

# (12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2023 年 11 月 16 日 (16.11.2023)



(10) 国际公布号  
**WO 2023/216472 A1**

- (51) 国际专利分类号:  
**G02B 3/00** (2006.01) **G02B 3/02** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/116987
- (22) 国际申请日: 2022 年 9 月 5 日 (05.09.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
202210503690.7 2022年5月10日 (10.05.2022) CN
- (71) 申请人: 南京理工大学 (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, Jiangsu 210094 (CN)。
- (72) 发明人: 沈哲 (SHEN, Zhe); 中国江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, Jiangsu 210094 (CN)。伍资哈 (WU, Ziha); 中国江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, Jiangsu 210094 (CN)。王淼 (WANG, Miao);

中国江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, Jiangsu 210094 (CN)。何全 (HE, Quan); 中国江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, Jiangsu 210094 (CN)。

(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: METHOD FOR REGULATING FOCAL LENGTH RANGE OF ZOOM SUPER-LENS BY INTRODUCING ADDITIONAL PHASE

(54) 发明名称: 通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法

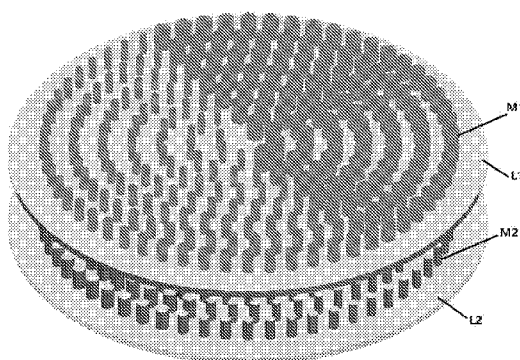


图 1

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a method for regulating a focal length range of a zoom super-lens by introducing an additional phase. A super-lens comprises: two layers of glass serving as substrates, and two layers of dielectric pillar layer arrays respectively arranged on the glass substrates. When the super-lens works, incident light vertically irradiates the lower surface of the glass substrate at the first layer, focusing is implemented by means of transmission of the glass and phase modulation of the dielectric silicon nanopillar arrays, a super-surface at the second layer is rotated, the focal length is changed, and a focal length range can be regulated by means of an additional deflection phase. According to the double-layer zoom super-lens additionally provided with the deflection phase put forward in the present invention, the contradiction between large rotation angles and efficiency of conventional zoom lenses is solved; in the present invention, a micro-nano structure is used to improve conventional zooming modes, the size and the weight of the lens are reduced as much as possible, and the trend of miniaturization and integration of modern optical devices or photoelectric devices is met.



(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法, 超透镜包括: 作为基底的两层玻璃, 和分别置于玻璃衬底上的两层电介质圆柱层阵列; 超透镜工作时, 入射光垂直照射在第一层玻璃基底的下表面, 经过玻璃的透射和介电硅纳米柱阵列得相位调制, 进行聚焦, 旋转第二层超表面, 焦距发生变化, 通过附加偏转相位可以调控焦距范围。本发明提出的附加了偏转相位的双层变焦超透镜, 解决了传统上变焦透镜大的旋转角度和效率之间的矛盾; 本发明采用微纳结构改进了传统变焦的方式, 尽可能缩小透镜的体积与重量, 符合现代化光学器件或光电器件小型化可集成的趋势。

## 通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法

### 技术领域

本发明属于光学变焦领域，特别是涉及一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法。

### 背景技术

可调谐光学器件，特别是折射能力可变的可调谐透镜，在许多光学系统中有着不可或缺的应用，例如用于模拟人眼功能的成像系统，或用于可调照明和光束控制。已有较多的方法实现焦距可调，包括液体聚合物容器和液晶透镜组。然而这些调焦方式需要许多光学器件组成的复杂的光学系统来完成，它们体积大，不利于集成。超表面是一种超薄的二维人工结构，由用于波前调制的金属或电介质光学亚波长天线组成，近年来引起了广泛的研究兴趣。超表面通过设计合适的亚波长结构，能实现对入射光的相位，振幅，偏振态进行任意控制。因此结构设计提出了各种基于超表面器件，如全息、偏转器和波片。由于具有体积小、与半导体器件集成度好、设计自由度高等优点，超表面被用于解决传统几何光学元件的问题，如色差和单色像差。在透镜的焦距调节方面，超表面也有广泛的应用。

目前主要的实现调焦的超透镜主要分为热调制，电动调谐，机械调制三类。超透镜的热调制通过改变影响相移及其相位分布的复折射率来利用对温度的响应。一个热可调超透镜使用螺旋金加热器调节温度升高；折射率随温度变化而变化，取决于热系数  $dn/dT$ 。这种既利用电介导又利用热介导现象的可调谐透镜被归类为电热光学系统。在电可调谐超透镜中，相移是通过偏置电压获得的。场效应诱导可调谐金属材料的设计利用了元原子的复介电常数随载流子浓度成比例的增加。提出了一种具有可调谐 NA 和焦距的透镜，该超透镜利用了电场作用下载流子密度的变化；这种透镜的优点是，这种变化不需要改变形状，而且调谐速度比热调谐透镜快。光学系统的机械刺激会引起结构变化，从而影响焦点的位置、大小和形状。这些刺激包括静电驱动、旋转和拉伸。然而热调制和电动调谐的方式需要额外的控制系统。相比之下，机械调制的超透镜装置调谐速度快，调制方式简单，更适用于移动电子设备成像方面的应用。但上述的偏振不敏感变焦超透镜在双合超表面的相对角度较大时对光的利用率低，因此聚焦效率低。

### 发明内容

本发明的目的在于提供一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法。

实现本发明目的的技术解决方案为：一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，所述变焦超透镜包括作为基底的两层玻璃，和设置于玻璃上表面的用于调节相位的两层电介质圆柱层阵列，所述的变焦超透镜，按照微纳电介质圆柱单元结构半径与相位变化关系构建超表面，其相位公式由实际透镜相位和附加相位叠加，附加相位通过增加一个恒定的相位补偿来实现对焦距范围的调控。

本发明与现有技术相比，其显著优点为：1) 使用的变焦超透镜在平面基底上排列微纳电介质圆柱层阵列以实现传统变焦超透镜的功能，能够最大程度削减它的厚度到波长量级，使其易于集成到复杂的系统或芯片化的微小系统当中；2) 变焦超透镜复杂的光束调制可由相位叠加原理实现，这种处理可以将原本由多个光学元件组成的光学系统简化到一片超表面薄片，进一步削减了光学系统的体积；3) 使用的变焦超透镜具有偏振不敏感特性，对不同偏振的入射光都可以实现焦距的变化，这摆脱了之前常见的几何相位型超表面对入射光偏振有特定要求的限制，并可以有效降低几何相位型超表面由于偏振转化产生的效率损失；4) 本发明可以实现焦距可调的变焦超透镜，具有较好的灵活性；5) 焦距变化通过旋转两片超表面实现，该方法为透镜变焦提供了一种基于超表面的直接的波前调控的方法，为结构光束的应用提供了一种新的可能；6) 在保证以上所述能力的情况下增加了附加相位，可以实现对焦距调控范围的改变，使焦距调控更为灵活。

下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

## 附图说明

图 1 为一个实施例中一种基于偏振不敏感型超表面的光学变焦超透镜结构示意图。

图 2 为一个实施例中超表面单元结构示意图。

图 3 为一个实施例中两半径为 80nm 相邻纳米柱的归一化磁能密度图，图中的白线代表结构的边界。

图 4 为一个实施例中对图 2 超表面单元结构进行仿真扫描，获得的在 x 偏振、y 偏振、左旋圆偏振和右旋圆偏振下超表面单元结构半径与相位改变量和效率的关系图。

图 5 为一个实施例中对偏振不敏感型超表面的光学变焦超透镜施加 round 函数后的仿真结果图，其中，图 5 (a) ~ (d) 分别为 40°、80°、120° 和 160° 的焦点示意图，图 5 (e) ~ (h) 分别为它们的相位分布图。

图 6 为一个实施例中不同角度下的焦点的曲线图。

图 7 为一个实施例中不同偏振光下焦点的示意图。图 7 (a) ~ (d) 分别为  $100^\circ$  旋转变角下分别使用线偏振光、X 偏振光、Y 偏振光和圆偏振光后的焦点的结果图。

图 8 为一个实施例中添加了  $120^\circ$  的附加相位后，分别对应图 5 中 4 个角度的焦点和相位的示意图。图 8 (a) ~ (d) 分别为  $-80^\circ$ 、 $-40^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $40^\circ$  的焦点示意图，图 8 (e) ~ (h) 分别为它们的相位分布图。

图 9 为聚焦效率的示意图，分为 4 种情况，有无 round 函数和是否添加  $120^\circ$  附加相位，取  $16.5\mu\text{m}$ ， $23\mu\text{m}$ ， $34\mu\text{m}$  三个不同焦距下各种情况效率的对比图。

### 具体实施方式

如图 1 所示，一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，所述变焦超透镜包括作为基底的两层玻璃，和设置于玻璃上表面的用于调节相位的两层电介质圆柱层阵列，其特征在于，所述的变焦超透镜，按照微纳电介质圆柱单元结构半径与相位变化关系构建超表面，其相位公式特征在于可由实际透镜相位和附加相位叠加；附加相位通过增加一个恒定的相位补偿来实现对焦距范围的调控，使焦距调控更灵活。

在其中一个实施例中，圆柱结构所用的电介质材料在工作波长内应满足折射率实部较大（达到基底折射率 1.5 倍以上）虚部接近于 0 的条件，通过对微纳电介质圆柱单元结构的 FDTD 仿真计算可获得半径与相位变化、透射率曲线关系。

在其中一个实施例中，微纳圆柱结构层为不同半径的纳米圆柱阵列，为了保证高的效率，圆柱单元结构（如图 2）的几何参数需要满足如下的限制条件：根据奈奎斯特采样定律，晶格常数  $p$  应小于  $\lambda/2\text{NA}$ ， $\lambda$  为波长，NA 为超透镜数值孔径，而同时，为了保证在正入射时只存在 0 阶衍射， $p$  应当小于入射光在基底中等效的工作波长（ $\lambda/n_{L1}$ ）而大于衍射条件（ $\lambda/2n_{L1}$ ）， $n_{L1}$  为基底折射率。

在其中一个实施例中，圆柱单元结构半径  $r$  的最小值取决于制造工艺，而其最大值不能大于晶格常数的一半。

在其中一个实施例中，圆柱单元结构的高度  $h$  应当大于  $\lambda/(n_{M1}-1)$ ， $n_{M1}$  为纳米柱材料折射率。

在其中一个实施例中，圆柱单元结构半径在一定范围内变化时，相位变化应当可以覆盖  $0\sim 2\pi$ 。

在其中一个实施例中，圆柱单元结构通过扫描半径获得的半径-相位变化与半径-透射效率变化曲线应当具有偏振不敏感性，即在不同偏振下测得的半径-相位变化曲线应当一致，不同偏振下测得的半径-透射效率变化曲线应当一致。

变焦超透镜纳米结构的散射应当为局部效应，纳米结构之间的没有耦合。

变焦超透镜具有偏振不敏感性，即对于不同偏振态的入射光，所述变焦超透镜均能发生焦点位置不变的聚焦。

为了便于理解本发明，下面将参照相关附图对本发明进行更全面的描述。附图中给出了本发明的首选实施例。但是，本发明可以以许多不同的形式来实现，并不限于本文所描述的实施例。相反地，提供这些实施例的目的是使对本发明的公开内容更加透彻全面。

需要说明，若本发明实施例中有涉及方向性指示诸如上、下、左、右、前、后……，则该方向性指示仅用于解释在某一特定姿态如附图所示下各部件之间的相对位置关系、运动情况等，如果该特定姿态发生改变时，则该方向性指示也相应地随之改变。

另外，若本发明实施例中有涉及“第一”、“第二”等的描述，则该“第一”、“第二”等的描述仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示其相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。另外，各个实施例之间的技术方案可以相互结合，但是必须是以本领域普通技术人员能够实现为基础，当技术方案的结合出现相互矛盾或无法实现时应当认为这种技术方案的结合不存在，也不在本发明要求的保护范围之内。

结合图 1，在一个实施例中，提供了一种基于双层超表面的偏振不敏感型变焦超透镜，所述变焦超透镜包括作为基底的双层玻璃 L1、L2，和设置于玻璃上表面的用于调节相位的两层微纳电介质圆柱层阵列 M1、M2。

这里，微纳电介质圆柱结构层 M1、M2 用于实现相位调控功能，分别设置于玻璃 L1、L2 上。

超透镜工作时，入射光垂直照射在第一层 L2 玻璃基底的下表面，经过玻璃的透射和介电硅纳米柱阵列得相位调制，进行聚焦，旋转第二层 L1 超表面，焦距发生变化，通过附加偏转相位可以调控焦距范围。

在其中一个实施例中，选取了  $\text{TiO}_2$  作为圆柱材料，其原因是在可见光波段， $\text{TiO}_2$  的折射率有较大的实部和可被忽略的虚部，因而它有高折射率和几乎可忽略不计的吸收损失。这里优选地，选取所述  $\text{TiO}_2$  圆柱高度  $h$  为 600nm，晶格常数  $p$  为 300nm。

进一步地,  $\text{TiO}_2$  圆柱单元结构的相位、透射效率与  $\text{TiO}_2$  圆柱半径的关系, 可通过对  $\text{TiO}_2$  圆柱单元结构 (如图 2 所示) 进行 FDTD 仿真扫描获得。由于相邻纳米柱之间的耦合极其微弱 (如图 3 所示), 它们可被认为独立地进行相位调控, 因此半径与透射效率的变化可以通过扫描纳米柱的半径获得。仿真中在  $x$  和  $y$  方向使用周期型边界条件, 在  $z$  方向使用 PML 边界条件。在基底上表面  $80\mu\text{m}$  处设置一个点监视器获取相位及透射效率变化, 测得在  $x$  偏振、 $y$  偏振、左旋圆偏振、右旋圆偏振平面波入射下, 相位、透射效率与半径的变化关系如图 4 所示。可以看出, 对于不同的偏振, 相位、透射效率与半径的变化关系一致, 这说明了该单元结构具有偏振不敏感特性。同时, 当纳米柱在  $40\text{nm}\sim 110\text{nm}$  范围内变化时, 相位改变量覆盖了  $0\sim 2\pi$ 。并且, 在此范围内, 透射效率均在 80% 以上。以上结果说明, 通过在  $40\text{nm}\sim 110\text{nm}$  范围改变纳米柱的半径, 可以实现对任意偏振的高效率相位调控。

进一步地, 可以通过上述方法根据相位公式设计超表面, 公式 (1) 和 (2) 分别表示两个相位片透射函数, 公式 (3) 为公式 (2) 对应的相位片旋转  $\theta$  角度后的透射函数。公式 (4) 为两个相位片叠加后的总的透射函数, 对比标准的球面透镜透射函数, 可得设计的变焦透镜的焦距为式 (5)。可以看出, 焦距  $f$  是  $\theta$  的函数, 焦距可以透过改变第二片超透镜的旋转角度而改变, 从而实现变焦的功能。式 (6) 和 (7) 分别是两个相位片添加了附加相位后的透射函数, 可增加了附加相位的功能。通过增加一个恒定的相位补偿, 可以解决聚焦能量和聚焦范围之间的矛盾, 可使其在想要的焦距范围内保持高效率。其中通过公式 (1) (2) (3) (4) 可以得到莫尔超透镜结构, 通过公式 (5) 可以得到焦点距离, 通过公式 (6) (7) 可以得到添加附加相位后的莫尔超透镜结构。

$$T_1(r, \phi) = \exp\{i\phi \text{round}(ar^2)\} \quad (1)$$

$$T_2(r, \phi) = \exp\{i\phi \text{round}(-ar^2)\} \quad (2)$$

$$T_{2, \text{rot}}(r, \phi) = \exp[-i(\phi - \theta) \text{round}(ar^2)] \quad (3)$$

$$T_{\text{com}} = T_1(r, \phi) T_{2, \text{rot}}(r, \phi) = \exp[i\theta \text{round}(ar^2)] \quad (4)$$

$$f = \pi/\theta a \lambda \quad (5)$$

$$T_{\text{IFr1}}(r) = \exp\{i\phi \text{round}(ar^2) + i\text{br}^2\} \quad (6)$$

$$T_{\text{IFr2}}(r) = \exp\{-i\phi \text{round}(ar^2) + i\text{br}^2\} \quad (7)$$

公式中,  $\lambda$  代表工作波长, 本实施例取  $532\text{nm}$ ,  $r$  为从任意点到相位板中心的半径,

$\phi$  是  $x$  轴与该点位于中心的轴线之间的角度,  $f$  为焦距,  $\theta$  为透镜的旋转角,  $a$  和  $b$  为常数, 受超透镜分辨率的限制, 取决于像素大小和超透镜的最大半径,  $C$  是纳米砖结构的晶胞大小,  $r_{\max}$  是 GEMS 的半径。根据对应的相位公式, 可以制成用于变焦的超透镜。

本发明基于偏振不敏感型超表面的光学变焦超透镜的制作过程为: 在平整的二氧化硅表面涂上六甲基二硅氮烷以促进抗蚀剂粘附, 然后旋转镀上未稀释的正性电子光束抗蚀剂 ZEP-520A 膜, 以获得厚度为 600nm 的抗腐蚀材料镀层。然后将抗腐蚀剂在 180°C 下烘烤 5 分钟。接着将样品通过电子束蒸发涂上 10nm 的铬, 以避免在写入过程中产生电荷效应。用 125kV 的加速电压曝光图案并在邻二甲苯中柔和搅拌 60 秒以使图案显形, 将倒置的超表面图案刻到抗腐蚀涂层中。然后将系统置于  $N_2$  流中并以四(二甲基氨基)钛为前体在 90°C 下通过原子层积技术沉积  $TiO_2$ ,  $TiO_2$  的完全沉积产生的膜厚度应大于最大特征尺寸宽度的一半, 即 600nm。接着用  $Cl_2$  和  $BCl_3$  离子的混合物进行反应性离子刻蚀后,  $TiO_2$  超表面的顶部和残留的抗腐蚀剂会露出。最后将样品暴露于 UV 辐射和臭氧中, 并置于移除剂中浸泡 24 小时得到最终的介电超表面。

在一个实施例中, 对本发明基于偏振不敏感型超表面的光学变焦超透镜进行 FDTD 仿真验证, 流程如下:

1) 设置超表面结构参数。设置参数为: 二氧化硅玻璃层, 规格为  $20\mu m \times 20\mu m$ , 厚度  $0.5\mu m$ ; 模拟波长 532nm; 超表面单元圆柱, 厚度  $0.6\mu m$ , 晶格常数  $0.3\mu m$ 。

2) 对建立好的模型进行仿真。以  $x$  偏振平面光入射, 分别设置两个不同的监视器, 在  $xz$  平面设置一个监视器, 实现对相位的监视; 在距离平面 100nm 处设置一个监视器, 实现对整个光场的监视。由图 5 可以看出, 在四个不同旋转角度  $\theta$  下, 在焦平面上的焦点和聚焦效果的示意图。正如预期的那样, 焦距随着角度的增加而减小。相位分布则表现出菲涅尔透镜的特征。图 6 为旋转角度  $\theta$  和焦距  $f$  的关系曲线, 两条曲线分别表示理论焦点和仿真焦点与旋转角度的关系。可以看出随着角度的增大, 焦距从无穷大逐渐减小, 渐渐趋于平缓。随着角度的增大, 两条曲线之间的差异逐渐缩小。完成差异的原因是超表面尺寸有限。

3) 图 7 在不同偏振入射的情况下振幅及相位分布基本一致, 这表明了超透镜具有偏振不敏感性, 其显示出的轻微的旋转不对称性并不对整体的偏振不敏感性产生重大影响, 基于这个特性, 我们在下文中分别使用超表面实现了不同角度下焦点和相位的改变。

4) 图 8 是添加了  $120^\circ$  附加相位后, 焦点和相位的示意图。可以看出在对应角度下不影响焦点位置和相位, 但是可以将一个大角度转换为小角度以此来灵活调控聚焦范



围。

5) 图 9 为焦距与聚焦效率的示意图, 聚焦效率的定义为直径为  $2 \times \text{FWHM}$  的圆形区域内的总功率和焦平面内直径为 1mm 的圆形区域内的总功率。两个圆形区域的中心是最大强度点。由图 9 可以看出附加相位对聚焦效率有一定的提高作用, 可以在想要的焦距范围内保持相对较高的效率。

本发明使用的光学变焦超透镜是在基底上制作微纳电介质圆柱的二维阵列超表面, 能够在亚波长空间分辨率下调控光学波前, 具有完善的相位调控功能因而可以实现透镜变焦。其偏振不敏感特性使得它可以对任意偏振的入射光实现透镜的变焦, 这与之前常见的基于 PB 相位需要特定偏振态的入射光有很大的不同。所设计的变焦超透镜在超分辨成像领域有潜在应用。这种基于偏振不敏感型超表面的光学变焦超透镜可以很容易地将其组合成芯片以形成具有扩展功能的复合设备。

以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征及优点。本行业的技术人员应该了解, 本发明不受上述实施例的限制, 上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理, 在不脱离本发明精神和范围的前提下, 本发明还会有各种变化和改进, 这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

## 权 利 要 求 书

1、一种通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，所述变焦超透镜包括作为基底的两层玻璃，和设置于玻璃上表面的用于调节相位的两层电介质圆柱层阵列，其特征在于，所述的变焦超透镜，按照微纳电介质圆柱单元结构半径与相位变化关系构建超表面，其相位公式由实际透镜相位和附加相位叠加，附加相位通过增加一个恒定的相位补偿来实现对焦距范围的调控。

2、根据权利要求1所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱结构所用的电介质材料在工作波长内应满足折射率实部达到基底折射率1.5倍以上的条件，通过对微纳电介质圆柱单元结构的FDTD仿真计算获得半径与相位变化、透射率曲线关系。

3、根据权利要求1所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，电介质圆柱层阵列为不同半径的纳米圆柱阵列，圆柱单元结构的几何参数满足如下条件：根据奈奎斯特采样定律，晶格常数 $p$ 应小于 $\lambda/2NA$ ，同时， $p$ 应当小于入射光在基底中等效的工作波长 $\lambda/n_{Li}$ ，大于衍射条件 $\lambda/2n_{Li}$ ，其中 $\lambda$ 为波长， $NA$ 为超透镜数值孔径， $n_{Li}$ 为基底折射率。

4、根据权利要求3所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱单元结构半径的最大值不大于晶格常数的一半。

5、根据权利要求4所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱单元结构半径在一定范围内变化时，相位变化应当可覆盖 $0\sim 2\pi$ 。

6、根据权利要求4所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱单元结构的高度 $h$ 大于 $\lambda/(n_{Mi}-1)$ ， $n_{Mi}$ 为纳米柱材料折射率。

7、根据权利要求4所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱单元结构的材料为 $TiO_2$ 。

8、根据权利要求1所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，圆柱单元结构通过扫描半径获得的半径-相位变化曲线与半径-透射效率变化曲线在不同偏振下测得的曲线应当一致。

9、根据权利要求1所述的通过引入附加相位调控变焦超透镜焦距范围的方法，其特征在于，对于不同偏振态的入射光，所述变焦超透镜均能发生焦点位置不变的聚焦。

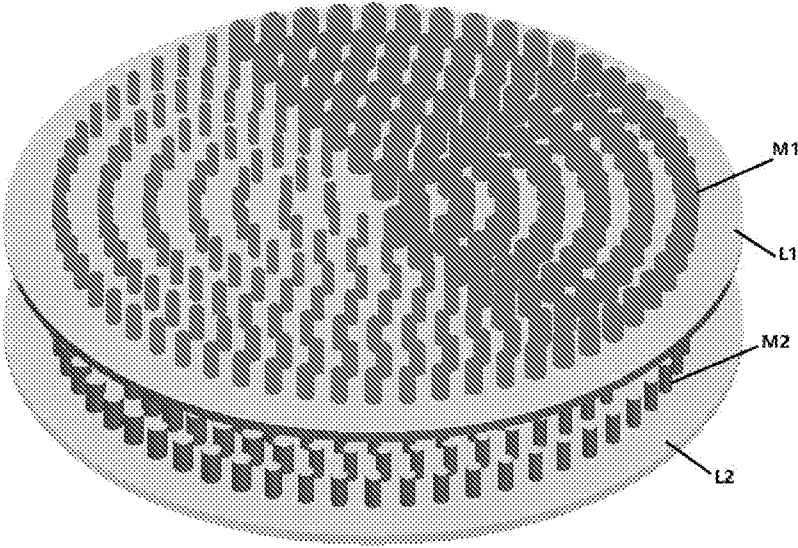


图 1

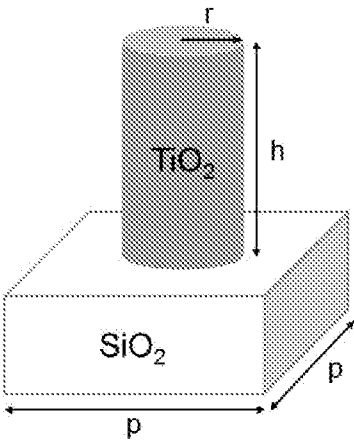


图 2

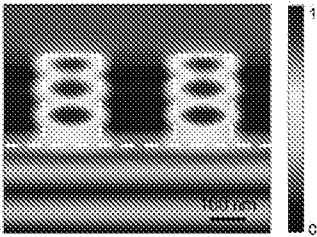


图 3

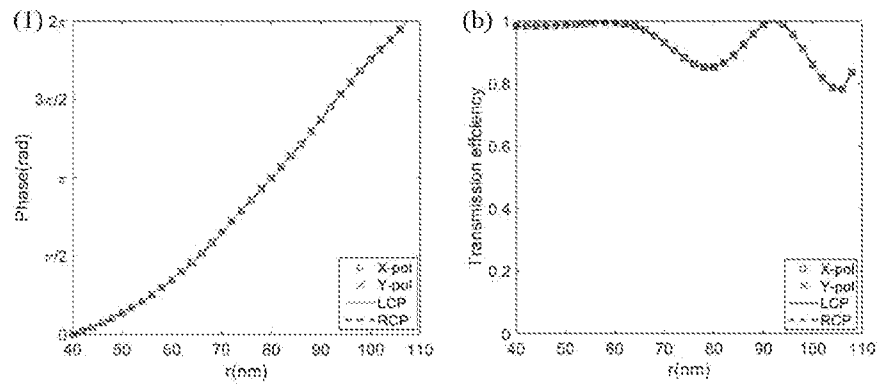
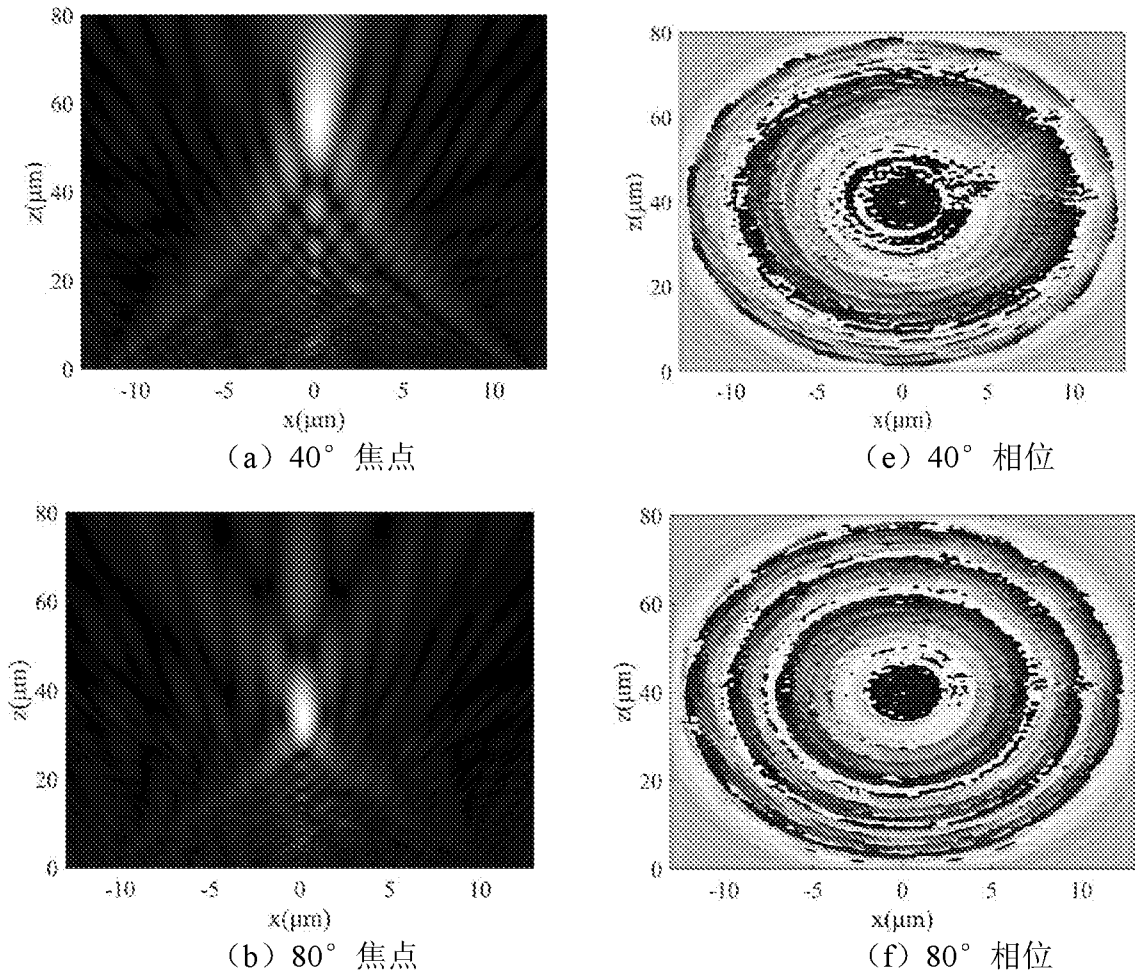


图 4



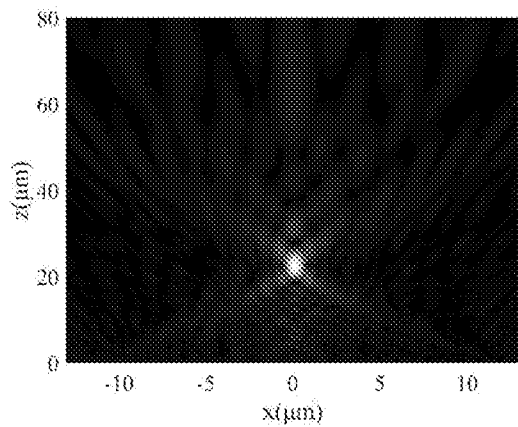
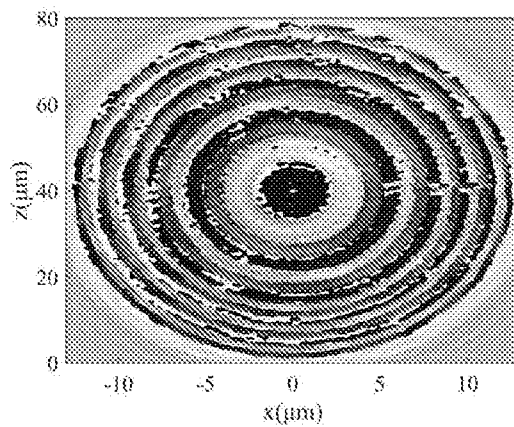
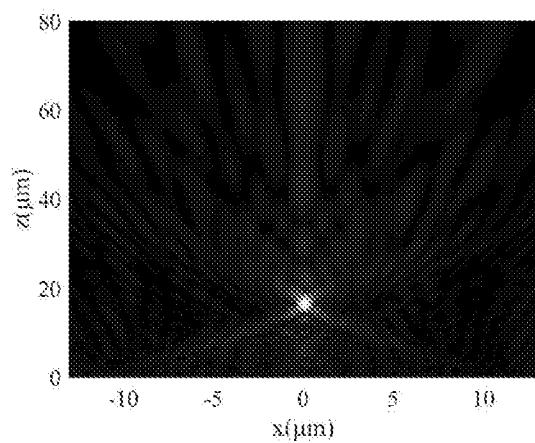
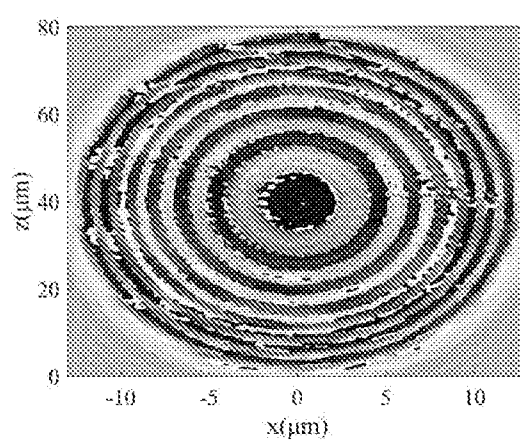
(c)  $120^\circ$  焦点(g)  $120^\circ$  相位(d)  $160^\circ$  焦点(h)  $160^\circ$  相位

图 5

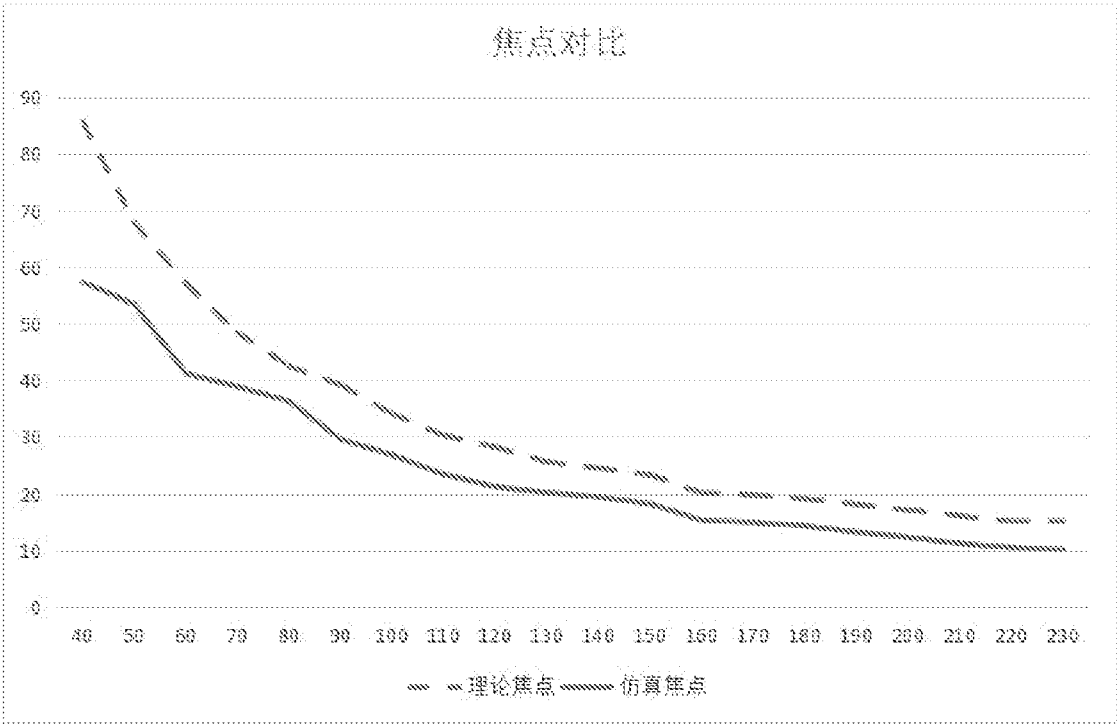
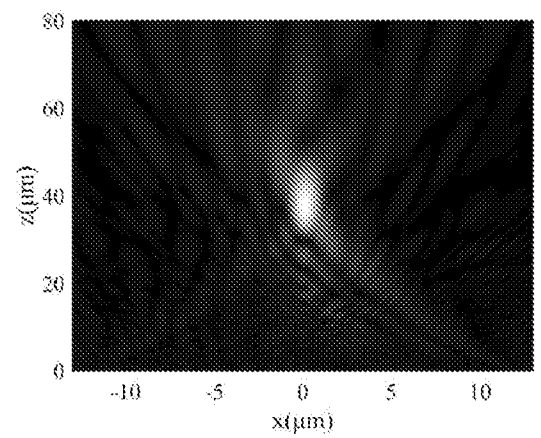
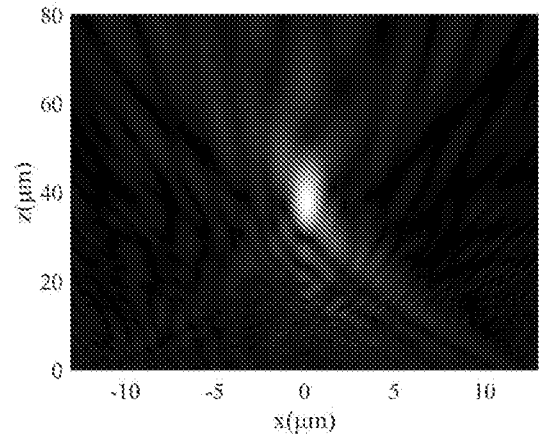


图 6



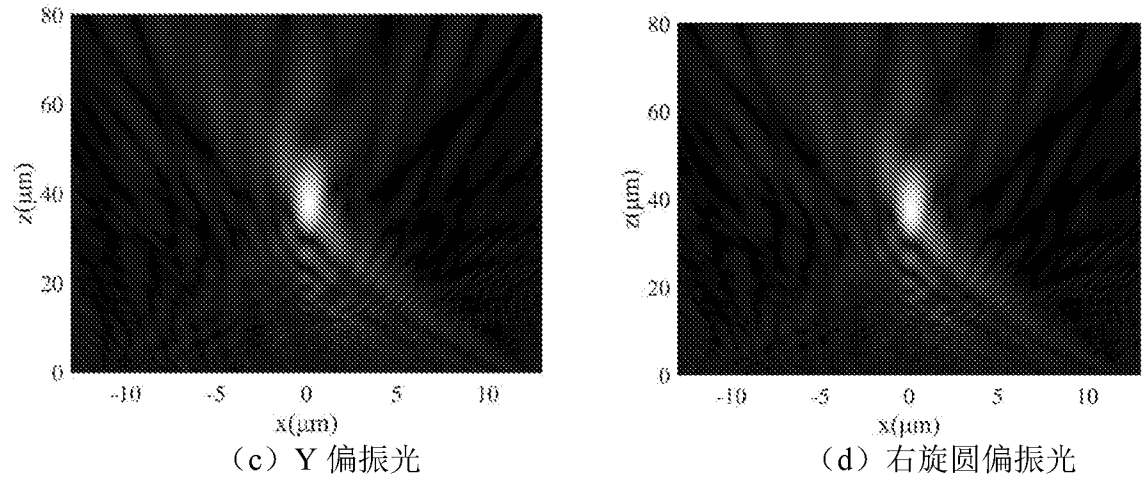
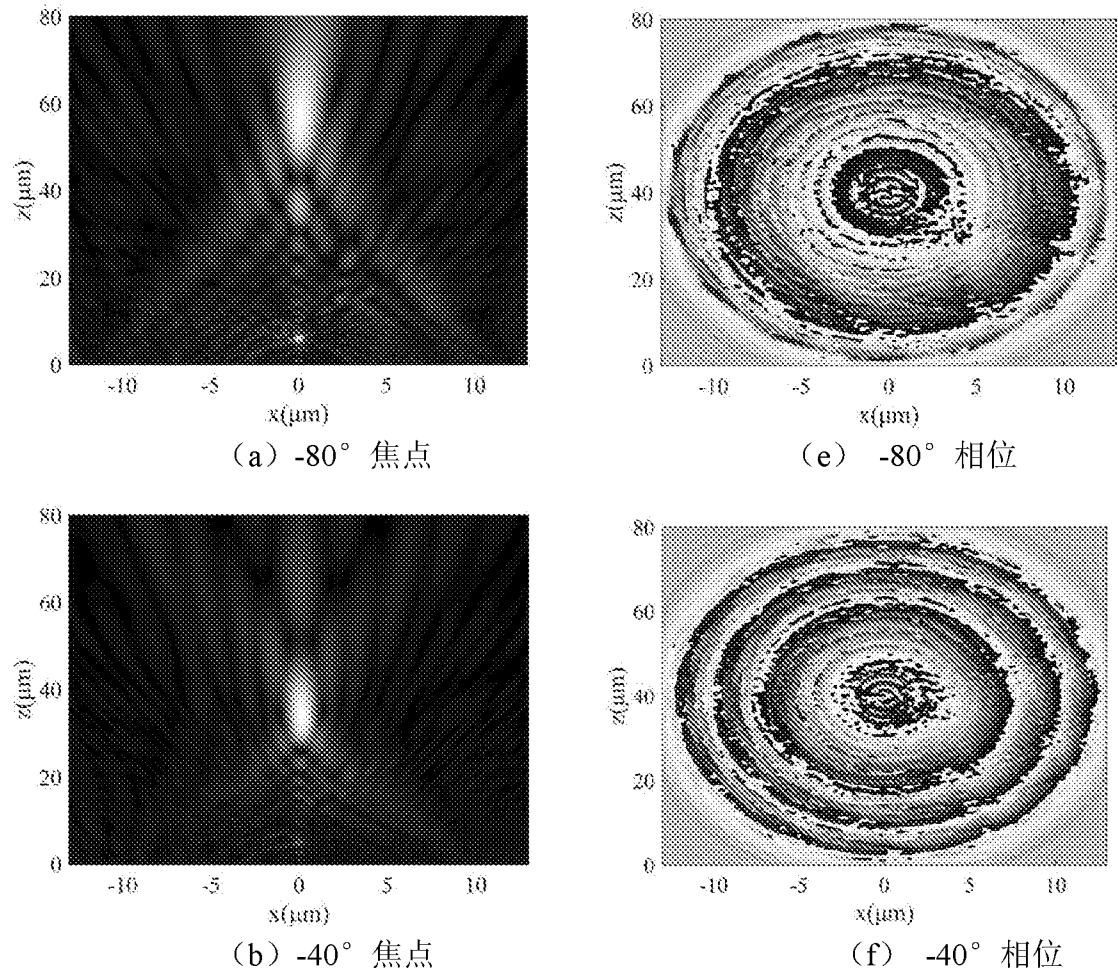


图 7



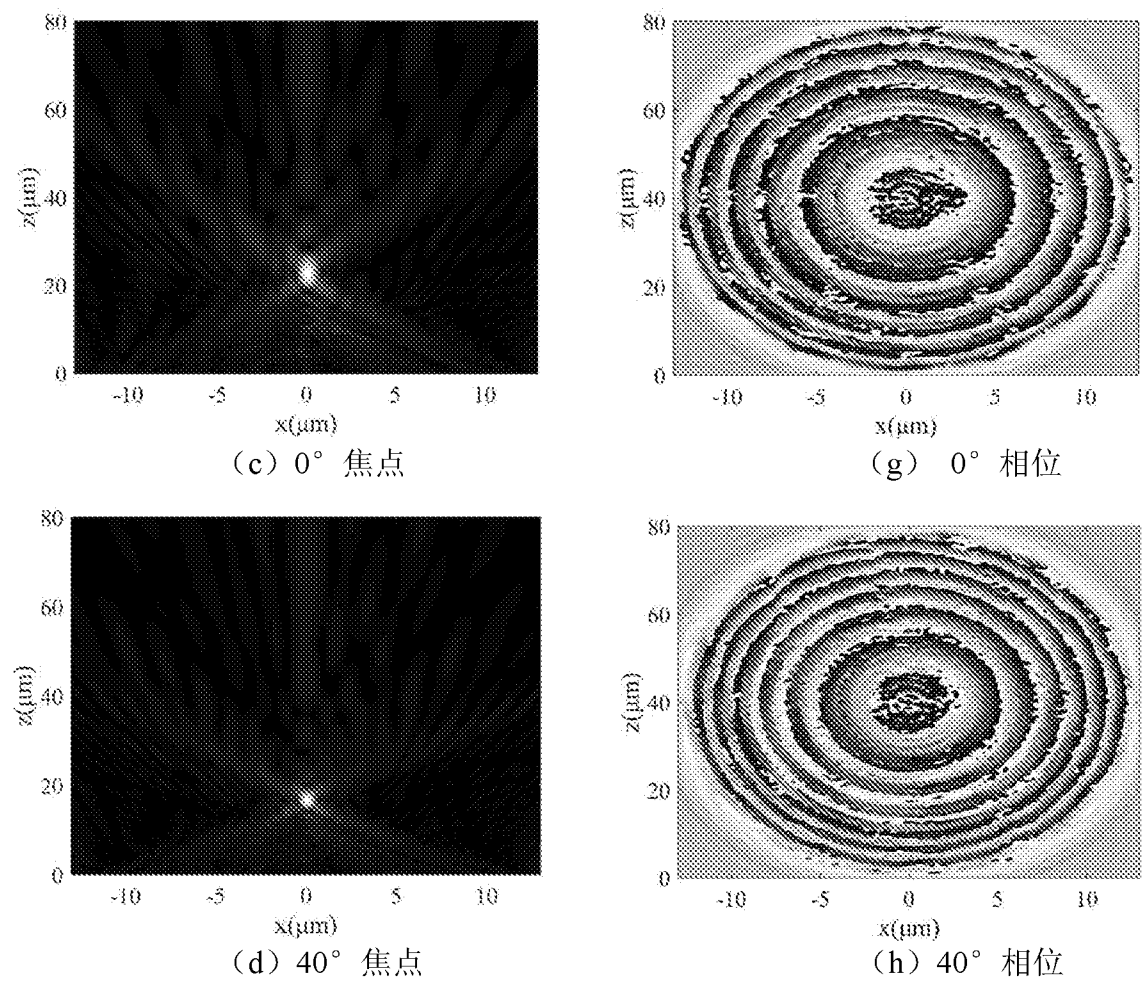
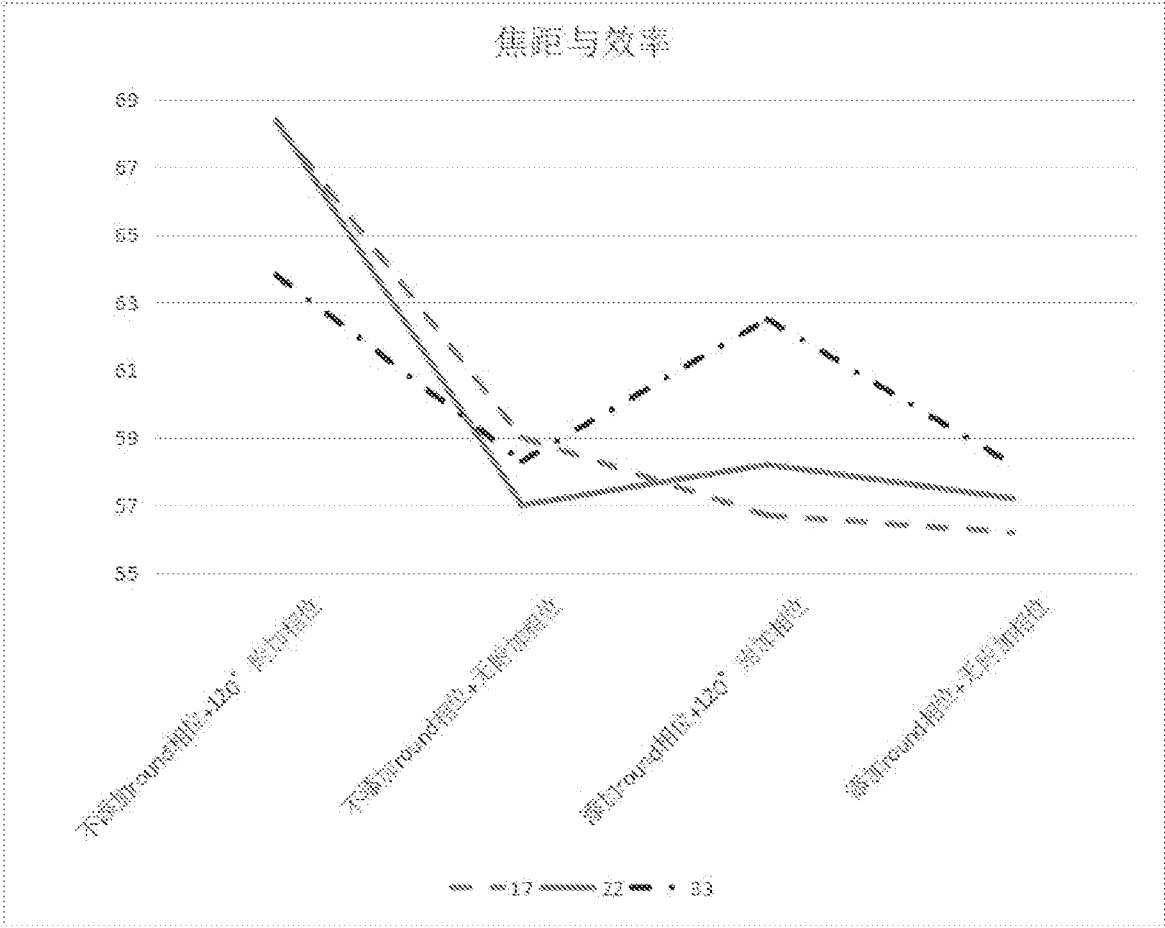


图 8





## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/116987

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G02B 3/00(2006.01)i; G02B 3/02(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; VEN; JPABS; USTXT; EPTXT; WOTXT; CNKI: 超透镜, 超表面, 附加, 相位, 双层, 两层, 变焦, 焦距, 范围, super, lens, addition+, phase, focal, range, two layers

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                    | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| PX        | CN 114815009 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 29 July 2022 (2022-07-29)<br>claims 1-9                                                 | 1-9                   |
| X         | CN 110161676 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 23 August 2019 (2019-08-23)<br>description, paragraphs [0009]-[0152], and figures 1-18 | 1-9                   |
| A         | CN 110412761 A (WUHAN UNIVERSITY) 05 November 2019 (2019-11-05)<br>entire document                                                                    | 1-9                   |
| A         | CN 112255711 A (WUHAN RESEARCH INSTITUTE OF POSTS & TELECOMMUNICATIONS CO., LTD.) 22 January 2021 (2021-01-22)<br>entire document                     | 1-9                   |
| A         | CN 109901251 A (GUILIN UNIVERSITY OF ELECTRONIC TECHNOLOGY) 18 June 2019 (2019-06-18)<br>entire document                                              | 1-9                   |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 November 2022

Date of mailing of the international search report

28 November 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/  
CN)  
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing  
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2022/116987**

| Patent document<br>cited in search report |           |   | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|-----------|---|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| CN                                        | 114815009 | A | 29 July 2022                         | None                    |                                      |
| CN                                        | 110161676 | A | 23 August 2019                       | CN 110161676            | B 08 September 2020                  |
| CN                                        | 110412761 | A | 05 November 2019                     | None                    |                                      |
| CN                                        | 112255711 | A | 22 January 2021                      | CN 112255711            | B 29 April 2022                      |
| CN                                        | 109901251 | A | 18 June 2019                         | None                    |                                      |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/116987

## A. 主题的分类

G02B 3/00(2006.01)i; G02B 3/02(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G02B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS;CNTXT;VEN;JPABS;USTXT;EPTXT;WOTXT;CNKI:超透镜, 超表面, 附加, 相位, 双层, 两层, 变焦, 焦距, 范围, super, lens, addition+, phase, focal, range, two layers

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                | 相关的权利要求 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|---------|
| PX   | CN 114815009 A (南京理工大学) 2022年7月29日 (2022 - 07 - 29)<br>权利要求1-9                   | 1-9     |
| X    | CN 110161676 A (华中科技大学) 2019年8月23日 (2019 - 08 - 23)<br>说明书第[0009]-[0152]段, 图1-18 | 1-9     |
| A    | CN 110412761 A (武汉大学) 2019年11月5日 (2019 - 11 - 05)<br>全文                          | 1-9     |
| A    | CN 112255711 A (武汉邮电科学研究院有限公司) 2021年1月22日 (2021 - 01 - 22)<br>全文                 | 1-9     |
| A    | CN 109901251 A (桂林电子科技大学) 2019年6月18日 (2019 - 06 - 18)<br>全文                      | 1-9     |

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年11月8日

国际检索报告邮寄日期

2022年11月28日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

沈婷婷

电话号码 (86-512)88997293

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/116987

| 检索报告引用的专利文件 |           |   | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利         | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|-----------|---|----------------|--------------|----------------|
| CN          | 114815009 | A | 2022年7月29日     | 无            |                |
| CN          | 110161676 | A | 2019年8月23日     | CN 110161676 | B 2020年9月8日    |
| CN          | 110412761 | A | 2019年11月5日     | 无            |                |
| CN          | 112255711 | A | 2021年1月22日     | CN 112255711 | B 2022年4月29日   |
| CN          | 109901251 | A | 2019年6月18日     | 无            |                |