



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109990733 B

(45)授权公告日 2020.02.14

(21)申请号 201910316548.X

审查员 邢明浩

(22)申请日 2019.04.19

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109990733 A

(43)申请公布日 2019.07.09

(73)专利权人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72)发明人 赵维谦 邱丽荣

(74)专利代理机构 北京理工正阳知识产权代理

事务所(普通合伙) 11639

代理人 郭晓楠

(51)Int.Cl.

G01B 11/255(2006.01)

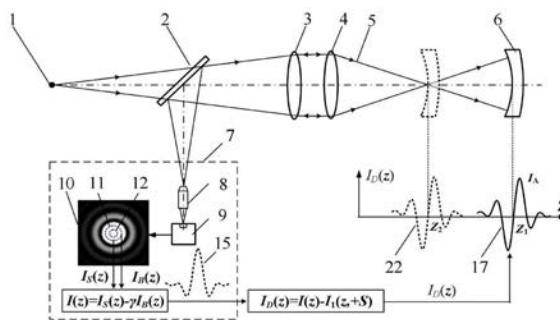
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

双边错位差动共焦曲率半径测量方法

(57)摘要

本发明属于光学精密测量技术领域,涉及一种双边错位差动共焦曲率半径测量方法。该方法在共焦测量光路系统中,首先在CCD探测的艾里斑图像上通过软件设置大、小虚拟针孔探测区域并将其探测的两条共焦特性曲线通过相减处理来锐化共焦特性曲线,然后将锐化共焦特性曲线进行双边错位差动相减处理来得到轴向高灵敏的差动共焦特性曲线,最后再利用该双边错位差动共焦特性曲线零点与共焦测量系统焦点精确对应这一特性对被测球面“猫眼”和“共焦”位置进行高精度定焦寻位,以期提升球面曲率半径测量中的定焦精度。本方法相对已有曲率半径方法,具有测量精度高、抗环境干扰能力强和结构简单等优势,在光学精密测量技术领域具有广泛的应用前景。



1. 双边错位差动共焦曲率半径测量方法,其特征在于包括以下步骤:

a) 打开点光源(1),调整被测球面镜(6)使其与测量物镜(4)和准直透镜(3)共光轴,点光源(1)发出的光经分束镜(2)、准直透镜(3)透射后生成平行光束,该平行光束经测量物镜(4)汇聚成聚焦测量光束(5)照射被测球面镜(6)上;

b) 被测球面镜(6)表面反射的聚焦测量光束(5)再经测量物镜(4)和准直透镜(3)后被分束镜(2)反射进入到横向相减共焦探测系统(7),形成的测量艾里斑(10)被CCD探测器(9)探测;

c) 沿光轴方向移动被测球面镜(6)使聚焦测量光束(5)的焦点与被测球面镜(6)的焦点位置重合,即“共焦”位置;在该“共焦”位置附近扫描被测球面镜(6),将横向相减共焦探测系统(7)中大虚拟针孔探测域(11)探测的大虚拟针孔探测共焦特性曲线(13)  $I_B(z)$ ,和小虚拟针孔探测域(12)探测到的小虚拟针孔探测共焦特性曲线(14)  $I_S(z)$ 进行相减处理,得到半高宽压缩的锐化共焦特性曲线(15)  $I(z) = I_S(z) - \gamma I_B(z)$ ,其中 $z$ 为轴向坐标, $\gamma$ 为调节因子;

d) 将锐化共焦特性曲线(15)沿横向坐标平移 $S$ 得到平移锐化共焦特性曲线(16),并使锐化共焦特性曲线(15)和平移锐化共焦特性曲线(16)的侧边交汇,对锐化共焦特性曲线(15)和平移锐化共焦特性曲线(16)分别进行同横坐标点插值处理后,再进行逐点相减处理得到错位相减差动共焦特性曲线(17)  $I_D(z) = I(z) - I(z, -S)$ ,利用差动共焦线性拟合直线(18)对错位相减差动共焦特性曲线(17)的线性段数据进行直线拟合;通过反向回移差动共焦线性拟合直线(18)  $S/2$ 位置的回移差动共焦拟合直线(20)的移位拟合直线零点(21)来精确确定聚焦测量光束(5)焦点与被测球面镜(6)的焦点重合,进而确定被测球面镜(6)的“共焦”位置 $Z_1$ ;

e) 继续沿测量物镜(4)的光轴方向相向移动被测球面镜(6),使聚焦测量光束(5)的焦点与被测球面镜(6)的表面顶点重合,即“猫眼”位置;在该“猫眼”位置附近扫描被测球面镜(6),由横向相减共焦探测系统(7)通过处理测得的测量艾里斑(10)得到锐化共焦特性曲线(15)后再进行双边错位相减处理,得到与测量物镜(4)焦点对应的第二错位相减差动共焦特性曲线(22),重复上述步骤d),主控计算机(24)对第二错位相减差动共焦特性曲线(22)进行线性拟合、拟合直线回移及确定回移拟合直线零点来精确确定被测球面镜(6)的表面顶点“猫眼”位置,记录此时被测球面镜(6)的“猫眼”位置 $Z_2$ ;

f) 计算被测球面镜(6)曲率半径 $r = Z_1 - Z_2$ 。

2. 根据权利要求1所述的双边错位差动共焦曲率半径测量方法,其特征在于:通过横向相减共焦探测系统(7)得到锐化共焦特性曲线(15)的过程如下:

a) 在被测球面镜(6)扫描过程中,通过CCD探测器(9)探测测量艾里斑(10),以测量艾里斑(10)的重心为中心,在CCD探测器(9)每帧探测图像上选定一定大小的大虚拟针孔探测域(11),将大虚拟针孔探测域(11)中每个像素上的强度进行积分,得出大虚拟针孔探测共焦特性曲线(13);

b) 同时以CCD探测器(9)探测的测量艾里斑(10)重心为中心,选择另一个小虚拟针孔探测域(12),所述小虚拟针孔探测域(12)的尺寸小于所述大虚拟针孔探测域(11),积分小虚拟针孔探测域(12)的强度得到小虚拟针孔探测共焦特性曲线(14),小虚拟针孔探测共焦特性曲线(14)的半高宽和峰值强度均低于大虚拟针孔探测共焦特性曲线(13);

c) 将大虚拟针孔探测共焦特性曲线 (13) 乘以调节因子  $\gamma$  ,使得大虚拟针孔探测共焦特性曲线 (13) 光强是小虚拟针孔探测共焦特性曲线 (14) 的1/2倍;

d) 将小虚拟针孔探测共焦特性曲线 (14) 减去乘以调节因子  $\gamma$  后的大虚拟针孔探测共焦特性曲线 (13) ,得到锐化共焦特性曲线 (15) 。

## 双边错位差动共焦曲率半径测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种双边错位差动共焦曲率半径测量方法,可用于球面元件曲率半径的非接触式高精度测量,属于光学精密测量技术领域。

### 背景技术

[0002] 在光学系统、惯性导航系统、飞机发动机传动系统中,球面元件都是最重要的元件之一。而球面元件的曲率半径是决定元件整体性能最为关键的参数,因此对球面元件的曲率半径进行高精度测量具有重要意义。

[0003] 针对球面的曲率半径测量,目前已有的测量方法有:球面样板法、球径仪法、自准直法、干涉仪法、刀口仪法、牛顿环法、激光剪切干涉仪法以及莫尔偏析法等。球面样板法和球径仪法属接触测量,测量方法简单,零件不需抛光,但球面样板法只适用于小曲率半径测量,测量精度受样板面形影响较大,并且在接触测量过程中,会因球面磨损和挤压带来测量误差;自准直法属于非接触测量,但零件需要抛光处理,光路调整较复杂,调焦和对准难度较大,会带来测量过程中的系统误差;干涉仪法、刀口仪法、牛顿环法、激光剪切干涉仪法以及莫尔偏析法一般用于大曲率半径的测量。干涉仪法在测量过程中易受温度、气流、振动、噪声等因素的干扰,对测量精度影响较大。

[0004] 2002年浙江大学提出了一种利用激光偏振干涉体系产生非接触的牛顿环并与CCD图像处理技术相结合的测量方法。该方法通过移动五角棱镜或被测元件并用CCD列阵测得两组干涉牛顿条纹后,通过计算机对两组图像的处理计算得到被测元件表面的曲率半径。该方法可测量的曲率半径为1~25m,具有很宽的测量范围;并且该方法为非接触测量,不会损坏高精度被测元件表面。

[0005] 2004年美国计量院的Wang Quandou及其工作小组构建了一台超高精度的移相干涉仪XCALIBIR,该干涉仪可以用于测量球面的曲率半径。该方法通过参考球面与被测元件球面产生的移相干涉图像来计算得到被测元件球面的曲率半径。该方法通过对于环境的苛刻控制,补偿十余项误差后,其曲率半径测量精度达到了0.003%。

[0006] 2006年南京理工大学研究了一种由单幅静态干涉图测量球面曲率半径的方法。该方法针对小曲率半径的球面用林尼克干涉显微镜得到被测球面的静态干涉图,基于阻尼最小二乘法拟合干涉条纹的光强曲线,得到被测小球面面形的多项式表达式,并由此计算出被测件的曲率半径。该方法通过对已知曲率半径的标准微小凸球面样板的测量,得到相对误差为0.093%的测量结果。

[0007] 同年,Xiayang Cai等人提出了大曲率半径测量的一种新方法,该方法将斐索干涉仪与变焦镜头相结合构成了一套紧凑的测量仪器,同时可以测量具有大曲率半径的凹球面曲率半径和凸球面曲率半径。对于曲率半径为10m的球面,其测量精度为0.04%。

[0008] 2008年,Wang Quandou在移相干涉仪测量曲率半径的基础上,引入全息技术,用于大曲率半径球面的曲率半径测量。该方法通过在检测光路中引入菲涅尔全息板,压缩光路整体长度,可实现曲率半径大于10m的镜面的高精度检测。

[0009] 本发明人于2009年提出了一种利用差动共焦原理来对曲率半径进行高精度测量的方法,并申请国家发明专利“差动共焦曲率半径测量方法与装置”。该方法将差动共焦显微原理扩展到曲率半径测量领域,具有测量精度高、抗环境干扰能力强的优点。但是需要同时使用两路探测器,需精确调整两探测器的离焦量,并且会聚透镜数值孔径改变后,原有离焦量可能不再适合,造成定焦精度降低。

[0010] 本发明人还于2011年提出了一种利用共焦干涉定焦原理来对曲率半径进行高精度测量的方法,并申请国家专利“共焦干涉定焦及曲率半径测量方法”(专利号201110038297.7)。该方法在共焦光路的基础上引入了干涉参考光,由共焦干涉响应曲线的最大值来精确定焦。该方法利用干涉条纹锐化了共焦响应曲线的主瓣,从而提高定焦和测量精度。但是需要保证参考光与测量光之间的光程差是光源半波长的整数倍,并且参考光与测量光之间的环境扰动会对测量精度产生较大干扰。

[0011] 为了进一步提高球面曲率半径测量的精度,本发明人进一步提出了一种双边错位差动共焦曲率半径测量方法,该方法在共焦测量系统中,首先在CCD探测的艾丽斑图像上通过软件设置大、小虚拟针孔探测区域并将其探测的两条共焦特性曲线通过相减处理来锐化共焦特性曲线,然后将锐化共焦特性曲线进行双边错位差动相减处理来得到轴向高灵敏的差动共焦特性曲线,最后再利用该双边错位差动共焦特性曲线零点与焦点精确对应这一特性对被测球面“猫眼”和“共焦”位置进行高精度定焦寻位,以期提升球面曲率半径测量中的定焦精度,进而提高球面曲率半径测量的精度。

## 发明内容

[0012] 本发明的目的是为了解决现有球面曲率半径测量中高精度定焦困难的问题,提供一种双边错位差动共焦曲率半径测量方法;该方法的核心思想是:在共焦测量光路系统中,通过大、小虚拟针孔共焦特性曲线的横向相减处理来锐化共焦响应特性曲线,通过锐化共焦响应特性曲线的双边错位差动相减处理来实现被测表面的差动共焦双极性定焦测量,通过差动共焦定焦曲线的线性拟合来提升焦点位置捕获精度,进而提高球面曲率半径测量中“猫眼”和“共焦”位置的定焦精度,以期实现球面曲率半径的高精度测量。

[0013] 本发明的目的是通过下述技术方案实现的。

[0014] 双边错位差动共焦曲率半径测量方法,包括以下步骤:

[0015] a) 打开点光源,调整被测球面镜使其与测量物镜和准直透镜共光轴,点光源发出的光经分束镜、准直透镜透射后生成平行光束,该平行光束经测量物镜汇聚成聚焦测量光束照射在被测球面镜上;

[0016] b) 被测球面镜表面反射的聚焦测量光束再经测量物镜和准直透镜后被分束镜反射进入到横向相减共焦探测系统,形成的测量艾里斑被CCD探测器探测;

[0017] c) 沿光轴方向移动被测球面镜使测量光束的焦点与被测球面镜的焦点位置重合;在该“共焦”位置附近扫描被测球面镜,将横向相减共焦探测系统中大虚拟针孔探测域探测的大虚拟针孔探测共焦特性曲线 $I_B(z)$ 和小虚拟针孔探测域探测到的小虚拟针孔探测共焦特性曲线 $I_S(z)$ 进行相减处理,得到半高宽压缩的锐化共焦特性曲线 $I(z) = I_S(z) - \gamma I_B(z)$ ,其中 $z$ 为轴向坐标, $\gamma$ 为调节因子;

[0018] d) 将锐化共焦特性曲线沿横向坐标平移 $S$ 得到平移锐化共焦特性曲线,并使锐化

共焦特性曲线和平移锐化共焦特性曲线的侧边交汇,对锐化共焦特性曲线和平移锐化共焦特性曲线分别进行同横坐标点插值处理后,再进行逐点相减处理得到错位相减差动共焦特性曲线 $I_D(z) = I(z) - I(z, -S)$ ,利用差动共焦线性拟合直线对错位相减差动共焦特性曲线的线性段数据进行直线拟合,通过反向回移差动共焦线性拟合直线 $S/2$ 位置的回移差动共焦拟合直线的移位拟合直线零点来精确确定聚焦测量光束焦点与被测球面镜的焦点重合,进而确定被测球面镜的“共焦”位置 $Z_1$ ;

[0019] e) 继续沿测量物镜的光轴方向相向移动被测球面镜,使测量光束的焦点与被测球面镜的表面顶点重合;在该“猫眼”位置附近扫描被测球面镜,由横向相减共焦探测系统通过处理测得的测量艾里斑得到锐化共焦特性曲线后再进行双边错位相减处理得到与测量物镜焦点对应的第二错位相减差动共焦特性曲线;重复上述步骤d),主控计算机通过对第二错位相减差动共焦特性曲线进行线性拟合、拟合直线回移及确定回移拟合直线零点来精确确定被测球面镜的表面顶点“猫眼”位置,记录此时被测球面镜的“猫眼”位置 $Z_2$ ;

[0020] f) 计算被测球面镜曲率半径 $r = Z_1 - Z_2$ 。

[0021] 本发明所述的双边错位差动共焦曲率半径测量方法,通过横向相减共焦探测系统得到锐化共焦特性曲线的过程如下:

[0022] a) 在被测球面镜扫描过程中,通过CCD探测器探测测量艾里斑,以测量艾里斑的重心为中心,在CCD探测器每帧探测图像上选定一定大小的大虚拟针孔探测域,将大虚拟针孔探测域中每个像素上的强度进行积分,得出大虚拟针孔探测共焦特性曲线;

[0023] b) 同时以CCD探测器探测的测量艾里斑重心为中心,选择另一个小虚拟针孔探测域,所述小虚拟针孔探测域的尺寸小于所述大虚拟针孔探测域,积分小虚拟针孔探测域的强度得到小虚拟针孔探测共焦特性曲线,小虚拟针孔探测共焦特性曲线的半高宽和峰值强度均低于大虚拟针孔探测共焦特性曲线;

[0024] c) 将大虚拟针孔探测共焦特性曲线乘以调节因子 $\gamma$ ,使得大虚拟针孔探测共焦特性曲线光强是小虚拟针孔探测共焦特性曲线的 $1/2$ 倍;

[0025] d) 将小虚拟针孔探测共焦特性曲线减去乘以调节因子 $\gamma$ 后的大虚拟针孔探测共焦特性曲线,得到锐化共焦特性曲线。

[0026] 有益效果

[0027] 1) 提出在共焦测量系统中利用大、小虚拟针孔探测横向相减锐化共焦特性曲线,利用锐化共焦响应特性曲线的双边错位差动相减处理来实现被测表面的差动共焦双极性定焦测量,进而显著提高了差动共焦定焦曲线的定焦灵敏度和信噪比,使球面曲率半径测量系统具有更高的测量精度。

[0028] 2) 相比于差动共焦测量装置,本发明在未增加硬件成本的情况下提高了测量精度。

[0029] 3) 该测量方法通过大小虚拟光斑探测区横向相减处理探测,有效消除共模噪声,提升了测量系统的抗环境干扰能力。

[0030] 4) 相比于经典的高精度干涉球面曲率半径测量方法,本方法由于采用非干涉的艾里斑中心强度“点探测”方式,克服了现有干涉定焦法对系统像差、环境振动、气流干扰和样品表面粗糙度极度灵敏的不足,大幅提高了抗系统像差、环境干扰和表面散射的能力,可显著提高球面曲率半径测量精度。

## 附图说明

- [0031] 图1为本发明双边错位差动共焦曲率半径测量方法示意图；
- [0032] 图2为本发明大小虚拟针孔共焦特性曲线横向相减锐化示意图；
- [0033] 图3为本发明锐化共焦特性曲线双边错位差动相减示意图；
- [0034] 图4为本发明双边错位差动共焦曲线线性拟合触发定焦示意图；
- [0035] 图5为本发明实施例双边错位差动共焦曲率半径测量示意图。
- [0036] 其中：1-点光源、2-分束镜、3-准直透镜、4-测量物镜、5-测量光束、6-被测球面镜、7-横向相减共焦探测系统、8-显微物镜、9-CCD探测器、10-测量艾里斑、11-大虚拟针孔探测域、12-小虚拟针孔探测域、13-大虚拟针孔共焦特性曲线、14-小虚拟针孔共焦特性曲线、15-锐化共焦特性曲线、16-平移锐化共焦特性曲线、17-错位相减差动共焦特性曲线、18-差动共焦线性拟合直线、19-拟合直线零点、20-回移差动共焦拟合直线、21-移位拟合直线零点、22-第二错位相减差动共焦特性曲线、23-图像采集系统、24-主控计算机、25-多路电机驱动系统、26-轴向测量运动系统、27-五维调整系统、28-激光器、29-显微物镜、30-针孔。

## 具体实施方式

- [0037] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步说明。
- [0038] 本发明使用双边错位差动共焦曲率半径测量方法来实现透镜球面曲率半径的高精度测量，核心思想：在差动共焦测量系统中，通过大、小虚拟针孔横向相减探测来锐化共焦特性曲线，通过锐化共焦响应特性曲线的双边错位差动相减处理探测来实现球面曲率半径测量中“猫眼”和“共焦”位置的定焦精度，进而达到提高球面曲率半径测量精度的目的。
- [0039] 实施例1：
- [0040] 如附图5所示，双边错位差动共焦曲率半径测量方法的测量步骤是：
- [0041] 1) 启动主控计算机24的测量软件，打开激光器28，激光器(28)发出的光经过显微物镜29和针孔30后形成点光源1；调整被测球面镜(6)使其与测量物镜4和准直透镜3共光轴；
- [0042] 2) 点光源1发出的光经分束镜2、准直透镜3和测量物镜4后汇聚成聚焦测量光束5照射在被测球面镜6上，由被测球面镜6表面反射的聚焦测量光束5再经测量物镜4和准直透镜3后被分束镜2反射进入到横向相减共焦探测系统7，主控计算机24中的测量软件，通过图像采集系统23获得由CCD探测器9采集到的测量艾里斑10；
- [0043] 3) 沿光轴方向移动被测球面镜6，使聚焦测量光束5的焦点与被测球面镜6的球心位置重合，即“共焦”位置；在该“共焦”位置附近扫描被测球面镜6，如图2所示，将横向相减共焦探测系统7中大虚拟针孔探测域11和小虚拟针孔探测域12分别探测的大虚拟针孔探测共焦特性曲线 $13I_B(z)$ 和小虚拟针孔探测共焦特性曲线 $14I_S(z)$ 进行相减处理得到半高宽压缩的锐化共焦特性曲线 $15I(z) = I_S(z) - \gamma I_B(z)$ ，其中 $z$ 为轴向坐标， $\gamma$ 为调节因子；
- [0044] 大/小虚拟针孔探测域探测共焦特性曲线的过程是：在CCD探测器9探测焦前测量艾里斑10的每帧图像上选取一个同心圆域，对大圆域内的每个像素光强进行积分得到一条大虚拟针孔探测共焦特性曲线 $I_B(z)$ ，对小圆域内的每个像素光强积分得到一条小虚拟针孔探测共焦特性曲线 $I_S(z)$ ，然后将 $I_B(z)$ 和 $I_S(z)$ 进行相减处理，得到横向相减共焦响应曲线 $I(z) = I_S(z) - \gamma I_B(z)$ ，改变调节因子 $\gamma$ 实现共焦特性曲线的优化。

[0045] 4) 本实施例中,大圆域直径选取11个像素,小圆域直径选取5个像素,取 $\gamma = 0.5$ ,如图3所示,主控计算机24的测量软件将相减处理得到的锐化共焦特性曲线15沿横向坐标平移 $S$ 得到平移锐化共焦特性曲线16,并使锐化共焦特性曲线15和平移锐化共焦特性曲线16的侧边交汇,对锐化共焦特性曲线15和平移锐化共焦特性曲线16分别进行同横坐标点插值处理后,再进行逐点相减处理得到错位相减差动共焦特性曲线17 $I_D(z) = I(z) - I(z, -S)$ 。

[0046] 5) 如图4所示,主控计算机24的测量软件对错位相减差动共焦特性曲线17的线性段数据进行直线拟合得到差动共焦线性拟合直线18,再利用反向回移差动共焦线性拟合直线18 $S/2$ 位移的回移差动共焦拟合直线20的移位拟合直线零点21来确定汇聚测量光束5聚焦在被测球面镜6的球心位置,进而精确确定被测球面镜6的“共焦”位置,记录此时被测球面镜6的“共焦”位置 $Z_1 = 0.1725\text{mm}$ 。

[0047] 6) 主控计算机24通过多路电机驱动系统25和轴向测量运动系统26控制五维调整系统27继续沿测量物镜4的光轴方向相向移动被测球面镜6,当聚焦测量光束5的焦点与被测球面镜6的球面顶点重合时,主控计算机24控制被测球面镜6在该位置“猫眼”附近扫描,同样由横向相减共焦探测系统7通过处理测得的测量艾里斑10得到锐化共焦特性曲线15,再进行双边错位相减处理得到与被测球面镜6球面顶点对应的第二错位相减差动共焦特性曲线22,重复上述步骤5),主控计算机24通过对第二错位相减差动共焦特性曲线22进行线性拟合、拟合直线回移及回移拟合直线零点确定来精确确定被测球面镜6的表面顶点“猫眼”位置,记录此时被测球面镜6的“猫眼”位置 $Z_2 = -24.8669\text{mm}$ 。

[0048] 7) 计算被测球面镜6“共焦”和“猫眼”两位置之间的距离 $Z_2 - Z_1 = -25.0394\text{mm}$ ,则被测球面镜6的曲率半径 $r = 25.0394\text{mm}$ 。

[0049] 以上结合附图对本发明的具体实施方式作了说明,但这些说明不能被理解为限制了本发明的范围,本发明的保护范围由随附的权利要求书限定,任何在本发明权利要求基础上的改动都是本发明的保护范围。



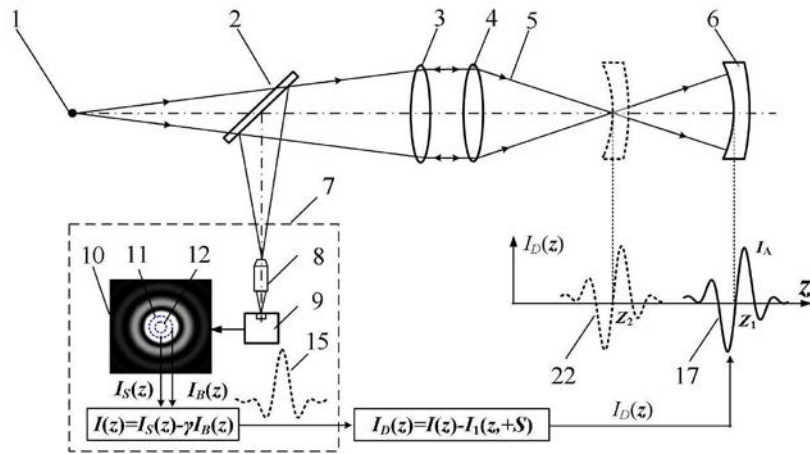


图1

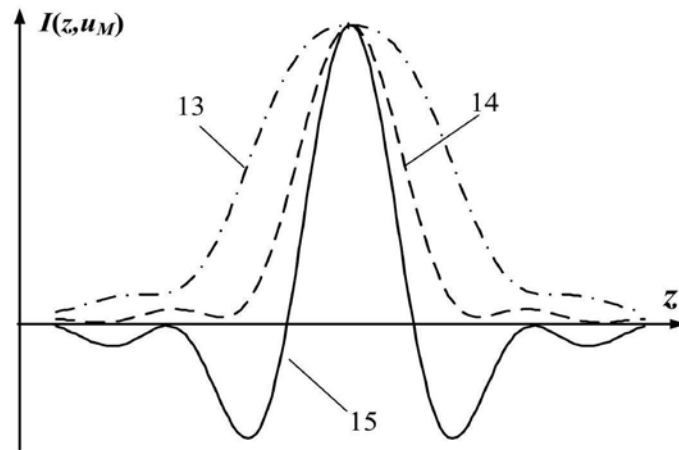


图2

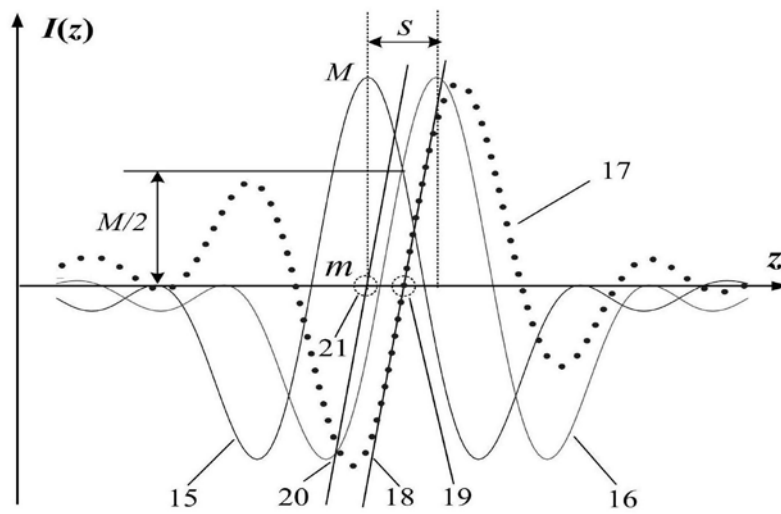


图3

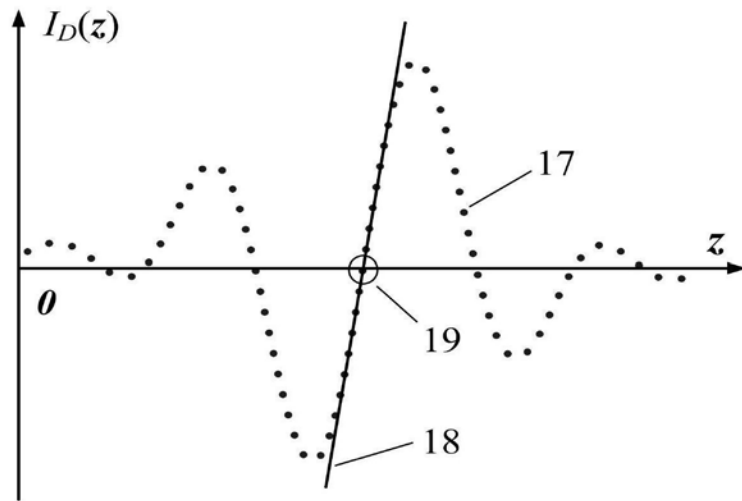


图4

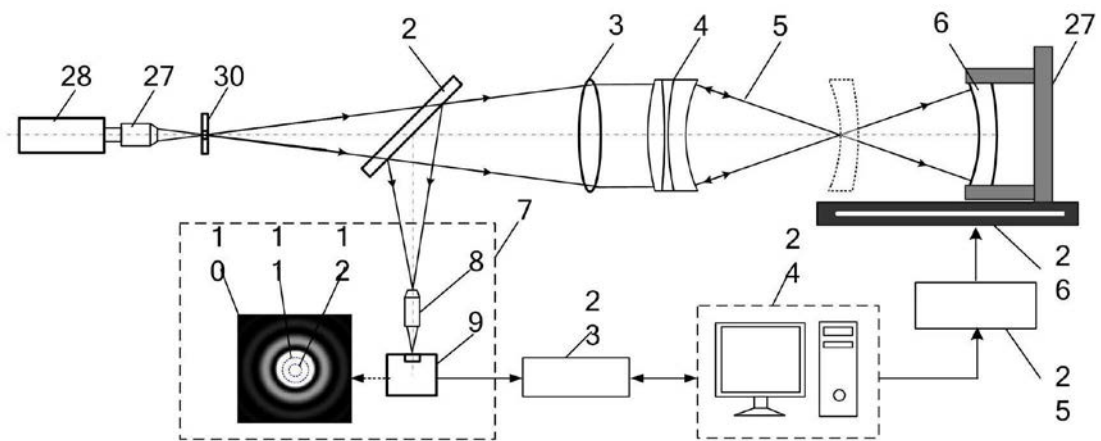


图5