



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113296167 B

(45) 授权公告日 2022.09.09

(21) 申请号 202110456064.2

G02B 3/00 (2006.01)

(22) 申请日 2021.04.26

G02B 27/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 陈春艳

申请公布号 CN 113296167 A

(43) 申请公布日 2021.08.24

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街
道高新技术产业园南区粤兴一道18号
香港理工大学产学研大楼205室

(72) 发明人 袁家琪 张景程 陈沐谷 蔡定平

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理人 谢松

(51) Int.Cl.

G02B 1/00 (2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

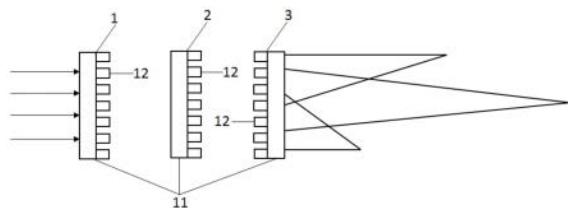
(54) 发明名称

一种全空间焦点可调超构透镜的设计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种全空间焦点可调超构透镜及其设计方法,包括:第一超构表面、第二超构表面以及第三超构表面,第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_1 = -a((x_1 + d)^2 + y_1^2)$,第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_2 = a((x_2 + d)^2 + y_2^2)$ ($a(x_2^2 + y_2^2)$) Φ_1 ,第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_3 = - (a(x_3^2 + y_3^2)) \Phi_2$,其中,a和d为常数,x₁和y₁为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标,x₂和y₂为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标,x₃和y₃为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标, Φ_1 和 Φ_2 为柱坐标系下的角度, $\Phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$, $\Phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ 。本发明的超构透镜的平面化结构避免了球差、色差的产生,增加了数值孔径,超构透镜体积小,利于集成,可实现全空间焦点自由可调。

CN 113296167 B



1. 一种全空间焦点可调超构透镜的设计方法,其特征在于,全空间焦点可调超构透镜包括:第一超构表面、第二超构表面以及第三超构表面,所述第一超构表面、所述第二超构表面以及所述第三超构表面均由基底层和设置于所述基底层上的若干纳米天线组成,所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_1 = -a((x_1 + d)^2 + y_1^2)$,所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式:

$P_2 = a((x_2 + d)^2 + y_2^2)(a(x_2^2 + y_2^2))\phi_1$,所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_3 = -(a(x_3^2 + y_3^2))\phi_2$,其中, a 和 d 为常数, x_1 和 y_1 为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标, x_2 和 y_2 为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标, x_3 和 y_3 为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标, ϕ_1 和 ϕ_2 为柱坐标系下的角, $\phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$;

所述第一超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第一超构表面的若干纳米天线的尺寸不同;

所述第二超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第二超构表面的若干纳米天线的尺寸不同;

所述第三超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第三超构表面的若干纳米天线的尺寸不同;

所述第一超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直,所述第二超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直,所述第三超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直;

所述第二超构表面设置于所述第一超构表面和所述第三超构表面之间,且所述第一超构表面的若干纳米天线和所述第三超构表面的若干纳米天线相对设置,所述第二超构表面的若干纳米天线与所述第一超构表面的若干纳米天线或所述第三超构表面的若干纳米天线相对设置;

所述若干纳米天线为圆柱形;

所述基底层的材质为二氧化硅,所述若干纳米天线的材质为二氧化钛、氮化镓和硅中的一种或多种,所述设计方法包括:

获取预先确定的所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标、所述第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标,根据所述第一平面坐标、所述第二平面坐标以及所述第三平面坐标,确定所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位;其中,所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_1 = -a((x_1 + d)^2 + y_1^2)$,所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_2 = a((x_2 + d)^2 + y_2^2)(a(x_2^2 + y_2^2))\phi_1$,所述第三

超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_3 = -(a(x_3^2 + y_3^2))\phi_2$ ，其中， a 和 d 为常数， x_1 和 y_1 为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标， x_2 和 y_2 为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标， x_3 和 y_3 为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标， ϕ_1 和 ϕ_2 为柱坐标系下的角度， $\phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$ ， $\phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ ；

根据所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位以及预先确定的天线半径与出射波相位的对应关系，确定所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一天线半径、所述第二超构表面的各个纳米天线对应第二天线半径以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的第三天线半径；

根据所述第一天线半径、所述第一平面坐标、所述第二天线半径、所述第二平面坐标、所述第三天线半径以及所述第三平面坐标，设计所述全空间焦点可调超构透镜；

所述天线半径与出射波相位的对应关系的确定方法包括：

将预设频率的波由不同半径的纳米天线组成的第四超构表面出射，获得不同半径的纳米天线对应的出射波相位；

根据不同半径的纳米天线及其对应的出射波相位，确定天线半径与出射波相位的对应关系；

超构透镜的入射波的相位变化范围为从 $-\pi$ 到 π 。

一种全空间焦点可调超构透镜的设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光学技术领域,尤其涉及一种全空间焦点可调超构透镜及其设计方法。

背景技术

[0002] 焦点可调光学透镜由于能够实现多焦点可调而在多焦平面显微、双焦物镜等方面得到广泛应用,但现有焦点可调光学透镜基于微透镜实现,一方面微透镜存在衍射极限无法进一步缩小,另一方面焦点可调范围越大,微透镜的机械运动占据的空间越大,导致现有焦点可调光学透镜体积大。另外,基于衍射光学元件制成的微透镜被限制在窄带内,导致现有焦点可调光学透镜的数值孔径较小。

[0003] 因此,现有技术有待于进一步地改进。

发明内容

[0004] 鉴于上述现有技术的不足,本发明的目的在于提供一种全空间焦点可调超构透镜及其设计方法,以解决现有焦点可调光学透镜体积大,数值孔径较小的问题。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 全空间焦点可调超构透镜,其中,包括:第一超构表面、第二超构表面以及第三超构表面,所述第一超构表面、所述第二超构表面以及所述第三超构表面均由基底层和设置于所述基底层上的若干纳米天线组成,所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_1 = -a((x_1+d)^2+y_1^2)$, 所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_2 = a((x_2+d)^2+y_2^2)(a(x_2^2+y_2^2))\Phi_1$, 所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_3 = -(a(x_3^2+y_3^2))\Phi_2$, 其中,a和d为常数,x₁和y₁为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标,x₂和y₂为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标,x₃和y₃为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标,Φ₁和Φ₂为柱坐标系下的角度,Φ₁ = tan⁻¹(y₂/x₂), Φ₂ = tan⁻¹(y₃/x₃)。

[0007] 所述的全空间焦点可调超构透镜,其中,所述第一超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第一超构表面的若干纳米天线的尺寸不同。

[0008] 所述的全空间焦点可调超构透镜,其中,所述第二超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第二超构表面的若干纳米天线的尺寸不同。

[0009] 所述的全空间焦点可调超构透镜,其中,所述第三超构表面的若干纳米天线呈周期性排列,所述第三超构表面的若干纳米天线的尺寸不同。

[0010] 所述的全空间焦点可调超构透镜,其中,所述第一超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直,所述第二超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直,所述第三超构表面的若干纳米天线的长轴与其对应的基底层垂直。

[0011] 所述的全空间焦点可调超构透镜,其中,所述第二超构表面设置于所述第一超构表面和所述第三超构表面之间,且所述第一超构表面的若干纳米天线和所述第三超构表面

的若干纳米天线相对设置，所述第二超构表面的若干纳米天线与所述第一超构表面的若干纳米天线或所述第三超构表面的若干纳米天线相对设置。

[0012] 所述的全空间焦点可调超构透镜，其中，所述若干纳米天线为圆柱形。

[0013] 所述的全空间焦点可调超构透镜，其中，所述基底层的材质为二氧化硅，所述若干纳米天线的材质为二氧化钛、氮化镓和硅中的一种或多种。

[0014] 一种所述的全空间焦点可调超构透镜的设计方法，其中，包括：

[0015] 获取预先确定的所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标、所述第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标，根据所述第一平面坐标、所述第二平面坐标以及所述第三平面坐标，确定所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位；其中，所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2+y_1^2)$ ，所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2+y_2^2)(a(x_2^2+y_2^2))\phi_1$ ，所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_3 = -(a(x_3^2+y_3^2))\phi_2$ ，其中， a 和 d 为常数， x_1 和 y_1 为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标， x_2 和 y_2 为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标， x_3 和 y_3 为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标， ϕ_1 和 ϕ_2 为柱坐标系下的角度， $\phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$ ， $\phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ ；

[0016] 根据所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位以及预先确定的天线半径与出射波相位的对应关系，确定所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一天线半径、所述第二超构表面的各个纳米天线对应第二天线半径以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应第三天线半径；

[0017] 根据所述第一天线半径、所述第一平面坐标、所述第二天线半径、所述第二平面坐标、所述第三天线半径以及所述第三平面坐标，设计所述全空间焦点可调超构透镜。

[0018] 所述的全空间焦点可调超构透镜的设计方法，其中，所述天线半径与出射波相位的对应关系的确定方法包括：

[0019] 将预设频率的波由不同半径的纳米天线组成的第四超构表面出射，获得不同半径的纳米天线对应的出射波相位；

[0020] 根据不同半径的纳米天线及其对应的出射波相位，确定天线半径与出射波相位的对应关系。

[0021] 有益效果：本发明通过满足特定相位分布的三片超构表面组成的超构透镜实现聚焦，能在空间三个维度自由操控焦点的位置，同时实现变焦和离轴聚焦功能，超构透镜体积小，利于集成，平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径，提高了成像分辨率。

附图说明

[0022] 为了更清楚的说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图示出的结构获得其他的附图。

- [0023] 图1是本发明实施例中提供的全空间焦点可调超构透镜的结构示意图；
[0024] 图2是本发明实施例中提供的超构表面单元的立体图；
[0025] 图3是本发明实施例中提供的纳米天线半径与出射波相位和透射率关系图。
[0026] 附图中各标记：1、第一超构表面；2、第二超构表面；3、第三超构表面；11、基底层；12、纳米天线。

具体实施方式

[0027] 本发明提供一种全空间焦点可调超构透镜及其设计方法，该超构透镜通过第一超构表面、第二超构表面和第三超构表面实现聚焦，超构透镜的平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径，通过控制三片超构表面满足相应的相位分布，可实现全空间焦点自由可调，超构透镜体积小，利于集成。为使本发明的目的、技术方案及效果更加清楚、明确，以下参照附图并举实例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0028] 在实施方式和申请专利范围中，除非文中对于冠词有特别限定，否则“一”与“所述”可泛指单一个或复数个。

[0029] 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。

[0030] 请参阅图1～图2，本发明提供了一种全空间焦点可调超构透镜。

[0031] 如图1所示，本发明所提供的一种全空间焦点可调超构透镜，可应用于多焦平面显微、双焦物镜等光学器件，通过控制三片超构表面满足相应的相位分布，可实现全空间焦点自由可调，超构透镜的平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径，超构透镜体积小，利于集成。其中，所述超构透镜包括：第一超构表面1、第二超构表面2以及第三超构表面3，所述第一超构表面1、所述第二超构表面2以及所述第三超构表面3均由基底层11和设置于所述基底层11上的若干纳米天线12组成，所述第一超构表面1的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2+y_1^2)$ ，所述第二超构表面2的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2+y_2^2)(a(x_2^2+y_2^2))\Phi_1$ ，所述第三超构表面3的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_3 = -(a(x_3^2+y_3^2))\Phi_2$ ，其中，a和d为常数， x_1 和 y_1 为第一超构表面1 的各个纳米天线12对应的第一平面坐标， x_2 和 y_2 为第二超构表面2的各个纳米天线12对应的第二平面坐标， x_3 和 y_3 为第三超构表面3的各个纳米天线12对应的第三平面坐标， Φ_1 和 Φ_2 为柱坐标系下的角度， $\Phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$ ， $\Phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ 。本实施例中基于超构表面的超构透镜相对于传统基于微透镜的焦点可调光学透镜，相位调制稳定，平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径。

[0032] 具体应用过程中，由于第一超构表面1的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2+y_1^2)$ ，第二超构表面2的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2+y_2^2)(a(x_2^2+y_2^2))\Phi_1$ ，第三超构表面3的若干纳米天线 12对应的出射波相位

满足公式： $P_3 = -a(x_3^2 + y_3^2) \Phi^2$ ，当光波或电磁波入射到超构透镜时，由第一超构表面1、第二超构表面2和第三超构表面3 对入射波的波前进行操控，实现光场聚焦，当旋转第一超构表面1、第二超构表面2和第三超构表面3，改变三片超构表面之间的相对旋转角度后，三片超构表面对入射波前的操控方式也会发生改变，则聚焦光斑的位置也会随之改变，从而在空间三个维度自由操控焦点的位置，同时实现变焦和离轴聚焦两个功能。发明人经研究发现，当本实施例中的三片超构表面的直径为1mm时，可实现焦点的纵向调制在厘米级别，而焦点的离轴偏移距离最大达到超构表面半径。

[0033] 继续参照图1和图2所示，所述第一超构表面1的若干纳米天线12呈周期性排列，为了使第一超构表面1的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2 + y_1^2)$ ，第一超构表面1的若干纳米天线12 的尺寸不同。在设计超构透镜时，本实施例中预先确定纳米天线尺寸与出射波相位的对应关系，然后根据第一超构表面1的各个纳米天线12需要满足的出射波相位确定其对应的尺寸。在一具体实施方式中，所述第一超构表面1的若干纳米天线12为圆柱形结构，第一超构表面1的若干纳米天线 12的高度相同，第一超构表面1的若干纳米天线12的尺寸不同具体是指第一超构表面1的若干纳米天线12的半径不同，在设计超构透镜时，预先确定纳米天线半径与出射波相位的对应关系，然后根据第一超构表面1的各个纳米天线12需要满足的出射波相位确定其对应的半径，即可得到满足相位分布公式的第一超表面1。

[0034] 与第一超表面1类似，所述第二超构表面2的若干纳米天线12呈周期性排列，为了使第二超构表面2的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2 + y_2^2)(a(x_2^2 + y_2^2)) \Phi_1$ ，第二超构表面2的若干纳米天线12的尺寸不同。在设计超构透镜时，本实施例中预先确定纳米天线尺寸与出射波相位的对应关系，然后根据第二超构表面2的各个纳米天线 12需要满足的出射波相位确定其对应的尺寸。在一具体实施方式中，所述第二超构表面2的若干纳米天线12为圆柱形结构，第二超构表面2的若干纳米天线12的高度相同，第二超构表面2的若干纳米天线12的尺寸不同具体是指第二超构表面2的若干纳米天线12的半径不同，在设计超构透镜时，预先确定纳米天线半径与出射波相位的对应关系，然后根据第二超构表面2的各个纳米天线12需要满足的出射波相位确定其对应的半径，即可得到满足相位分布公式的第一超表面2。

[0035] 与第一超表面1和第二超表面2类似，所述第三超构表面3的若干纳米天线12呈周期性排列，为了使第三超构表面3的各个纳米天线12对应的出射波相位满足公式： $P_3 = a((x_3+d)^2 + y_3^2)(a(x_3^2 + y_3^2)) \Phi_1$ ，第三超构表面3的若干纳米天线12的尺寸不同。在设计超构透镜时，本实施例中预先确定纳米天线尺寸与出射波相位的对应关系，然后根据第三超构表面3的各个纳米天线12需要满足的出射波相位确定其对应的尺寸。在一具体实施方式中，所述第三超构表面3的若干纳米天线12为圆柱形结构，第三超构表面3的若干纳米天线12的高度相同，第三超构表面3的若干纳米天线 12的尺寸不同具体是指第三超构表面3的若干纳米天线12的半径不同，在设计超构透镜时，预先确定纳米天线半径与出射波相位的对应关系，然后根据第三超构表面3的各个纳米天线12需要满足的相位确定其对应的半径，即可得到满足相位分布公式的第一超表面3。

[0036] 继续参照图1和图2所示，所述第一超构表面1的若干纳米天线12的长轴与其对应的基底层11垂直，所述第二超构表面2的若干纳米天线12 的长轴与其对应的基底层11垂

直,所述第三超构表面3的若干纳米天线12 的长轴与其对应的基底层11垂直。所述基底层11的材质为二氧化硅,所述若干纳米天线12的材质为二氧化钛、氮化镓和硅中的一种或多种。图3 为本实施例提供的超构透镜的纳米天线半径与出射波相位和透射率的关系图,从图3可以看出,本实施例提供的超构透镜可以实现入射波从 $-\pi$ 到 π 的相位变化,并且透过超构表面的波的透过率在80%以上,表明纳米天线不会对超构透镜的效率造成干扰。

[0037] 本实施例中第一超构表面1、第二超构表面2和第三超构表面3的位置可以根据需要进行设置,在一具体实施方式中,所述第二超构表面2设置于所述第一超构表面1和所述第三超构表面3之间,且所述第一超构表面1 的若干纳米天线12和所述第三超构表面3的若干纳米天线12相对设置,而所述第二超构表面2的若干纳米天线12与所述第一超构表面1的若干纳米天线12或所述第三超构表面3的若干纳米天线12相对设置。

[0038] 在另一具体实施方式中,所述第一超构表面1设置于所述第二超构表面2和所述第三超构表面3之间,且所述第二超构表面2的若干纳米天线 12和所述第三超构表面3的若干纳米天线12相对设置,而所述第一超构表面1的若干纳米天线12与所述第二超构表面2的若干纳米天线12或所述第三超构表面3的若干纳米天线12相对设置。

[0039] 当然,本发明中还可以将第三超构表面3设置于所述第一超构表面1 和所述第二超构表面2之间,且所述第一超构表面1的若干纳米天线12和所述第二超构表面2的若干纳米天线12相对设置,而所述第三超构表面3 的若干纳米天线12与所述第一超构表面1的若干纳米天线12或所述第二超构表面2的若干纳米天线12相对设置。

[0040] 基于上述全空间焦点可调超构透镜,本发明实施例还提供一种所述的全空间焦点可调超构透镜的设计方法,包括:

[0041] S1、获取预先确定的所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标、所述第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标,根据所述第一平面坐标、所述第二平面坐标以及所述第三平面坐标,确定所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位;其中,所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_1 = -a((x_1+d)^2+y_1^2)$,所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_2 = a((x_2+d)^2+y_2^2)(a(x_2^2+y_2^2))\phi_1$,所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式: $P_3 = -(a(x_3^2+y_3^2))\phi_2$,其中,a和d为常数,x₁和y₁为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标,x₂和y₂为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标,x₃和y₃为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标, ϕ_1 和 ϕ_2 为柱坐标系下的角度, $\phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$;

[0042] S2、根据所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位以及预先确定的天线半径与出射波相位的对应关系,确定所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一天线半径、所述第二超构表面的各个纳米天线对应第二天线半径以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应第三天线半径;

[0043] 根据所述第一天线半径、所述第一平面坐标、所述第二天线半径、所述第二平面坐标、所述第三天线半径以及所述第三平面坐标,设计所述全空间焦点可调超构透镜。

[0044] 在设计全空间焦点可调超构透镜时,本实施例中首先确定所述第一超构表面的各

个纳米天线对应的第一平面坐标、所述第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标，然后将所述第一平面坐标、所述第二平面坐标和所述第三平面坐标分别代入所述第一超构表面、所述第二超构表面和所述第三超构表面满足的相位分布公式中，确定所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位；其中，所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2 + y_{12}^2)$ ，所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2 + y_2^2) (a(x_2^2+y_2^2)) \Phi_1$ ，所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_3 = -a((x_3+d)^2 + y_3^2) (a(x_3^2+y_3^2)) \Phi_2$ ，其中， a 和 d 为常数， x_1 和 y_1 为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标， x_2 和 y_2 为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标， x_3 和 y_3 为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标， Φ_1 和 Φ_2 为柱坐标系下的角度， $\Phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$ ， $\Phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ 。

[0045] 进一步地，在获取到所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位后，根据所述第一超构表面的各个纳米天线、所述第二超构表面的各个纳米天线以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位以及预先确定的天线半径与出射波相位的对应关系，确定所述第一超构表面的各个纳米天线对应的第一天线半径、所述第二超构表面的各个纳米天线对应第二天线半径以及所述第三超构表面的各个纳米天线对应第三天线半径。最后，根据所述第一天线半径、所述第一平面坐标、所述第二天线半径、所述第二平面坐标、所述第三天线半径以及所述第三平面坐标，设计所述全空间焦点可调超构透镜。基于本发明实施例提供的方法设计出的超构透镜可实现全空间焦点自由可调，超构透镜的平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径，超构透镜体积小，利于集成。

[0046] 综上所述，本发明提供了一种全空间焦点可调超构透镜及其设计方法，包括：第一超构表面、第二超构表面以及第三超构表面，所述第一超构表面、所述第二超构表面以及所述第三超构表面均由基底层和设置于所述基底层上的若干纳米天线组成，所述第一超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_1 = -a((x_1+d)^2 + y_1^2)$ ，所述第二超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_2 = a((x_2+d)^2 + y_2^2) (a(x_2^2+y_2^2)) \Phi_1$ ，所述第三超构表面的各个纳米天线对应的出射波相位满足公式： $P_3 = -a((x_3+d)^2 + y_3^2) (a(x_3^2+y_3^2)) \Phi_2$ ，其中， a 和 d 为常数， x_1 和 y_1 为第一超构表面的各个纳米天线对应的第一平面坐标， x_2 和 y_2 为第二超构表面的各个纳米天线对应的第二平面坐标， x_3 和 y_3 为第三超构表面的各个纳米天线对应的第三平面坐标， Φ_1 和 Φ_2 为柱坐标系下的角度， $\Phi_1 = \tan^{-1}(y_2/x_2)$ ， $\Phi_2 = \tan^{-1}(y_3/x_3)$ 。本发明的超构透镜可实现全空间焦点自由可调，超构透镜的平面化结构避免了球差、色差的产生，增加了数值孔径，超构透镜体积小，利于集成。

[0047] 应当理解的是，本发明的应用不限于上述的举例，对本领域普通技术人员来说，可以根据上述说明加以改进或变换，所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

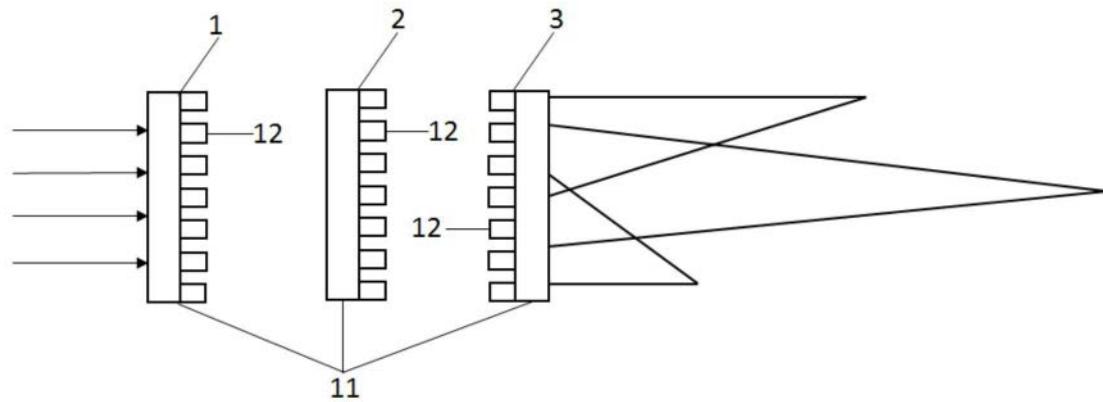


图1

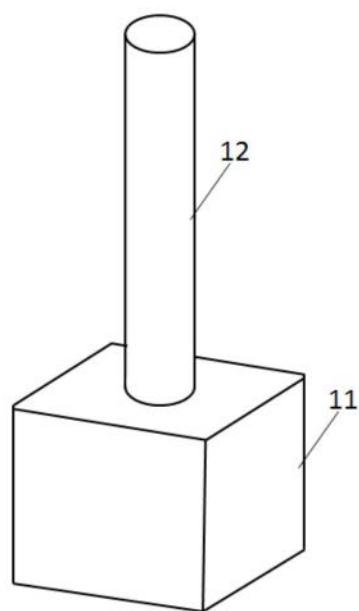


图2

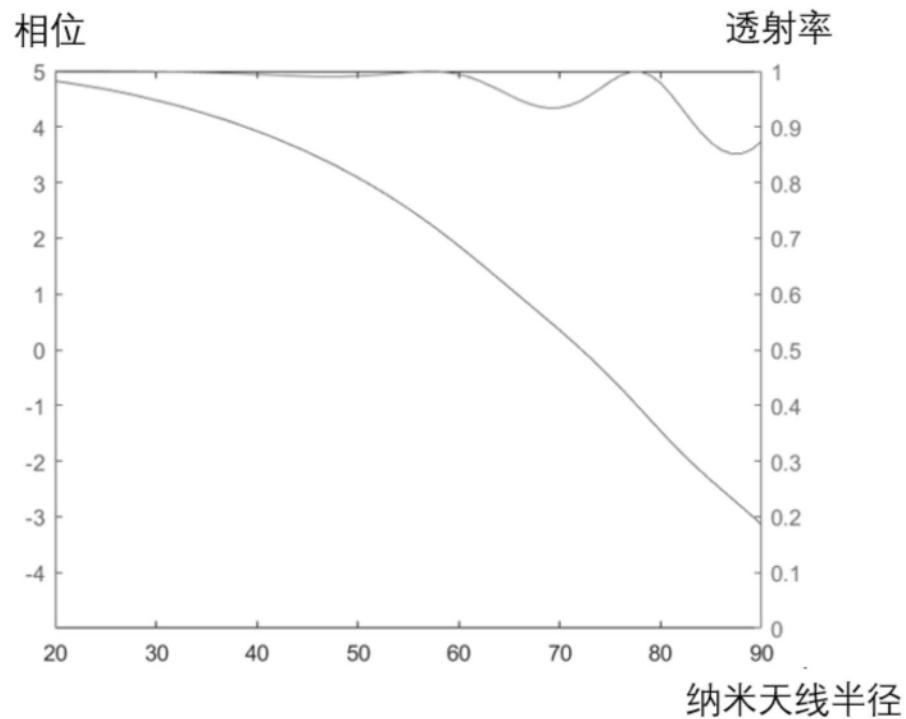


图3