(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119335630 A
(43)申请公布日 2025.01.21

(21)申请号 202410947465.1
(22)申请日 2024.07.16
(30)优先权数据
2023-117275 2023.07.19 JP
(71)申请人 佳能株式会社
地址 日本
(72)发明人 石橋友彦
(74)专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所有限公司 11038
专利代理师 曾琳
(51)Int.Cl.
G02B 3/08(2006.01)
G02B 1/00(2006.01)
G02B 7/02(2021.01)
G03B 17/12(2021.01)
H04N 23/55(2023.01)

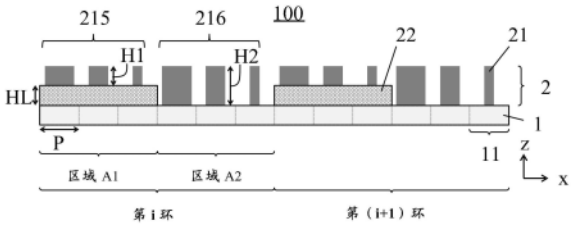
权利要求书2页 说明书37页 附图13页

(54)发明名称

光学元件、光学系统、透镜装置和图像拾取装置

(57)摘要

本公开涉及光学元件、光学系统、透镜装置和图像拾取装置。光学元件包括基板和同心布置在基板上的多个环形部分。多个环形部分包括第一环形部分,第一环形部分包括设置有基层的第一区域和未设置基层的第二区域。第一区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第一结构。第二区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第二结构。



CN 119335630 A

1.一种光学元件,包括:

基板;以及

同心布置在基板上的多个环形部分,

其特征在于,所述多个环形部分包括第一环形部分,第一环形部分包括设置有基层的第一区域和未设置基层的第二区域,

其中第一区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第一结构,并且

其中第二区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第二结构。

2.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,基层由与所述多个第一结构的材料相同的材料制成。

3.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.20 \leq H1/H2 \leq 0.90$

其中H1为所述多个第一结构中的每一个的高度,并且H2为所述多个第二结构中的每一个的高度。

4.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.80 \leq (H1+HL)/H2 \leq 1.20$

其中H1为所述多个第一结构中的每一个的高度,H2为所述多个第二结构中的每一个的高度,并且HL为基层的高度。

5.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,所述多个第一结构对于垂直入射到所述基板的表面的光引起的相位延迟量大于所述多个第二结构对于所述光引起的相位延迟量。

6.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.50 \leq V1s \leq 1.00$

$0.80 \leq V2a/V2s \leq 1.20$

其中HL为基层的高度,V1s为从所述基板的表面到高度HL的范围内所述多个第一结构的填充率的最大值,V2s为从所述基板的表面到高度HL的范围内所述多个第二结构的填充率的最大值,并且V2a为从高度HL处的位置到所述多个第一结构和所述多个第二结构的尖端中的对应尖端的范围内所述多个第一结构和所述多个第二结构的填充率的最大值。

7.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.20 \leq V1a/V1s \leq 0.80$

其中HL为基层的高度,V1s为从所述基板的表面到高度HL的范围内所述多个第一结构的填充率的最大值,并且V1a为从高度HL处的位置到所述多个第一结构的尖端的范围内所述多个第一结构的填充率的最大值。

8.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$1.05 \leq Wmax1/Wmin1 \leq 6.00$

$1.05 \leq Wmax2/Wmin2 \leq 6.00$

其中Wmax1和Wmin1分别为所述多个第一结构的最大宽度和最小宽度,并且Wmax2和Wmin2分别为所述多个第二结构的最大宽度和最小宽度。

9.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,由所述多个第一结构和所述多个第二结构中的每一个引起的相位调制量在径向方向上单调变化。

10.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.35 \leq AR1/AR2 \leq 2.00$

其中AR1为所述多个第一结构的纵横比的最大值,并且AR2为所述多个第二结构的纵横比的最大值。

11.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.50 \leq H2/\lambda 0 \leq 4.00$

其中H2为所述多个第二结构中的每一个的高度,并且λ0为参考波长。

12.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.70 \leq Wmax1/Wmax2 \leq 1.40$

其中Wmax1为所述多个第一结构的最大宽度,并且Wmax2为所述多个第二结构的最大宽度。

13.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.10 \leq P/H2 \leq 0.60$

其中P为所述多个第二结构在径向方向上的排列周期,并且H2为所述多个第二结构中的每一个的高度。

14.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.15 \leq E/n \leq 0.95$

其中E为第一区域与第二区域之间的边界处的归一化相位,并且n为设计的衍射级。

15.根据权利要求1所述的光学元件,其特征在于,满足以下不等式:

$0.00 \leq H2/t \leq 0.10$

其中H2为所述多个第二结构中的每一个的高度,并且t为所述基板的厚度。

16.一种光学系统,包括多个光学元件,所述多个光学元件包括根据权利要求1至15中的任一项所述的光学元件。

17.一种透镜装置,包括:

根据权利要求16所述的光学系统;以及

保持器,被配置为保持所述光学系统。

18.一种图像拾取装置,包括:

根据权利要求16所述的光学系统;以及

图像传感器,被配置为接收由所述光学系统形成的图像。

光学元件、光学系统、透镜装置和图像拾取装置

技术领域

[0001] 实施例的一个方面涉及光学元件、光学系统、透镜装置和图像拾取装置。

背景技术

[0002] 为了减小图像拾取装置等中的光学系统的尺寸,传统上已知一种光学元件(超透镜),其具有在基板表面上形成的精细不平坦(起伏、浮雕或纹理)结构,并且利用衍射提供光会聚或发散效果。日本专利特许公开号2021-99400公开了一种作为太赫兹波透镜的超透镜。

[0003] 为了提高具有精细不平坦结构的光学元件的衍射效率(导向特定衍射角度的光量与入射光量的比率),精细不平坦结构的重复周期(间距)可以小于入射光的波长。通过更改每个间距的精细不平坦结构的形状,可以实现平滑的相位分布。

[0004] 但是,随着间距减小,精细不平坦结构的纵横比增加,因此,变得难以形成精细不平坦结构及维持其形状,并且精细不平坦结构可能因微小的负荷、温度、压力等而变形。

发明内容

[0005] 根据本公开的一个方面的光学元件包括基板,以及同心布置在基板上的多个环形部分。该多个环形部分包括第一环形部分,该第一环形部分包括设置有基层的第一区域和未设置基层的第二区域。第一区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第一结构。第二区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第二结构。均具有上述光学元件的光学系统、透镜装置和图像拾取装置也构成本公开的其他方面。

[0006] 通过以下参考附图对实施例的描述,本公开的各种实施例的进一步特征将变得清楚。

附图说明

[0007] 图1A、1B和1C是根据每个示例的光学元件的构造图。

[0008] 图2是根据比较示例的光学元件的构造图。

[0009] 图3图示了每个示例中光学元件的不平坦元件的形状与相位调制量之间的关系。

[0010] 图4图示了比较示例中的光学元件的不平坦元件的形状与相位调制量之间的关系。

[0011] 图5A、5B和5C解释了根据每个示例的光学元件的制造方法。

[0012] 图6解释了根据每个示例的偏移层。

[0013] 图7解释了根据每个示例的光学元件的径向方向上归一化相位的调制量。

[0014] 图8解释了根据每个示例和比较示例的每个光学元件的不平坦元件在径向方向上的宽度。

[0015] 图9A和9B解释了根据每个示例的元件填充率。

[0016] 图10A、10B、10C和10D解释了根据每个示例的基层的偏移。

[0017] 图11A、11B、11C和11D解释了根据每个示例的不平坦元件的形状。

[0018] 图12是根据示例16的光学元件的构造图。

[0019] 图13A和13B是根据示例19的光学元件的构造图。

[0020] 图14解释了包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统。

[0021] 图15解释了具有根据上述任一个示例的光学元件的图像拾取装置。

具体实施方式

[0022] 现在参考附图,将对根据本公开的实施例进行详细描述。

[0023] 现在参考图1A、1B和1C,将描述根据每个示例的光学元件100。图1A、1B和1C是光学元件100的构造图。图1A是从y轴方向看到的光学元件100(在xz平面上)的放大截面图。图1B是从z轴方向(光轴方向)看到的光学元件100(在xy平面上)的放大顶视图。图1C是从z轴方向(光轴方向)看到的光学元件100(在xy平面上)的整体顶视图。在每个示例中,光学元件100的光轴方向和基板1的厚度方向与z轴方向一致。

[0024] 根据每个示例的光学元件100包括基板1和形成在基板1上的不平坦结构(柱状物)2。不平坦结构2包括多个不平坦元件(多个结构)21和基层22,该多个不平坦元件包括在径向方向上周期性布置的凹部或凸部中的至少一个,该基层22在基板1的厚度方向(z轴方向)上具有基本恒定的厚度。术语“基本恒定”意味着虽然基层20的厚度可以尽可能恒定,但由于制造误差等原因,厚度不必严格恒定。基层22的厚度例如在满足以下不等式的范围内。

[0025] 满足以下不等式(1):

[0026] $1.00 \leqslant A/B < 1.50$ (1)

[0027] 其中A和B分别为基板1中基层22的最大厚度和最小厚度。

[0028] 不等式(1)可以用下面的不等式(1a)代替:

[0029] $1.00 \leqslant A/B < 1.20$ (1a)

[0030] 不等式(1)可以用下面的不等式(1b)代替:

[0031] $1.00 \leqslant A/B < 1.15$ (1b)

[0032] 不等式(1)可以用下面的不等式(1c)代替:

[0033] $1.00 \leqslant A/B < 1.10$ (1c)

[0034] 不等式(1)可以用下面的不等式(1d)代替:

[0035] $1.00 \leqslant A/B < 1.05$ (1d)

[0036] 在基板1的径向方向上形成周期性的相位差(环形部分或环)可以为入射光提供会聚或发散效果。光学元件100包括多个环形部分,其包括沿着径向方向部署的第一环形部分(第i环形部分)和第二环形部分(第(i+1)环形部分),以相对于光学元件100的中心在圆周方向上延伸。多个环形部分中的每一个具有沿着光学元件100的径向方向部署的区域A1(第一区域)和区域A2(第二区域)。在每个示例中,多个环形部分中的至少一个可以具有区域A1和A2,但是多个环形部分可以具有区域A1和A2,并且所有环形部分可以具有区域A1和A2。

[0037] 多个不平坦元件(多个结构)21具有部署在区域A1中的多个第一结构215和部署在区域A2中的多个第二结构216。在区域A1中,多个第一结构215经由基层22形成在基板1上。在区域A2中,多个第二结构216直接形成在基板1上(没有基层22)。多个第一结构215在径向方向上具有不同的宽度。类似地,多个第二结构216在径向方向上具有不同的宽度。但是,多

个第一结构215的宽度不必全部不同,其中一些可以相同。这同样适用于多个第二结构216的宽度。

[0038] 基板1是由合成石英制成的透明平板。基板1可以是反射入射光的平面镜,或者可以是具有任意曲率的弯曲表面。基板1的材料不限于合成石英,并且可以是无机玻璃、诸如塑料之类的有机材料、陶瓷、金属等。不平坦结构2形成在基板1的表面上,并且对穿过不平坦结构2的光提供相位差,从而产生光会聚或发散效果。每个示例通过以其中2nπ(n=1、2、…,表示设计的衍射级或某个衍射级的整数)的相位差同心且周期性地重复的环形部分形成相位分布,获得几乎与衍射光学元件的光会聚效果相当的光会聚效果。

[0039] 不平坦结构2具有不平坦元件21和基层22,不平坦元件21由周期性布置的凹部或凸部构成。在每个示例中,不平坦元件21由介电材料Si_3N_4制成的凸柱元件构成。不平坦元件21的形状不限于凸柱元件,而是可以为多棱柱、多棱锥、圆锥、任意凹的元件或它们的组合。不平坦元件21的材料可以为TiO_2、GaN、GaP、GaAs、Si、SiC、Al_2O_3、SiO_2等。

[0040] 不平坦元件21是部署在基板1的径向方向上被划分成正方形的单元分割段11的中心处的凸柱元件。由于段11的宽度(间距)小于入射光的波长,因此无论不平坦元件21的形状如何,光都根据占据单元分割(段)的填充率(元件填充率)所需的有效折射率而被有效地相位调制。例如,在入射光处于可见光范围(400至700nm)内的情况下,间距(阵列周期)P[nm]可以小于400nm,并且由于可以抑制不必要的衍射光,因此可以进一步减小间距P。第i环形部分(i=1,2,…)具有区域A1和区域A2,区域A1具有部署在多个不平坦元件21与基板1之间的近似平坦的基层22,区域A2不具有部署在多个不平坦元件21与基板1之间的近似平坦的基层22。

[0041] 基层22在基板1的厚度方向上具有大致恒定的厚度,并且由Si_3N_4制成,这是与每个示例中的不平坦元件21的材料相同的材料。第i环形部分中的区域A1和A2各自具有多个不平坦元件21,并且每个形状在基板1的径向方向上具有不同的宽度。由此,在环形部分中形成2nπ的相位分布。在与光轴正交的方向上,RLi和RHi分别是从光轴开始的第i环形部分中的区域A1和A2的半径。如从图1C中可以理解的,区域A1和A2在与光轴(z轴)正交的方向上交替地同心布置,使得RLi<RHi。

[0042] 现在参考图2,将对根据比较示例的不具有基层22的光学元件101进行描述。图2是根据比较示例的光学元件101的构造图。为了在环形部分内形成2nπ的相位分布,更改作为不平坦元件21的凸柱元件的宽度(直径),并且更改段内不平坦元件21的元件填充率。即,元件填充率从具有大直径的凸柱元件到具有小直径的凸柱元件依次减小,并且形成期望的相位分布。在图2中所示的光学元件101中,元件填充率仅通过凸柱元件的直径进行调整,因此直径被显著更改。因此,凸柱元件的最小直径趋于减小,并且纵横比(不平坦元件21的高度与宽度之比(高度/宽度))趋于增大。对于具有大纵横比的相对细长元件,在因接触或振动而施加负载的情况下,或者在诸如温度或压力之类的外部因素变化的情况下,形状可能会变形、倾斜或翘起。因此,每个示例通过在环形部分中设置基层22以提高区域A2中的相位调制量,来在不增加纵横比的情况下形成不平坦结构2,从而减少不平坦元件21的宽度变化量。

[0043] 图3图示了根据每个示例的光学元件100的不平坦元件21的形状与相位调制量之间的关系,并且涉及作为不平坦元件21的凸柱元件的直径和相位调制量。在图3中,横轴表

示凸柱元件的直径W(以段的间距P归一化的归一化直径),并且纵轴表示以2π归一化相位调制量而获得的归一化相位。在归一化相位在0至0.54范围内的情况下,没有基层22的区域A2中的凸柱元件的归一化直径从0.552变为0.790。在归一化相位在0.54至1范围内的情况下,具有基层22的区域A1中的凸柱元件的归一化直径从0.253变为0.790。从而可以获得归一化相位0至1的相位调制量,区域A1中的不平坦元件21的纵横比的最大值AR1为7.2,并且区域A2中的不平坦元件21的纵横比的最大值AR2为6.6。

[0044] 图4图示了根据比较示例的光学元件101的不平坦元件21的形状与相位调制量之间的关系,并且涉及不具有基层22的光学元件101中的凸柱元件的直径和相位调制量。在图4中,横轴和纵轴分别与图3的横轴和纵轴类似。在图4中,为了获得归一化相位0至1的相位调制量,归一化直径将从0.177更改为0.823,并且纵横比的最大值为20.7,这比设置基层的情况大。由此可以理解,设置基层22可以抑制不平坦元件21的纵横比。

[0045] 现在参考图5A、5B和5C,将描述根据每个示例的光学元件100的制造方法。可以使用光刻技术制造光学元件100。图5A、5B和5C解释了制造光学元件100的方法,并且图示了使用纳米压印光刻制造光学元件100的步骤。图5A图示了模具31,其形状是通过电子束、激光等形成的不平坦元件21的不平坦形状的反转。如图5B中所示,将抗蚀剂材料32施加到沉积在基板1上的膜33,压制模具31,并照射紫外线等,使得在抗蚀剂材料32上形成模具31的不平坦形状的反转形状。随后,如图5C中所示,剥离模具31并进行显影,使得抗蚀剂材料32的不平坦形状转移到膜33,从而在光学元件100的基板1上形成不平坦结构2。在每个示例中,制造不平坦结构2的方法不限于纳米压印光刻,并且可以使用其他方法,诸如使用电子束、激光等直接形成不平坦结构2。

[0046] 图6解释了根据每个示例的偏移层34。如图6中所示,可以设置跨越区域A1和A2部署的偏移层34,而不是如图5C中所示那样在基板1上直接形成不平坦结构2的结构。基板1可以包括偏移层34,并且作为基板1处理。

[0047] 在每个示例中,基层22可以由与不平坦元件21的材料相同的材料制成。如图5B中所示,制备如膜33之类的厚度均匀的材料相对容易。因此,在基于膜33形成基层22和不平坦结构2时,基层22可以由与不平坦元件21的材料相同的材料制成。

[0048] 在每个示例中,可以满足以下不等式(2):

[0049] $0.20 \leq H1/H2 \leq 0.90$ (2)

[0050] 其中H1为区域A1中多个第一结构215中的每一个的高度(第一高度),并且H2为区域A2中多个第二结构216中的每一个的高度(第二高度)。通过满足不等式(2),制造工艺变得简单,并且不平坦元件21的形成变得更加容易。

[0051] 不等式(2)涉及不平坦元件21的形状。由于基层22部署在区域A1中,因此即使区域A1中的不平坦元件21的高度H1低于区域A2中的不平坦元件21的高度H1,也可以增加相位调制量。因此,可以实现不平坦元件21的纵横比减小的形状,特别是在区域A1中。

[0052] 在值变得低于不等式(2)的下限的情况下,区域A1中的不平坦元件21的高度H1变得相对低,并且在更改区域A1中的不平坦元件21的宽度的情况下,相位调制量无法增加。此时,为了获得期望的相位调制量,区域A1中的不平坦元件21的宽度将要相对显著地更改,使得无法获得减小区域A1中的纵横比的效果。在每个示例中,不等式(2)的下限为0.25、0.30、0.32、0.34、0.35、0.36、0.38或0.40。

[0053] 另一方面,在值变得高于不等式(2)的上限的情况下,区域A2中的不平坦元件21的高度H2变得相对低,并且更改区域A2中的不平坦元件21的宽度时的相位调制量无法增大。此时,为了获得期望的相位调制量,区域A2中的不平坦元件21的宽度将要相对显著地更改,使得无法获得减小区域A2中的纵横比的效果。可以将不等式(2)的上限更改为0.88、0.86、0.84、0.82、0.80、0.78、0.76、0.74、0.72、0.70、0.69、0.68、0.67、0.66或0.65。

[0054] 在每个示例中,多个第一结构215的高度H1不一定要相同,并且可以彼此不同。这一点也同样适用于多个第二结构216的高度H2。

[0055] 在每个示例中,可以满足以下不等式(3):

[0056] $0.80 \leqslant (H1+HL)/H2 \leqslant 1.20$ (3)

[0057] 其中HL是区域A1中的基层22的高度。高度HL例如是区域A1中的基层22的平均高度。即使高度HL是最小高度或最大高度,也可以满足以下不等式(3)。

[0058] 不等式(3)涉及不平坦元件21和基层22的高度。通过满足不等式(3),相对于基板1的区域A1中的不平坦元件21的尖端位置和区域A2中的不平坦元件21的尖端位置变得大致相等。因此,在由具有均匀厚度的膜形成不平坦结构2时,可以通过简单的工艺实现高度稳定的不平坦结构。在值变得低于不等式(3)的下限的情况下,区域A2中的不平坦元件21的高度H2变得相对高,并且无法获得减小区域A2中的纵横比的效果。此外,区域A1和A2之间不平坦元件21的尖端位置的差异增加。因此,在由具有均匀厚度的膜形成不平坦结构2时,将包括提供高度差异的步骤。另一方面,在值变得高于不等式(3)的上限的情况下,区域A1中的不平坦元件21的高度H1变得相对高,并且无法获得减小区域A1中的纵横比的效果。

[0059] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(3)的下限更改为0.82、0.84、0.86、0.88、0.90、0.92、0.94、0.95、0.96、0.97、0.98、或0.99。可以将不等式(3)的上限更改为1.18、1.16、1.14、1.12、1.10、1.08、1.06、1.05、1.04、1.03、1.02、或1.01。

[0060] 在不平坦元件21和基层22的高度在基板1的径向方向上具有轻微起伏的情况下,环形部分中不平坦元件21和基层22的高度的平均值可以满足不等式(3)。另外,在不期望每个示例的效果的区域中,诸如在由于制造误差或射线有效部分之外的结构而导致的意外局部不平坦部分中,可能不满足不等式(3)。

[0061] 关于在基板1的厚度方向上传播的光,由不平坦结构2引起的相位调制量(相位延迟量)在区域A1中可能比在区域A2中更大。图7解释了基板1的径向方向上归一化相位的调制量。在图7中,纵轴表示归一化相位,并且横轴表示径向方向上的位置。图8解释了不平坦元件宽度(例如,凸柱元件的直径等)。在图8中,纵轴表示不平坦元件宽度,并且横轴表示径向方向上的位置。在图8中,用实线示出了根据每个示例的光学元件100的结构,并且用虚线示出了根据比较示例的没有基层22的光学元件101的结构。

[0062] 每个示例将基层22置于区域A1中,并使相位调制量大于区域A2中的相位调制量。每个示例更改每个区域中的不平坦元件宽度、使不平坦元件宽度的变化量小于比较示例中的不平坦元件宽度的变化量,从而抑制区域A1和A2中的不平坦元件21的纵横比。在区域A1中由不平坦结构2引起的相位调制小于区域A2中的相位调制的情况下,除非将区域A1和A2中的不平坦元件宽度的变化量配置得相对大,否则无法获得期望的相位分布或纵横比抑制效果。

[0063] 现在参考图9A和9B,将对元件填充率进行描述。图9A和9B解释了元件填充率。图9A

图示了具有基层22的区域A1中的元件填充率,并且图9B图示了不具有基层22的区域A2中的元件填充率。

[0064] 元件填充率是不平坦结构2在每个段中所占体积的比例。如图9A和9B中所示,从区域A1或A2中的基板1的表面位置到距基板1的表面位置的高度HL的位置的范围内的元件填充率是基层22或不平坦元件21与由底表面PxP乘以高度HL定义的体积Vs的比例。如图9A和9B中所示,从区域A1或A2中的高度HL的位置到不平坦元件21的尖端位置的范围内的元件填充率是基层22或不平坦元件21与由底表面PxP乘以高度H1定义的体积Va的比例。

[0065] 可以满足以下不等式(4)至(6)中的至少一个:

[0066] $0.50 \leqslant V1s \leqslant 1.00$ (4)

[0067] $0.80 \leqslant V2a/V2s \leqslant 1.20$ (5)

[0068] $0.20 \leqslant V1a/V1s \leqslant 0.80$ (6)

[0069] 其中V1s为区域A1中从基板1的表面位置(表面)到高度HL的位置的多个第一结构的元件填充率的最大值,V2s为区域A2中从基板1的表面位置到高度HL的位置的多个第二结构的元件填充率的最大值,V1a为区域A1中从高度HL的位置到不平坦结构2(结构)的尖端位置(尖端)的多个第一结构的元件填充率的最大值,并且V2a为区域A1和A2各自中从高度HL的位置到不平坦结构2的尖端位置的多个第一结构和多个第二结构的元件填充率的最小值。

[0070] 不等式(4)涉及区域A1中的基层22的元件填充率。在值变得低于不等式(4)的下限的情况下,除非区域A1和A2的不平坦元件宽度相对显著地更改,否则无法获得期望的相位调制量或抑制纵横比的效果。根据元件填充率的定义,在V1s变得等于Vs的情况下,V1s变为最大值,因此它永远不会超过不等式(4)的上限。不等式(4)的下限可以是0.54、0.58、0.62、0.64、0.68、0.72、0.76、0.80、0.82、0.84、0.86、0.88、0.90、0.92、0.94或0.96。

[0071] 不等式(5)涉及区域A2中的元件填充率。在值变得低于条件(5)的下限的情况下,V2s变得相对大,并且除非区域A2中的不平坦元件宽度显著更改,否则无法获得期望的相位调制量或抑制纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(5)的上限的情况下,V2a变得相对大,并且除非区域A1中的不平坦元件21的宽度显著更改,否则无法获得期望的相位调制量或抑制纵横比的效果。为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(5)的下限更改为0.82、0.84、0.86、0.88、0.90、0.92、0.94或0.96。可以将不等式(5)的上限更改为1.18、1.16、1.14、1.12、1.10、1.08、1.06、1.04或1.02。

[0072] 不等式(6)涉及区域A1中的元件填充率。在值变得低于不等式(6)的下限的情况下,V1s变得相对大,并且除非区域A2中的不平坦元件21的宽度显著更改,否则无法获得期望的相位调制量或抑制纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(6)的上限的情况下,V1a变得相对大,并且除非区域A1中的不平坦元件21的宽度显著更改,否则无法获得期望的相位调制量或抑制纵横比的效果。为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(6)的下限更改为0.21、0.22、0.23、0.24、0.25、0.26、0.27、0.28、0.29、或0.30。可以将不等式(6)的上限更改为0.78、0.76、0.74、0.72、0.70、0.68、0.66、或0.65。

[0073] 在每个示例中,可以满足以下不等式(7)和(8):

[0074] $1.05 \leqslant Wmax1/Wmin1 \leqslant 6.00$ (7)

[0075] $1.05 \leqslant Wmax2/Wmin2 \leqslant 6.00$ (8)

[0076] 其中Wmax1为区域A1中不平坦元件21的最大宽度(多个第一结构当中圆柱体的最大直径),Wmin1为区域A1中不平坦元件21的最小宽度(多个第一结构当中圆柱体的最小直径),Wmax2为区域A2中不平坦元件21的最大宽度(多个第二结构当中圆柱体的最大直径),并且Wmin2为区域A2中不平坦元件21的最小宽度(多个第二结构当中圆柱体的最小直径)。

[0077] 不等式(7)和(8)分别涉及区域A1和A2中的不平坦元件21的形状。在值变得低于不等式(7)和(8)中的每一个的下限的情况下,由于不平坦元件宽度的轻微变化,相位调制变得相对大,在形成不平坦结构2时制造变化的影响增大,并且制造变得困难。另一方面,在值变得高于不等式(7)和(8)中的每一个的上限的情况下,不平坦元件宽度的变化量增大,并且无法获得抑制纵横比的效果。

[0078] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(7)的下限更改为1.10、1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40或1.45。可以将不等式(7)的上限更改为5.50、5.00、4.50、4.00或3.50。

[0079] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(8)的下限更改为1.06、1.08、1.12、1.16、1.20、1.24、1.26、1.28、1.30、1.32、1.34、或1.36。可以将不等式(8)的上限更改为5.50、5.00、4.50、4.00、3.50、3.00、2.50、2.00、1.80、1.70、或1.60。

[0080] 在每个示例中,区域A1和A2中的不平坦元件21的相位调制可以在环形部分内沿着基板1的径向方向上单调增加或减少。即,在多个环形部分中的每个环形部分中,多个第一结构215和多个第二结构216被配置为使得穿过不平坦结构2的光的相位在径向方向上单调增加或减少。在相位调制离散地增加或减少的情况下,不平坦元件宽度将相对显著地更改,并且无法获得抑制纵横比的效果。在根据每个示例的光学元件100在平面波在基板1的厚度方向上进入时具有光会聚效果的情况下,环形部分内的相位调制显示相位延迟从基板1的内部到外周部分在径向方向上单调减少。此外,在根据每个示例的光学元件100具有光发散效果的情况下,环形部分内的相位调制显示相位延迟从基板的内部到外周部分在径向方向上单调增加。

[0081] 在每个示例中,可以满足以下不等式(9):

[0082] $0.35 \leq AR1/AR2 \leq 2.00$ (9)

[0083] 其中AR1为区域A1中的不平坦元件21的纵横比的最大值,并且AR2为区域A2中的不平坦元件21的纵横比的最大值。

[0084] 不等式(9)涉及不平坦元件21的形状。在值变得低于不等式(9)的下限的情况下,区域A2中不平坦元件宽度的变化量增加,并且无法获得抑制区域A2中的纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(9)的上限的情况下,区域A1中不平坦元件宽度的变化量增加,并且无法获得抑制区域A1中的纵横比的效果。

[0085] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(9)的下限更改为0.36、0.38、0.40、0.42、0.43、或0.44。可以将不等式(9)的上限更改为1.90、1.80、1.70、1.60、1.50、1.40、1.30、1.25、或1.20。

[0086] 在每个示例中,可以满足以下不等式(10)和(11):

[0087] $1.50 \leq A1 \leq 20.00$ (10)

[0088] $1.50 \leq A2 \leq 20.00$ (11)

[0089] 不等式(10)和(11)涉及区域A1和A2中的不平坦元件21的形状。在值变得低于不等

式(10)和(11)中的每一个的下限的情况下,即使不平坦元件宽度轻微变化,相位调制也会变得相对大,在形成不平坦结构2时制造变化的影响增加,并且制造变得困难。另一方面,在值变得高于不等式(10)和(11)中的每一个的上限的情况下,纵横比增加,并且结构可能会因外部因素而崩溃。

[0090] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(10)和(11)的下限更改为2.00、3.00、3.40、3.80、4.00、4.20、4.40、4.60、4.80、5.00、或5.20。可以将不等式(10)和(11)的上限更改为18.00、16.00、15.00、14.00、13.0、12.0、11.0、10.0、9.0、或8.0。

[0091] 在根据每个示例的光学元件100中,相位分布取决于参考波长λ0。可以满足以下不等式(12):

[0092] $0.50 \leq H2/\lambda 0 \leq 4.00$ (12)

[0093] 不等式(12)涉及不平坦结构2的形状。关于相位分布,基于相对于参考波长λ0的相位来确定环形部分。在值变得低于不等式(12)的下限的情况下,不平坦元件宽度的变化量增加,并且无法获得抑制区域A2中的纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(12)的上限的情况下,纵横比增加,并且结构可能因外部因素而崩溃。

[0094] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(12)的下限更改为0.60、0.70、0.80、0.90、0.95或1.00。可以将不等式(12)的上限更改为3.80、3.60、3.40、3.20、3.00、2.80、2.60、2.40、2.20或2.00。

[0095] 根据每个示例的光学元件100可以满足以下不等式(13):

[0096] $0.15 \leq Wmin1/Wmin2 \leq 4.00$ (13)

[0097] 不等式(13)涉及不平坦元件21的形状。在值变得低于不等式(13)的下限的情况下,区域A1中的不平坦元件宽度变得相对小,并且变得难以获得抑制区域A1中的纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(13)的上限的情况下,区域A2中的不平坦元件宽度变得相对小,并且变得难以获得抑制区域A2中的纵横比的效果。

[0098] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(13)的下限更改为0.16、0.18、0.20、0.22、0.24、0.26、0.28、或0.29。可以将不等式(13)的上限更改为3.75、3.50、3.25、3.00、2.75、2.50、或2.25。

[0099] 可以满足以下不等式(14):

[0100] $0.70 \leq Wmax1/Wmax2 \leq 1.40$ (14)

[0101] 不等式(14)涉及不平坦元件21的形状。在值变得低于不等式(14)的下限的情况下,区域A1中的不平坦元件21的最大宽度变得相对小。因此,为了更改区域A1中的预定归一化相位,不平坦元件21的最小宽度将减小,并且变得难以获得抑制纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(14)的上限的情况下,区域A2中的不平坦元件21的最大宽度变得相对小。因此,为了更改区域A2中的预定归一化相位,不平坦元件21的最小宽度将减小,并且变得难以获得抑制区域A2中的纵横比的效果。

[0102] 为了进一步确保根据每个示例的效果,可以将不等式(14)的下限更改为0.74、0.78、0.82、0.84、0.85、0.86或0.87。可以将不等式(14)的上限更改为1.36、1.32、1.30、1.28、1.26、1.24、1.22或1.20。

[0103] 可以满足以下不等式(15):

[0104] $0.10 \leq P/H2 \leq 0.60$ (15)

[0105] 不等式(15)涉及不平坦元件21的形状和段形状。在值变得低于不等式(15)的下限的情况下,不平坦元件21的段变得相对小,并且不平坦元件宽度的轻微变化使相位调制增大。结果,在形成不平坦结构2时,制造变化的影响增大,并且制造变得困难。另一方面,在值变得高于不等式(15)的上限的情况下,区域A2中的不平坦元件21的高度变高,并且变得难以充分获得抑制纵横比的效果。

[0106] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(15)的下限更改为0.12、0.14、0.15、0.16、0.17、或0.18。可以将不等式(15)的上限更改为0.58、0.56、0.54、0.52、0.50、0.48、0.46、0.44、或0.42。

[0107] 可以满足以下不等式(16):

[0108] $0.15 \leqslant E/n \leqslant 0.95$ (16)

[0109] 其中E为同一环形部分中区域A1与A2之间边界处的归一化相位,并且n为设计的衍射级。

[0110] 不等式(16)涉及衍射效果的归一化相位。在值变得低于不等式(16)的下限的情况下,区域A1中的归一化相位的变化量增大,区域A1中的不平坦元件21的宽度变化量将增大,并且变得难以获得抑制纵横比的效果。另一方面,在值变得高于不等式(16)的上限的情况下,区域A2中的归一化相位的变化量增大,区域A2中的不平坦元件21的宽度变化量将增大,并且变得难以获得抑制纵横比的效果。

[0111] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(16)的下限更改为0.16、0.20、0.24、0.28、0.30、0.32、0.34、0.36、或0.38。可以将不等式(16)的上限更改为0.94、0.93、0.92、0.91、0.90、0.89、0.88、0.87、0.86、0.85、0.84、0.83、或0.82。

[0112] 在每个示例中,可以满足以下不等式(17):

[0113] $0.00 \leqslant H2/t \leqslant 0.10$ (17)

[0114] 其中t为基板1在光轴方向上的厚度。

[0115] 不等式(17)涉及光学元件100的形状。区域A2中的不平坦元件21的高度H2和基板1的厚度t均为指示长度的数值,且大于零。因此,值永远不会变得低于不等式(17)的下限。在值变得高于不等式(17)的上限的情况下,基板变得相对薄,并且当基板被保持器保持时,无法抑制由于其自身重量而导致的变形,或者基板在使用光刻技术制造期间可能变形。

[0116] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(17)的下限更改为0.000001、0.000005、0.00001、或0.0001。可以将不等式(17)的上限更改为0.08、0.06、0.04、0.02、0.01、0.008、0.006、或0.004。

[0117] 可以满足以下不等式(18):

[0118] $0.00 \leqslant S/P \leqslant 0.40$ (18)

[0119] 其中S为在同一环形部分中的区域A1与A2之间的边界,从以间距P布置的段之间的边界到基层22的端部的与基板1的厚度方向正交的方向上(即与光轴正交的方向上)的长度。

[0120] 不等式(18)涉及基层22的形状。现在参考图10A至10D,将对基层22的偏移进行描述。图10A至10D解释了基层22的偏移。

[0121] 如图10A中所示,在同一环形部分中的区域A1与A2之间的边界,通过将基层22的端部在与光轴正交的方向上从段边界偏移长度S,可以确保区域A2中的不平坦元件21与基层

22之间有足够的距离。由此,在使用光刻技术形成不平坦元件21时,可以确保不平坦元件21之间的距离(间隔)或不平坦元件21与基层22之间的距离相对宽,并且工艺可以简单。

[0122] 图10B是根据下面将描述的示例18的第一环形部分中的区域A1与A2之间的边界处的xy平面图。每个段是一个边长为P的正方形,并且段的中心坐标(x,y)为((j-0.5)×P,(k-0.5)×P),其中i和k中的每一个是整数。在包括在段的一个顶点处接触区域A1的不平坦元件211的段中,基层可以在x方向和y方向中的每一个方向上从接触区域A1的段顶点偏移S。在包括在段的一边接触区域A1的不平坦元件212的段中,基层可以在x方向或y方向上从接触区域A1的段边偏移S。在包括在段的一个顶点和两边与区域A1接触的不平坦元件213的段中,基层可以在x方向和y方向中的每一个方向上从与区域A1接触的每个段边偏移S。在基层22偏移的段中,光穿过段时的相位变化量与段未偏移的情况不同,不平坦元件宽度将根据偏移长度S而更改。

[0123] 图10C图示了通过用段间距P将作为不平坦元件21的凸柱元件的直径归一化而获得的归一化直径,以及在考虑基层22的偏移的情况下归一化相位的变化量。包括不平坦元件211的段将被称为区域A11,包括不平坦元件212的段将被称为区域A12,并且包括不平坦元件213的段将被称为区域A13。可以理解,为了获得与不具有基层22的偏移的区域A1相同的归一化相位,归一化直径将在区域A11、A12和A13中更改。由于区域A11、A12和A13位于同一环形部分中区域A1与A2的边界,因此图示了与区域A1与A2之间的边界对应的位置处的归一化直径的归一化相位的值。

[0124] 如图10D中所示,在相邻环形部分中的区域A1和A2之间的边界,区域A2的不平坦元件宽度被配置得相对窄,并且能够确保距基层22的足够距离。因此,区域A1中的基层22的端部可以不从段边界偏移。

[0125] 偏移长度S和间距P均为指示长度的数值,并且由于它们为大于或等于0的值,因此值永远不会变得低于不等式(18)的下限。在值变得高于不等式(18)的上限的情况下,除非使偏移基层22的段的不平坦元件宽度相对大,否则无法获得期望的归一化相位。此时,无法确保从不平坦元件21的端部到基层22的偏移端部的足够距离,并且制造变得困难。此外,由于从基层端部超出不平坦元件端部的悬垂形状,制造变得困难。

[0126] 为了进一步确保每个示例的效果,可以将不等式(18)的下限更改为0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.06、0.07、或0.08。可以将不等式(18)的上限更改为0.36、0.32、0.28、0.24、0.20、0.18、0.16、0.14、或0.12。

[0127] 现在将对根据每个实施例的光学元件100进行详细描述。

[0128] 图11A、11B、11C和11D解释了不平坦元件21的形状。图11A中所示的不平坦元件21为凸柱元件,并且不平坦元件宽度Wa为圆柱体的直径。图11B中所示的不平坦元件21为凸矩形(四边形)棱柱元件,并且不平坦元件宽度Wb为矩形棱柱在与光轴正交的方向上的边的长度。图11C中所示的不平坦元件21为凹柱元件,并且不平坦元件宽度Wc为空心圆柱体的直径。图11D中所示的不平坦元件21具有凸十字形棱柱元件,并且不平坦元件宽度WS和WL可以是图示的长度。

[0129] 根据示例1的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为0.775mm的基板、由Si_3N_4制成的凸柱元件和具有均匀膜厚度的基层。对于边长为240nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有440nm和880nm的高度,并且基层的高

度为440nm。该不平坦结构具有**φ4.0mm**的有效直径、以500nm的波长周期性重复2π相位差的105个环形部分、以及40.0mm的焦距。将归一化相位为0.54的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为7.24和6.64。因此,与没有基层的参考例1中的纵横比的最大值20.7相比,能够抑制纵横比。

[0130] 根据示例2的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为0.775mm的基板、由Si_3N_4制成的凸柱元件和具有均匀膜厚度的基层。对于边长为300nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有500nm和1000nm的高度,并且基层的高度为500nm。该不平坦结构具有**φ2.5mm**的有效直径、以587.6nm的波长周期性地重复2π相位差的67个环形部分、以及20.0mm的焦距。将归一化相位为0.59的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为4.46和6.29。因此,与没有基层的参考例2中的纵横比的最大值18.9相比,能够抑制纵横比。

[0131] 根据示例3的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为0.775mm的基板、由Si_3N_4制成的凸柱元件和具有均匀膜厚度的基层。对于边长为320nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有800nm和1600nm的高度,并且基层的高度为800nm。该不平坦结构具有**φ2.5mm**的有效直径、以500nm的波长周期性地重复4π相位差的79个环形部分、以及10.0mm的焦距。将归一化相位为0.80的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为5.88和9.80。因此,与没有基层的参考例3中的纵横比的最大值21.3相比,能够抑制纵横比。

[0132] 根据示例4的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为0.775mm的基板、TiO_2的凸柱元件和具有均匀膜厚度的基层。对于边长为240nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有300nm和600nm的高度,并且基层的高度为300nm。该不平坦结构具有**φ12.0mm**的有效直径、以587.6nm的波长周期性地重复2π相位差的307个环形部分、以及100.0mm的焦距。将归一化相位为0.65的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为3.55和7.01。因此,与没有基层的参考例4中的纵横比的最大值39.3相比,能够抑制纵横比。

[0133] 根据示例5的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为2.0mm的基板、Al_2O_3的凸柱元件和具有均匀膜厚度的基层。对于边长为300nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有700nm和1400nm的高度,并且基层的高度为700nm。该不平坦结构具有**φ7.5mm**的有效直径、以486.1nm的波长周期性地重复2π相位差的348个环形部分、以及41.7mm的焦距。将归一化相位为0.60的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为5.68和8.84。因此,与没有基层的参考例5中的纵横比的最大值26.4相比,能够抑制纵横比。

[0134] 根据示例6至10的光学元件分别具有与根据示例1至5的光学元件类似的规格,除了区域A1中的不平坦元件的高度与基层的高度不同之外。

[0135] 根据示例6的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为352nm和528nm。将归一化相位为0.58的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为5.02和5.83。

[0136] 根据示例7的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为400nm和

600nm。将归一化相位为0.70的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为7.90和7.58。

[0137] 根据示例8的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为640nm和960nm。将归一化相位为1.40的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为5.32和12.47。

[0138] 根据示例9的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为240nm和360nm。将归一化相位为0.68的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为2.63和5.36。

[0139] 根据示例10的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为560nm和840nm。将归一化相位为0.58的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为9.86和7.97。

[0140] 根据示例11至15的光学元件具有与根据示例1至5的光学元件类似的规格,除了区域A1中的不平坦元件的高度和基层的高度不同之外。

[0141] 根据示例11的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为528nm和352nm。将归一化相位为0.55的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为6.49和7.94。

[0142] 根据示例12的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为600nm和400nm。将归一化相位为0.60的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为8.29和13.77。

[0143] 根据示例13的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为960nm和640nm。将归一化相位为1.60的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为5.37和15.92。

[0144] 根据示例14的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为360nm和240nm。将归一化相位为0.60的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为3.62和11.99。

[0145] 根据示例15的光学元件的A1区域中的不平坦元件和基层的高度分别为840nm和560nm。将归一化相位为0.60的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为7.50和11.22。

[0146] 根据示例16的光学元件具有与根据示例1的光学元件类似的规格,除了区域A1中的不平坦元件的高度和基层的结构不同之外。图12解释了根据示例16的光学元件100。如图12中所示,不平坦元件21的高度H11和H12和基层22的高度HL1和HL2具有不同的结构,并且不平坦元件21的高度为352nm和528nm,并且基层22的高度为528nm和352nm。基层22在环形部分中的区域A1中具有不同高度的位置是归一化相位为0.78的位置,并且区域A1与A2之间的边界是归一化相位为0.40的位置。区域A1中的纵横比的最大值为3.07和5.29,并且区域A2中的纵横比的最大值为6.37。

[0147] 根据示例17的光学元件具有与根据示例1的光学元件类似的规格,除了区域A2中的不平坦元件是凸矩形(四边形)棱镜元件,其在与光轴正交的平面中具有正方形切割表面之外。示例17将归一化相位为0.60的区域设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为7.33和8.05。与没有基层的参考例6中的纵横比的

最大值14.6相比,能够抑制纵横比。

[0148] 根据示例18的光学元件具有与根据示例1的光学元件类似的规格,除了在同一环形部分中区域A1与A2之间的边界处,基层边界与段边界偏移24nm之外。通过偏移基层边界,基层端部与区域A2中的不平坦元件之间的最小距离从25.2nm更改为49.2nm,并且制造变得容易。

[0149] 示例18将归一化相位为0.54的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中的纵横比的最大值分别为7.24和6.64。这个示例将偏移长度S设定为24nm,但只要能够配置不平坦元件,也可以将值更改为5nm、10nm、15nm、20nm、30nm等。

[0150] 根据示例19的光学元件具有不平坦结构,其包括由合成石英制成且厚度为0.775mm的基板、由Si_3N_4制成的凹圆柱元件和具有均匀膜厚度的基层。图13A是根据示例19的光学元件100在xz平面中的截面图,并且图13B是根据示例19的光学元件100在xy平面中的截面图。对于边长为300nm的每个正方形段,布置区域A1和A2中的不平坦元件,并且其分别具有600nm和1200nm的高度,并且基层的高度为600nm。不平坦结构具有**φ4.0mm**的有效直径、以500nm的波长周期性地重复2π相位差的105个环形部分、以及40.0mm的焦距。将归一化相位为0.65的位置设定为环形部分中区域A1与A2之间的边界,并且区域A1和A2中纵横比的最大值分别为11.98和7.06。因此,与没有基层的参考例7中的纵横比的最大值28.2相比,能够抑制纵横比。

[0151] 下面将图示与根据示例1至示例19的光学元件对应的数值示例1至19。指示不平坦结构的光会聚和发散效果的相位**φ**表达如下:

[0152] $$\phi(h) = \left(2\pi \frac{m}{\lambda_0}\right) \sum_k C_{2k} h^{2k}$$

[0153] 其中h为在与光轴正交的方向(径向方向)上距光轴的高度,m为衍射光的衍射级,λ0为参考波长,并且Ck(k=1,2,3…)为各级的相位系数。

[0154] nd、ng、nC、nF和n500分别为针对d线(587.6nm)、g线(435.8nm)、F线(486.1nm)和C线(656.3nm)以及500nm的波长的折射率。W1[nm]和W2[nm]分别为区域A1和A2中的不平坦元件的宽度,并且Wref[nm]为比较示例中的不平坦元件的宽度。

[0155] 数值示例1

归一化相位	W1	W2	Wref1
0.00		132.45	43.48
0.05		138.45	66.44
0.10		144.15	82.23
0.15		149.64	94.19
0.20		154.97	104.04
0.25		160.19	112.59
0.30		165.32	120.22
0.35		170.38	127.12
0.40		175.42	133.44
0.45		180.48	139.34
0.50		185.58	144.96
0.54	60.79	189.62	149.33
0.60	95.31		155.75
0.65	113.95		161.01
0.70	128.17		166.16
0.75	140.18		171.21
0.80	150.87		176.18
0.85	160.69		181.18
0.90	170.11		186.30
0.95	179.73		191.56
1.00	189.57		196.52

[0156]

[0157]

[0158] 数值示例2

[0159]

归一化相位	W1	W2	Wref2
0.00		158.94	52.99
0.05		166.78	82.77
0.10		174.14	102.57
0.15		181.20	117.34
0.20		188.06	129.51
0.25		194.79	140.16
0.30		201.41	149.70
0.35		207.90	158.33
0.40		214.31	166.23
0.45		220.76	173.58
0.50		227.39	180.60
0.55		234.24	187.44
0.59	112.09	239.58	192.84
0.65	141.54		200.86
0.70	160.51		207.43
0.75	177.02		213.88
0.80	191.37		220.27
0.85	203.86		226.74
0.90	215.65		233.51
0.95	228.05		240.57
1.00	239.89		247.29

[0160] 数值示例3

[0161]

归一化相位	W1	W2	Wref3
0.00		163.26	74.98
0.10		169.62	97.75
0.20		175.83	112.71
0.30		181.96	123.86
0.40		188.08	133.16
0.50		194.24	141.46
0.60		200.53	149.09
0.70		206.97	156.17
0.80	136.05	213.53	162.79
0.90	144.54		169.10
1.00	151.29		175.24
1.10	157.24		181.34
1.20	162.72		187.48
1.30	167.77		193.72
1.40	172.49		200.05
1.50	177.01		206.51
1.60	181.51		213.17
1.70	186.07		220.20
1.80	190.64		227.84
1.90	195.15		236.23
2.00	200.02		245.16

[0162] 数值示例4

[0163]

归一化相位	W1	W2	Wref4
0.00		85.65	15.25
0.05		101.98	67.65

	0.10		114.61	90.20
	0.15		125.27	103.58
	0.20		134.52	115.27
	0.25		142.73	126.60
	0.30		150.29	136.86
	0.35		157.51	145.42
	0.40		164.56	152.39
	0.45		171.42	158.51
	0.50		178.06	164.70
[0164]	0.54		183.29	170.12
	0.60		191.36	179.06
	0.65	84.56	198.34	186.69
	0.70	116.42		193.72
	0.75	136.38		199.78
	0.80	152.32		205.26
	0.85	165.61		211.46
	0.90	177.15		219.59
	0.95	189.20		228.51
	1.00	201.50		230.08

[0165] 数值示例5

归一化相位	W1	W2	Wref5
0.00		158.36	52.97
0.05		166.48	79.60
0.10		174.23	97.81
0.15		181.73	111.83
0.20		189.07	123.73
0.25		196.30	134.40
0.30		203.39	144.17

[0166]

	0.35		210.36	153.20
	0.40		217.21	161.61
	0.45		224.01	169.54
	0.50		230.87	177.15
	0.54		236.44	183.10
	0.60	123.32	244.65	191.89
	0.65	144.19		199.09
[0167]	0.70	161.62		206.16
	0.75	177.43		213.07
	0.80	191.96		219.85
	0.85	205.46		226.63
	0.90	218.72		233.54
	0.95	232.57		240.59
	1.00	245.90		247.22

[0168] 数值示例6

归一化相位	W1	W2
0.00		151.05
0.05		156.31
0.10		161.49
0.15		166.64
0.20		171.76
[0169] 0.25		176.84
0.30		181.89
0.35		186.90
0.40		191.94
0.45		197.05
0.50		202.25
0.55		207.44

	0.58	70.16	210.38
	0.65	109.34	
	0.70	126.54	
	0.75	142.11	
[0170]	0.80	156.88	
	0.85	170.53	
	0.90	183.79	
	0.95	198.06	
	1.00	211.04	

[0171] 数值示例7

归一化相位	W1	W2
0.00		132.01
0.05		142.35
0.10		151.62
0.15		160.04
0.20		167.81
0.25		175.12
0.30		182.14
0.35		188.98
0.40		195.70
0.45		202.29
0.50		208.77
0.54		213.90
0.60		221.64
0.65		228.31
0.70	50.66	235.17
0.75	118.64	
0.80	152.47	

[0172]

[0173]

0.85	178.35	
0.90	200.04	
0.95	219.95	
1.00	239.89	

[0174] 数值示例8

归一化相位	W1	W2
0.00		128.27
0.10		137.09
0.20		145.00
0.30		152.28
0.40		159.10
0.50		165.59
0.60		171.88
0.70		178.05
0.80		184.17
0.90		190.31
1.00		196.51
1.10		202.84
1.20		209.41
1.30		216.32
1.40	120.28	223.63
1.50	143.63	
1.60	159.94	
1.70	174.47	
1.80	188.44	
1.90	203.75	
2.00	223.92	

[0175]

[0176] 数值示例9

[0177]

归一化相位	W1	W2
0.00		111.87
0.05		123.26
0.10		133.24
0.15		141.71
0.20		149.02
0.25		155.85
0.30		162.77
0.35		169.95
0.40		177.14
0.45		183.91
0.50		190.13
0.55		196.33
0.60		203.43
0.68	91.15	215.18
0.70	105.66	
0.75	130.19	
0.80	151.59	
0.85	169.55	
0.90	183.43	
0.95	199.62	
1.00	215.64	

[0178] 数值示例10

[0179]

归一化相位	W1	W2
0.00		175.65
0.05		183.00
0.10		190.27

0.15		197.51
0.20		204.71
0.25		211.79
0.30		218.67
0.35		225.38
0.40		232.02
0.45		238.82
0.50		245.92
0.55		253.07
0.58	56.82	256.90
0.65	122.39	
0.70	147.19	
0.75	168.58	
0.80	188.48	
0.85	206.14	
0.90	222.66	
0.95	240.81	
1.00	257.76	

[0180]

[0181] 数值示例11

归一化相位	W1	W2
0.00		110.85
0.05		118.59
0.10		125.58
0.15		132.01
0.20		138.04
0.25		143.77
0.30		149.29
0.35		154.63

[0182]

	0.40		159.84
	0.45		164.95
	0.50		170.02
	0.55	81.32	175.10
	0.60	99.50	
	0.65	113.30	
[0183]	0.70	125.22	
	0.75	136.04	
	0.80	145.86	
	0.85	154.81	
	0.90	163.32	
	0.95	171.88	
	1.00	179.95	

[0184] 数值示例12

归一化相位	W1	W2
0.00		72.61
0.05		95.29
0.10		111.80
0.15		124.95
0.20		136.14
0.25		146.01
0.30		154.90
0.35		163.04
0.40		170.63
0.45		177.84
0.50		184.81
0.55		191.59
0.60	72.34	198.23

[0185]

[0186]

0.65	113.91	
0.70	141.68	
0.75	163.42	
0.80	181.55	
0.85	196.60	
0.90	209.56	
0.95	222.18	
1.00	233.93	

[0187] 数值示例13

归一化相位	W1	W2
0.00		100.48
0.10		114.55
0.20		125.47
0.30		134.65
0.40		142.79
0.50		150.23
0.60		157.17
0.70		163.74
0.80		170.07
0.90		176.27
1.00		182.40
1.10		188.53
1.20		194.71
1.30		200.99
1.40		207.48
1.50		214.28
1.60	178.74	221.48
1.70	189.71	

[0188]

	1.80	200.78
[0189]	1.90	212.36
	2.00	223.94

[0190] 数值示例14

归一化相位	W1	W2
0.00		50.05
0.05		79.97
0.10		97.72
0.15		111.10
0.20		122.41
0.25		132.13
0.30		140.54
0.35		148.11
0.40		155.34
0.45		162.51
0.50		169.56
0.55		176.29
0.60	99.54	182.71
0.65	118.07	
0.70	133.58	
0.75	148.31	
0.80	161.23	
0.85	171.92	
0.90	182.13	
0.95	194.01	
1.00	203.77	

[0191]

[0192] 数值示例15

[0193]

归一化相位	W1	W2
0.00		124.75
0.05		135.29
0.10		144.90
0.15		153.80
0.20		162.17
0.25		170.15
0.30		177.83
0.35		185.27
0.40		192.52
0.45		199.62
0.50		206.61
0.55		213.56
0.60	112.01	220.45
0.65	131.35	
0.70	147.84	
0.75	162.63	
0.80	176.09	
0.85	188.39	
0.90	199.91	
0.95	211.15	
1.00	221.97	

[0194] 数值示例16

[0195]

归一化相位	W11	W12	W2
0.00			138.25
0.05			143.97
0.10			149.47
0.15			154.81

	0.20			160.02
	0.25			165.13
	0.30			170.20
	0.35			175.28
	0.40		99.88	180.31
	0.45		113.75	
	0.50		125.76	
	0.54		134.37	
[0196]	0.60		146.02	
	0.65		155.08	
	0.70		163.81	
	0.78	114.69	176.91	
	0.80	121.81		
	0.85	137.96		
	0.90	152.35		
	0.95	166.17		
	1.00	179.95		

[0197] 数值示例17

归一化相位	W1	W2	Wref6
0.00		109.35	60.15
0.05		115.29	73.38
0.10		120.88	83.52
0.15		126.19	91.89
0.20		131.28	99.23
0.25		136.22	105.89
0.30		141.04	112.06
0.35		145.76	117.84
0.40		150.40	123.30

[0198]

0.45		154.97	128.50
0.50		159.50	133.51
0.54		163.11	137.42
0.60	60.07	168.56	143.16
0.65	90.24		147.85
0.70	110.30		152.46
0.75	125.32		157.02
0.80	137.73		161.53
0.85	148.59		166.04
0.90	158.51		170.61
0.95	168.10		175.24
1.00	177.59		179.85

[0199]

[0200] 数值示例18

归一化相位	W1	W11	W12	W13	W2
0.00					132.52
0.05					138.51
0.10					144.21
0.15					149.70
0.20					155.03
0.25					160.25
0.30					165.37
0.35					170.43
0.40					175.47
0.45					180.53
0.50					185.63
0.54	60.79	67.49	108.63	136.41	189.67
0.60	95.31	99.31	127.32	150.44	
0.65	113.95				

[0201]

	0.70	128.17
	0.75	140.18
	0.80	150.87
[0202]	0.85	160.69
	0.90	170.11
	0.95	179.73
	1.00	189.57

[0203] 数值示例19

归一化相位	W1	W2	Wref7
0.00		257.49	257.49
0.10		246.63	246.63
0.20		240.96	240.96
0.30		238.67	238.67
0.40		237.14	237.14
0.50		234.23	234.23
0.60		228.80	228.80
0.70		220.82	220.82
0.80		211.13	211.13
0.90		200.96	200.96
1.00		191.50	191.50
1.10		184.92	184.92
1.20		176.60	176.60
1.30	226.77	170.00	170.00
1.40	220.77		161.81
1.50	210.77		149.89
1.60	190.59		132.42
1.70	161.38		108.89
1.80	130.43		81.29

[0204]

[0205]

1.90	**100.95**	**55.45**
2.00	**50.09**	**42.53**

[0206] 表1至3C总结了根据每个示例的各种数值。

[0207] 表1

[0208]

	Si_3N_4	TiO_2	Al_2O_3	合成石英
ng	2.08394	2.48181	1.63759	1.46240
nF	2.06710	2.42034	1.63053	1.45876
nd	2.04580	2.35281	1.62153	1.45345
nC	2.03665	2.32645	1.61759	1.45084
n500	2.06337	2.40780	1.62896	1.45790

[0209] 表2

[0210]

	示例 1、6、11、16、17、18 和 19	**示例 2、7 和 12**	**示例 3、8 和 13**	**示例 4、9 和 14**	**示例 5、10 和 15**
λ0	**500.0**	**587.6**	**500.0**	**587.6**	**486.1**
C 2	**-1.249999E-02**	**-2.500000E-02**	**-5.000000E-02**	**-5.000000E-03**	**-1.200000E-02**
C 4	**3.395631E-04**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**
C 6	**-1.203821E-04**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**
C 8	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**	**0.000000E+00**

[0211] 表3A

[0212]

	示例	**示例**	**示例**	**示例**	**示例**	**示例**	**示例**

[0213]

	1	2	3	4	5	6	7
材料	Si_3N_4	Si_3N_4	Si_3N_4	TiO_2	Al_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4
λ0 [nm]	500	587.56	500	587.6	486.1	500	587.56
P [nm]	240	300	320	240	300	240	300
H1 [nm]	440	500	800	300	700	352	400
H2 [nm]	880	1000	1600	600	1400	880	1000
HL [nm]	440	500	800	300	700	528	600
H1/H2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.400	0.400
（H1+HL）/H2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Wmin1[nm]	60.8	112.1	136.0	84.6	123.3	70.2	50.7
Wmax1[nm]	189.6	239.9	200.0	201.5	245.9	211.0	239.9
Wmin2[nm]	132.4	158.9	163.3	85.7	158.4	151.1	132.0
Wmax2[nm]	189.6	239.6	213.5	198.3	244.7	210.4	235.2
AR1	7.24	4.46	5.88	3.55	5.68	5.02	7.90
AR2	6.64	6.29	9.80	7.01	8.84	5.83	7.58
AR1/AR2	1.09	0.71	0.60	0.51	0.64	0.86	1.04
Wmax1/Wmin1	3.12	2.14	1.47	2.38	1.99	3.01	4.74
Wmax2/Wmin2	1.43	1.51	1.31	2.32	1.54	1.39	1.78
N	1	1	2	1	1	1	1

[0214]

V1s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
V1a	0.490	0.502	0.307	0.554	0.528	0.607	0.502
V2s	0.490	0.501	0.350	0.536	0.522	0.603	0.483
V2a	0.490	0.501	0.350	0.536	0.522	0.603	0.483
V1a/V1s	0.490	0.502	0.307	0.554	0.528	0.607	0.502
V2a/V2s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
H2/λ	1.760	1.702	3.200	1.021	2.880	1.760	1.702
Wmin1/Wmin2	0.459	0.705	0.833	0.987	0.779	0.464	0.384
Wmax1/Wmax2	1.000	1.001	0.937	1.016	1.005	1.003	1.020
P/H2	0.273	0.300	0.200	0.400	0.214	0.273	0.300
E/n	0.540	0.590	0.400	0.650	0.600	0.580	0.700
t [mm]	0.775	0.775	0.775	0.775	2.000	0.775	0.775
H2/t	0.0011	0.0013	0.0021	0.0008	0.0007	0.0011	0.0013
S [nm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S/P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

[0215] 表3B

[0216]

	示例 8	示例 9	示例 10	示例 11	示例 12	示例 13	示例 14
材料	Si_3N_4	TiO_2	Al_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4	Si_3N_4	TiO_2
λ0 [nm]	500	587.6	486.1	500	587.56	500	587.6

[0217]

P [nm]	320	240	300	240	300	320	240
H1 [nm]	640	240	560	528	600	960	360
H2 [nm]	1600	600	1400	880	1000	1600	600
HL [nm]	960	360	840	352	400	640	240
H1/H2	0.400	0.400	0.400	0.600	0.600	0.600	0.600
（H1+HL）/H2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Wmin1 [nm]	120.3	91.1	56.8	81.3	72.3	178.7	99.5
Wmax1 [nm]	223.9	215.6	257.8	179.9	233.9	223.9	203.8
Wmin2 [nm]	128.3	111.9	175.7	110.8	72.6	100.5	50.1
Wmax2 [nm]	223.6	215.2	256.9	175.1	198.2	221.5	182.7
AR1	5.32	2.63	9.86	6.49	8.29	5.37	3.62
AR2	12.47	5.36	7.97	7.94	13.77	15.92	11.99
AR1/AR2	0.43	0.49	1.24	0.82	0.60	0.34	0.30
Wmax1/Wmin1	1.86	2.37	4.54	2.21	3.23	1.25	2.05
Wmax2/Wmin2	1.74	1.92	1.46	1.58	2.73	2.20	3.65

[0218]

N	2	1	1	1	1	2	1
V1s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
V1a	0.385	0.634	0.580	0.442	0.478	0.385	0.566
V2s	0.384	0.631	0.576	0.418	0.343	0.376	0.455
V2a	0.384	0.631	0.576	0.418	0.343	0.376	0.455
V1a/V1s	0.385	0.634	0.580	0.442	0.478	0.385	0.566
V2a/V2s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
H2/λ	3.200	1.021	2.880	1.760	1.702	3.200	1.021
Wmin1/Wmin2	0.938	0.815	0.324	0.734	0.996	1.779	1.989
Wmax1/Wmax2	1.001	1.002	1.003	1.028	1.180	1.011	1.115
P/H2	0.200	0.400	0.214	0.273	0.300	0.200	0.400
E/n	0.700	0.680	0.580	0.550	0.600	0.800	0.600
t [mm]	0.775	0.775	2.000	0.775	0.775	0.775	0.775
H2/t	0.0021	0.0008	0.0007	0.0011	0.0013	0.0021	0.0008
S [nm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S/P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

[0219] 表3C

[0220]

	示例15	示例16	示例17	示例18	示例19
材料	Al_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4	Si_3N_4	Si_3N_4

[0221]

λ0 [nm]	486.1	500		500	500	500
P [nm]	300	240		240	240	300
H1 [nm]	840	352	528	440	440	600
H2 [nm]	1400	880		880	880	1200
HL [nm]	560	528	352	440	440	600
H1/H2	0.600	0.400	0.600	0.500	0.500	0.500
（H1+HL）/H2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Wmin1 [nm]	112.0	114.7	99.9	60.1	60.8	50.1
Wmax1 [nm]	222.0	180.0	176.9	177.6	189.6	226.8
Wmin2 [nm]	124.7	138.2		109.3	132.5	170.0
Wmax2 [nm]	220.5	180.3		168.6	189.7	257.5
AR1	7.50	3.07	5.29	7.33	7.24	11.98
AR2	11.22	6.37		8.05	6.64	7.06
AR1/AR2	0.67	0.48	0.83	0.91	1.09	1.70
Wmax1/Wmin1	1.98	1.57	1.77	2.96	3.12	4.53
Wmax2/Wmin2	1.77	1.30		1.54	1.43	1.51
n	1	1		1	1	1
V1s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
V1a	0.430	0.442	0.427	0.430	0.490	0.449
V2s	0.424	0.443		0.387	0.491	0.579
V2a	0.424	0.443		0.387	0.491	0.579
V1a/V1s	0.430	0.442	0.427	0.430	0.490	0.449
V2a/V2s	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000
H2/λ	2.880	1.760		1.760	1.760	2.400
Wmin1/Wmin2	0.898	0.830	0.723	0.549	0.459	0.295
Wmax1/Wmax2	1.007	0.998	0.981	1.054	0.999	0.881
P/H2	0.214	0.273		0.273	0.273	0.250

[0222]

E/n	0.600	0.780	0.400	0.600	0.540	0.650
t [mm]	2.000	0.775		0.775	0.775	0.775
H2/t	0.0007	0.0011		0.0011	0.0011	0.0015
S [nm]	0.000	0.000	0.000	0.000	24.000	0.000
S/P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000

[0223] 表4图示了表示根据与根据每个示例的光学元件对应的比较示例(参考例1至7)的不平坦结构的数值。

[0224] 表4

[0225]

	参考例1	参考例2	参考例3	参考例4	参考例5	参考例6	参考例7
最小宽度[nm]	43.5	53.0	75.0	15.3	53.0	60.2	42.5
最大宽度[nm]	196.5	247.3	245.2	230.1	247.2	179.8	257.5
最大纵横比	20.2	18.9	21.3	39.3	26.4	14.6	28.2

[0226] 光学系统

[0227] 现在参考图14,将对包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统进行描述。图14解释了包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统。在图14中,附图标记100表示根据上述任一个示例的光学元件,附图标记102表示透镜元件,OA表示光轴,IP表示像平面,并且附图标记3表示包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统。透镜元件包括透镜、衍射光学元件、反射镜等,并且透镜元件的数量不受限制。光学元件100和透镜元件102沿着光轴OA布置,以将入射光成像到像平面IP上。部署在光学元件100的像侧的表面上的不平坦元件可以提供光会聚或发散效果。

[0228] 图像拾取装置

[0229] 现在参考图15,现在将对使用包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统作为成像光学系统的数字静态相机(图像拾取装置)进行描述。图15解释了具有包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统的图像拾取装置6。在图15中,附图标记4表示相机主体,并且附图标记3表示包括根据上述任一个示例的光学元件的光学系统。附图标记5表示内置于相机主体4中、接收由光学系统3形成的光学图像、并对其进行光电转换的图像传感器(光电转换元件),诸如CCD传感器或CMOS传感器。相机主体4可以是具有快速返回镜的所谓单透镜反光相机,或不具有快速返回镜的所谓无反光镜相机。以这种方式将包括根据每个示例的光学元件的光学系统应用于诸如数字静态相机之类的图像拾取装置可以提供具有小透镜的图像拾取装置。

[0230] 因此,根据示例的一个方面的光学元件包括同心地布置在基板上的多个环形部分。多个环形部分包括第一环形部分,该第一环形部分包括设置有基层的第一区域和未设

置基层的第二区域。第一区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第一结构。第二区域中布置有径向方向上宽度相互不同的多个第二结构。由此,每个示例可以提供光学元件、光学系统、透镜装置和图像拾取装置,其中每个具有高度稳定的精细不平坦结构。

[0231] 虽然本公开描述了示例实施例,但是应该理解的是,一些实施例不限于公开的实施例。所附权利要求的范围应给予最宽泛的解释,以涵盖所有此类修改以及等同的结构和功能。

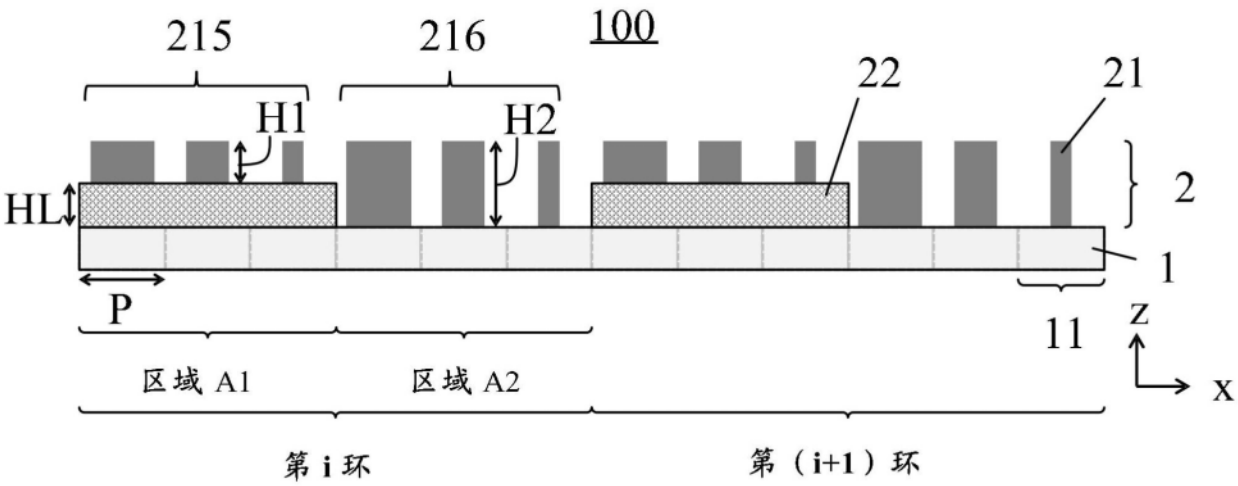

215
216
100
22
21
H1
H2
HL
2
1
P
11
z
x
区域 A1
区域 A2
第 i 环
第（i+1）环

图1A

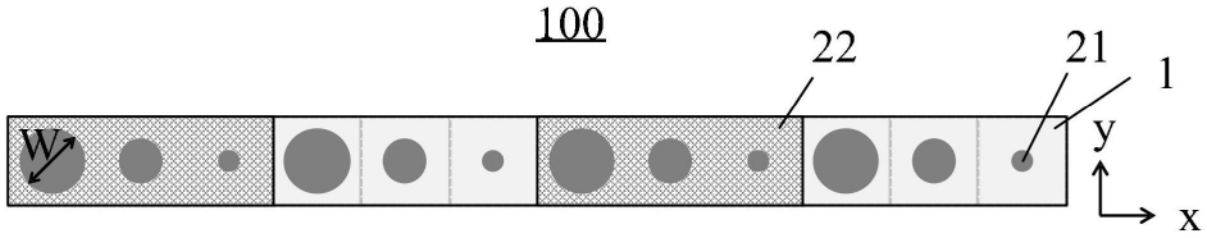

100
22
21
1
W
y
x

图1B

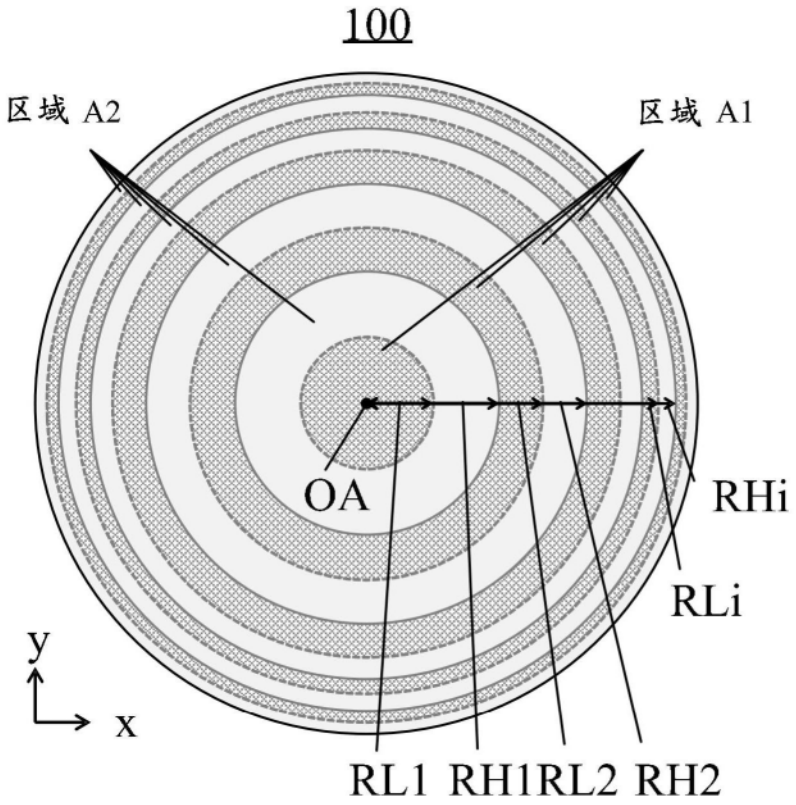


图1C

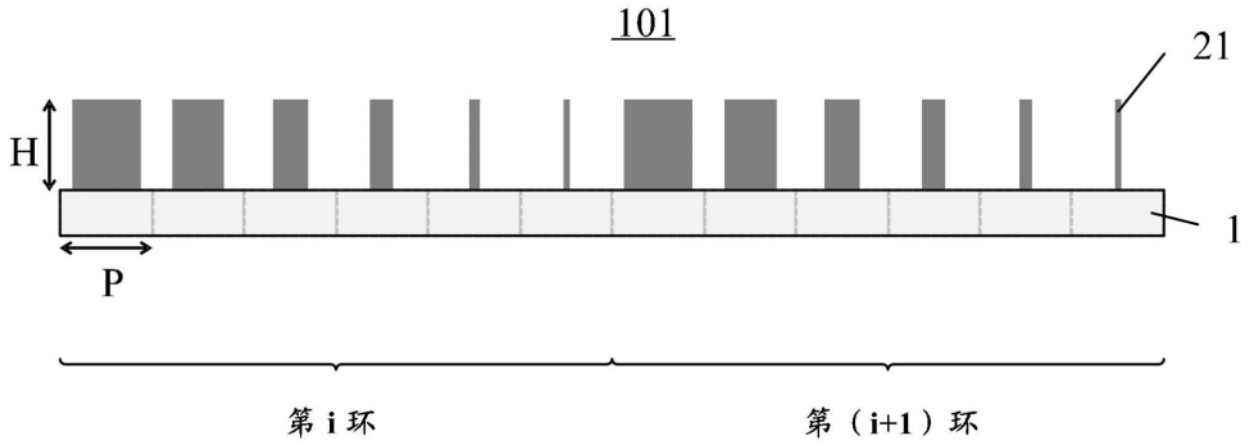


图2

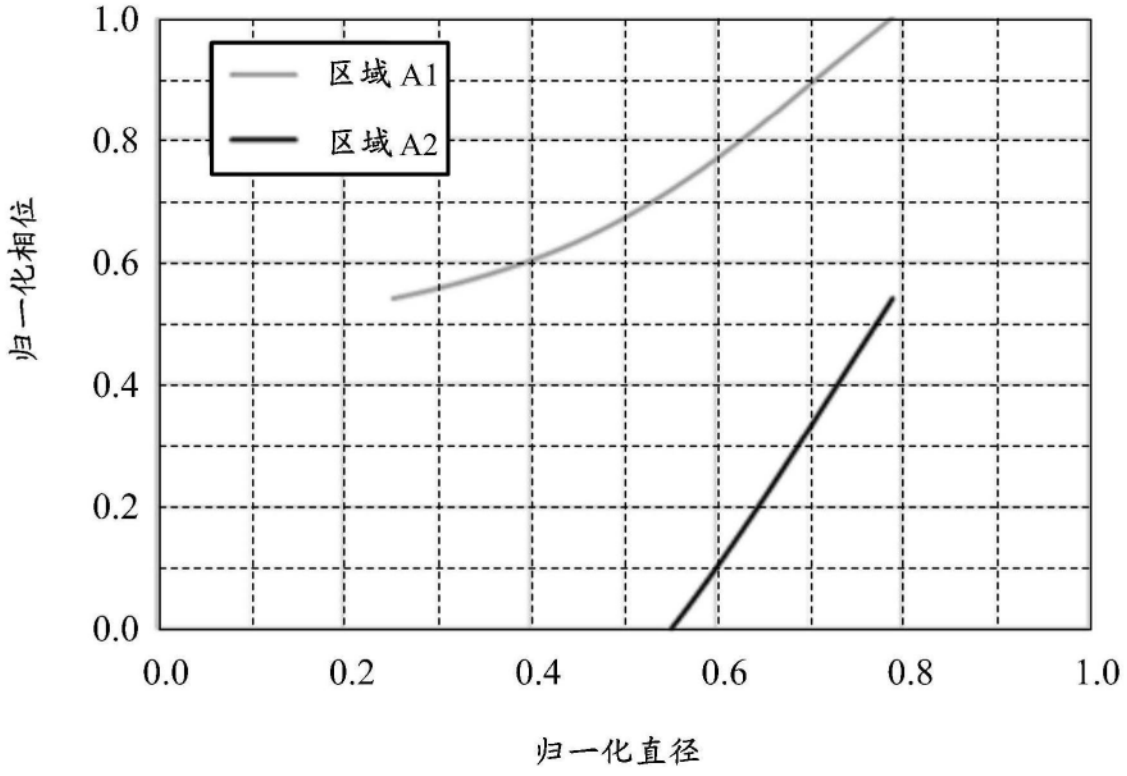


图3

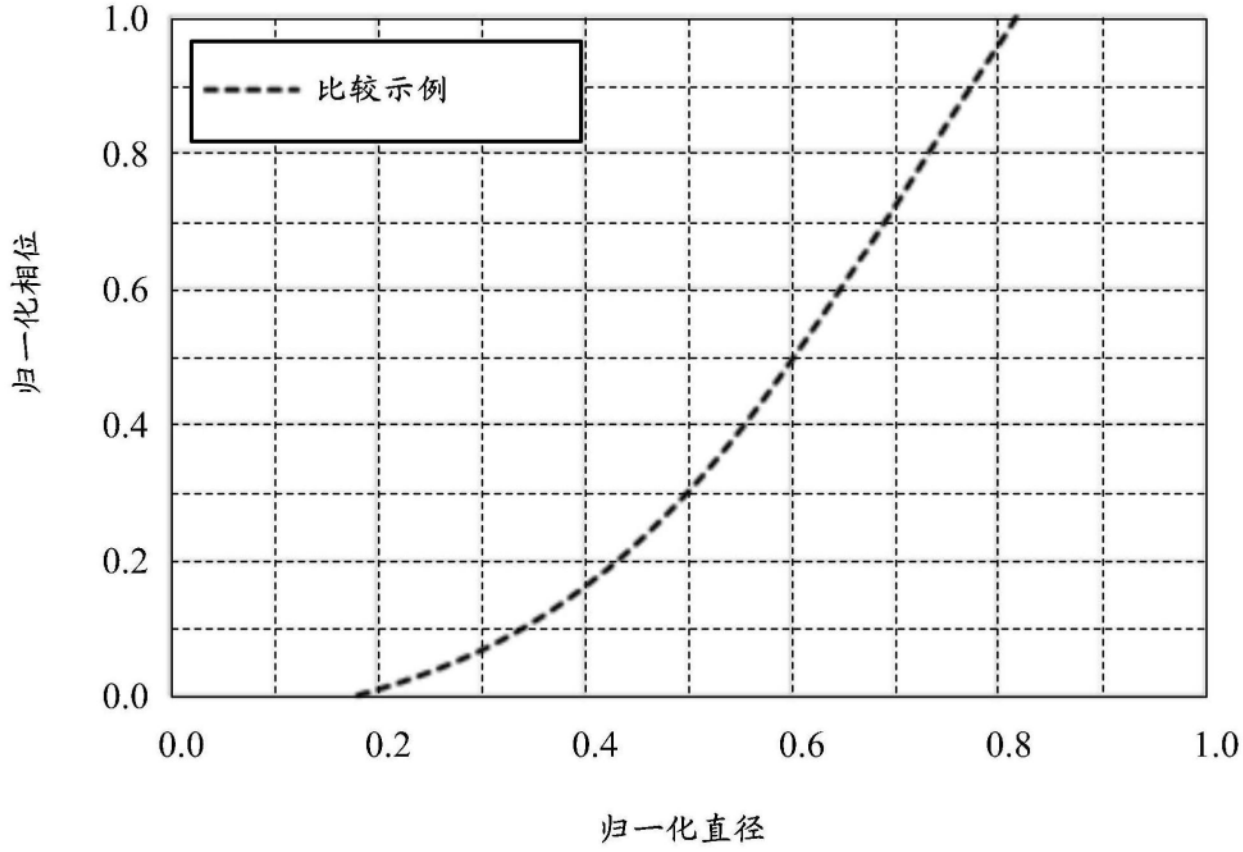


图4



图5A



图5B

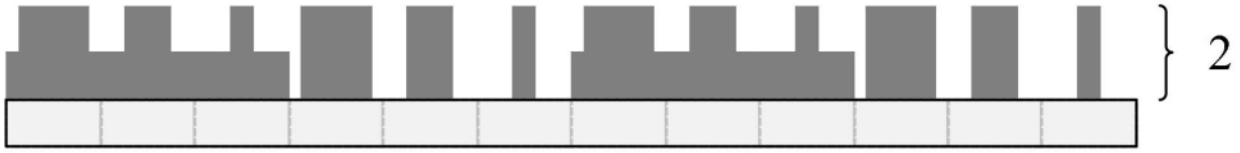


图5C

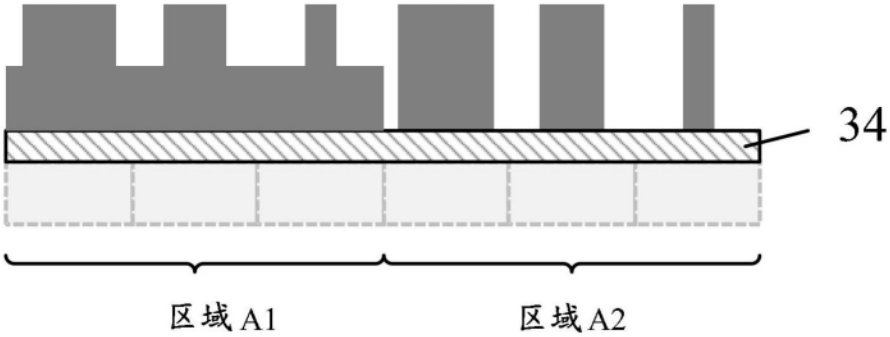


图6

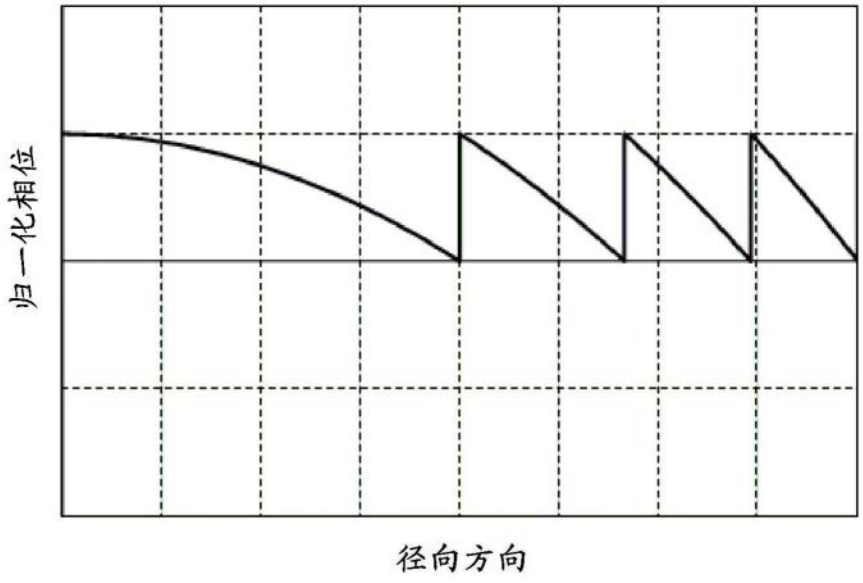


图7

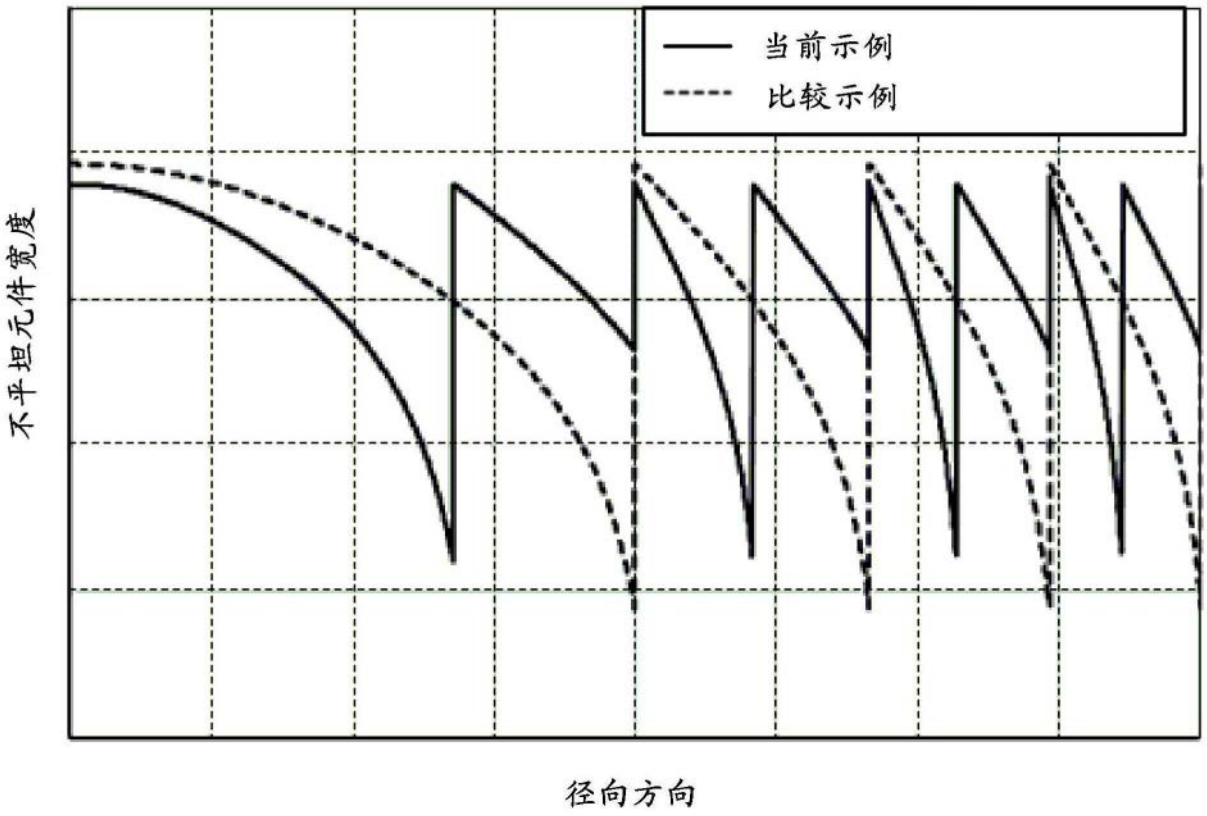


图8

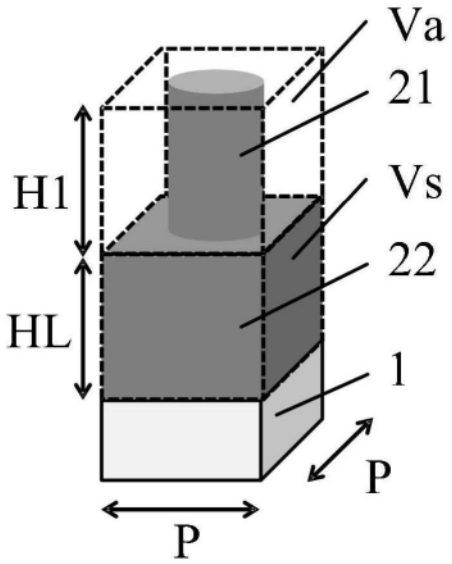


图9A

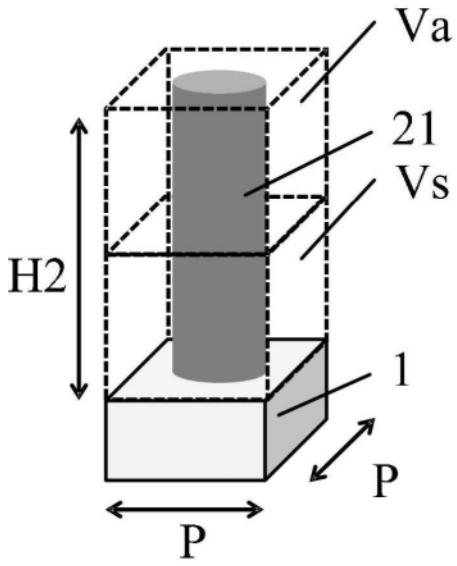


图9B

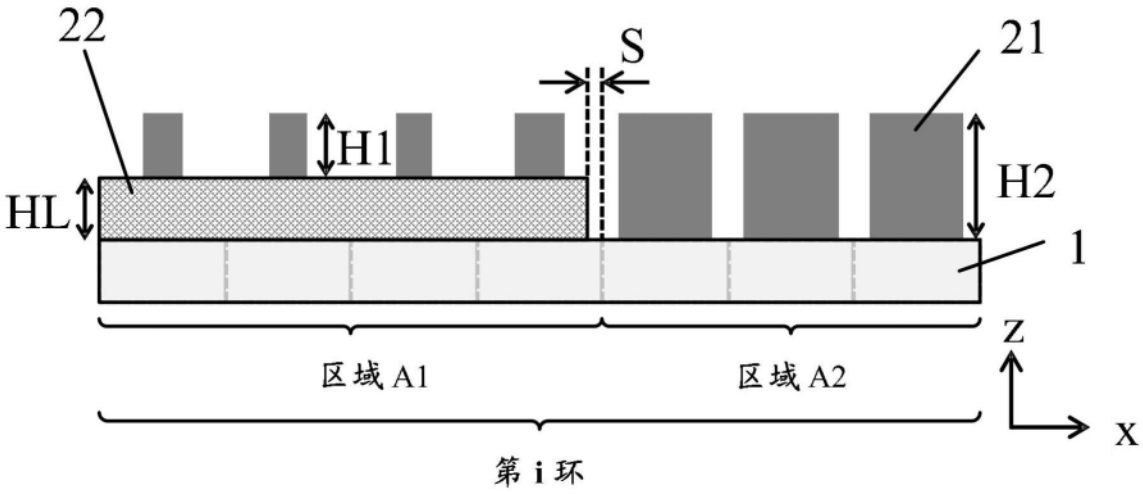


图10A

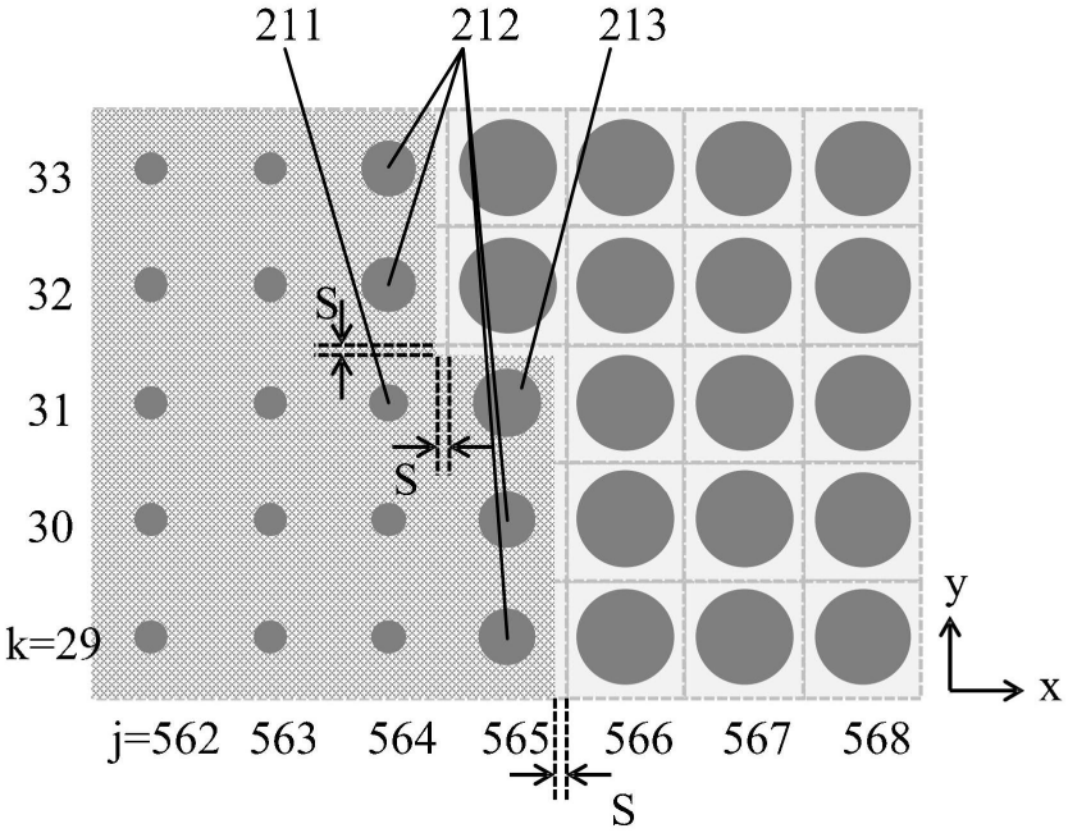


图10B

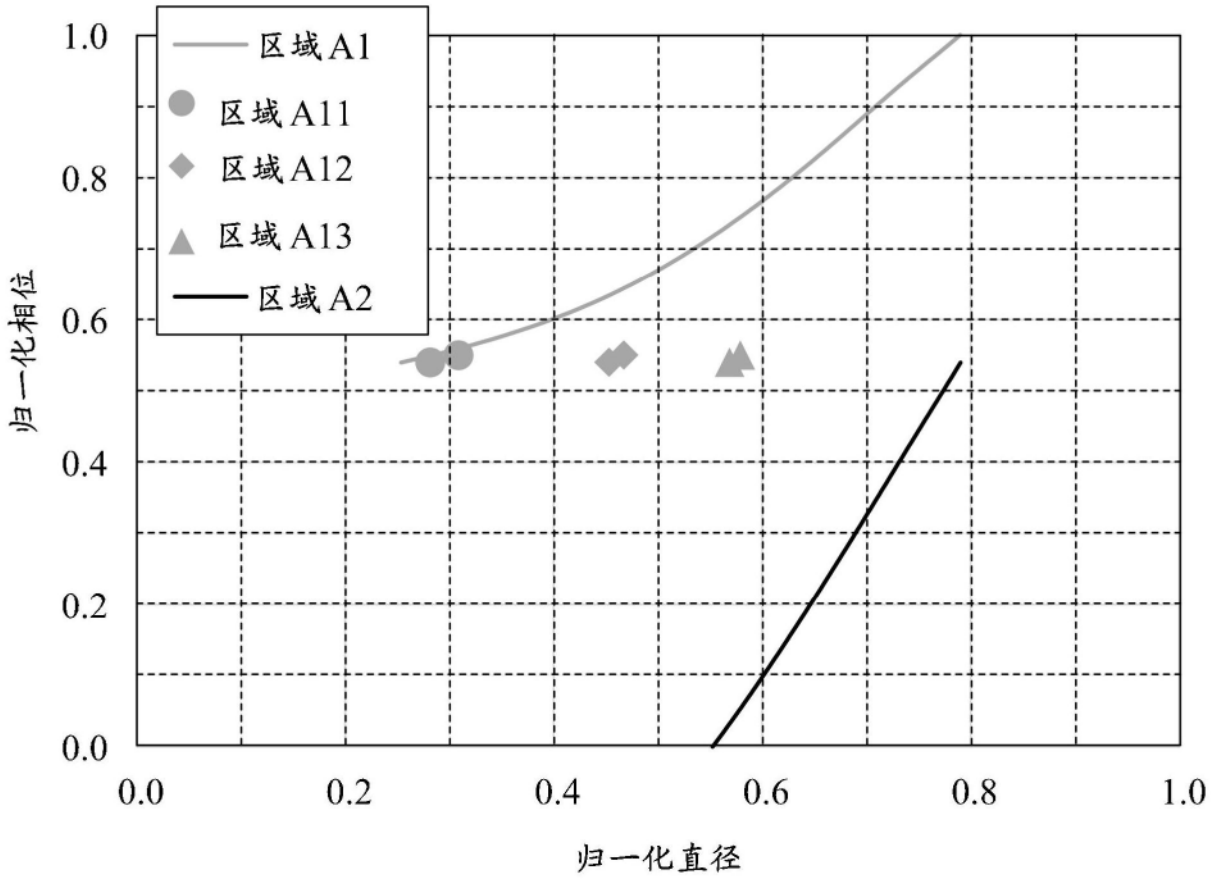

区域A1
区域A11
区域A12
区域A13
区域A2
归一化相位
归一化直径
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0

图10C

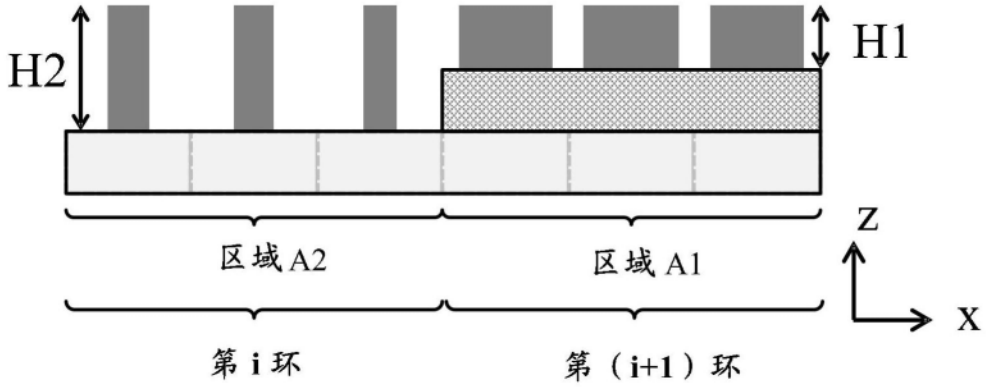

H2
H1
区域A2
区域A1
Z
X
第 i 环
第（i+1）环

图10D

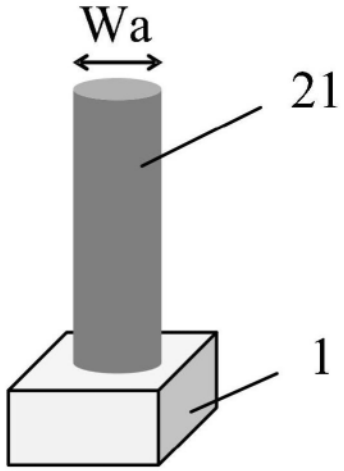


图11A

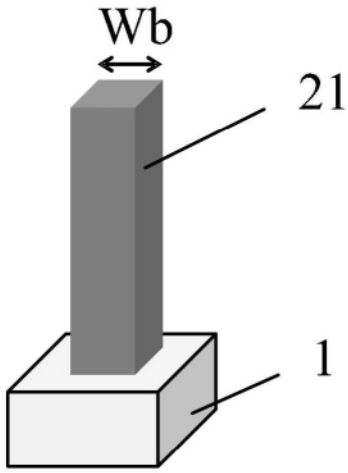


图11B

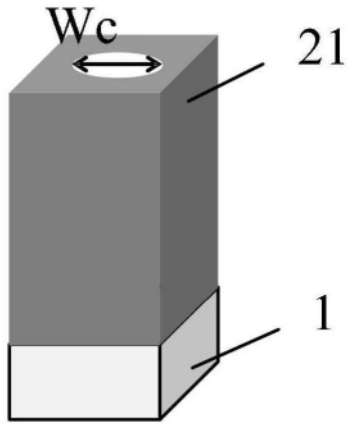


图11C

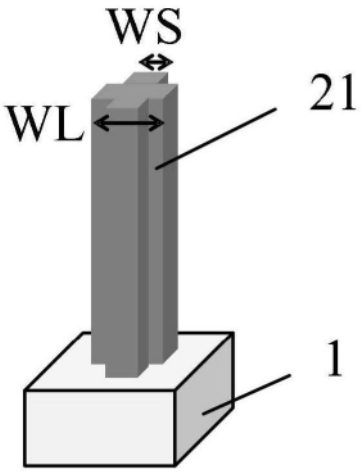


图11D

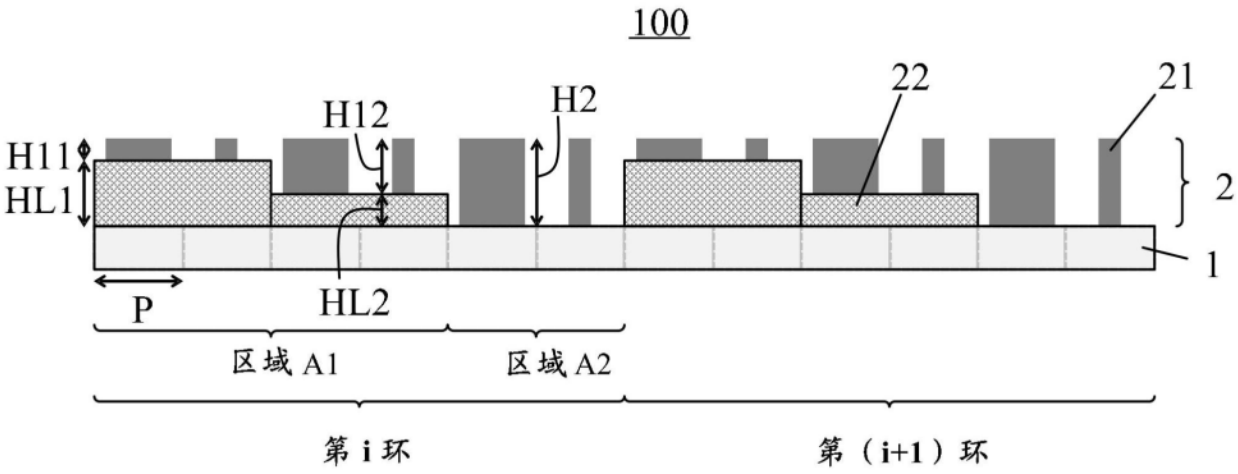


图12

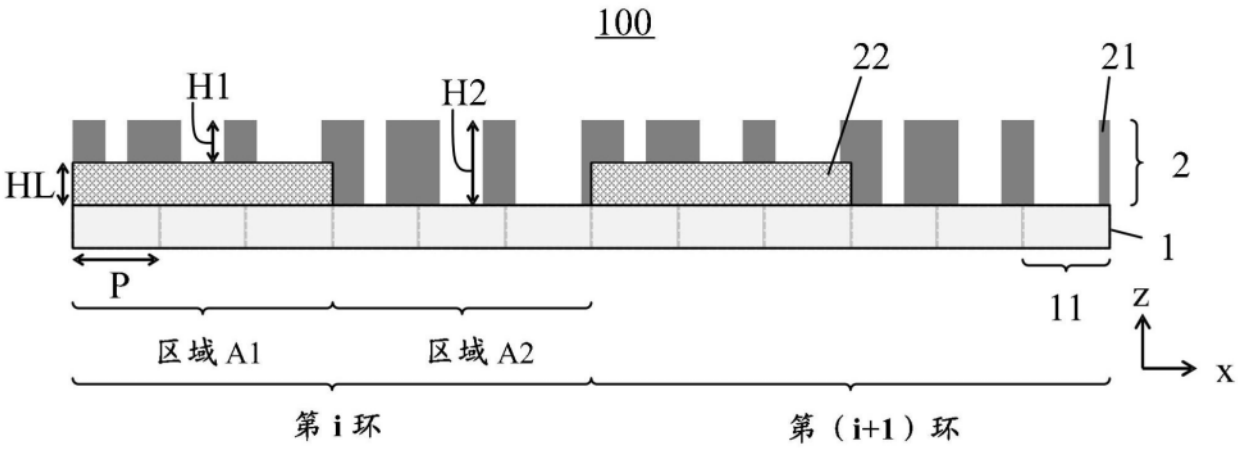


图13A

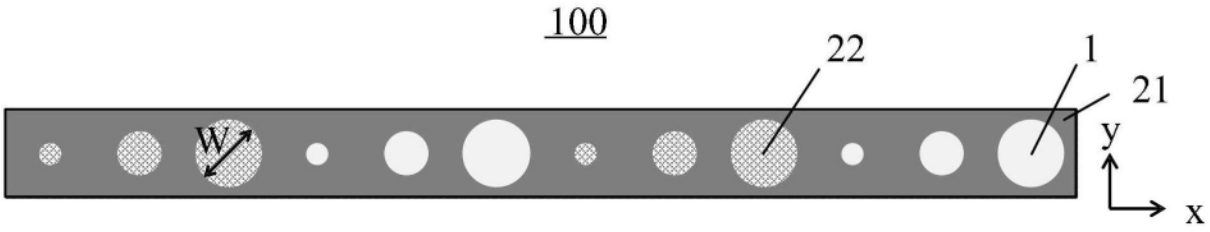


图13B

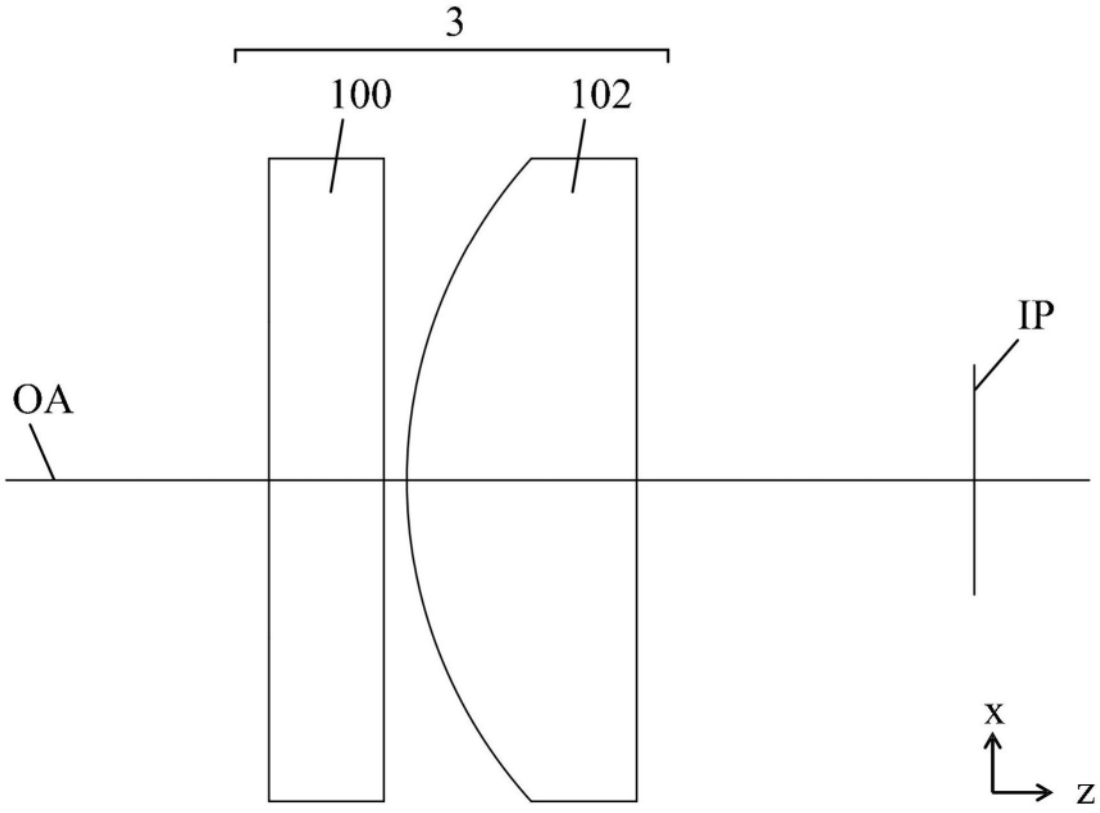


图14

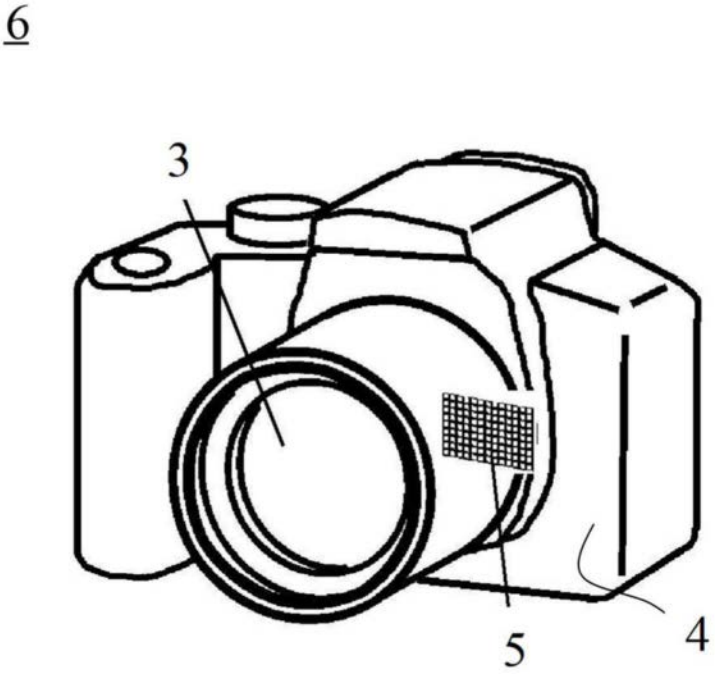


图15