig, *SPIE*, **1502** (1989), 85.
[17] W. B. Veldkamp and C. J. Kastner, *Appl. Opt.*, **21**(1982), 345.
[18] J. A. Cox, *SPIE*, **884**(1988), 127.