

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610017114.2

[51] Int. Cl.

G01M 9/06 (2006.01)

G01M 9/08 (2006.01)

G01M 9/00 (2006.01)

G01M 11/00 (2006.01)

[43] 公开日 2008 年 2 月 20 日

[11] 公开号 CN 101126675A

[22] 申请日 2006.8.18

[21] 申请号 200610017114.2

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 胡立发 宣丽 曹召良 穆全全
彭增辉 高永刚

[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所

代理人 南小平

权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 4 页

[54] 发明名称

具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器

[57] 摘要

本发明属于光学技术领域，是一种纯位相液晶湍流模拟器。由 TFT 液晶屏、偏振片、驱动模块与带有湍流波面计算软件的计算机构成。计算软件的设计为：先确定 Zernike 项数 n ，表达式为 $n^{\sqrt{3}/2} = 0.2944 * (L/r_0)^{5/3} \Delta_n$ ，其中 L 、 r_0 、 Δ_n 分别为所模拟的湍流截面的尺度、湍流相干长度和模拟的均方根误差；利用 n 项系数代数的协方差矩阵法求出系数；由 $m = (8L/r_0)^2$ 确定波面的有效格点数 m ，代入 Zernike 多项式计算出波面上的位相分布，令这一巨大波面匀速切过光束，得到光束截面上时空连续的动力湍流波前。用湍流软件驱动平行排列的向列相液晶屏，得到再现时空连续的动力湍流模拟。这种液晶湍流模拟器驱动电压低，可用计算机控制，模拟精度高，成本低，制作比较简单。

1、具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器，其特征是由 TFT 液晶屏（1）、偏振片（2）、驱动模块（3）、计算机（4）构成；其中，偏振片（2）置于液晶屏（1）的入射光线一侧，且它的偏振方向与 TFT 液晶屏（1）中液晶的排列方向相同；驱动模块（3）分别用电缆线同 TFT 液晶屏（1）与计算机（4）相连。

2、根据权利要求 1 所述的具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器，其特征是：

所述的 TFT 液晶屏（1）的上下玻璃基板（5）内侧附有 ITO 透明导电电极（6），在下基板的 ITO 透明导电电极上依次还附着 TFT 阵列（7）和正向摩擦取向膜（8），在上基板的 ITO 透明导电电极上依次附着黑矩阵（11）和反向摩擦取向膜（10）、在上下玻璃基板（5）间是液晶（9）；

所述的偏振片（2）为晶体偏振片，表面平整度优于二十分之一波长，其直径应大于入射光直径，透光轴与 TFT 液晶屏（1）的摩擦方向平行，使通过 TFT 液晶屏（1）的光为纯粹 e 光；

所述的计算机（4）配有湍流波前的计算软件，其硬件的基本配置要优于：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G。

3、根据权利要求 2 所述的具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器，其特征是湍流波前计算软件的设计为：湍流波前位相分布由 n 项 Zernike 多项式来表示，
i) 首先根据 $n^{\sqrt{3}/2} = 0.2944 * (L/r_0)^{5/3} / \Delta_n$ 确定 Zernike 项数 n，其中 Δ_n 为所模拟的均方根误差、L 为湍流截面的直径、 r_0 为湍流强度的湍流相干长度；ii) 用系数代数的协方差矩阵求出 n 项 Zernike 多项式的系数，得出波前位相的 Zernike 方程；iii) 确定 Zernike 方程的面积边界值、即湍流截面直径 L，一般 L 选为 10~100

米； iV) 确定波面有效格点数 m , 根据光学系统的衍射极限, 确定 $m=(8L/r_0)^2$, 如果 $8L/r_0$ 为带有小数的数字则取其整数部分; V) 确定这 m 个有效格点的坐标 (x_i, y_j) , $i=1, 2, 3\dots m, j=1, 2, 3\dots m$; Vi) 依次将 m 个有效格点的坐标 (x_i, y_j) 带入 Zernike 方程, 经数值计算得到湍流波面的数值解; Vi i) 将数值解析波面切割成宽度与光学口径 D 匹配的环带, 环带宽度上的有效格点数为 $8D/r_0$, 如果 $8D/r_0$ 为带有小数的数字则取其整数部分, 并令 $8D/r_0$ 大于 10; Vi ii) 在 TFT 液晶屏 (1) 上取 $(8D/r_0) \times (8D/r_0)$ 个有效格点的方形面阵, 根据 TFT 液晶屏 (1) 的 o 光与 e 光的光程差—灰度级关系, 将计算的湍流波面环带上的位相分布转换成有效格点方阵上的电压分布, 驱动 TFT 液晶屏 (1); Vi iii) 根据风速选定湍流波面环带流动速度, 即以视频刷新 TFT 液晶屏 (1), 每一帧平移的有效格点数为 $1\sim 8D/10r_0$ 之间的整数。

4、根据权利要求 3 所述的具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器, 其特征是利用光谱型椭偏仪或 ZYGO 干涉仪测量 TFT 液晶屏 (1) 的 e 光与 o 光的光程差—灰度级曲线, 利用这一关系将计算的湍流波前位相分布转换成液晶屏上的电压分布, 实现湍流波前模拟。

具有时空连续性的 TFT 液晶湍流模拟器

技术领域

本发明属于自适应光学领域，涉及具有时间和空间连续性的纯位相液晶湍流模拟器。

背景技术

随着天文成像、光通讯及遥感探测等的迅速发展，大气湍流对光传输的干扰越来越引起人们的重视，因此，有必要研制湍流模拟器，为工作于随机涨落大气介质中的光学仪器提供实验室条件下的测试和评价手段。湍流模拟器的功能是对入射光的波面进行调制，产生湍流中的畸变波前，为所研制的光学系统提供大气湍流仿真环境。

目前，已有利用空气或水等介质在温度梯度场中模拟湍流的方法，但此方法对湍流强度、空间分布函数不可重复，使实验结果确认困难，另外模拟系统的散热对光学仪器有不利影响。随着精密加工技术的发展，采用位相屏制作的湍流模拟器已经出现。这种模拟器所用的位相屏是将湍流中的畸变波面刻蚀在玻璃基板上，玻璃上的厚度起伏与波面位相分布对应。这种位相屏一般是圆形，直径通常远大于光束的直径，用在模拟器上时将它的中心固定在轴上。使用过程中位相屏绕轴进行机械旋转时，玻璃厚度的不均匀使穿过的光束位相发生变化，形成空间和时间上的连续湍流模拟。位相屏的缺点是玻璃上刻蚀的畸变波面固定，旋转所产生的湍流波前具有周期性，与实际的随机湍流现象差距较大。

近年来，液晶以其优异的电光特性在湍流模拟器方面的应用前景引起人们的高度重视。液晶具有折射率各向异性，在外加电压作用下能调制入射光波前。在高像素密度、可编程驱动、无机械震动、与集成电路匹配等方面独具优势；在室温上下不超出 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 温度变化的环境下能保持正常工作状态；结构紧凑、模拟的空间频带宽、成本低，是湍流模拟器未来的发展趋势之一。文献报道挪威 F. StaboEeg 等人模拟了相干长度为 1mm 范围内的强湍流成分，而相干长度大于 1mm 范围的相对弱湍流成分没有包含在内，即空间频带宽度较窄；另外模拟的

湍流波面虽然具有很好的空间随机性，但相近两个时刻内波面之间没有时间相关性，即没有波面起伏随时间的连续性演变，不符合实际湍流情况；美国空军实验室 M.R. Brooks 等人报道的液晶湍流模拟器利用另一种方法，即功率谱的方法，它模拟湍流时低频部分的误差较大；美国 Noll 等人提出了 Zernike 多项式的协方差矩阵方法模拟湍流的基本原理，这种方法可以弥补功率谱法的不足，但还没有人以此为基础设计液晶湍流模拟器。要用 Zernike 多项式的协方差矩阵方法制作液晶湍流模拟器还需合理限定 Zernike 模式数和波面数值解的格点数，另外还应考虑相近两个时刻波面起伏演变的连续性。

发明内容

本发明的目的是提供一种波面演变具有时空连续性且空间频带宽度很宽的 TFT 液晶湍流模拟器。

本发明的 TFT 液晶湍流模拟器如图 1 所示，由 TFT 液晶屏 1、偏振片 2、驱动模块 3、计算机 4 构成，其中，偏振片 2 置于液晶屏 1 的入射光线一侧，且它的偏振方向与 TFT 液晶屏 1 中液晶的排列方向相同；驱动模块 3 分别用电缆线同 TFT 液晶屏 1 与计算机 4 相连。

所述的 TFT 液晶屏 1 结构如图 2 所示。上下是玻璃基板 5，上下玻璃基板 5 的内侧附有 ITO 透明导电电极 6。在下基板 5 的 ITO 透明导电电极 6 上依次还附着 TFT 阵列 7 和正向摩擦取向膜 8。在上基板 5 的 ITO 透明导电电极 6 上依次附着黑矩阵 11 和反向摩擦取向膜 10。在上下基板 5 间是液晶 9。其中，ITO 透明导电电极 6 的作用是可在液晶两侧施加电场；TFT 阵列 7 是控制像素驱动电压的开关；黑矩阵 11 是为防止像素间布线处的光泄漏和防止光线直射 TFT，黑矩阵材料一般采用 Cr 或碳黑；正向摩擦取向膜 8 和反向摩擦取向膜 10 的摩擦方向反平行，使液晶 9 的分子平行取向排列。

所述的偏振片 2 为晶体偏振片，表面平整度优于二十分之一波长，其直径应大于入射光直径，透光轴与 TFT 液晶屏 1 取向膜的摩擦方向平行，使通过 TFT 液晶屏 1 的光为纯粹 e 光。

所述的驱动模块 3 将数字信号转换为交流电压信号，用来驱动液晶屏，使液晶分子在玻璃基板 5 表面与法线决定的平面内转动，从而调节光位相分布，产生

透射光的湍流位相波前。

所述的计算机 4 配有湍流波前的计算软件，其硬件的基本配置要优于：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G。

湍流波前计算软件的设计思想如下：要模拟湍流，实际上就是要确定湍流中的光波前位相分布。根据 Kolmogorov 理论，湍流波前位相分布由 n 项 Zernike 多项式来表示。为确定 Zernike 多项式中每一项前面的系数，即算出波面，做如下处理：i)首先确定 Zernike 项数、也称模式数 n。n 由所模拟的均方根误差 Δ_n 、湍流截面的直径 L 和代表湍流强度的湍流相干长度 r_0 决定，其表达式为 $n^{\sqrt{3}/2} = 0.2944 * (L/r_0)^{5/3} / \Delta_n$ ，其中，L 和 r_0 的单位为米， Δ_n 的单位为弧度的平方，由此式算出不同 L/r_0 下 Zernike 模式数 n 与模拟均方根误差之间的关系如图 3，从而可以确定不同模拟精度下应该使用的 Zernike 项数 n；ii)为求出 n 项 Zernike 多项式的系数，先写出系数代数的协方差矩阵，将协方差矩阵代入随机数生成函数式，并将随机数平均值设置为零，则由计算机生成一组平均值为零且相互独立的随机数，即为 Zernike 多项式的系数，将系数代入 Zernike 多项式即可得出波前位相的 Zernike 方程；iii)确定 Zernike 方程的面积边界值、即湍流截面的直径 L。根据系统平均的原理和冻结湍流假设，让一个巨大波面以一定速度流过光学系统的光束截面，即可得到时空连续的湍流波面。因此 L 应比光学系统的口径 D 大得多，实际上湍流截面的外尺度 L_0 可达上百米， $L \leq L_0$ ，一般 L 选为 10~100 米；iv)下一步确定模拟精度的波面有效格点数 m。根据光学系统的衍射极限，确定 $m = (8L/r_0)^2$ ，如果 $8L/r_0$ 为带有小数的数字则取其整数部分，有效格点数 m 代表了模拟分辨率，这个分辨率与所应用的光学系统分辨率匹配；v)确定这 m 个有效格点的坐标 (x_i, y_j) ， $i=1, 2, 3\dots m, j=1, 2, 3\dots m$ ；vi)依次将 m 个有效格点的坐标 (x_i, y_j) 带入 Zernike 方程，经数值计算得到湍流波面的数值解；vii)将数值解波面切割成宽度与光学口径 D 匹配的环带，环带宽度上的有效格点数为 $8D/r_0$ ，如果 $8D/r_0$ 为带有小数的数字则取其整数部分，且 $8D/r_0$ 大于 10；viii)在 TFT 液晶屏 1 上取 $(8D/r_0) \times (8D/r_0)$ 个有效格点的方形面阵，根据 TFT 液晶屏 1 的 o 光与 e 光的光程差—灰度级关系如图 4，将计算的湍流波面环带上的位相分布转换成有效格点方阵上的电压分布，驱动 TFT 液晶屏 1；此时光学系统的光束通

过液晶屏，即可获得所计算的湍流光波前；Viiii) 根据风速选定湍流波面环带流动速度，即以视频刷新 TFT 液晶屏 1，每一帧平移的有效格点数为 $1 \sim 8D/10r_0$ 之间的整数，这样就可以实现时空连续的湍流模拟。

本发明提出的这种液晶波前校正器很容易控制，调制的光程量较大，可以与集成电路匹配编程控制，精度高，可重复，定量化，最重要的是时间和空间上都是连续性的湍流波前，与实际湍流波前的特性更接近。同时，本发明的成本低，可利用液晶显示器的工艺进行制作。

附图说明：

图 1 本发明中液晶湍流模拟器的结构示意图，TFT 液晶屏 1、偏振片 2、驱动模块 3、计算机 4。

图 2 本发明中 TFT 液晶屏的结构示意图，玻璃基板 5、ITO 透明导电电极 6、TFT 阵列 7、正向摩擦取向膜 8、液晶 9、反向摩擦取向膜 10 和黑矩阵 11。

图 3 本发明中模拟湍流波面尺寸 L 为 50 米时，不同 L/r_0 值下 Zernike 模式数 n 与均方根误差 Δ_n 之间的关系。

图 4 本发明中 TFT 液晶屏 1 的光程差和透过光强随灰度级变化的关系曲线。

图 5 本发明中检测湍流模拟器的光路图，12 激光光源，13 透镜，14 小孔，15 透镜，1TFT 液晶屏，2 偏振片，16 和 17 透镜，18 哈特曼传感器，3 驱动模块，4 计算机。

具体实施方式：

1) 制作 TFT 液晶屏 1：采用吉林彩晶公司 TFT 液晶屏生产线制作如图 2 所示 TFT 液晶屏 1，具有 1920×480 象素的二维阵列，象素面积 $100\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ ，象素间距 $10\mu\text{m}$ ，液晶为大日本油墨公司提供的 RDP-92975 向列相液晶，层厚为 $5\mu\text{m}$ ；

2) 购买偏振片：直径为 40mm 石英晶体偏振片，表面平整度优于二十分之一波长；

3) 在吉林彩晶公司购买 TFT 液晶屏 1 的驱动模块 3，具有 64 灰度级的电压控制分度值；

4) 购买计算机 4，其硬件的基本配置为：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G，

配上湍流波前计算软件；

5) 利用光谱型椭偏仪或 ZYGO 干涉仪测量 TFT 液晶屏 1 的 e 光与 o 光的光程差—灰度级曲线，逐灰度级测量，每一级在两个不同位置分别测量 5 次取平均值，得出光程差—灰度级的关系。之后测量透过率与灰度级的关系，以检验液晶校正器的纯位相性质。测出的结果如图 4 所示，光程差—灰度级曲线是两次测得的结果，可以看出两次结果一致性很好，在所加的灰度级范围内 e 光位相变化达 700nm，相对 632.8nm 的 He-Ne 激光光源来说超过其 2π 位相，而强度保持不变。

6) 湍流波前计算软件的设计：选择波面直径 $L=10m$ ，中等湍流强度的大气相干长度 $r_0=10cm$ ，模拟精度为十分之一个波长，算出 Zernike 模式数 n 为 5033；计算的有效格点数 m 为 800×800 ，为格点坐标赋值；利用系数协方差矩阵方法，通过随机数生成函数式，并将随机数平均值设置为零，由计算机生成 zernike 多项式的 5033 个系数；将系数代入 zernike 多项式计算出 800×800 格点方阵上的位相分布，得出 $10m\times 10m$ 的湍流波面；选择光学口径 D 为 1m，TFT 液晶屏 1 的有效格点数为 80×80 ；将计算波面切割成宽度为 80 个格点的方形环带；利用光谱型椭偏仪和 ZYGO 干涉仪分别测量了 TFT 液晶屏 1 的 e 光与 o 光的光程差—灰度级曲线，根据光程差—灰度级关系将环带上的位相分布转换成电压分布加到液晶屏 80×80 个有效格点方阵上；选择风速 1 米/秒，由此确定湍流环带流动速度为 40Hz，每一帧移动 2 个格点，实现了时空连续性湍流模拟。

为检验模拟的湍流效果，按图 5 所示的方法布置好光路。由激光光源 12 发出的 632.8nm He-Ne 激光，被透镜 13 聚焦，经过小孔 14 衍射后形成球面波，再经透镜 15 准直，经过偏振片 2 后偏振方向与液晶分子光轴方向相同，入射到 TFT 液晶屏 1 上；计算机 4 根据 Kolmogorov 理论计算出随机的湍流位相分布；根据测得的光程差—电压关系，通过驱动模块 3 施加灰度级信号于 TFT 液晶屏 1，形成相应湍流波前的电压分布，从而获得湍流中的光波前；调制后的透射光经过透镜 16 和 17 缩束后进入哈特曼传感器 18，再现计算模拟波前；统计计算模拟湍流位相分布结构函数的指数为 $5.16/3$ ，与理论值 $5/3$ 相比模拟误差小于 3%。

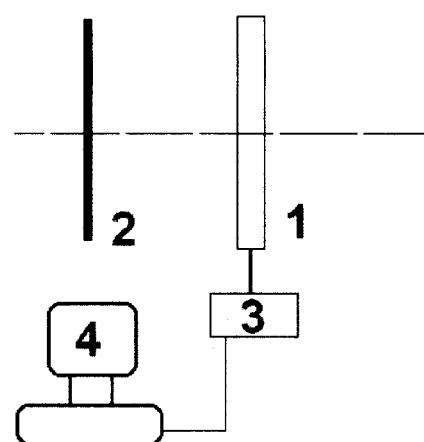


图 1

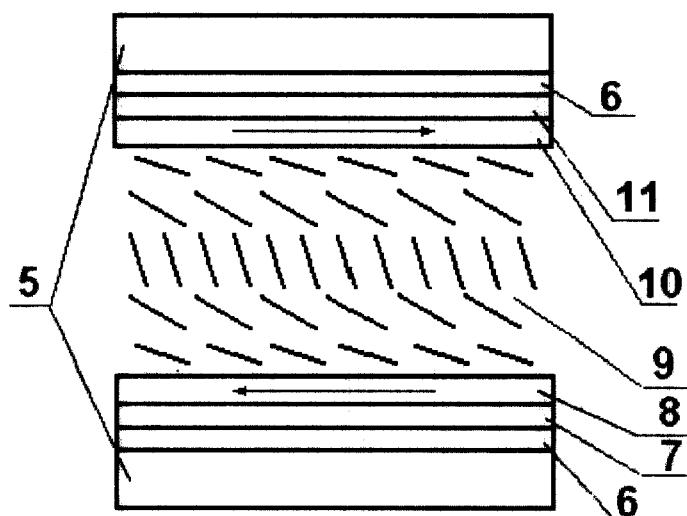


图 2

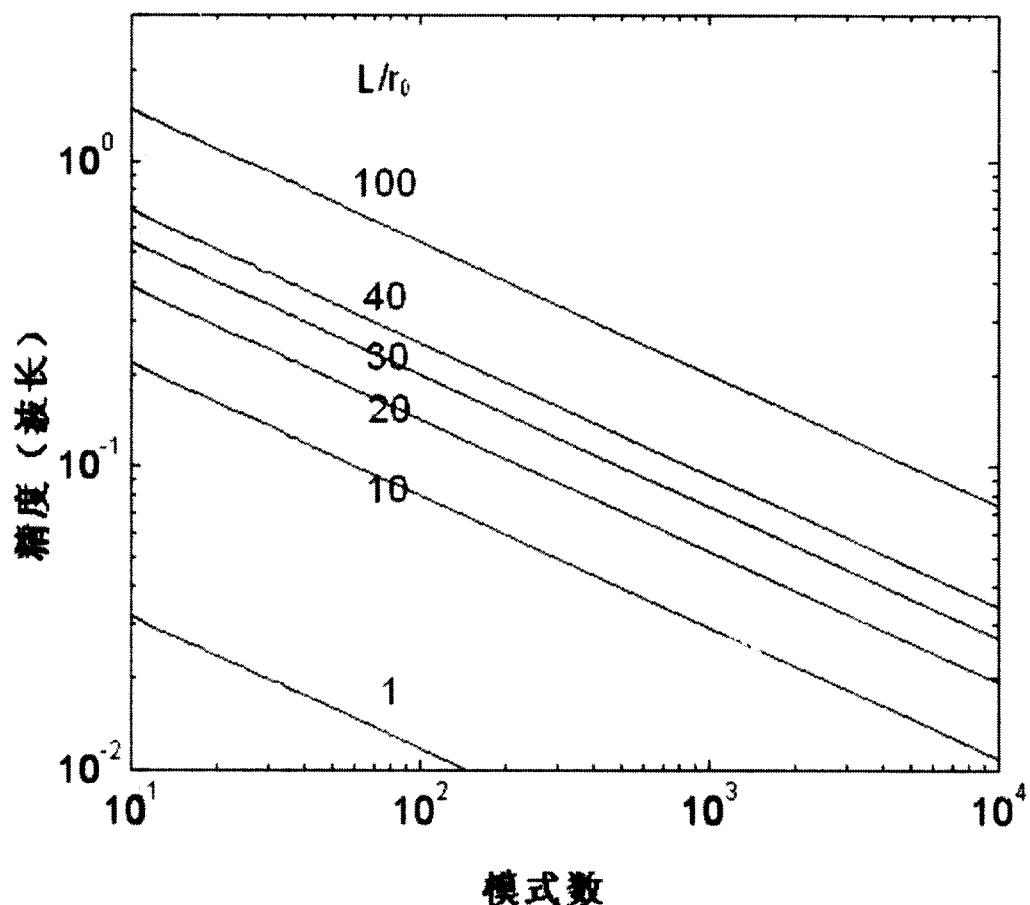


图 3

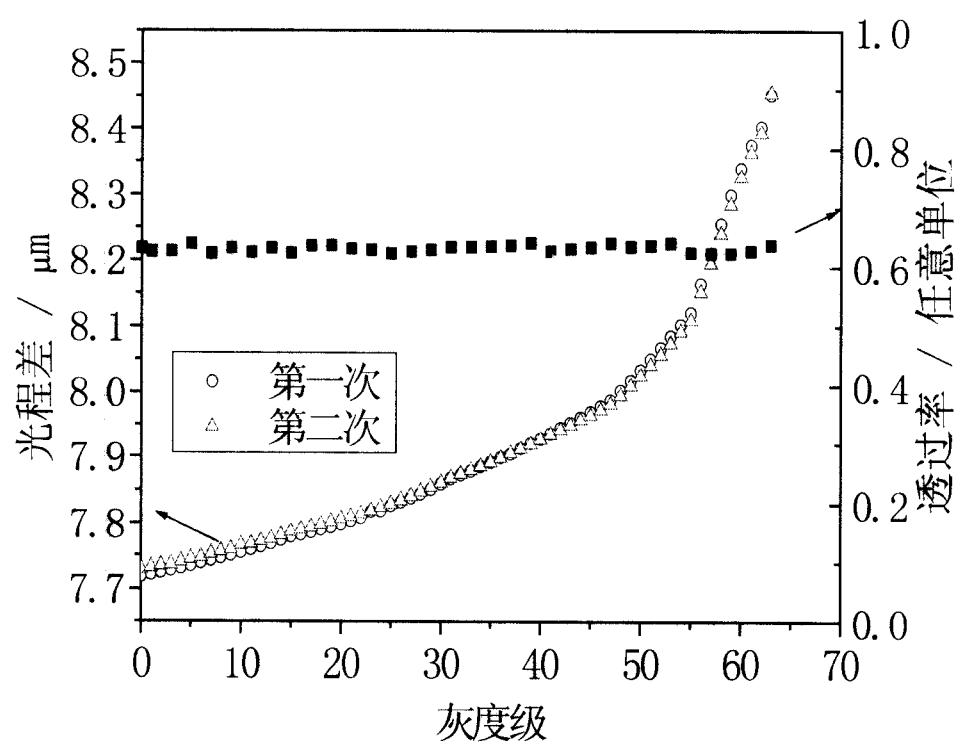


图 4

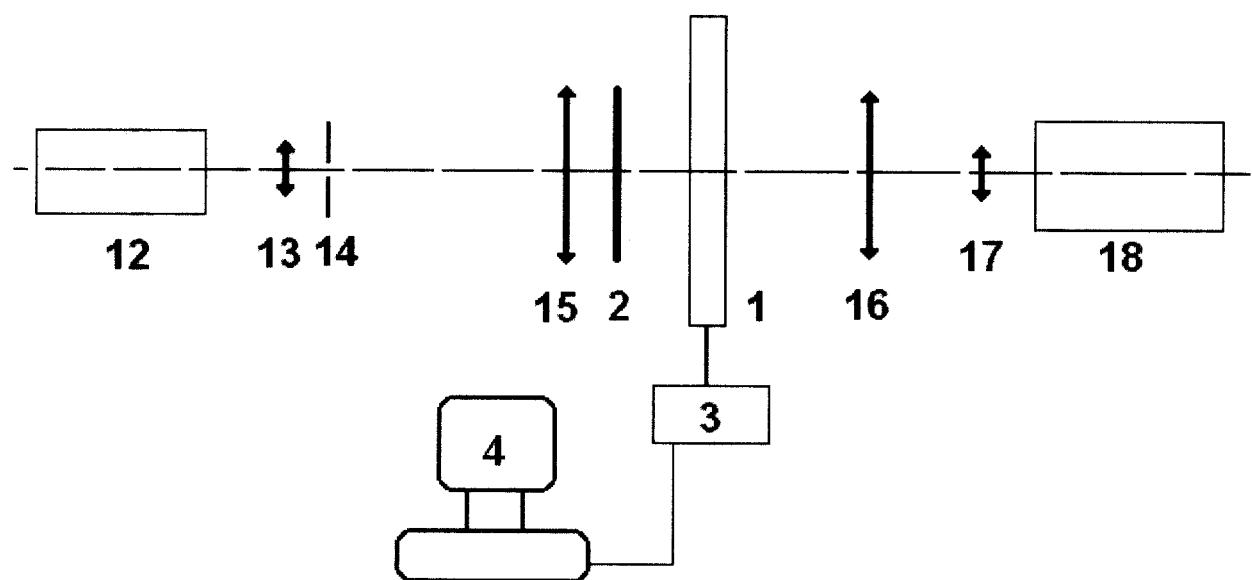


图 5