

衍射光学元件的制作和应用

谭新 董碧珍

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

衍射光学是基于光的衍射原理,利用计算机设计衍射图,并通过微电子加工技术直接在光学材料上制作表面浮雕的元件,从而能够灵活地控制波前位相和光线偏折。衍射光学是在模拟全息术(analog holography),计算全息图和相息图(computer-generated holograms and kinoforms)的基础上发展起来的新型光学分支。随着微电子加工工艺的革新和高性能计算机的出现,衍射光学引起了广泛的关注和兴趣,其技术业已应用到各个领域之中。将着重介绍衍射光学元件的制作和复制方法以及具体的应用。

关键词 衍射光学,表面浮雕,计算机产生全息图和相息图

Abstract

Diffractive optics refers to the technology of producing surface-relief, and computer-generated diffractive patterns directly on the optical material by means of fabrication technology in the microelectronics industry, which offers a very flexible way of controlling and shaping of phase fronts or bending of rays. It is a newly developed branch in optics based on the analog holography and computer-generated holograms and kinoforms. With the revolution of fabrication technology in electronics industry and the improvement of computer performance that permits the use of sophisticated design methods, diffractive optics has aroused great interest and may find wide applications. In this article, we mainly introduce the fabrication and replication technology of diffractive optical elements and some of their specific applications.

Key words diffractive optics, surface-relief, computer-generated holograms and kinoforms

传统的光学是基于光束的折射和反射原理,利用透镜、反射镜、棱镜等诸元件来进行设计和实现各种光学功能的。由于衍射效应总是导致光学系统的最高的分辨率受到限制,因此除了光波的色散性质可应用于光谱学之外,传统光学总是尽量地避免衍射效应造成的不利影响。然而,60年代模拟全息术和计算全息图以及相息图的发明和成功地制作引起了观念上的重大变革。人们认识到应用这些新型的元件,基于光学的衍射原理,可方便灵活地控制光路和实现多种光学功能,从而开辟了光学系统设

计的新天地。到了70年代,尽管计算全息图和相息图的技术日臻完善,但是由于制作在可见光和近红外光波段内具有高衍射效率的超精细结构元件仍面临困难,因而限制了衍射光学元件的实际应用范围。与此同时,微电子工业在制作技术方面也经历了一场革命,光学和电子束制版(optical and electron-beam lithography)以及干刻(dry etching)技术逐渐发展成熟,已成为制作精细结构元件的完善工具。80年代,各种新型的加工制作方法不断涌现,能够制作高质量和多功能的衍射光学元件,从

而极大地推动了衍射光学的发展^[1,2]。随着微结构元件的尺度缩小,当其精细结构周期可与波长相比较时,传统的标量衍射理论不再适用,带来了设计理论的变革。人们应用矢量衍射理论实现元件的设计,推动了基础光学理论研究。衍射光学元件以其能够灵活控制波前,集多功能于一体和可复制的优良特性使光学系统及器件向轻型化、微型化和集成化发展。这种新型元件可广泛应用于激光波面校正,光束剖面成形,光束阵列发生器,光学互连,光学平行计算,微型光通信等方面^[3-8]。衍射光学的研究已成为90年代光学的前沿课题。本文着重介绍衍射光学元件的制作过程和复制方法以及相关的应用。有关设计理论方法,请参阅文献[9]。

一、衍射光学元件的制作和复制方法

1. 衍射光学元件的制作

衍射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案写到感光材料上,再通过离子束刻蚀技术,将感光层上的图案复制到衬底片基上,最终形成深度为亚微米量级的表面刻蚀结构。它可以是一个纯相位片,也可以是一片刻有衍射图案的透镜或二者结合。衍射元件分为台阶式量

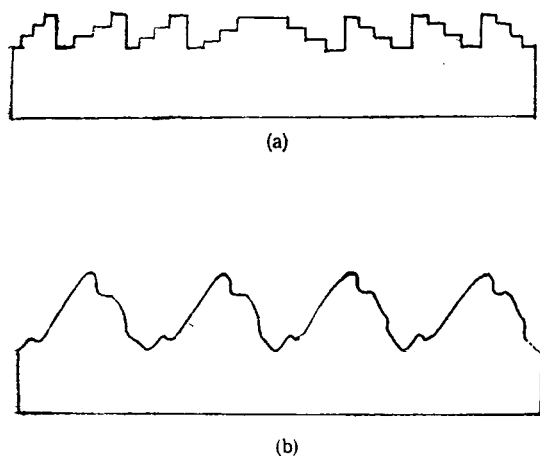


图1 衍射光学元件的两种类型
(a) 台阶式分布; (b) 连续分布

化分布和连续的刻蚀深度分布两类结构,如图1所示。

衍射光学元件的制作分为先制作掩模而后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案变换成衬底上的三维结构。制作过程中首先需要制作单个或多个预先设计的二元掩模。(binary mask)二元掩模是通过掩模基片上的感光胶进行有控制的曝光和显影获得。制作掩模的常规方法是利用半导体微电子加工技术。例如,用电子束仪上的电子束曝光技术或图样产生器的快速光学曝光技术,可以制作出精细结构为 $0.25\mu\text{m}$ 的高质量掩模。也可利用商业化的桌面制版技术(desktop publishing)^[10],通过特殊软硬件、激光打印机以及可缩小的光学照相机,实现快捷而低廉的相当高精度的二元掩模制作。

(1) 利用掩模制作衍射光学元件

(a) 深紫外线逐级缩减式制版刻蚀方法(deep-ultraviolet Reduction stepper lithography)^[11]:图2给出此方法的具体加工过程。

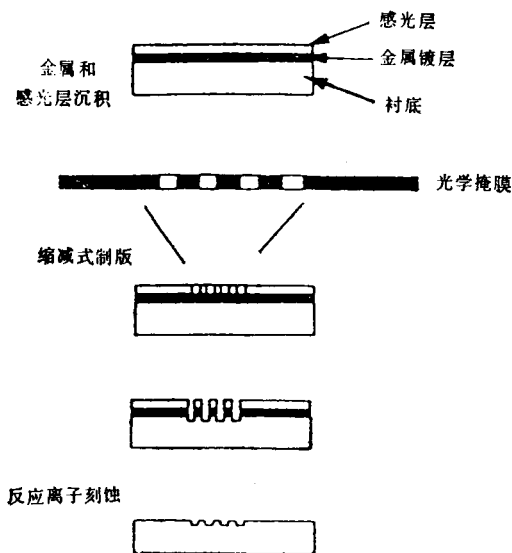


图2 深紫外线缩减式制版刻蚀方法制作衍射光栅的加工过程^[11]

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图案缩小后投影到衬底

上。衬底上镀有金属层和对紫外光敏感的感光层。曝光后经过烘烤后处理和湿显影法，在感光层中形成二维衍射图。然后通过多步的反应离子刻蚀方法：应用等离子体除去显影区中多余感光层；进行等离子体对金属层刻蚀；等离子体氧化物刻蚀；等离子体原位感光层剥离以及湿化学刻蚀法除去金属镀层，最后在衬底上形成所需的三维结构。通过控制曝光系统的聚焦和曝光量来调节刻蚀结构的参数；通过调控刻

蚀系统中等离子气体的组分比例，气体流速，刻蚀力 (etching force) 的强弱来实现各向异性的刻蚀，使得最终台阶边缘的垂直度好。

(b) 光学触式制版刻蚀方法 (optical contact lithography)^[11]：这种方法与第一种十分类似，不同之处在于掩模和衬底接触，图案曝光投影时不缩小，同时感光材料的类型不同，不再是紫外光敏材料。其加工过程如图 3 所示。

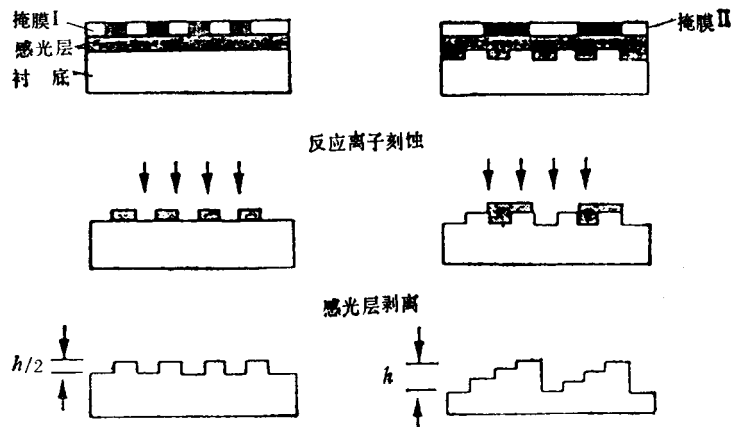


图 3 利用光学触式制版刻蚀方法制作二级和多级衍射光栅的加工过程^[11]

利用上述这两种有掩模的光学制版刻蚀方法可以制作二级或多级台阶式衍射位相元件。制作 2^k 阶的衍射元件通常需要 k 个掩模和进行 k 次上述刻蚀过程，而且每次刻蚀都要求不同掩模间图型不重叠和高精度对准位置，刻蚀只在垂直方向进行，精确控制对应位相级的深度和宽度，通常误差不超过百分之一。

(2) 无需掩模制作衍射元件

(a) 电子束直写制版刻蚀方法 (electron-beam direct write lithography)^[12]：这种方法常用来制作多级台阶式衍射光学元件，例如亚微米衍射光栅结构。电子束直写有很高空间分辨率，可以有效地制作精细结构，而且单步刻写避免了掩模间定位困难。图 4 给出了这一加工方法的示意图。

衬底基片上镀有对电子束敏感的感光层，其上又镀有防止长时曝光中充电的金属层。电子束感光材料反差度极低，通过部分曝光和部分显影技术使得不同电子束剂量得到标识，从而

控制了待刻蚀的深度分布。一旦通过电子束曝

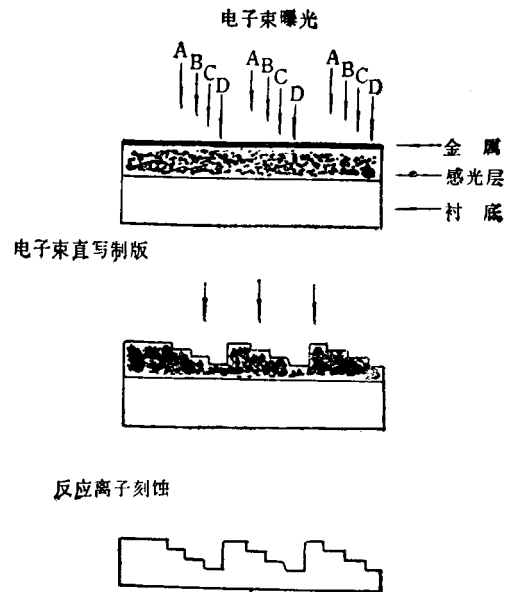


图 4 电子束直写制版刻蚀方法制作多级衍射光栅的加工过程^[12]

先将图案写到感光层后，便可利用反应离子刻蚀技术将其转移到衬底上形成三维台阶式结构。

(b) 激光束直写制版刻蚀方法(laser-beam direct write lithography)^[7]：这种制作方法通过精密的扫描系统控制，利用激光束直接在感

光层中写下连续的深度分布。由于连续的深度分布的衍射元件比台阶式量化分布的衍射元件有更高的衍射效率，因而这种技术更有吸引力，一经完善便可用于制作一系列高效的衍射相位元件和微型光学元件。图5显示了直写控制系统的组成。

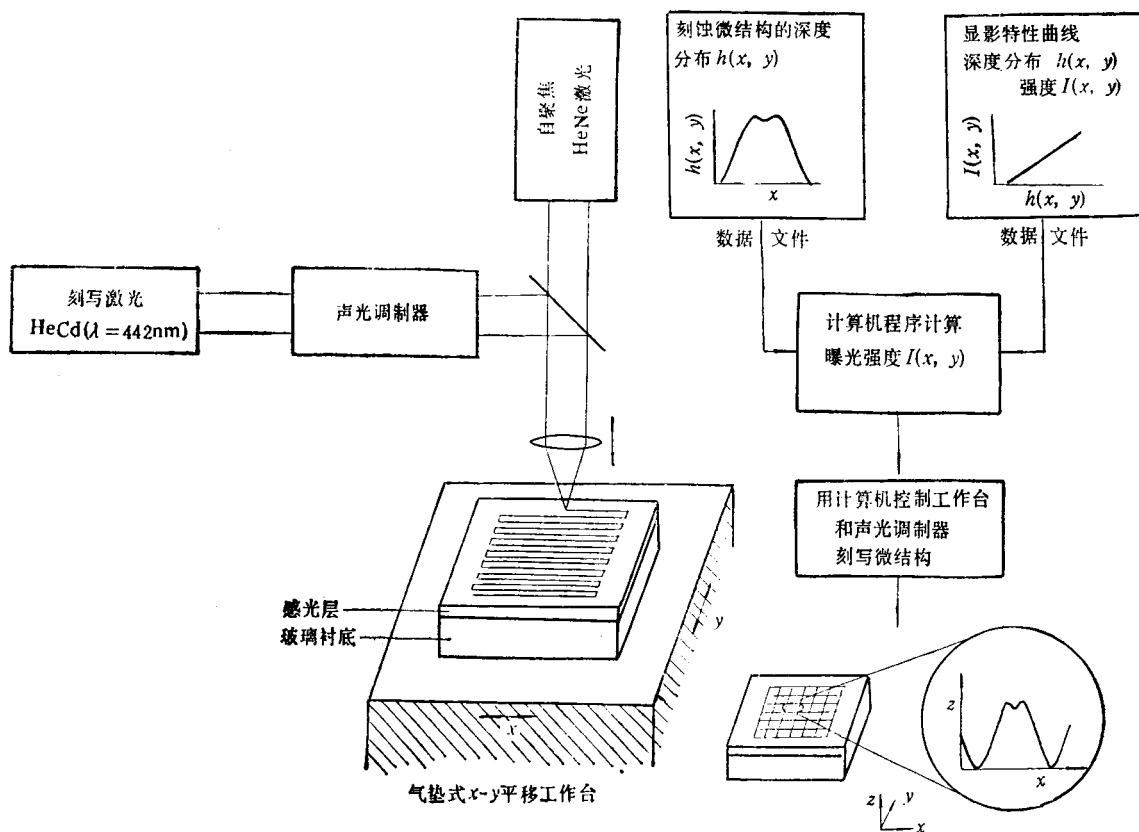


图5 激光直写系统的硬件和软件示意图^[7]

这种技术需要精密的激光束直写系统，包括激光刻写源、计算机控制系统、声光调制器、自聚焦光学系统以及可精确平移的工作台。常用的刻写光源是 HeCd 激光 ($\lambda = 442\text{nm}$)，通过竖直方向可移动的光学系统将光束引导到聚焦物镜上。带有压电装置的自聚焦系统在刻写过程中始终使激光束对扫描工作区域保持动态聚焦。带有感光层的衬底基片置于水平工作台上，工作台在计算机控制装置驱动下能以光栅扫描方式运动。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，并输入计算机通过硬

件驱动的声光调制器控制扫描过程中激光束的强度，从而进行合适的感光层曝光。激光束曝光直写后，经过显影在感光层中获得所需要的衍射图案，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。

2. 衍射光学元件的复制

衍射光学元件的一个主要优点是可以进行复制。进行复制时首先要制作金属填隙模片 (metal shim)，然后向经过光学或电子束制版的衬底感光层上蒸发 100nm 厚的银膜，制得导电镀层，再电镀镍至标准厚度 60—100 μm ，并与感光层分离，从而获得第一代镍填隙模片，称

为母模片 (master shim)。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。复制技术主要有以下三种^[7],如图6所示。

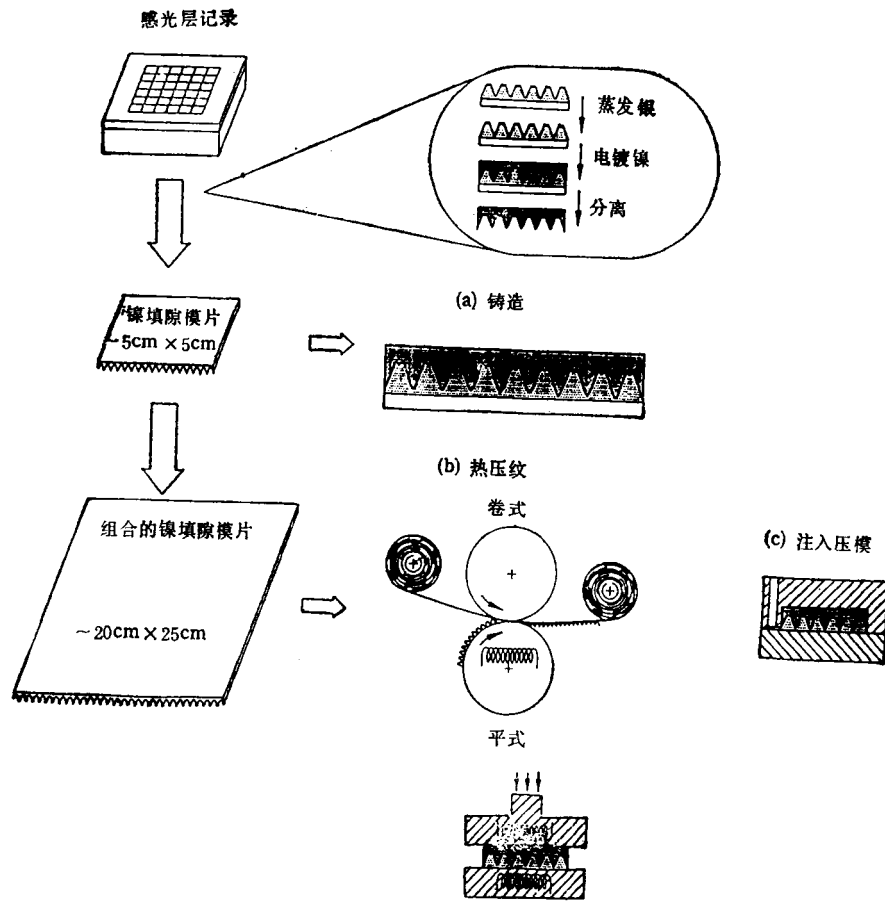


图6 由衍射元件的感光层记录进行复制的几种技术^[7]
(a) 铸造法; (b) 热压纹法; (c) 注入压模法

(1) 铸造法 (casting)

将填隙模片压到镀在玻璃衬底上的一层可固化环氧树脂薄膜上,便可制作出高质量的复制品。通常采用热固化法,也可以采用紫外光照固化法。铸造法是实验室中实现复制的最常用的方法。

(2) 热压纹法 (embossing)

这种技术有平压 (stamping) 和连续卷压 (continuous-roll embossing) 二种方式,目前常用来进行表面刻蚀微结构的商业化复制,例如保密用的全息图和作为包装商标的衍射薄膜。热塑薄膜卷压法是一种快速低廉的热压纹复制技术,目前已发展到可复制振幅达 $1\mu\text{m}$ 的微结构,通过对材料和加工条件的优化选择,能够进

行更深的微结构的复制。

(3) 注入压模法 (injection moulding)

它是用于制作精密磁盘的成熟复制技术,成本虽然较高,但复制质量优良。

二、衍射光学元件的应用

衍射光学元件应用极为广泛,如微小光学系统中的微型元件,光学及神经计算、光学平行处理系统中的光互连元件,宽场和红外成像系统中的元件,光学滤波和材料加工系统中的衍射元件,以及抗反射和偏振态控制的亚波长光栅结构。而且衍射光学元件逐渐产品化,应用于各种部门,例如用于外科医疗仪器中的双聚

焦内窥透镜,光盘读出头的 NEC 衍射元件,能矫正色差畸变的 Redimax 热聚焦透镜和用于材料加工的高效能系列长寿命的 CO₂ 聚焦透镜。这些问世不久的新产品业已赢得了很有潜力的市场。下面将介绍若干具体应用的实例。

1. 光束整形元件(beam-shaping element)^[12]

CO₂ 激光在材料加工中的重要用途之一,是用于材料的表面热处理。为了使材料表面各点升温均匀,需要一种光束整形元件,将高斯型强度分布的激光束转换成平台型强度分布。

利用传统的折射光学实现高斯—平台光束转换的唯一有效途径是制作特殊的折射元件,其表面是由对光束起不同响应作用的许多子区域组成。这样的元件既复杂又不切合实际。

利用单个的衍射光学元件便能够同时实现对入射高斯激光束的相位调制、强度变换和聚焦。利用这种衍射型光束整形器处理后的 CO₂ 激光束,可以进行高效而均匀的表面热处理。

2. 无像差畸变的扩束器(aberration-free expander)^[12]

通常使用的 CO₂ 扩束器是由两个标准折射透镜组成的,因此不可避免地引进球差。利用折射光学改善扩束器性能的方法是设计特殊功能透镜,使总体球差尽可能小。但是,此校正方法对于低 f 数的透镜不是十分有效。利用衍射光学原理,在透镜上刻蚀精心设计的衍射图案,可使得系统的球差完全消除。这种方法可以有效地应用于各种不同焦距的透镜组。衍射型无像差畸变扩束器常用于需要高质量光束的光学仪器(例如,CO₂ 干涉仪)中。

3. He-Ne 激光聚焦校正器(He-Ne corrector)^[12]

医疗仪器中长期悬而未决的难题是如何将 CO₂ “刀光束”与指示照明的 He-Ne 激光束聚焦到同一平面上。通常使用的 ZnSe 透镜在 He-Ne 激光器输出波长上有比在 CO₂ 激光器输出波长上更高的折射率,使得 He-Ne 照明光束聚焦位置更靠近透镜。所有现存的传统光学的解决办法,例如选择 KCl 透镜,也都会带来新的问题。

衍射光学技术提供了直接巧妙的解决方法。在聚焦透镜表面刻蚀出起负透镜作用的衍射图案,使得 He-Ne 可见光束聚焦点拉远而对长波段的 CO₂ 红外激光束不起作用,从而使 CO₂ “刀光束”和 He-Ne “照明光束”很好地聚于同一表面。

4. 抗反射的衍射元件(anti-reflection structured surface-relief)^[13]

为了抑制光学表面的菲涅耳反射,通常采用镀膜方法,即在光学表面镀一层具有梯度折射率的薄膜,使得两种介质的界面的光学性质近似地连续变化,从而获得极低的反射率。由于镀膜中常用的化学萃取和共蒸发方法都要用到各向异性材料,因此不可避免地带来热学和力学性能不均匀等问题,使高质量镀膜难以成功地制作。

衍射光学提供了另一种解决途径,是研制抗反射的衍射表面。这种衍射光学元件是高空间频率的连续表面刻蚀光栅。由于光栅的空间周期极小,使得只有零级衍射光在入射介质和衬底中传播,如同处于折射率呈梯度分布的有效介质中一样,从而达到消除反射的功效。通过合理地匹配光栅周期,选择入射光波长等参数来设计抗反射结构元件,可以获得在宽波段和广角度范围内极低的反射率,从而有效地抑制光学表面的菲涅耳反射。

5. 导模共振滤波器(guided-mode resonance filter)^[14]

平面电介质波导光栅(带有平面电介质层的衍射光栅)具有导模共振特性:由于外界传播的衍射场同波导筒正模耦合,使得在很小的参数范围内入射波和反射波达到 100% 的能量转换。这种特性提供了一种新型光学和微电子器件的工作原理。平面电介质波导光栅有着广泛的应用前景,例如任意控制并压窄线宽的不变或可调谐的光谱滤波器,高效的低能开关转换元件,集成光学中窄波段光谱选择反射镜,体光学系统中激光线宽压窄,以及偏振器,混色计、高精度传感器。目前已在光电开关、光折变可调谐滤波器、窄线宽偏振激光等方面获得实

际的应用。

6. 光学互连元件 (optical interconnect)^[15-17,71]

光学互连是将一束激光分裂成一维或二维光束阵列的衍射光学元件,如图7所示。它已经广泛地应用于光学计算和平行处理,集成光学,光电开关网络,以及机器人视觉等领域中。

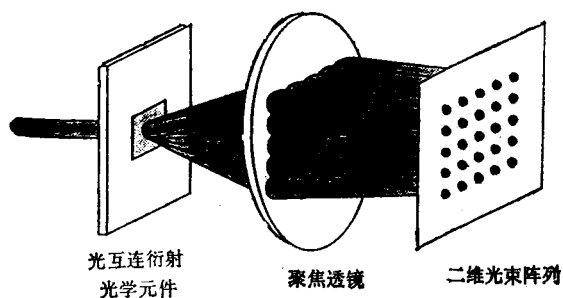


图7 产生二维光束阵列的光互连衍射元件^[7]

光互连元件有两个重要参数,一个是互连程度,即与激光源相连的探测器数目;第二个是劈裂比,即各劈裂开光束之间的相对能量比。选择不同的参数可以设计出不同功能的光互连元件。通常有形成均匀强度分布的光互连元件(例如,多光束发生器、多光束照明器)和形成非均匀强度分布的光互连元件(例如,高斯扇形展开分束器)。

7. 其他方面应用

衍射光学元件还可以用于集成平面微光学系统中,灵活地控制光线传输过程,例如折束器和裂束器,这些微型元件是高效的二级或多级衍射光栅。^[11]另外,在惯性约束核聚变高功率激光系统中,应用随机相位板来实现光束平滑处理。这种衍射元件直径可达80cm,具有对

敏玻璃激光器三次谐波有大的抗光学损伤阈值以及良好的光学性能^[18]。衍射光学元件还可以用于作为材料加工的高功率YAG激光系统中的衍射中继透镜。它不仅消除了激光能量传输过程中的系统球差,而且提高了能量增益^[12]。

以上介绍仅是衍射光学这一90年代新型光学分支一瞥。相信随着衍射光学的基本理论,衍射光学元件的制作技术和衍射光学与传统的折射反射光学有效结合等方面的深入研究,衍射光学技术会更完善,其应用将更广泛。

感谢顾本源先生精心阅读并润饰此文。

- [1] *Appl. Opt.*, 32-14(1993).
- [2] *J. Modern Optics*, 40-4(1993).
- [3] J. Cordingley, *Appl. Opt.*, 32(1993) 2538.
- [4] W. B. Veldkamp and C. J. Kastner, *Appl. Opt.*, 21(1982), 345.
- [5] V. V. Wong and G. J. Swanson, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2502.
- [6] N. Streibl, *J. Modern Opt.*, 36(1989), 1559.
- [7] M. T. Gale et al., *Appl. Opt.*, 32(1993), 2526.
- [8] P. Ehbets et al., *J. Modern Opt.*, 40(1993), 637.
- [9] 杨国楨、顾本源, *物理*, 23-4(1994).
- [10] D. C. O'Shea, J. W. Beletic and M. Poutous, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2566.
- [11] S. J. Walker et al., *Appl. Opt.*, 32(1993), 2494.
- [12] Uri Levy, *Photonics Spectra*, 26-May (1992), 135.
- [13] D. H. Ragun and G. M. Morris, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2582.
- [14] S. S. Wang and R. Magnusson, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2606.
- [15] V. V. Wong and G. J. Swanson, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2502.
- [16] R. L. Morrison, S. L. Walker, and T. J. Cloonan, *Appl. Opt.*, 32(1993), 2512.
- [17] J. M. Miller et al., *Appl. Opt.*, 32(1993), 2519.
- [18] S. N. Dixit et al., *Appl. Opt.*, 32(1993), 2543.

(上接第299页)

预计在不久的将来,会出现实时的三维超声成像。

过去,超声成像的物理基础一般是建立在单一声学参量声特性阻抗的差别之上的,所以从某种意义上说,B型显示的超声图像实际上是一种人体声特性阻抗的分布图。近年来,国

内外许多单位在积极进行利用新的声学参量成像的研究,其中包括声速、声衰减,散射系数,非线性声参量B/A等,有的已经取得了十分可喜的进展。另外,由于这些多参量成像研究的进展,使得利用不同的声学参数进行组织定征有了希望。