



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108139560 B

(45) 授权公告日 2021.02.26

(21) 申请号 201680055621.7

(22) 申请日 2016.08.24

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108139560 A

(43) 申请公布日 2018.06.08

(30) 优先权数据
62/209,290 2015.08.24 US
62/318,917 2016.04.06 US
15/174,938 2016.06.06 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2018.03.23

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2016/048499 2016.08.24

(87) PCT国际申请的公布数据
W02017/035283 EN 2017.03.02

(73) 专利权人 阿科尼亚全息有限责任公司
地址 美国科罗拉多

(72) 发明人 M·爱瑞斯 K·安德森
A·厄尼斯 F·施罗陶

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所
有限公司 11038
代理人 邹丹

(51) Int.Cl.
G02B 5/18 (2006.01)
G03H 1/02 (2006.01)
G03H 1/28 (2006.01)
G02B 5/32 (2006.01)
G03H 1/26 (2006.01)
G02B 27/01 (2006.01)
G03H 1/04 (2006.01)

(56) 对比文件
EP 0157895 A2, 1985.10.16
US 2002/0191394 A1, 2002.12.19
CN 203673215 U, 2014.06.25

审查员 付画婧

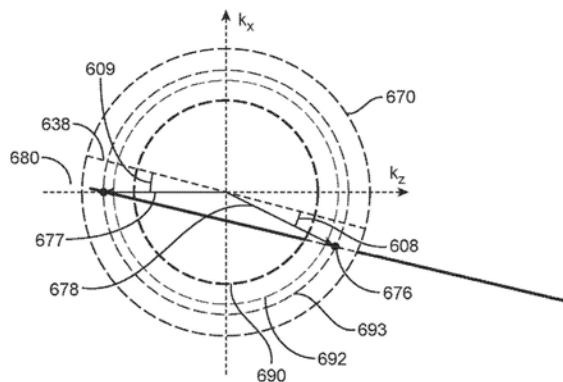
权利要求书2页 说明书50页 附图18页

(54) 发明名称

斜交镜、使用方法和制造方法

(57) 摘要

本发明提供了被称为斜交镜的光学反射设备,所述设备具有不需要被限制为表面法线的反射轴。斜交镜的示例被配置为在相对较宽的波长范围内关于基本恒定的反射轴反射光。在一些示例中,斜交镜在相对较宽的入射角范围内具有基本恒定的反射轴。还公开了用于制造和使用斜交镜的示例性方法。斜交镜包括光栅结构,其在一些示例中包括全息图。



1. 一种光学装置,包括:

位于光栅介质中的光栅结构,其中:

所述光栅结构被配置为反射第一入射光,所述第一入射光在特定位置处入射到所述光栅介质上,并且所述第一入射光具有第一波长和相对于所述光栅介质的表面法线的第一内入射角,所述特定位置包括所述光栅介质的表面的区域;

所述第一入射光主要由所述光栅介质反射为第一反射光,所述第一反射光具有所述第一波长以及相对于所述表面法线的第一内反射角;

所述第一入射光和所述第一反射光被第一反射轴等分,所述第一反射轴具有相对于所述表面法线的第一反射轴角度;

所述光栅结构被进一步配置为反射第二入射光,所述第二入射光在所述特定位置处入射到所述光栅介质上,并且所述第二入射光具有第二波长和相对于所述表面法线的第二内入射角;

所述第二入射光主要由所述光栅介质反射为第二反射光,所述第二反射光具有所述第二波长以及相对于所述表面法线的第二内反射角;

所述第二入射光和所述第二反射光被第二反射轴等分,所述第二反射轴具有相对于所述表面法线的第二反射轴角度;

所述第一反射轴角度和第二反射轴角度分别相对于所述表面法线是非零的;以及

所述第一波长与所述第二波长不同;并且

所述第一反射轴角度与所述第二反射轴角度相差0.25度或更小。

2. 根据权利要求1所述的光学装置,其中所述第一波长与所述第二波长相差至少0.005的波分率。

3. 根据权利要求1所述的光学装置,其中所述第一入射光偏离所述第一反射轴至少1.0度。

4. 根据权利要求1所述的光学装置,其中:

所述光栅结构包括多个体积全息图;

所述多个体积全息图中的每一个与所述多个体积全息图中的至少另一个在空间上重叠;并且

所述光栅介质为至少70 μm 厚。

5. 根据权利要求4所述的光学装置,其中:

所述多个体积全息图包括至少9个全息图;并且

所述多个体积全息图中的每一个至少部分地与所述多个体积全息图中的所有其他体积全息图在空间上重叠。

6. 根据权利要求1所述的光学装置,其中所述第一反射轴角度相对于所述表面法线为至少1.0度。

7. 根据权利要求3所述的光学装置,其中:

所述光栅结构包括至少9个体积全息图;

所述至少9个体积全息图中的每一个至少部分地与所述至少9个体积全息图中的至少另一个在空间上重叠;并且

所述光栅介质为至少200 μm 厚。

8. 根据权利要求1所述的光学装置,其中所述光学装置是头戴式显示器设备,所述头戴式显示器设备包括:

光源,朝波导发射光,其中所述光栅介质位于所述波导上,所述第一反射轴与所述表面法线相差至少4.0度,

所述第一内入射角和所述第二内入射角中的每一个包括跨越至少4.0度范围的多个角度,所述第一反射轴角度与所述第二反射轴角度相差0.10度或更少,并且所述光栅结构包括至少九个重叠的体积全息图。

9. 一种光学装置,包括:

位于光栅介质中的光栅结构,其中:

所述光栅结构被配置为反射第一入射光,所述第一入射光在特定位置处入射到所述光栅介质上,并且所述第一入射光具有相对于所述光栅介质的表面法线的第一内入射角,所述特定位置包括所述光栅介质的表面的区域;

所述第一入射光主要由所述光栅介质反射为第一反射光,所述第一反射光具有相对于所述表面法线的第一内反射角;

所述第一入射光和所述第一反射光被第一反射轴等分,所述第一反射轴具有相对于所述表面法线的第一反射轴角度;

所述光栅结构被进一步配置为反射第二入射光,所述第二入射光在所述特定位置处入射到所述光栅介质上并且具有相对于所述表面法线的第二内入射角;

所述第二入射光主要由所述光栅介质反射为第二反射光,所述第二反射光具有相对于所述表面法线的第二内反射角;

所述第二入射光和所述第二反射光被第二反射轴等分,所述第二反射轴具有相对于所述表面法线的第二反射轴角度;

所述第一入射光与所述第一反射光具有相同的波长,

所述第二入射光与所述第二反射光具有相同的波长;

所述第一内入射角与所述第二内入射角相差多个 $\Delta\theta_B$,其中 $\Delta\theta_B$ 是针对在所述第一入射光和所述第二入射光之间的中点处入射的入射光角度而计算的角度布拉格选择性;

所述第一反射轴角度相对于所述表面法线是非零的;以及

所述第一入射光和所述第二入射光中的每一个从所述第一反射轴偏离;并且

所述第一反射轴角度与所述第二反射轴角度相差0.25度或更小。

10. 根据权利要求9所述的光学装置,其中:

所述第一反射轴角度与所述第二反射轴角度相差0.025度或更小。

11. 根据权利要求9所述的光学装置,其中:

所述第一入射光和所述第二入射光中的每一个偏离所述第一反射轴至少1.0度。

12. 根据权利要求9所述的光学装置,其中:

所述第一入射光和所述第二入射光中的每一个偏离所述第一反射轴至少9.0度。

斜交镜、使用方法和制造方法

背景技术

[0001] 传统电介质反射镜是通过用其介电常数互不相同的多层材料来涂覆表面(通常是玻璃)而制造出来的。这些材料层通常被布置成使得来自层边界的Fresnel反射大大增强,从而得到大的净反射率。可以通过确保在相对宽的指定波长范围和入射角上实现该条件,来设计宽带电介质反射镜。然而,因为这些层是沉积于一个表面上,因此电介质反射镜的反射轴必然会与表面法线一致,即,反射轴与反射镜表面垂直。因为对反射轴的这种限制,所以电介质反射镜完全不适合用于某些用途。此外,玻璃电介质反射镜往往相对较重,使之不太适合或不适合用于要求反射部件相对轻质的应用。相反,传统光栅结构则可关于与光栅结构驻留的介质表面法线相差的反射轴反射光。然而,对于给定的入射角而言,传统光栅结构的反射角通常会随着入射光的波长一起变化。因此,采用传统的光栅结构来反射光避免了电介质反射镜所固有的反射轴必须与表面法线一致的限制。然而,在需要恒定反射轴的情况下,对于给定的入射角而言,传统的光栅结构通常限制在单一波长或非常窄的波长范围。类似地,为了关于恒定反射轴反射指定波长的光,传统的光栅结构也限制在单一入射角或非常窄的入射角范围。因此,传统的光栅结构在任何大的波长范围或入射角的光上不具有恒定反射轴。

[0002] 因此,当前可用的反射装置(包括反射光栅结构或电介质反射镜)都无法满足这样的要求:在相对简单的装置中,关于不限于表面法线的反射轴反射光,并且对于给定的入射角,其反射角在多个波长下基本恒定。因此存在对此类反射装置的需求,此类需求在头盔式显示装置中尤为迫切。

附图说明

[0003] 本领域技术人员将理解,附图主要是出于例示性目的,并非旨在限制本文所述的发明主题的范围。附图不一定按比例绘制;在一些情况下,本文所公开的发明主题的各个方面可能在附图中被夸大或放大示出以便于理解不同的特征部。在附图中,相同的附图标记通常表示相同的特征部(例如,功能上类似的和/或结构上类似的元件)。

[0004] 图1A是记录在光栅介质中的全息图的横截面视图。

[0005] 图1B是单个正弦全息图的k空间表示的横截面视图。

[0006] 图2A是单个正弦全息图的k空间表示的横截面视图。

[0007] 图2B是单个正弦全息图的k空间表示的横截面视图。

[0008] 图3是示出根据一个实施方案的在实际空间中的斜交镜的反射特性的横截面真实视图。

[0009] 图4A是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。

[0010] 图4B是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。

[0011] 图5A是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。

[0012] 图5B是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。

[0013] 图6A是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。

- [0014] 图6B是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0015] 图6C是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0016] 图6D是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0017] 图7A是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0018] 图7B是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0019] 图8A是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0020] 图8B是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0021] 图8C是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0022] 图9A是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0023] 图9B是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0024] 图10A是根据一个实施方案的斜交镜的k空间表示的横截面视图。
- [0025] 图10B是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0026] 图11A是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0027] 图11B是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0028] 图12A是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0029] 图12B是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的横截面视图。
- [0030] 图13是根据一个实施方案的用于制造斜交镜的系统的横截面视图。
- [0031] 图14是示出根据一个实施方案的制造斜交镜的方法的横截面视图。
- [0032] 图15是示出根据一个实施方案的斜交镜的反射特性的平面图。
- [0033] 图16A是示出根据一个实施方案的用于制造斜交镜的系统的横截面视图。
- [0034] 图16B是示出根据一个实施方案的用于制造斜交镜的系统的横截面视图。

具体实施方式

[0035] 本发明的实施方案包括一种反射设备,该反射设备包括其内驻留有体积全息图或其他光栅结构的光栅介质。光栅介质凭借其中驻留的光栅结构具有允许其在称为反射轴的轴周围衍射光的物理特性,其中衍射角(下文称为反射角)对于以给定入射角入射到光栅介质上的多个波长的光而言变化小于 1° 。在一些实施方案中,对于多个入射角观察到上述现象。

[0036] 类似地,对于给定波长的入射光,在一定入射角范围内,实施方案通常具有基本上恒定的反射轴(即,反射轴的反射轴角度变化小于 1.0°),并且这种现象可使用各种波长的入射光观察到。在一些实施方案中,对于一组多个入射角和一组多个波长的每个组合,反射轴保持基本上恒定。

[0037] 在一些实施方案中,光栅结构包括由多个光束(称为记录光束)之间的干涉产生的全息图。通常但不一定,光栅结构包括多个全息图。可使用以在多个全息图之间不同的角度(即多重角度)入射到光栅介质上的记录光束和/或使用其波长多个全息图之间不同(即,多重波长)的记录光束来记录多个全息图。在一些实施方案中,光栅结构包括使用两束记录光束记录的全息图,该两束记录光束在记录全息图时其入射到光栅介质上的角度改变,和/或在记录全息图时其波长改变。实施方案还包括一种设备,其中反射轴与光栅介质的表面法线相差至少 1.0° 、或至少 2.0° 、或至少 4.0° 、或至少 9.0° 。

[0038] 全息术的k空间形式体系

[0039] k空间形式体系是一种用于分析全息记录和衍射的方法。在k空间中,传播的光波和全息图由它们在真实空间中分布的三维傅立叶变换表示。例如,实际空间和k空间中的无限准直单色参考光束可由等式(1)表示,

$$[0040] \quad E_r(\vec{r}) = A_r \exp(i \vec{k}_r \cdot \vec{r}) \xrightarrow{\mathfrak{F}} E_r(\vec{k}) = A_r \delta(\vec{k} - \vec{k}_r), \quad (1)$$

[0041] 其中 $E_r(\vec{r})$ 是所有 $\vec{r} = \{x, y, z\}$ 3D 空间矢量位置下的光学标量场分布,并且其变换 $E_r(\vec{k})$ 是所有 $\vec{k} = \{k_x, k_y, k_z\}$ 3D 空间频率矢量下的光学标量场分布。 A_r 是场的标量复振幅;并且 \vec{k}_r 是波矢量,其长度表示光波的空间频率,其方向表示传播方向。在一些实施方案中,所有光束由相同波长的光组成,因此所有光波矢量必然具有相同的长度,即 $|\vec{k}_r| = k_n$ 。因此,所有光学传播矢量必然位于半径 $k_n = 2\pi n_0 / \lambda$ 的球体上,其中 n_0 是全息图的平均折射率(“体积指数”),并且 λ 是光的真空波长。这种结构被称为k球体。在其他实施方案中,多个波长的光可分解为位于不同k球体上的不同长度的波矢量的叠加。

[0042] 另一个重要的k空间分布是全息图本身。体积相位全息图通常由光栅介质内的折射率的空间变型组成。折射率空间变型,通常表示为 $\Delta n(\vec{r})$, 可被称为折射率调制图案,其k空间分布通常表示为 $\Delta n(\vec{k})$ 。由第一记录光束和第二记录光束之间的干涉产生的折射率调制图案通常与记录干涉图案的空间强度成比例,如等式(2)所示,

$$[0043] \quad \Delta n(\vec{r}) \propto |E_1(\vec{r}) + E_2(\vec{r})|^2 = |E_1(\vec{r})|^2 + |E_2(\vec{r})|^2 + E_1^*(\vec{r})E_2(\vec{r}) + E_1(\vec{r})E_2^*(\vec{r}), \quad (2)$$

[0044] 其中 $E_1(\vec{r})$ 是信号第一记录光束场的空间分布,并且 $E_2(\vec{r})$ 是第二记录光束场的空间分布。一元运算符*表示复共轭。等式(2)中的最后一项 $E_1(\vec{r})E_2^*(\vec{r})$ 将入射的第二记录光束映射到衍射的第一记录光束中。因此我们可写出方程(3),

$$[0045] \quad E_1(\vec{r})E_2^*(\vec{r}) \xrightarrow{\mathfrak{F}} E_1(\vec{k}) \otimes E_2(\vec{k}), \quad (3)$$

[0046] 其中 \otimes 是3D互相关性运算符。这就是说,空间域中一个光场与另一光场的复共轭的积与频域中它们对应的傅里叶变换具有互相关性。

[0047] 图1A示出了使用第二记录光束115和第一记录光束114在光栅介质 110中记录的全息图105的真实空间表示。光栅介质通常包括被配置为将干涉图案记录为全息图的记录层。图1A省略了除记录层以外的光栅介质部件,诸如可用作记录层的衬底或保护层的附加层。第二记录光束115和第一记录光束114反向传播。第二记录光束115和第一记录光束114中的每一者通常是波长彼此相同的平面波束,并且第一记录光束114和第二记录光束通常都不包含编码信息。因此,除了它们入射到记录介质110上的角度以外,可被称为信号光束和参考光束的第一记录光束和第二记录光束通常基本上彼此相同。

[0048] 图1B示出了第一记录光束和第二记录光束以及全息图的k空间表示。图1A和图1B所示的全息图是由反向传播的第一记录光束114和第二记录光束115产生并记录在记录介质110中的简单布拉格反射全息图。图1A示出了照射在光栅介质110的相对侧上的第二记录

光束115和第一记录光束 114。第二记录光束115和第一记录光束114中的每一者在所有 $\vec{r} = \{x, y, z\}$ 3D空间矢量位置处的光学标量场分布可分别表示为 $E_2(\vec{r})$ 和 $E_1(\vec{r})$ 。记录光束114, 115形成平面干涉条纹, 其被记录为光栅介质110内的全息图105。全息图 105包括正弦折射率调制图案, 并且可表示为 $\Delta n(\vec{r})$ 。在反向传播配置中, 所记录的平面干涉条纹的间距恰好是用于记录全息图的光的(内部)波长的一半。

[0049] 图1B示出了图1A所示真实空间中的情况的k空间表示。记录光束在图1B中由位于记录k球体170的相对侧上的点状k空间分布表示。如图 1B所示, 第二记录光束具有k空间分布162, 并且第一记录光束具有k空间分布163。第二记录光束k空间分布162可表示为 $E_2(\vec{k})$, 并且第一记录光束k空间分布163可表示为 $E_1(\vec{k})$ 。第二记录光束k空间分布162和第一记录光束k空间分布163中的每一者均为“点状”。第二记录光束波矢量164 和第一记录光束波矢量165示出分别从原点延伸到第二记录波束k空间分布162和第一记录波束k空间分布163。第二记录光束波矢量164可表示为 $E_2(\vec{k})$, 并且第一记录光束波矢量165可表示为 $E_1(\vec{k})$ 。全息图本身在图1B中由两个共轭旁频带k空间分布168表示, 其中每一者可表示为 $\Delta n(\vec{k})$ 并被称为 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布。该两个 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布168具有小而有限的尺寸, 但为“点状”, 在某种意义上它们通常比它们到原点的距离或图1B的其他特征部小几个数量级。例如, 如果光栅介质110的厚度是200 μm , 折射率为 1.5, 并且记录光束的波长为532nm, 则分布168各自类似于沿 k_z 维度具有零值到零值的 3.14×10^4 弧度/米 (rad/m) 尺寸的正弦函数。然而, 它们距原点的距离为超过1000倍大的 3.56×10^7 rad/m。除非另有指示, 否则所有所述波长均指真空波长。

[0050] 通常, 全息图构成真实空间中实值的折射率分布。全息图的两个 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布 168的位置可分别由互相关性运算 $E_2(\vec{k}) \otimes E_1(\vec{k})$ 和 $E_1(\vec{k}) \otimes E_2(\vec{k})$ 从数学上或者由矢量差值 $\vec{K}_{G+} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$ 和 $\vec{K}_{G-} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1$ 从几何学上确定, 其中 \vec{K}_{G+} 和 \vec{K}_{G-} 是从相应全息图 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布到原点的光栅矢量(未单独显示)。光栅矢量 169, 可表示为 \vec{K}_G , 包括 \vec{K}_{G+} 和 \vec{K}_{G-} 光栅矢量两者, 在图1B中示出为在第二记录光束k空间分布162和第一记录光束k空间分布163之间延伸的双箭头169。需注意, 按照惯例, 波矢由小写“k”表示, 光栅矢量由大写“K”表示。

[0051] 一旦被记录, 全息图可被探测光束照亮以产生衍射光束。出于本公开的目的, 衍射光束可被认为是探测光束的反射, 该探测光束可被称为入射光束。探测光束及其反射光束被反射轴按角度等分(即, 探测光束相对于反射轴的入射角度与反射光束相对于反射轴的反射角度相同)。衍射过程可由类似于记录过程中的那些的k空间中的一组数学和几何运算来表示。在弱衍射极限中, 衍射光束的衍射光分布由等式(4)给出,

$$[0052] \quad E_d(\vec{k}) \propto \Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k}) \Big|_{|\vec{k}|=k_n}, \quad (4)$$

[0053] 其中 $E_d(\vec{k})$ 和 $E_p(\vec{k})$ 分别是衍射光束和探测光束的k空间分布; 并且“*”是 3D卷积运

算符。注释“ $\big|_{|\vec{k}|=k_n}$ ”指示前述表达式仅在 $|\vec{k}|=k_n$ 的情况下即结果位于k球体上时成立。卷积 $\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$ 表示偏振密度分布,并且与由探测光束引起的光栅介质的不均匀电偶极矩 $E_p(\vec{k})$ 的宏观总和成比例。

[0054] 通常,当探测光束类似于用于记录的记录光束中的一者时,卷积的作用是在记录期间逆转互相关性,并且衍射光束将基本上类似于用于记录全息图的其他记录光束。当探测光束具有与用于记录的记录光束不同的k空间分布时,全息图可产生与用于记录全息图的光束基本上不同的衍射光束。还需注意,尽管记录光束通常是相互相干的,但探测光束(和衍射光束)不受此限制。多波长探测光束可被分析为单波长光束的叠加,每个光束遵循具有不同k球体半径的方程(4)。

[0055] 图2A和图2B分别示出了照明在图1A和图1B所示的全息图上产生的布拉格匹配和布拉格失配重建的情况。在布拉格匹配和布拉格失配两者的情况中,全息图使用波长比用于记录全息图的记录光束更短的探测光束来照明。较短的波长对应于较长的波矢量。因此,探测k球体172具有比记录k球体170更大的半径。图2A和图2B中示出了探测k球体172和记录k球体170两者。

[0056] 图2A示出了探测光束被设计为产生点状且位于探测k球体172上的衍射光束k空间分布175(表示为 $E_d(\vec{k})$)的情况。根据等式(4)的卷积产生衍射光束k空间分布175。探测光束具有也为点状的k空间分布176(表示为 $E_p(\vec{k})$)。在这种情况下,虽然探测光束波长不同于用于记录全息图的记录光束的波长,也可认为探测光束与全息图“布拉格匹配”,并且全息图可产生有意义的衍射。如图2A所示,卷积运算也可由矢量和 $\vec{k}_d = \vec{k}_p + \vec{K}_{G+}$ 在几何上表示,其中 \vec{k}_d 表示衍射光束波矢量177, \vec{k}_p 表示探测光束波矢量178, \vec{K}_{G+} 表示旁频带光栅矢量179。

[0057] 图2A示出了探测光束通过全息图的镜像衍射(其可被称为反射)的k空间表示,其中探测光束相对于 k_z 轴的入射角等于衍射光束相对于 k_z 轴的反射角。图2B示出了布拉格失配情况的k空间表示,其中k空间偏振密度分布180(其可表示为 $\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$)不位于探测k球体172上,因此探测光束不会发生明显的衍射。图2B所示的布拉格失配情况中的这种非衍射k空间分布180一定程度上类似于图2A所示布拉格匹配情况中的衍射光束k空间分布175,但是k空间分布180不应被称为衍射光束k空间分布,因为探测光束没有发生明显的衍射。

[0058] 比较布拉格匹配和布拉格失配的情况,显然对于给定的探测波长,全息图仅在非常小的输入角度范围内产生镜像衍射(如果有的话)。本领域技术人员将认识到,可通过过度调制全息图或通过使用非常薄的记录层在一定程度上延长该范围;但这些步骤可能仍不会在更大范围的波长和角度上产生镜像行为。这些步骤还可能导致不期望的色散。

[0059] k空间中的斜交镜实施方案

[0060] 图1A、图1B、图2A和图2B表示由单个正弦光栅构成的反射全息图。如图所示,该全息图在窄的波长和入射角范围内表现出镜像反射。此类全息图的具体特性可通过应用公知

的Kogelnik耦合波理论来确定。相反,本发明的实施方案通过创建包括多个光栅的更复杂的光栅结构而在相对宽的波长和角度范围内表现出新的镜像反射率。

[0061] 图3示出了示出单个正弦光栅的布拉格选择性的几何形状。光栅介质 310包含厚度为d的单个正弦光栅,其将单个波长 λ_0 的入射光324反射为主反射光327。在布拉格匹配条件下,入射光324以角度 θ_i 照射,并且以角度 θ_r 反射为反射光327,这两个角度均相对于z轴测量。入射光324和反射光 327还限定反射轴338,关于该反射轴的入射角度量值 θ_i' 和反射角度量值 θ_r' 相等。反射轴338因此是入射光324和反射光327的角平分线。

[0062] 如本领域技术人员所知,图3的正弦光栅将表现出角度布拉格选择性和波长布拉格选择性。如果入射光324以非布拉格匹配角度 $\theta_i + \Delta \theta_i$ 照射,衍射效率与布拉格匹配的衍射效率相比可能会降低。正弦光栅的选择性可由其角度布拉格选择性 $\Delta \theta_B$ 来表征,其由等式(5)给出:

$$[0063] \quad \Delta \theta_B = \frac{\lambda \cos \theta_r}{n_0 d \sin(\theta_i - \theta_r)} \quad (5)$$

[0064] 本领域技术人员将认识到,在弱衍射正弦光栅中,角度 $\theta_i + \Delta \theta_B$ 表示角衍射效率图中的第一零值。因此可认为量 $\Delta \theta_B$ 表示正弦光栅的角宽度,因为当入射角偏离布拉格匹配角 θ_i 超过几倍 $\Delta \theta_B$ 时,衍射可大大降低。类似地,对于弱衍射正弦光栅,本领域技术人员将预期对于其入射角发生超过几倍 $\Delta \theta_B$ 变化的单色入射光而言反射轴将显著变化。

[0065] 相反,根据本公开的斜交镜对于其入射角发生许多倍 $\Delta \theta_B$ 变化的入射光而言表现出相对稳定的衍射和基本恒定的反射轴。一些斜交镜实施方案在 20倍 $\Delta \theta_B$ 的入射光入射角范围内表现出基本恒定的反射轴。在实施方案中,在20倍 $\Delta \theta_B$ 的入射光入射角范围内,反射轴角度变化小于0.250度、或小于0.10度、或小于0.025度。

[0066] 类似地,正弦光栅可由其波长布拉格选择性 $\Delta \lambda_B$ 来表征,其由等式(6)给出:

$$[0067] \quad \Delta \lambda_B = \frac{\lambda_0^2 \cos \theta_r}{2n_0^2 d \sin^2(\theta_i - \theta_r)} \quad (6)$$

[0068] 本领域技术人员将认识到,在弱衍射正弦光栅中,波长 $\lambda_0 + \Delta \lambda_B$ 表示波长衍射效率图中的第一零值。因此可认为量 $\Delta \lambda_B$ 表示正弦光栅的波长宽度,因为当入射波长偏离布拉格匹配波长 λ_0 超过几倍 $\Delta \lambda_B$ 时,不会发生明显的衍射。本领域技术人员还将认识到,等式(5)和(6)分别仅适用于角度和波长上的变化,并且角度和波长的同时改变可导致另一布拉格匹配条件。

[0069] 光栅也可用其衍射角响应来表征。对于正弦光栅,衍射角响应可由等式(7)表示:

$$[0070] \quad \Delta \theta_r \cos \theta_r = -\Delta \theta_i \cos \theta_i \quad (7)$$

[0071] 衍射角响应表示响应于入射角的小变化 $\Delta \theta_i$ 的反射角的变化 $\Delta \theta_r$ 。相反,精密反射镜具有由等式(8)表示的角度响应:

$$[0072] \quad \Delta \theta_r = -\Delta \theta_i \quad (8)$$

可认为具有基本上由等式(7)表征的衍射角响应的设备表现出类似光栅的反射行为,而具有基本上由等式(8)表征的衍射角响应的设备可被认为表现出镜像反射行为。表现出类似光栅反射行为的设备将必然还表现出随着入射角而变化的反射轴,除非该反射轴垂直于设备表面,在这种情况下 $\cos \theta_r = \cos \theta_i$ 。因此,单个正弦光栅无法满足这样的要求:在相对简单的设备中,关于不限于表面法线的反射轴反射光,

并且对于跨越其角度布拉格选择性多倍的入射角,其反射角在跨越其波长布拉格选择性多倍的波长下是恒定的。

[0073] 图3示出了反射配置中的设备几何形状。本领域技术人员将认识到,前述分析也适用于透射配置中的设备几何形状以及其中一个或两个光束由设备内的全内反射引导的设备几何形状。

[0074] 图4A和图4B示出了根据一个实施方案的k空间中斜交镜的操作。图4A示出了根据一个实施方案的记录在光栅介质中并且被配置为产生多波长镜像衍射的全息图的两个 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488。图4A和图4B中的红色k球体490、绿色k球体492和蓝色k球体493分别指示对应于光的波长位于可见光谱的红色、绿色和蓝色区域中的k球体。

[0075] 不同于两个 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布构成单个正弦光栅(并因此可表征为“点状”),图4A中所示的 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488沿着k空间中的大致直线定位,并且因此可被表征为“线段状”。在一些实施方案中,线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布包括k空间中大致直线的连续调制子段。在一些实施方案中,线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布基本上由沿着k空间中的大致直线定位的点状分布组成。线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488关于原点对称地定位,并且因此可实现为真实空间中的实值折射率分布的共轭旁频带(表示为 $\Delta n(\vec{r})$)。在一些实施方案中,调制可包括吸收和/或发射分量,并且因此在k空间中可不表现出共轭对称。根据本发明的实施方案,分布的复振幅可以是均匀的,或者其振幅和/或相位可变化同时仍基本上表现出多波长镜像衍射。在一个实施方案中,线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布基本上沿kz轴定位,其按照惯例是光栅介质的厚度方向。

[0076] 图4B示出了全息图的多波长镜像反射特性。根据等式(4),具有点状k 空间分布476(表示为 $E_p(\vec{k})$)的准直探测光束照射全息图产生k空间偏振密度分布480(表示为 $\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$)。因为探测光束k空间分布476是点状的,所以偏振密度分布480类似于 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488从原点到探测光束波矢量478(\vec{k}_p)的尖端的简单平移。然后,同样根据等式(4),只有k空间偏振密度分布480($\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$)与探测光束k空间分布476($E_p(\vec{k})$)的k球体492相交的部分才有助于衍射。这产生了构成衍射光束的衍射光束k空间分布475, ($E_d(\vec{k})$)。因为 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488类似于与kz轴平行的线段,显然反射角482的量值(θ_r)基本上等于入射角481的量值(θ_i),使得全息图表现出镜像行为。此外,还显而易见的是,该特性通常适用于所有产生任何衍射的任何入射角和波长以及产生衍射的探测光束的任何叠加。k空间偏振分布 $\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$ 将在关于 k_x 轴(或关于 k_x, k_y 平面,在3D情况下)的镜像对称的单个位置处与探测k球体相交。因此,图4A的全息图被配置为在相对宽的波长和角度范围内表现出镜像行为,并因此构成宽带全息反射镜。

[0077] 实施方案通常但不一定在 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488靠近原点处显示出间隙,如图4A所示。间隙的存在会限制非常高 $\Delta \theta$ (即,入射和反射的掠入角)下的性能。

[0078] 根据一个实施方案,斜交镜 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布可相对于 k_x 、 k_y 和 k_z 轴旋转到任意角度。在一些实施方案中, $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布不垂直于真实空间中的相关反射表面。换句话说讲,斜交镜实施方案的反射轴不限于与表面法线重合。

[0079] 图5A和图5B示出了 k 空间中的斜交镜。图5A和图5B分别与图4A 和图4B相同,不同之处在于所有的分布和矢量已关于原点旋转约 45° 。在对图4B进行讨论之后,显然图5B的斜交镜对于产生衍射的所有探测光束波长和角度产生镜像衍射。衍射相对于由线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布488限定的反射轴461是镜像的,即入射角481相对于反射轴461的量值等于反射角482相对于反射轴461的量值。图5B示出了一种此类情况。

[0080] 图6A示出了在真实空间中斜交镜的操作。斜交镜610的由垂直于斜交镜表面612的相对于 z 轴测量的以 -13° 角度的反射轴638表征。斜交镜610 被入射光624以相对于 z 轴测量的 -26° 内入射角照射。主要的反射光627以相对于 z 轴测量的内反射角 180° 被反射。

[0081] 图6B示出了 k 空间中的图6A的斜交镜610。线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布 688穿过原点,并且相对于 z 轴的角度为 -13° ,其等于反射轴638的角度。记录 k 球体670是对应于405nm的写入波长的 k 球体。图6B和图6D中的红色 k 球体690、绿色 k 球体692和蓝色 k 球体693分别指示对应于光的波长位于可见光谱的红色、绿色和蓝色区域中的 k 球体。

[0082] 图6C示出了图6B的高度放大的部分,示出了根据一个实施方案的记录 k 球体670和线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布688之间的左交叉点。在该视图中,可以看出线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布688包括多个离散的全息图。该多个离散的全息图605中的每一者由在 k_z 方向上划分全息图的第一零值到第一零值间隔的水平线表示。在一些实施方案中,离散全息图的间距可大于或小于图 6C所示的间距。在一些实施方案中,间距可足够小以在线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布688中产生间隙。在具有间隙的一些实施方案中,宽带照明的使用可基本上掩盖间隙对反射光的任何影响。在一些实施方案中,该方法可导致净衍射效率增加。在其他实施方案中,离散全息图的间隔可如此密集以致接近或等效于连续分布。

[0083] 图6D示出了在 k 空间中图6A的斜交镜对蓝色入射光的反射。具有探测光束波矢量678的入射光以相对于 z 轴测量的 -26° 的内入射角照射。探测光束波矢量678的尖端位于蓝色 k 球体693上,从而指示点状探测光束 k 空间分布 $676(E_p(\vec{k}))$ 的位置。偏振密度分布680由卷积 $\Delta n(\vec{k}) * E_p(\vec{k})$ 给出,其类似于平移至探测光束波矢量678的尖端的线段 $\Delta n(\vec{k})$ k 空间分布688(见图 6C)。具有衍射光束波矢量677的主反射光通过评估在蓝色 k 球体693处的偏振密度分布680由方程(4)来确定。具有衍射光束波矢量677的主反射光以相对于 z 轴测量的 180° 的内传播角被反射。

[0084] 本领域技术人员将认识到,本文在描述 k 空间中斜交镜的特性时通常使用的术语“探测光束”类似于术语“入射光”,其通常在本文描述现实空间中斜交镜的反射特性时使用。类似地,本文在描述 k 空间中斜交镜的特性时通常使用的术语“衍射光束”类似于术语“主反射光”,其通常在本文描述现实空间中斜交镜的特性时使用。因此,当描述现实空间中斜交镜的反射特性时,通常的说法是入射光被全息图(或其他光栅结构)反射为主反射光,但探测光束被全息图衍射产生衍射光束的这一说法基本上表达相同的意思。类似地,当描

述k空间中斜交镜的反射特性时,通常的说法是探测光束被全息图(或其他光栅结构)衍射产生衍射光束,但入射光被光栅结构反射产生主反射光的这一说法在本发明的实施方案的上下文中具有相同的含义。

[0085] 如图6D所示,探测光束波矢量678和衍射光束波矢量677必然形成以线段状偏振密度分布680为基线的基本上等腰三角形的支路。该三角形的等角必然与入射角608和反射角609(均相对于反射轴638测量)全等。因此,斜交镜610关于反射轴638以基本镜像的方式反射光。

[0086] 在 $\Delta n(\vec{k})$ k空间分布688基本上类似于穿过原点的线段的任何时候获得图6D的等腰三角形结构,如图6C所示。偏振密度分布680因此基本上类似于等腰三角形的直基线,从而对于衍射的任何长度的任何入射内波矢量产生关于反射轴638的镜像反射。在一些实施方案中,根据斯涅耳定律,光栅介质的色散可使得具有相同方向但不同长度的内波矢量在外部介质中沿不同方向折射。类似地,色散可使得具有相同方向和不同长度的外波矢量在内部光栅介质中沿不同方向折射。因此,如果希望使斜交镜中的色散效果最小化,则可期望向线段状 $\Delta n(\vec{k})$ k空间分布688赋予曲线,或者以其他方式偏离穿过原点的线。根据一些度量,此类方法可减少涉及外部折射的反射中的净角度色散。由于有用的光栅介质的色散通常非常低,所以与通过原点的直线的偏差可能很小。

[0087] 图7A示出了在k空间中图6A的斜交镜对绿色入射光的反射。具有波矢量778A的入射光以相对于z轴测量的 -35° 的内传播角照射。具有波矢量777A的主反射光以相对于z轴测量的 -171° 的内传播角被反射。入射角708A和反射角709A的量值都基本上等于相对于反射轴638测量的22度,因此关于反射轴638构成镜像反射。图7A中还示出了偏振密度分布780A。

[0088] 图7B示出了k空间中图10A的斜交镜对红色入射光的反射。具有探测光束波矢量778B的入射光以相对于z轴测量的 -35° 的内传播角照射。具有衍射光束波矢量777B的主反射光以相对于z轴测量的 -171° 的内传播角被反射。入射角708B和反射709B的量值均基本上等于相对于反射轴638测量的 22° ,因此关于反射轴638构成镜像反射。图7B中也示出了偏振密度分布780B。

[0089] 图7A和图7B示出了以相同的入射角和反射角的绿光和红光的反射,示出了斜交镜的消色差反射特性。本领域技术人员将认识到,图6A至图6D和图7A至图7B的几何配置对于产生反射的所有角度/波长组合(包括未具体示出的角度和波长)将产生镜像反射。

[0090] 斜交镜的光学特性

[0091] 斜交镜的实施方案相对于内传播角产生镜像反射,外部角必然使用斯涅尔定律在相关边界处确定。因此,斜交镜可能会向外部波阵面引入像差、色散和/或场失真。在一些实施方案中,可通过使用补偿光学设备来减轻像差、色散和/或场失真。在一些实施方案中,补偿光学设备可包括处于对称关系的另一个斜交镜。

[0092] 相对薄的斜交镜可能会在反射光束中引入与光束在细轴上的投影成比例的较低的角度分辨率。在某些情况下,增加记录层的厚度以便减轻这种影响可能是有利的。

[0093] 斜交镜的反射率

[0094] 斜交镜的实施方案可以是全部反射的或部分反射的。斜交镜的实施方案可能需要

相对高的动态范围记录介质,以在相对宽的波长带宽和角度范围内实现高反射率。在一个实施方案中,具有跨越405nm下的105°到低至650nm下的20°的角度范围的斜交镜可能需要在200 μ m记录层中的183个单独的全息图。使用具有0.03的最大折射率调制的最先进的光敏记录介质,这种配置具有约7.5%的反射率。在一些实施方案中,增加记录介质厚度可能不会导致反射率增加,因为衍射选择性也随厚度而增加。

[0095] 斜交镜的应用

[0096] 先前的论述涉及内部波长和传播角度,但描述了在z方向上具有厚度的板状全息图的一种情况。许多其他配置在本发明的范围内是可能的。在不暗示限制的情况下,此处示出了几个示例性实施方案。

[0097] 图8A示出了称为斜交窗口的实施方案,该倾斜窗口在光栅介质中包括光栅结构805,并且包括入射光关于其对称折射的反射轴861。斜交窗口是斜交镜的透射模拟。图8B示出了斜交耦合器实施方案,其使用斜交镜将外部光耦合进入波导894或离开该波导。透射斜交耦合器也是可能的。图8C示出了可折叠光路和/或反转图像的斜交棱镜实施方案。

[0098] 图9A示出了由具有两个斜交耦合器的平板波导994形成的光瞳中继镜实施方案,每个斜交耦合器包括具有与光栅介质的表面法线相差的反射轴961的光栅介质910。由于该设备被配置为以均匀的1:1映射将输入光线中继到输出光线,所以它可将无限远处的图像通过波导994传输到眼睛或其他传感器。除了其他应用之外,此类配置对于头盔式显示器(HMD)可能是有用的。在相反的方向上,它可中继眼睛的图像,这可用于眼睛追踪目的。图9B示出了用作聚光器/漫射器的斜交镜900,其可将大的暗光束变换成明亮的小光束,和/或反之亦然。

[0099] 图10A和图10B示出了斜交镜的角度滤波器实施方案。在图10A中,与图8A中所示的分布相比, $\Delta n(\vec{k})\mathbf{k}$ 空间分布1088被指示具有较高的低频截止(即,较大的中心间隙)。因此,斜交镜将仅将窄带入射光束 E_{inc} 的低 θ (即,接近垂直入射)角度分量反射为反射光束 E_r ,同时透射 E_t 中的高 θ 角度分量。本领域技术人员将容易地认识到,根据本发明的一个实施方案,可通过调制线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布的振幅和/或相位来实现任意的圆性对称传递函数。也可用斜交镜并且在涉及记录在一个或多个介质中的多个斜交镜的配置中来完成角度过滤。这些配置可不限于圆形对称,并且可实现一定水平的消色差运算。

[0100] 第一实施方案斜交镜

[0101] 第一实施方案斜交镜的发明方面包括被配置为关于反射轴反射两种入射光的反射镜,一种入射光的波长为532nm,另一入射光的波长为513nm,该两种入射光共同具有相对于表面法线+13.73度的平均反射轴角度。在另一发明方面,以-4.660度到+1.933度范围内的内入射角入射到斜交镜上的532nm光的平均反射轴角度(+13.759度)与以与532nm入射光相同的入射角入射到斜交镜上的513nm光的平均反射轴角度(13.693度)仅相差0.066度。因此对于532nm至513nm的波长范围,反射轴基本上是恒定的,这是对于-4.660度至+1.993度的内入射角(相对于表面法线)获得的条件。

[0102] 图11A和图11B示出了第一实施方案斜交镜1100。第一实施方案斜交镜1100包括位于光栅介质1110中的光栅结构1105(由图11A和图11B中的斜阴影线示出)。为了清楚起见,斜阴影线在光栅介质1110内靠近指示光、轴和角度的图形元素的区域中被省略。然而,本领域

域技术人员将认识到,光栅结构1105通常占据上述区域。第一实施方案的光栅结构1105包括在光栅介质1110中彼此在空间上至少部分重叠的多个全息图。

[0103] 该多个全息图被记录到光栅介质内部体积中,并且因此在光栅介质表面1112下方延伸。因此,它们有时被称为体积全息图。第一实施方案的多个全息图包括用405nm波长的记录光束记录的四十八(48)个体积全息图。在光栅介质1110中,该48个体积全息图中的每一者通常与该48个体积全息图中的所有其他全息图至少部分在空间上重叠。在一些实施方案中,该多个全息图中的每一者与该多个全息图中的其他全息图中的至少一者但不是全部至少部分在空间上重叠。下文在制造斜交镜的第一方法中描述了记录第一实施方案斜交镜的48个全息图。在一些实施方案中,光栅结构包括 1至48个全息图、或4至25个全息图、或至少5个全息图、或至少9个全息图、或至少11个全息图、或至少24个全息图。

[0104] 第一实施方案光栅介质1110是可从Akonia Holographics, LLC (Longmont, CO) 商购获得的称为AK174-200的专用光敏聚合物光学记录介质。第一实施方案的AK174-200记录介质约200 μm 厚, M/#为约18, 并且对于405nm光折射率为约1.50。诸如AK174-200介质的光学记录介质是其中光栅结构可通过光学手段记录这一类型的光栅介质。光栅介质通常但不一定为至少70 μm 厚至约1.2mm厚。作为记录体积全息图的结果, AK174-200介质通常经历相对较少的收缩(通常约0.1%至0.2%)。光栅介质的变型包括但不限于光折射晶体、重铬明胶、光热折射玻璃和含有分散的卤化银颗粒的薄膜。

[0105] 第一实施方案斜交镜1100的变型可包括附加层, 诸如玻璃盖或玻璃衬底(图11A和图11B中未示出)。附加层可用于保护光栅介质免受污染、湿气、氧气、反应性化学物质、损坏等。附加层通常具有与光栅介质1110 匹配的折射率。因为附加层的折射率通常非常接近光栅介质的折射率, 所以光在附加层和光栅介质界面处的折射有时可忽略。对于第一实施方案, 对于波长为405nm的光, 附加层和光栅介质的折射率均为约1.5。为了清楚起见, 图11A和图11B中未示出附加层。

[0106] 如图11A所示, 第一实施方案的光栅结构1105具有被配置为关于第一反射轴1138(以虚线示出)反射第一入射光1124A, 1124B的物理特性。第一入射光具有532nm的第一波长并且在特定位置1117处入射到光栅介质 1110上。第一反射轴1138与光栅介质的表面法线1122相差第一反射轴角 1135角度+13.759度(内部, 相对于表面法线), 其中第一入射光具有相对于表面法线从-4.660度(示出为第一入射光1124A)到+1.933度(示出为第一入射光1124B)的第一内入射角1125A, 1125B, 从而产生6.593度的范围。如表1所示, 第一入射光的第一内入射角包括从-4.660度到+1.933度以约0.067度的角度间隔隔开的一百(100)个不同内角。在第一实施方案斜交镜的一些变型中, 第一入射光的第一内入射角包括从-4.660度到+1.933度以约0.67度的角度间隔隔开的十(10)个不同内角。在整个说明书和所附权利要求书中, 除非另外明确指出, 否则所标识的角度和角度值是指相对于表面法线的内角。

[0107] 如图11A所示, 具有相对于表面法线-4.660度的第一内入射角1125A 的第一入射光1124A被光栅结构1105反射为具有相对于表面法线+32.267 度的第一内反射角1126A的第一反射光1127A。具有相对于表面法线 +1.933度的第一内入射角1125B的第一入射光1124B被反射为具有+25.668 度的第一内反射角1126B的第一反射光1127B。第一反射光1127A, 1127B 具有第一波长, 即在第一实施方案中, 第一反射光具有532nm的波长。表 1中示出了第一实施方案斜交镜的第一入射光角度、第一反射光角度和第一反射轴角度。

[0108] 表1第一实施方案斜交镜的第一入射光、第一反射光 and 第一反射轴的角度;波长=532nm;AK174-200记录介质;N=100

	第一内 反射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第一反 射轴角 度(内 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一内 入射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第一入 射光的 入射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第一反 射光的 反射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第一入 射光的 入射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一反 射光的 反射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一反 射轴角 度(外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)
[0109]	25.668	13.800	1.933	-11.867	11.867	2.900	40.521	21.711
	25.680	13.773	1.866	-11.907	11.907	2.800	40.542	21.671
	25.691	13.746	1.800	-11.946	11.946	2.701	40.563	21.632
	25.814	13.774	1.733	-12.041	12.041	2.600	40.782	21.691
	25.938	13.803	1.667	-12.136	12.136	2.501	41.003	21.752
	26.005	13.802	1.600	-12.202	12.202	2.400	41.122	21.761
	25.904	13.719	1.533	-12.185	12.185	2.300	40.942	21.621
	25.971	13.719	1.466	-12.252	12.252	2.200	41.062	21.631
	26.094	13.747	1.400	-12.347	12.347	2.101	41.283	21.692
	26.216	13.775	1.333	-12.442	12.442	2.000	41.502	21.751
	26.339	13.803	1.267	-12.536	12.536	1.901	41.723	21.812
	26.350	13.775	1.200	-12.575	12.575	1.800	41.742	21.771
	26.472	13.803	1.134	-12.669	12.669	1.701	41.963	21.832
	26.538	13.802	1.067	-12.736	12.736	1.600	42.082	21.841
	26.660	13.830	1.001	-12.830	12.830	1.501	42.303	21.902
	26.780	13.857	0.933	-12.924	12.924	1.399	42.521	21.960
	26.738	13.802	0.867	-12.935	12.935	1.301	42.443	21.872
	26.803	13.801	0.800	-13.001	13.001	1.200	42.561	21.881

	26.923	13.829	0.734	-13.095	13.095	1.101	42.781	21.941
	26.989	13.828	0.667	-13.161	13.161	1.000	42.901	21.951
	26.946	13.773	0.601	-13.173	13.173	0.901	42.822	21.862
	27.066	13.800	0.533	-13.266	13.266	0.800	43.041	21.921
	26.913	13.690	0.467	-13.223	13.223	0.701	42.762	21.732
	27.088	13.744	0.400	-13.344	13.344	0.600	43.081	21.841
	27.263	13.798	0.334	-13.464	13.464	0.501	43.402	21.952
	27.436	13.852	0.267	-13.585	13.585	0.400	43.721	22.061
	27.230	13.715	0.201	-13.515	13.515	0.301	43.342	21.822
	27.241	13.687	0.133	-13.554	13.554	0.200	43.361	21.781
	27.416	13.742	0.067	-13.674	13.674	0.101	43.683	21.892
	27.589	13.794	0.000	-13.794	13.794	0.000	44.002	22.001
	27.600	13.766	-0.067	-13.833	13.833	-0.100	44.022	21.961
	27.664	13.766	-0.133	-13.899	13.899	-0.200	44.142	21.971
	27.837	13.818	-0.200	-14.018	14.018	-0.300	44.462	22.081
	27.955	13.844	-0.267	-14.111	14.111	-0.400	44.682	22.141
	28.074	13.870	-0.333	-14.203	14.203	-0.499	44.903	22.202
	28.030	13.815	-0.401	-14.215	14.215	-0.601	44.822	22.111
	28.042	13.788	-0.467	-14.254	14.254	-0.700	44.844	22.072
	28.106	13.786	-0.533	-14.320	14.320	-0.800	44.964	22.082
	28.224	13.812	-0.600	-14.412	14.412	-0.900	45.184	22.142
	28.288	13.811	-0.667	-14.477	14.477	-1.000	45.304	22.152
	28.298	13.783	-0.733	-14.516	14.516	-1.100	45.324	22.112
	28.362	13.781	-0.800	-14.581	14.581	-1.200	45.444	22.122
[0110]	28.427	13.781	-0.866	-14.646	14.646	-1.299	45.566	22.134
	28.437	13.752	-0.933	-14.685	14.685	-1.400	45.585	22.093
	28.607	13.804	-0.999	-14.803	14.803	-1.499	45.906	22.204
	28.670	13.802	-1.067	-14.868	14.868	-1.600	46.026	22.213
	28.734	13.800	-1.133	-14.933	14.933	-1.700	46.146	22.223
	28.797	13.798	-1.200	-14.998	14.998	-1.800	46.266	22.233
	28.808	13.771	-1.266	-15.037	15.037	-1.899	46.287	22.194
	28.923	13.795	-1.333	-15.128	15.128	-2.000	46.506	22.253
	28.829	13.715	-1.399	-15.114	15.114	-2.099	46.327	22.114
	28.996	13.765	-1.466	-15.231	15.231	-2.200	46.646	22.223
	29.007	13.737	-1.532	-15.270	15.270	-2.299	46.667	22.184
	29.069	13.735	-1.600	-15.335	15.335	-2.400	46.786	22.193
	29.028	13.681	-1.666	-15.347	15.347	-2.499	46.707	22.104
	29.142	13.705	-1.733	-15.438	15.438	-2.600	46.926	22.163
	29.309	13.755	-1.799	-15.554	15.554	-2.699	47.247	22.274
	29.475	13.804	-1.866	-15.670	15.670	-2.800	47.566	22.383
	29.330	13.699	-1.932	-15.631	15.631	-2.899	47.287	22.194
	29.392	13.696	-1.999	-15.696	15.696	-3.000	47.406	22.203
	29.558	13.746	-2.065	-15.812	15.812	-3.099	47.727	22.314
	29.670	13.769	-2.133	-15.902	15.902	-3.200	47.946	22.373
	29.630	13.716	-2.199	-15.914	15.914	-3.299	47.867	22.284
	29.640	13.687	-2.266	-15.953	15.953	-3.400	47.886	22.243
	29.752	13.710	-2.333	-16.043	16.043	-3.500	48.106	22.303
	29.916	13.759	-2.399	-16.158	16.158	-3.600	48.426	22.413
	29.825	13.680	-2.465	-16.145	16.145	-3.699	48.247	22.274

	29.988	13.728	-2.532	-16.260	16.260	-3.800	48.566	22.383
	30.151	13.776	-2.598	-16.374	16.374	-3.899	48.887	22.494
	30.160	13.747	-2.665	-16.413	16.413	-4.000	48.906	22.453
	30.170	13.719	-2.732	-16.451	16.451	-4.100	48.926	22.413
	30.332	13.767	-2.799	-16.565	16.565	-4.200	49.246	22.523
	30.394	13.765	-2.865	-16.629	16.629	-4.299	49.368	22.535
	30.302	13.685	-2.932	-16.617	16.617	-4.400	49.187	22.394
	30.363	13.683	-2.998	-16.681	16.681	-4.499	49.308	22.405
	30.474	13.704	-3.065	-16.769	16.769	-4.600	49.527	22.464
	30.634	13.752	-3.131	-16.883	16.883	-4.699	49.848	22.575
	30.694	13.748	-3.198	-16.946	16.946	-4.800	49.967	22.584
	30.654	13.695	-3.264	-16.959	16.959	-4.899	49.888	22.495
	30.814	13.741	-3.331	-17.072	17.072	-5.000	50.208	22.604
	30.874	13.738	-3.397	-17.135	17.135	-5.099	50.329	22.615
	30.834	13.685	-3.464	-17.149	17.149	-5.200	50.248	22.524
	30.894	13.682	-3.530	-17.212	17.212	-5.299	50.369	22.535
	31.051	13.727	-3.597	-17.324	17.324	-5.400	50.688	22.644
	31.160	13.749	-3.663	-17.411	17.411	-5.499	50.909	22.705
[0111]	31.169	13.720	-3.730	-17.450	17.450	-5.600	50.928	22.664
	31.180	13.692	-3.796	-17.488	17.488	-5.699	50.949	22.625
	31.336	13.736	-3.863	-17.599	17.599	-5.800	51.268	22.734
	31.443	13.757	-3.929	-17.686	17.686	-5.899	51.488	22.795
	31.549	13.777	-3.996	-17.772	17.772	-6.000	51.706	22.853
	31.704	13.821	-4.062	-17.883	17.883	-6.099	52.027	22.964
	31.713	13.792	-4.129	-17.921	17.921	-6.200	52.046	22.923
	31.723	13.764	-4.195	-17.959	17.959	-6.299	52.067	22.884
	31.636	13.687	-4.262	-17.949	17.949	-6.400	51.886	22.743
	31.695	13.684	-4.327	-18.011	18.011	-6.499	52.007	22.754
	31.848	13.727	-4.395	-18.121	18.121	-6.600	52.326	22.863
	31.858	13.699	-4.460	-18.159	18.159	-6.699	52.347	22.824
	31.963	13.718	-4.527	-18.245	18.245	-6.800	52.566	22.883
	32.116	13.762	-4.593	-18.355	18.355	-6.899	52.888	22.995
	32.267	13.804	-4.660	-18.464	18.464	-7.000	53.207	23.104

	平均值=	13.759					平均值=	22.234
	标准偏							
	差=	0.047						

[0112] 入射光及其反射光被反射轴等分,使得入射光相对于反射轴的内入射角的量值与反射光相对于反射轴的内反射角的量值相同。因此可以说,入射光及其反射光关于反射轴表现出左右对称。

[0113] 如图11B所示,第一实施方案的光栅结构1105被进一步配置为关于第二反射轴1139反射第二入射光1130A,1130B。第二入射光具有513nm的第二波长并且在特定位置1117入射到光栅介质1110上。特定位置1117包括光栅介质表面1112的第一入射光和第二入射光均照射在其上的区域。第二反射轴1139与光栅介质的表面法线1122相对于表面法线相差第二反射轴角度1136+13.693度(内部),其中第二入射光相对于表面法线具有-4.660度到+1.933度的第二内入射角。第二内入射角包括从-4.660度到+1.933度以约0.067度的角度间隔隔开的一百(100)个不同内角。在第一实施方案斜交镜的一些变型中,第二入射光的第二内入射角包括从-4.660度到+1.933度以约0.67度的角度间隔隔开的十(10)个不同内角。

[0114] 如图11B所示,具有相对于表面法线的-4.660度的第二内入射角 1128A的第二入射光1130A被光栅结构1105反射为具有相对于表面法线 +32.075度的第二内反射角1129A的第二反射光1133A。具有相对于表面法线+1.933度的第二内入射角1128B的第二入射光1130B被反射为具有 +25.273度的第二内反射角1129B的第二反射光1133B。第二反射光1133A, 1133B具有第二波长,即在第一实施方案中,第二反射光具有513nm的波长。表2中示出了第一实施方案斜交镜的第二入射光角度、第二反射光角度和第二反射轴角度。

[0115] 表2第一实施方案斜交镜的第二反射光、第二反射光和第二反射轴的角度;波长=513nm;AK174-200记录介质;N=100

第二内 反射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第二反 射轴角 度(内 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二内 入射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第二入 射光的 入射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第二反 射光的 反射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第二入 射光的 入射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二反 射光的 反射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二反 射轴角 度(外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)
25.273	13.603	1.933	-11.670	11.670	2.900	39.821	21.361
25.341	13.604	1.866	-11.737	11.737	2.800	39.942	21.371
25.466	13.633	1.800	-11.833	11.833	2.701	40.163	21.432
25.645	13.689	1.733	-11.956	11.956	2.600	40.481	21.541
25.769	13.718	1.667	-12.051	12.051	2.501	40.702	21.602
25.780	13.690	1.600	-12.090	12.090	2.400	40.721	21.561
25.959	13.746	1.533	-12.213	12.213	2.300	41.041	21.671
25.915	13.691	1.466	-12.224	12.224	2.200	40.961	21.581
25.982	13.691	1.400	-12.291	12.291	2.100	41.081	21.591
26.160	13.746	1.333	-12.413	12.413	2.000	41.400	21.700

	26.171	13.719	1.267	-12.452	12.452	1.900	41.420	21.660
	26.181	13.691	1.200	-12.491	12.491	1.800	41.439	21.620
	26.249	13.691	1.134	-12.557	12.557	1.701	41.560	21.631
	26.259	13.663	1.067	-12.596	12.596	1.600	41.579	21.590
	26.438	13.719	1.001	-12.718	12.718	1.501	41.900	21.701
	26.448	13.691	0.933	-12.757	12.757	1.400	41.919	21.660
	26.515	13.691	0.867	-12.824	12.824	1.301	42.040	21.671
	26.636	13.718	0.800	-12.918	12.918	1.200	42.259	21.730
	26.592	13.663	0.734	-12.929	12.929	1.101	42.180	21.641
	26.769	13.718	0.667	-13.051	13.051	1.000	42.500	21.750
	26.780	13.690	0.601	-13.090	13.090	0.901	42.520	21.711
	26.845	13.689	0.533	-13.156	13.156	0.800	42.639	21.720
	26.912	13.690	0.467	-13.222	13.222	0.701	42.760	21.731
	26.977	13.689	0.400	-13.289	13.289	0.600	42.879	21.740
	26.989	13.661	0.334	-13.327	13.327	0.501	42.900	21.701
	27.108	13.687	0.266	-13.421	13.421	0.399	43.118	21.759
	27.229	13.715	0.201	-13.514	13.514	0.301	43.340	21.821
	27.240	13.686	0.133	-13.553	13.553	0.200	43.359	21.780
	27.360	13.714	0.067	-13.646	13.646	0.101	43.580	21.841
	27.425	13.713	0.000	-13.713	13.713	0.000	43.700	21.850
	27.490	13.712	-0.066	-13.778	13.778	-0.099	43.820	21.861
	27.555	13.711	-0.133	-13.844	13.844	-0.200	43.939	21.870
	27.565	13.683	-0.200	-13.883	13.883	-0.300	43.959	21.830
	27.630	13.682	-0.267	-13.949	13.949	-0.400	44.079	21.840
[0117]	27.750	13.709	-0.333	-14.041	14.041	-0.499	44.300	21.901
	27.760	13.680	-0.400	-14.080	14.080	-0.600	44.319	21.860
	27.825	13.680	-0.466	-14.146	14.146	-0.699	44.440	21.871
	27.889	13.678	-0.533	-14.211	14.211	-0.800	44.559	21.880
	28.007	13.703	-0.600	-14.303	14.303	-0.900	44.778	21.939
	28.017	13.675	-0.667	-14.342	14.342	-1.000	44.798	21.899
	28.135	13.701	-0.733	-14.434	14.434	-1.100	45.018	21.959
	28.253	13.726	-0.800	-14.526	14.526	-1.200	45.238	22.019
	28.264	13.699	-0.866	-14.565	14.565	-1.299	45.259	21.980
	28.274	13.670	-0.933	-14.604	14.604	-1.400	45.278	21.939
	28.338	13.669	-0.999	-14.669	14.669	-1.499	45.399	21.950
	28.455	13.694	-1.067	-14.761	14.761	-1.600	45.619	22.010
	28.572	13.719	-1.133	-14.852	14.852	-1.700	45.839	22.070
	28.635	13.718	-1.200	-14.917	14.917	-1.800	45.959	22.080
	28.646	13.690	-1.267	-14.956	14.956	-1.900	45.979	22.040
	28.709	13.688	-1.333	-15.021	15.021	-2.000	46.099	22.050
	28.720	13.660	-1.399	-15.060	15.060	-2.099	46.120	22.011
	28.835	13.684	-1.466	-15.151	15.151	-2.200	46.339	22.070
	28.899	13.683	-1.532	-15.216	15.216	-2.299	46.460	22.081
	29.013	13.707	-1.600	-15.307	15.307	-2.400	46.679	22.140
	29.024	13.679	-1.666	-15.345	15.345	-2.499	46.700	22.101
	29.087	13.677	-1.733	-15.410	15.410	-2.600	46.819	22.110
	29.150	13.675	-1.799	-15.474	15.474	-2.699	46.940	22.121
	29.264	13.699	-1.866	-15.565	15.565	-2.800	47.159	22.180
	29.326	13.697	-1.932	-15.629	15.629	-2.899	47.280	22.191

	29.388	13.694	-1.999	-15.694	15.694	-3.000	47.399	22.200
	29.502	13.718	-2.065	-15.784	15.784	-3.099	47.620	22.261
	29.667	13.767	-2.133	-15.900	15.900	-3.200	47.939	22.370
	29.678	13.739	-2.199	-15.938	15.938	-3.299	47.960	22.331
	29.790	13.762	-2.266	-16.028	16.028	-3.400	48.180	22.390
	29.647	13.657	-2.333	-15.990	15.990	-3.500	47.900	22.200
	29.760	13.680	-2.399	-16.079	16.079	-3.600	48.120	22.260
	29.822	13.678	-2.465	-16.143	16.143	-3.699	48.241	22.271
	29.882	13.675	-2.532	-16.207	16.207	-3.800	48.360	22.280
	29.944	13.672	-2.599	-16.271	16.271	-3.900	48.480	22.290
	30.056	13.695	-2.665	-16.361	16.361	-4.000	48.700	22.350
	30.066	13.667	-2.732	-16.399	16.399	-4.100	48.721	22.311
	30.229	13.715	-2.799	-16.514	16.514	-4.200	49.041	22.421
	30.290	13.713	-2.865	-16.577	16.577	-4.299	49.162	22.432
	30.349	13.709	-2.932	-16.641	16.641	-4.400	49.280	22.440
	30.360	13.681	-2.998	-16.679	16.679	-4.499	49.301	22.401
	30.420	13.677	-3.065	-16.742	16.742	-4.600	49.420	22.410
	30.531	13.700	-3.131	-16.831	16.831	-4.699	49.641	22.471
	30.590	13.696	-3.198	-16.894	16.894	-4.800	49.760	22.480
	30.651	13.694	-3.264	-16.957	16.957	-4.899	49.881	22.491
	30.710	13.690	-3.331	-17.021	17.021	-5.000	50.000	22.500
	30.820	13.712	-3.397	-17.109	17.109	-5.099	50.221	22.561
[0118]	30.830	13.683	-3.464	-17.147	17.147	-5.200	50.240	22.520
	30.939	13.705	-3.530	-17.235	17.235	-5.299	50.461	22.581
	30.949	13.676	-3.597	-17.273	17.273	-5.400	50.480	22.540
	31.009	13.673	-3.663	-17.336	17.336	-5.499	50.602	22.552
	31.068	13.669	-3.730	-17.399	17.399	-5.600	50.721	22.561
	31.225	13.714	-3.797	-17.511	17.511	-5.700	51.041	22.671
	31.284	13.710	-3.863	-17.573	17.573	-5.800	51.161	22.681
	31.293	13.682	-3.929	-17.611	17.611	-5.900	51.181	22.641
	31.352	13.678	-3.996	-17.674	17.674	-6.000	51.302	22.651
	31.460	13.699	-4.062	-17.761	17.761	-6.099	51.522	22.712
	31.517	13.694	-4.129	-17.823	17.823	-6.200	51.641	22.721
	31.528	13.667	-4.195	-17.861	17.861	-6.299	51.662	22.682
	31.682	13.710	-4.262	-17.972	17.972	-6.400	51.981	22.791
	31.692	13.682	-4.327	-18.010	18.010	-6.499	52.002	22.752
	31.798	13.701	-4.395	-18.096	18.096	-6.600	52.221	22.811
	31.904	13.722	-4.460	-18.182	18.182	-6.699	52.442	22.872
	31.913	13.693	-4.527	-18.220	18.220	-6.800	52.461	22.831
	31.970	13.689	-4.593	-18.282	18.282	-6.899	52.582	22.842
	32.075	13.707	-4.660	-18.368	18.368	-7.000	52.801	22.901
	平均值=	13.693					平均值=	22.110
	标准偏	0.025						
	差=							

[0119] 该第一波长 ($\lambda_1=532\text{nm}$) 与第二波长 ($\lambda_2=513\text{nm}$) 相差19nm,其可通过被称为波分率(WF)的值来表示,定义为 $WF=|\lambda_1-\lambda_2|/[(\lambda_1+\lambda_2)/2]$ 。因此,在多个波长包括532nm的第一波长和513nm的第二波长的情况下, $WF=0.036$ 。类似地,在多个波长由从390nm或更小到至少700nm的连续光谱组成的情况下, $WF\geq 0.57$ 。实施方案包括但不限于以下变型:其中 $WF\geq 0.005$; $WF\geq 0.010$; $WF\geq 0.030$; $WF\geq 0.10$; $WF\geq 0.250$; $WF\geq 1.0$; 或 $WF\geq 2.0$ 。由范围内的第一波长 (λ_1) 和第二波长 (λ_2) 所限定的波分率(WF)可能但不一定包括 λ_1 和 λ_2 之间的波长的连续光谱。

[0120] 第二反射轴角度1136与第一反射轴角度1135相差0.066度。因此,第二反射轴基本上与第一反射轴重合,这意味着第二反射轴角度1136与第一反射轴角度1135相差1.0度或更小。在整个波长范围内(在这种情况下,在0.039的WF内)反射轴角度之间的此类小差异意味着光栅结构可用作非散射镜。对于某些应用,对于WF=0.030,反射轴角度之间的差值应为0.250度或更小。同样,对于其他一些应用,对于WF=0.030,反射轴角度之间的差异应等于0.10度或更小。

[0121] 相对于第一反射轴,第一入射光的内入射角在-11.867度至-18.464度范围内。相对于第二反射轴,第二入射光的内入射角在-11.670度至-18.368度范围内。因此可以说,第一入射光和第二入射光中的每一者从第一反射轴偏移至少11.670度。在实施方案中,入射光可从其反射轴偏移至少1.0度、至少2.0度、至少5.0度、或至少9.0度的内角。在一些应用中,被配置为反射从入射光的反射轴偏移的入射光的斜交镜或其他反射设备可能是有利的。例如,在头戴式显示器中,向用户的眼睛反射图像而不是将图像向回反射回其来源可能是有利的。此类朝向用户眼睛的反射通常要求入射光从其反射轴偏移至少5.0度并且更典型地至少9.0度的内角。类似地,利用全内反射的设备通常要求入射光从其反射轴偏移。

[0122] 图11A和图11B中还示出了对于入射光及其反射光相对于表面法线的第一实施方案的外角。如图11A所示,第一入射光1124A,1124B相对于表面法线的外角在从第一入射光外角1113A的-7.000度到第一入射光外角1113B的+2.900度范围内。如图11B所示,第二入射光1130A,1130B相对于表面法线的外角在从第二入射光外角1115A的-7.000度到第二入射光外角1115B的+2.900度范围内。在图11A和图11B中还分别示出了第一反射光外角1114A,1114B和第二反射光外角1116A,1116B。使用位于空气中的斜交镜测量外角,其中在斜交镜/空气边界处发生折射。表1和表2列出了入射角和反射角以及反射轴角。

[0123] 第一实施方案的物理特性使其能够反射具有其他波长的光,并且关于基本恒定的反射轴反射以其他角度入射到光栅介质上的光。例如,第一实施方案光栅结构的反射特性使其能够关于具有+13.726度的平均反射轴角度的反射轴反射波长为520.4nm的光,其中对于从-6.862度到+13.726度和所有其间的角度的范围(20.588度的范围)内的入射角而言反射轴角度变化0.10度或更小。在其反射特性的另一个示例中,第一实施方案被配置为关于反射轴(具有+13.726°的平均反射轴角度)反射入射光,其中对于503nm和537nm的波长(34nm的范围,WF=0.065,包括503nm和537nm之间的波长的连续光谱),反射轴角度变化0.20度或更小,其中入射角(内部,相对于表面法线)为-1.174度。

[0124] 为了清楚起见,图11A和图11B中的光被示出为在靠近光栅结构1105的中心的位位置被反射。然而,本领域技术人员认识到,光通常在整个光栅结构上而不是在特定位置被反射。

[0125] 在一些实施方案中,第一入射光和第二入射光分别具有532和513以外的波长。类似地,实施方案包括可与表面法线重合、或者可与表面法线相差的第一反射轴和第二反射轴。

[0126] 第二实施方案斜交镜

[0127] 第二实施方案斜交镜的发明方面包括被配置为关于反射轴反射波长为532nm的入射光和波长为513nm的入射光的反射镜,该两种入射光共同具有相对于表面法线的+14.62度的平均反射轴角度。在另一发明方面,对于以-9.281度到-2.665度范围内的内入射

角入射到斜交镜上的532nm光的平均反射轴角度(+14.618度)与以与532nm入射光相同的入射角入射到斜交镜上的513nm光的平均反射轴角度(+14.617度)相差小于0.001度。因此对于532nm至513nm的波长范围,反射轴基本上是恒定的,该是对于-9.281 度到-2.665度的内入射角(相对于表面法线)获得的条件。

[0128] 图12A和图12B示出了第二实施方案的斜交镜1200。第二实施方案的斜交镜1200包括位于光栅介质1210中的光栅结构1205(由图12A和图 12B中的斜阴影线示出)。为了清楚起见,斜线影线在光栅介质1210内靠近指示光、轴和角度的图形元素的区域中被省略。然而,本领域技术人员将认识到,光栅结构1205通常占据上述区域。第二实施方案的光栅结构1205包括在光栅介质1210中彼此至少部分重叠的多个全息图。第二实施方案的多个全息图包括用405nm波长的记录光束记录的四十九(49)个体积全息图。该49个体积全息图在光栅介质1210中彼此重叠并且以类似于第一实施方案的斜交镜的方式记录,不同之处在于记录光束的内入射角被调整以解释介质收缩。下文在制造斜交镜的第二种方法中描述了记录第二实施方案斜交镜的49个全息图。

[0129] 第二实施方案光栅介质1210是可从Akonia Holographics,LLC (Longmont,CO)商购获得的称为AK233-200的专有光敏聚合物光学记录介质。第二实施方案的AK233-200记录介质的厚度为约200 μm ,M/#为约 24,并且对于波长为405nm的光折射率为约1.50。作为记录体积全息图的结果,AK233-200介质通常缩小约0.50%。

[0130] 第二实施方案斜交镜1200的变型可包括附加层,诸如玻璃盖或玻璃衬底(图12A和图12B中未示出)。该附加层的折射率通常与光栅介质匹配,并且折射率匹配流体薄膜可位于光栅介质1210和附加层之间。

[0131] 如图12A所示,第二实施方案的光栅结构1205具有被配置为关于第一反射轴1238(以虚线示出)反射第一入射光1224A,1224B的物理特性。第一入射光具有532nm的第一波长并且在特定位置1217入射到光栅介质 1210上。第一反射轴1238与光栅介质的表面法线1222相对于表面法线相差+14.618度(内角)的第一反射轴角度1235,其中第一入射光具有相对于表面法线位于-9.281度至-2.665度之间(包含性)(6.616度的范围)的第一内入射角1225A,1225B。第一内入射角包括从-9.281度到-2.665度以约 0.066度的角度间隔隔开的一百(101)个不同内角。在第二实施方案斜交镜的一些变型中,第一入射光的第一内入射角包括从-9.281度到-2.665度以约 0.66度的角度间隔隔开的十(10)个不同内角。

[0132] 如图12A所示,具有相对于表面法线-9.281度的第一内入射角1225A 的第一入射光1224A被光栅结构1205反射为具有相对于表面法线+38.610 度的第一内反射角1226A的第一反射光1227A。具有相对于表面法线-2.665 度的第一内入射角1225B的第一入射光1224B被反射为具有+31.836度的第一内部反射角1226B的第一反射光1227B。第一反射光1224A,1224B具有第一波长,即在第二实施方案中,第一反射光具有532nm的波长。表3中示出了第二实施方案斜交镜的第一入射光角度、第一反射光角度和第一反射轴角度。

[0133] 表3第二实施方案斜交镜的第一入射光、第一反射光 and 第一反射轴的角度;波长=532nm;AK233-200记录介质;N=101

[0134]

第一内 反射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第一反 射轴角 度(内 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一内 入射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第一入 射光的 入射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第一反 射光的 反射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第一入 射光的 入射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一反 射光的 反射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第一反 射轴角 度(外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)
31.836	14.585	-2.665	-17.250	17.250	-4.000	52.300	24.150
31.941	14.604	-2.732	-17.336	17.336	-4.100	52.520	24.210
31.998	14.600	-2.799	-17.398	17.398	-4.200	52.640	24.220
32.103	14.619	-2.865	-17.484	17.484	-4.299	52.861	24.281
32.160	14.614	-2.932	-17.546	17.546	-4.400	52.980	24.290
32.217	14.610	-2.998	-17.607	17.607	-4.499	53.101	24.301
32.321	14.628	-3.065	-17.693	17.693	-4.600	53.320	24.360
32.378	14.623	-3.131	-17.754	17.754	-4.699	53.441	24.371
32.433	14.618	-3.198	-17.816	17.816	-4.800	53.560	24.380
32.490	14.613	-3.264	-17.877	17.877	-4.899	53.681	24.391
32.546	14.607	-3.331	-17.938	17.938	-5.000	53.800	24.400
32.602	14.603	-3.397	-18.000	18.000	-5.099	53.921	24.411
32.704	14.620	-3.464	-18.084	18.084	-5.200	54.140	24.470
32.760	14.615	-3.530	-18.145	18.145	-5.299	54.261	24.481
32.815	14.609	-3.597	-18.206	18.206	-5.400	54.380	24.490
32.871	14.604	-3.664	-18.267	18.267	-5.500	54.500	24.500
32.926	14.598	-3.730	-18.328	18.328	-5.600	54.620	24.510
33.027	14.616	-3.796	-18.412	18.412	-5.699	54.841	24.571
33.082	14.609	-3.863	-18.472	18.472	-5.800	54.960	24.580
33.137	14.604	-3.929	-18.533	18.533	-5.899	55.081	24.591
33.191	14.598	-3.996	-18.594	18.594	-6.000	55.200	24.600
33.291	14.615	-4.062	-18.677	18.677	-6.099	55.421	24.661
33.345	14.608	-4.129	-18.737	18.737	-6.200	55.540	24.670
33.400	14.603	-4.195	-18.797	18.797	-6.299	55.661	24.681
33.498	14.618	-4.262	-18.880	18.880	-6.400	55.880	24.740
33.552	14.612	-4.327	-18.940	18.940	-6.499	56.001	24.751
33.605	14.605	-4.395	-19.000	19.000	-6.600	56.120	24.760
33.659	14.600	-4.460	-19.060	19.060	-6.699	56.241	24.771
33.757	14.615	-4.527	-19.142	19.142	-6.800	56.460	24.830

	33.810	14.608	-4.593	-19.201	19.201	-6.899	56.580	24.841
	33.862	14.601	-4.660	-19.261	19.261	-7.000	56.699	24.850
	33.916	14.595	-4.726	-19.321	19.321	-7.099	56.820	24.861
	34.012	14.609	-4.793	-19.402	19.402	-7.200	57.039	24.920
	34.064	14.603	-4.859	-19.462	19.462	-7.299	57.160	24.931
	34.116	14.595	-4.926	-19.521	19.521	-7.400	57.279	24.940
	34.169	14.588	-4.992	-19.580	19.580	-7.500	57.399	24.950
	34.264	14.603	-5.058	-19.661	19.661	-7.600	57.619	25.010
	34.316	14.596	-5.124	-19.720	19.720	-7.699	57.740	25.021
	34.368	14.588	-5.191	-19.779	19.779	-7.800	57.860	25.030
	34.462	14.602	-5.257	-19.860	19.860	-7.900	58.080	25.090
	34.513	14.595	-5.324	-19.918	19.918	-8.000	58.199	25.100
	34.606	14.608	-5.390	-19.998	19.998	-8.100	58.419	25.160
	34.699	14.622	-5.456	-20.078	20.078	-8.200	58.639	25.220
	34.750	14.614	-5.522	-20.136	20.136	-8.299	58.760	25.231
	34.842	14.626	-5.589	-20.216	20.216	-8.401	58.978	25.289
	34.893	14.619	-5.655	-20.274	20.274	-8.500	59.100	25.300
	34.943	14.611	-5.721	-20.332	20.332	-8.600	59.220	25.310
	35.035	14.624	-5.787	-20.411	20.411	-8.699	59.441	25.371
	35.084	14.615	-5.854	-20.469	20.469	-8.800	59.560	25.380
	35.134	14.607	-5.919	-20.527	20.527	-8.899	59.681	25.391
	35.224	14.619	-5.986	-20.605	20.605	-9.000	59.900	25.450
	35.273	14.611	-6.052	-20.662	20.662	-9.099	60.021	25.461
	35.321	14.601	-6.119	-20.720	20.720	-9.200	60.140	25.470
[0135]	35.411	14.613	-6.184	-20.798	20.798	-9.299	60.361	25.531
	35.459	14.604	-6.251	-20.855	20.855	-9.400	60.479	25.540
	35.548	14.616	-6.316	-20.932	20.932	-9.499	60.700	25.601
	35.595	14.606	-6.383	-20.989	20.989	-9.600	60.819	25.610
	35.683	14.617	-6.449	-21.066	21.066	-9.699	61.040	25.671
	35.731	14.608	-6.516	-21.123	21.123	-9.800	61.159	25.680
	35.817	14.618	-6.582	-21.200	21.200	-9.900	61.379	25.740
	35.865	14.608	-6.648	-21.256	21.256	-10.000	61.499	25.750
	35.951	14.618	-6.714	-21.332	21.332	-10.100	61.719	25.810
	35.997	14.609	-6.780	-21.389	21.389	-10.200	61.839	25.820
	36.083	14.619	-6.845	-21.464	21.464	-10.299	62.060	25.881
	36.168	14.628	-6.912	-21.540	21.540	-10.400	62.279	25.940
	36.214	14.618	-6.977	-21.596	21.596	-10.499	62.400	25.951
	36.298	14.627	-7.044	-21.671	21.671	-10.600	62.619	26.010
	36.343	14.617	-7.110	-21.726	21.726	-10.699	62.739	26.020
	36.426	14.625	-7.176	-21.801	21.801	-10.800	62.958	26.079
	36.471	14.615	-7.242	-21.856	21.856	-10.899	63.079	26.090
	36.553	14.623	-7.308	-21.931	21.931	-11.000	63.298	26.149
	36.635	14.631	-7.373	-22.004	22.004	-11.099	63.519	26.210
	36.679	14.620	-7.440	-22.060	22.060	-11.200	63.638	26.219
	36.761	14.628	-7.505	-22.133	22.133	-11.299	63.859	26.280
	36.804	14.616	-7.572	-22.188	22.188	-11.400	63.978	26.289
	36.885	14.624	-7.637	-22.261	22.261	-11.499	64.199	26.350
	36.964	14.630	-7.704	-22.334	22.334	-11.600	64.418	26.409
	37.007	14.619	-7.769	-22.388	22.388	-11.699	64.539	26.420

	37.086	14.625	-7.836	-22.461	22.461	-11.800	64.758	26.479
	37.164	14.631	-7.901	-22.533	22.533	-11.900	64.978	26.539
	37.241	14.637	-7.967	-22.604	22.604	-12.000	65.198	26.599
	37.284	14.625	-8.033	-22.658	22.658	-12.100	65.318	26.609
	37.360	14.630	-8.099	-22.729	22.729	-12.200	65.537	26.669
	37.436	14.636	-8.165	-22.800	22.800	-12.300	65.757	26.729
	37.512	14.640	-8.231	-22.871	22.871	-12.400	65.977	26.789
	37.553	14.629	-8.296	-22.924	22.924	-12.499	66.098	26.800
	37.627	14.633	-8.362	-22.995	22.995	-12.600	66.317	26.859
	37.702	14.637	-8.427	-23.064	23.064	-12.699	66.538	26.920
	37.774	14.640	-8.494	-23.134	23.134	-12.800	66.756	26.978
	37.848	14.645	-8.559	-23.203	23.203	-12.899	66.978	27.040
	37.920	14.648	-8.625	-23.273	23.273	-13.000	67.197	27.099
[0136]	37.960	14.635	-8.690	-23.325	23.325	-13.099	67.318	27.110
	38.031	14.637	-8.756	-23.394	23.394	-13.200	67.537	27.169
	38.102	14.640	-8.822	-23.462	23.462	-13.300	67.757	27.229
	38.172	14.642	-8.888	-23.530	23.530	-13.400	67.977	27.289
	38.242	14.644	-8.953	-23.597	23.597	-13.499	68.197	27.349
	38.310	14.645	-9.019	-23.664	23.664	-13.600	68.415	27.408
	38.379	14.647	-9.084	-23.731	23.731	-13.699	68.636	27.469
	38.446	14.648	-9.150	-23.798	23.798	-13.800	68.855	27.528
	38.514	14.649	-9.215	-23.864	23.864	-13.899	69.076	27.589
	38.610	14.664	-9.281	-23.946	23.946	-14.000	69.395	27.698

	平均值=	14.618					平均值=	25.594
	标准偏							
	差=	0.016						

[0137] 如图12B所示,第二实施方案的光栅结构1205被进一步配置为关于第二反射轴1239反射第二入射光1230A,1230B。第二入射光具有513nm的第二波长,因此第二波长与第一波长相差19nm,或相差0.036的波分率(WF)。第二入射光在特定位置1217入射到光栅介质1210上。第二实施方案的特定位置1217包括光栅介质表面1212的第一入射光和第二入射光两者均照射到其上的区域。第二反射轴1239与光栅介质的表面法线1222相对于表面法线相差+14.617度(内角)的第二反射轴角1236,其中第二入射光具有相对于表面法线的跨越-9.281度到-2.665度范围的第二内入射角1228A,1228B。第二入射光的第二内入射角包括从-9.281度到-2.665度以约0.066度的角度间隔隔开的一百(101)个不同内角。在第二实施方案的斜交镜的一些变型中,第二入射光的第二内入射角包括从-9.281度到-2.665度以约0.66度的角度间隔隔开的十(10)个不同内角。

[0138] 如图12B所示,具有相对于表面法线-9.281度的第二内入射角1228A的第二入射光1230A被光栅结构1205反射为具有1229A相对于表面法线38.598度的第二内反射角的第二反射光1233A。具有相对于表面法线-2.655度的第二内入射角1228B的第二入射光1230B被反射为具有+31.836度的第二内部反射角1229B的第二反射光1233B。第二反射光1233A,1233B具有第二波长,即在第二实施方案中第二反射光具有513nm的波长。表4中示出了第二实施方案斜交镜1200的第二入射光角度、第二反射光角度和第二反射轴角度。

[0139] 表4第二实施方案斜交镜的第二入射光、第二反射光和第二反射轴的角度;波长=513nm;AK233-200记录介质;N=101

	第二内 反射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第二反 射轴角 度(内 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二内 入射角 (相对 于表面 法线, 以度为 单位)	第二入 射光的 入射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第二反 射光的 反射角 (外 部,相 对于反 射轴, 以度为 单位)	第二入 射光的 入射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二反 射光的 反射角 (外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)	第二反 射轴角 度(外 部,相 对于表 面法 线,以 度为单 位)
[0140]	31.836	14.585	-2.665	-17.250	17.250	-4.000	52.300	24.150
	31.941	14.604	-2.732	-17.336	17.336	-4.100	52.520	24.210
	32.022	14.612	-2.799	-17.410	17.410	-4.200	52.690	24.245
	32.080	14.608	-2.865	-17.472	17.472	-4.299	52.811	24.256
	32.160	14.614	-2.932	-17.546	17.546	-4.400	52.980	24.290
	32.240	14.621	-2.998	-17.619	17.619	-4.499	53.150	24.326
	32.297	14.616	-3.065	-17.681	17.681	-4.600	53.270	24.335
	32.378	14.623	-3.131	-17.754	17.754	-4.699	53.441	24.371
	32.434	14.618	-3.198	-17.816	17.816	-4.800	53.561	24.381
	32.514	14.625	-3.264	-17.889	17.889	-4.899	53.732	24.417
	32.570	14.619	-3.331	-17.950	17.950	-5.000	53.851	24.426
	32.626	14.615	-3.397	-18.011	18.011	-5.099	53.972	24.437
	32.705	14.620	-3.464	-18.084	18.084	-5.200	54.141	24.471
	32.737	14.604	-3.530	-18.134	18.134	-5.299	54.212	24.457
	32.816	14.610	-3.597	-18.207	18.207	-5.400	54.382	24.491
	32.872	14.605	-3.663	-18.267	18.267	-5.500	54.503	24.502
	32.950	14.610	-3.730	-18.340	18.340	-5.600	54.672	24.536
	33.006	14.605	-3.796	-18.401	18.401	-5.699	54.794	24.548
	33.060	14.598	-3.863	-18.461	18.461	-5.800	54.912	24.556
	33.137	14.604	-3.929	-18.533	18.533	-5.899	55.082	24.592
	33.215	14.609	-3.996	-18.605	18.605	-6.000	55.252	24.626

	33.292	14.615	-4.062	-18.677	18.677	-6.099	55.423	24.662
	33.346	14.608	-4.129	-18.737	18.737	-6.200	55.541	24.671
	33.423	14.614	-4.195	-18.809	18.809	-6.299	55.713	24.707
	33.477	14.608	-4.262	-18.869	18.869	-6.400	55.833	24.717
	33.554	14.613	-4.327	-18.941	18.941	-6.499	56.004	24.753
	33.607	14.606	-4.395	-19.001	19.001	-6.600	56.123	24.762
	33.683	14.611	-4.460	-19.072	19.072	-6.699	56.294	24.798
	33.758	14.615	-4.527	-19.143	19.143	-6.800	56.463	24.832
	33.812	14.609	-4.593	-19.202	19.202	-6.899	56.584	24.843
	33.886	14.613	-4.660	-19.273	19.273	-7.000	56.752	24.876
	33.939	14.607	-4.726	-19.333	19.333	-7.099	56.874	24.888
	33.992	14.599	-4.793	-19.392	19.392	-7.200	56.994	24.897
	34.067	14.604	-4.859	-19.463	19.463	-7.299	57.165	24.933
	34.141	14.608	-4.926	-19.533	19.533	-7.400	57.335	24.968
	34.192	14.600	-4.992	-19.592	19.592	-7.500	57.454	24.977
	34.266	14.604	-5.058	-19.662	19.662	-7.600	57.624	25.012
	34.318	14.597	-5.124	-19.721	19.721	-7.699	57.745	25.023
	34.391	14.600	-5.191	-19.791	19.791	-7.800	57.915	25.058
	34.443	14.593	-5.257	-19.850	19.850	-7.900	58.036	25.068
	34.258	14.467	-5.324	-19.791	19.791	-8.000	57.606	24.803
	34.418	14.514	-5.390	-19.904	19.904	-8.100	57.977	24.939
	34.576	14.560	-5.456	-20.016	20.016	-8.200	58.348	25.074
	34.733	14.606	-5.522	-20.127	20.127	-8.299	58.719	25.210
	34.846	14.629	-5.589	-20.217	20.217	-8.401	58.988	25.294
[0141]	34.897	14.621	-5.654	-20.276	20.276	-8.500	59.109	25.305
	34.967	14.623	-5.721	-20.344	20.344	-8.600	59.279	25.340
	35.018	14.615	-5.787	-20.402	20.402	-8.699	59.400	25.351
	35.108	14.627	-5.854	-20.481	20.481	-8.800	59.618	25.409
	35.137	14.609	-5.919	-20.528	20.528	-8.899	59.690	25.396
	35.207	14.610	-5.986	-20.596	20.596	-9.000	59.859	25.430
	35.277	14.612	-6.052	-20.664	20.664	-9.099	60.030	25.466
	35.345	14.613	-6.119	-20.732	20.732	-9.200	60.198	25.499
	35.414	14.615	-6.184	-20.799	20.799	-9.299	60.368	25.535
	35.482	14.615	-6.251	-20.866	20.866	-9.400	60.536	25.568
	35.551	14.617	-6.316	-20.934	20.934	-9.499	60.708	25.605
	35.618	14.617	-6.383	-21.001	21.001	-9.600	60.876	25.638
	35.666	14.608	-6.449	-21.058	21.058	-9.699	60.996	25.649
	35.753	14.619	-6.516	-21.134	21.134	-9.800	61.216	25.708
	35.820	14.619	-6.582	-21.201	21.201	-9.900	61.385	25.743
	35.887	14.619	-6.648	-21.267	21.267	-10.000	61.555	25.778
	35.954	14.620	-6.713	-21.334	21.334	-10.100	61.727	25.814
	36.020	14.620	-6.780	-21.400	21.400	-10.200	61.897	25.849
	36.067	14.611	-6.845	-21.456	21.456	-10.299	62.017	25.859
	36.170	14.629	-6.912	-21.541	21.541	-10.400	62.286	25.943
	36.217	14.620	-6.977	-21.597	21.597	-10.499	62.407	25.954
	36.282	14.619	-7.044	-21.663	21.663	-10.600	62.577	25.989
	36.365	14.628	-7.110	-21.737	21.737	-10.699	62.798	26.050
	36.429	14.627	-7.176	-21.803	21.803	-10.800	62.967	26.084
	36.475	14.617	-7.242	-21.858	21.858	-10.899	63.089	26.095

	36.557	14.625	-7.308	-21.933	21.933	-11.000	63.309	26.155
	36.621	14.624	-7.373	-21.997	21.997	-11.099	63.480	26.191
	36.665	14.612	-7.440	-22.053	22.053	-11.200	63.599	26.200
	36.746	14.620	-7.505	-22.126	22.126	-11.299	63.819	26.260
	36.826	14.627	-7.572	-22.199	22.199	-11.400	64.037	26.319
	36.888	14.626	-7.637	-22.263	22.263	-11.499	64.209	26.355
	36.950	14.623	-7.704	-22.327	22.327	-11.600	64.379	26.390
	37.029	14.630	-7.769	-22.399	22.399	-11.699	64.600	26.451
	37.107	14.636	-7.836	-22.472	22.472	-11.800	64.819	26.510
	37.185	14.642	-7.901	-22.543	22.543	-11.900	65.039	26.570
	37.228	14.630	-7.967	-22.598	22.598	-12.000	65.159	26.580
	37.305	14.636	-8.033	-22.669	22.669	-12.100	65.380	26.640
	37.364	14.633	-8.099	-22.731	22.731	-12.200	65.549	26.675
	37.440	14.638	-8.165	-22.803	22.803	-12.300	65.770	26.735
	37.499	14.634	-8.231	-22.865	22.865	-12.400	65.940	26.770
	37.557	14.631	-8.296	-22.926	22.926	-12.499	66.111	26.806
	37.632	14.635	-8.362	-22.997	22.997	-12.600	66.330	26.865
[0142]	37.706	14.639	-8.427	-23.067	23.067	-12.699	66.551	26.926
	37.779	14.643	-8.494	-23.136	23.136	-12.800	66.770	26.985
	37.852	14.647	-8.559	-23.206	23.206	-12.899	66.991	27.046
	37.908	14.641	-8.625	-23.266	23.266	-13.000	67.159	27.080
	37.980	14.645	-8.690	-23.335	23.335	-13.099	67.380	27.141
	38.051	14.647	-8.756	-23.404	23.404	-13.200	67.599	27.200
	38.121	14.650	-8.822	-23.472	23.472	-13.300	67.819	27.260
	38.176	14.644	-8.888	-23.532	23.532	-13.400	67.989	27.295
	38.245	14.646	-8.953	-23.599	23.599	-13.499	68.208	27.355
	38.314	14.647	-9.019	-23.666	23.666	-13.600	68.427	27.414
	38.398	14.657	-9.084	-23.741	23.741	-13.699	68.697	27.499
	38.465	14.657	-9.150	-23.808	23.808	-13.800	68.916	27.558
	38.517	14.651	-9.215	-23.866	23.866	-13.899	69.087	27.594
	38.598	14.658	-9.281	-23.940	23.940	-14.000	69.355	27.678

	平均值=	14.617					平均值=	25.593
	标准偏							
	差=	0.025						

[0143] 为了清楚起见,图12A和图12B中的光被示出为在位于光栅结构1205 的中心附近的位置被反射。然而,本领域技术人员认识到,光通常在整個光栅结构上而不是在特定位置被反射。

[0144] 在第二实施方案中,在整个 $WF=0.036$ 上,第二反射轴角度与第一反射轴角度相差约 0.0005 度。这一非常低水平的变化可接近用于测量反射角的仪器的精度水平。因此,出于本发明的目的,可认为第二反射轴与第一反射轴没有偏差。对于某些应用,反射轴角度之间的差异应为 0.025 度或更小。对于其他一些应用,在 $WF \geq 0.036$ 范围内,反射轴角度之间的差异应为 0.010 度或更小。第二实施方案的斜交镜满足这些要求。学生t检验(双尾)指示第一反射轴角度和第二反射轴线角度之间没有差异(每组 $N=101$; $P=0.873$)。而且, 0.001 度或更小的差异对于测量斜交镜反射角的仪器的精度提出了挑战。因此,出于本发明的目的,在第二反射轴与第一反射轴相差 0.001 度或更小的情况下,可认为第二反射轴与第一反射轴没有偏差。

[0145] 对于第二实施方案的斜交镜,第一入射光的入射角相对于第一反射轴在 -17.250 度到 -23.946 度之间变化。第二入射光的入射角相对于第二反射轴在 -17.250 度到 -23.940

度之间变化。因此可以说,第一入射光和第二入射光中的每一者从第一反射轴偏移至少17.20度。对于第二实施方案的斜交镜,在表3和表4中分别列出了入射光的入射角和该入射光的反射相对于反射轴的反射角。

[0146] 图12A和图12B中还示出了第二实施方案相对于入射光及其反射的表面法线的外角。如图12A所示,第一入射光1224A、1224B相对于表面法线的外角范围从第一入射光外角1213A的-14.000度到第一入射光外角1213B的-4.000度。如图12A所示,第二入射光1230A、1230B相对于表面法线的外角范围从-14.000度的第二入射光外角1215A到-4.000度的第二入射光外角1215B。在图12A和12B中还分别示出了第一反射光外角1214A、1214B和第二反射光外角1216A、1216B。

[0147] 本领域的技术人员将认识到,入射光及其反射通常可以被颠倒,使得先前的反射角变为入射角,反之亦然。然而,为了本公开的目的,一定范围的入射角的叙述或描述指的是入射光朝向反射轴的一侧或另一侧,但不是两者,或者在逆向反射的入射光的情况下,相对于反射轴为零(0)的入射角。因此,一定范围的入射角不包括相对于反射轴正负的角度。如在此所示出和描述的,入射角相对于其各自的反射轴为负(即,沿顺时针方向)。然而,这一惯例是为了方便和简单而使用的,并不旨在教导、建议或暗示斜交镜只能反射驻留在反射轴一侧的入射光。

[0148] 第三实施方案的斜交镜

[0149] 第三实施方案的斜交镜包括位于光栅介质中的光栅结构,其中该光栅结构包括在光栅介质中彼此重叠的二十一(21)个体积全息图。

[0150] 第三实施方案的光栅介质是可从Covestro AG(前Bayer MaterialScience AG)(Leverkusen, Germany)商购获得的光敏聚合物光学记录介质,称为BAYFOL® HX TP光聚合物膜。第三实施方案的BAYFOL® HX TP记录介质为约70μm厚,并且通常由于记录体积全息图收缩约1.0%。因此,在第三实施方案的光栅介质中记录体积全息图时通常采用收缩补偿。下面在制造第三实施方案的斜交镜中描述收缩补偿。

[0151] 第三实施方案的斜交镜的变型可以包括附加层,诸如玻璃盖或玻璃基板。该附加层的折射率通常与光栅介质匹配,并且折射率匹配流体薄膜可位于第三实施方案的光栅介质和附加层之间。

[0152] 第三实施方案的光栅结构具有被配置为关于第一反射轴反射第一入射光的物理性质。第一入射光具有532nm的第一波长并且在特定位置入射到光栅介质上。第一反射轴与光栅介质的表面法线相对于表面法线相差第一反射轴角度+9.419度(内部),其中第一入射光具有相对于表面法线驻留在(含)-6.251度和+0.334度之间的内角(6.585度的范围)。第一入射光的内角包括跨越约6.59度范围的多个角度,所述多个角度包括从-6.251度到+0.334度以约0.067度的角度间隔隔开的一百(100)个不同内角。

[0153] 第三实施方案的第一入射光相对于表面法线具有-6.251度的内角,被光栅结构反射为具有相对于表面法线的+25.027度的内角的第一反射光。具有相对于表面法线的+0.334度的内角的第一入射光被反射为具有+18.487度的内角的第一反射光。第一反射光具有第一波长,即在第三实施方案中,第一反射光具有532nm的波长。

[0154] 第三实施方案的光栅结构被进一步配置为关于第二反射轴反射第二入射光。第二入射光具有513nm的第二波长,并且其第二波长与第一波长相差19nm,或波分率(WF)为

0.036。第二入射光入射到特定位置处的光栅介质上。第二反射轴与光栅介质的表面法线相对于表面法线相差第二反射轴角度+9.400度(内部),其中第二入射光相对于表面法线具有内角,其范围从-6.251度到+0.334度。第二入射光的内角包括从-6.251度到+0.334度以约0.067度的角度间隔隔开的一百(100)个不同内角。

[0155] 第三实施方案的第二入射光相对于表面法线具有-6.251度的内角,被光栅结构反射为具有相对于表面法线的+24.967度的内角的第二反射光。具有相对于表面法线的+0.334度的内角的第二入射光被反射为具有+18.425度的内角的第二反射光。第二反射光具有第一波长,即在第三实施方案中,第二反射光具有513nm的波长。第三实施方案的第二反射轴基本上与第一反射轴重合。

[0156] 表5总结了第一实施方案、第二实施方案和第三实施方案的斜交镜的反射特性。

[0157] 表5反射轴之间的差 $\lambda=532\text{nm}$ 和 $\lambda=513\text{nm}$ 处的角度

[0158]

	第一实施方案的斜交镜 (AK174-200 记录介质) N = 100 测量	第二实施方案的斜交镜 (AK233-200 记录介质) N = 101 测量	第三实施方案的斜交镜 (BAYFOL [®] HX 记录介质) N = 100 测量
$\lambda=532\text{nm}$ 处的平均反射轴内角*	13.693°	14.617°	9.400°
$\lambda=513\text{nm}$ 处的平均反射轴内角*	13.759°	14.618°	9.419°
$\lambda=532\text{nm}$ 和 $\lambda=513\text{nm}$ 处的反射轴内角之差**	0.066°	0.0005°	0.018°
入射光内角***	-4.660°至+1.933° (范围=6.593°)	-9.281°至-2.665° (范围=6.616°)	-6.251°至+0.334° (范围=6.585°)
$\lambda=532\text{nm}$ 处的平均反射轴外角*	22.234°	25.594°	14.720°
$\lambda=513\text{nm}$ 处的平均反射轴外角*	22.110°	25.593°	14.690°
$\lambda=532\text{nm}$ 和 $\lambda=513\text{nm}$ 处的反射轴外角之差**	0.124°	0.0005°	0.030°
入射光外角***	-7.000°至 2.900°	-14.000°至-4.000°	-9.400°至+0.501°

[0159] *平均角度是相对于表面法线的N个入射光入射角处的N个测量值的平均值;入射光和反射光都具有特定的波长(λ)。

[0160] ** $\lambda=532\text{nm}$ 和 $\lambda=513\text{nm}$ 处的平均反射轴角度之差为绝对值,因此不包括负数。

[0161] ***相对于表面法线的入射光入射角。

[0162] 反射轴保持恒定的入射角范围可以用 $\Delta\theta_B$ 表示,如下表6中所示,第一实施方案的斜交镜的反射轴角度对于入射角范围 $\geq 20 \times \Delta\theta_B$ 的入射光而言变化小于0.015度,在多个波长彼此相差 $WF \geq 0.036$ 。对于第二实施方案的斜交镜而言,对于入射角范围 $\geq 20 \times \Delta\theta_B$ 的入射光,反射轴角度变化小于 0.020度,在多个波长彼此相差 $WF \geq 0.036$ 。

[0163] 表6跨约 $20 \times \Delta\theta_B$ 的入射角范围反射轴角度的变化

[0164]	斜交镜的实施方案	λ^*	反射轴角度之间的差**	入射光角度范围***	$\Delta\theta_B^\dagger$
	第一实施方案的斜交镜 (AK174-200 记录介质)	532nm	0.012°	-3.198°至+0.400° (3.598°=20.3× $\Delta\theta_B$)	0.177°
		513nm	0.012°	-3.198°至+0.400° (3.598°=21.0× $\Delta\theta_B$)	0.171°
	第二实施方案的斜交镜 (AK233-200 记录介质)	532nm	0.019°	-7.242°至-4.726° (2.516°=20.0× $\Delta\theta_B$)	0.126°
		513nm	0.016°	-7.242°至-4.726° (2.516°=20.6× $\Delta\theta_B$)	0.122°

[0165] *入射光和反射光的波长。

[0166] **入射角变化为约 $20 \times \Delta\theta_B$ 的入射光的反射轴角度(内部,相对于表面法线)之间的差。

[0167] ***入射光入射角度的范围(内部,相对于表面法线)约等于 $20 \times \Delta\theta_B$,该表中公布了反射轴角度之间的差。

[0168] †计算该表中公布的入射光角度范围的中点处的入射光入射角的 $\Delta\theta_B$ 。

[0169] 制造斜交镜的方法

[0170] 图13中示出了用于制造斜交镜的示例性系统1350。示例性系统1350 包括设置在第一反射镜1352A和第二反射镜1352B之间的光栅介质1310。第一反射镜和第二反射镜被布置为引导第一记录光束1354和第二记录光束 1355,使得记录光束彼此相交并且彼此干涉以形成作为全息图1305被记录在光栅介质1310中的干涉图案。全息图1305是光栅结构的示例。

[0171] 根据全息技术领域的技术人员有时使用的惯例,记录光束可以被称为参考光束和信号光束。然而,第一记录光束和第二记录光束中的每一者通常是(除了入射到光栅介质上的角度之外)彼此相同的单色准直平面波束。此外,所谓的信号光束通常不包括在所谓的参考光束中不存在的编码在其中的数据。因此,将一个记录光束指定为信号光束,将另一个记录光束指定为参考光束可以是任意的,其中指定“信号”和“参考”用于区分两个记录光束,而不是指示一个记录光束包括不存在于另一个记录光束中的编码数据。

[0172] 在一些实施方案中,记录光束可以具有彼此不同的宽度,或者这些宽度可以是相同的。记录光束可以各自具有彼此相同的强度,或者光束之间的强度可以不同。通常使用与棱镜和光栅介质匹配的流体折射率,将光栅介质1310在第一棱镜1359A和第二棱镜1359B之间固定就位。倾斜轴 1361驻留在相对于表面法线1322的倾斜角1364处。第一记录光束和第二记录光束1354、1355相对于表面法线1322分别驻留在第一记录光束内角 1356和第二记录光束内角1357处。光束差角(α) 1358是第一记录光束和第二记录光束1354、1355相对于彼此的角度。在实施方案中, α 驻留在从0 到180度的范围内。根据等式(9)可以计算出每个全息图的倾斜角1364,

$$[0173] \quad \theta_{\text{倾斜}} = (\theta_{R1} + \theta_{R2} - 180^\circ) / 2 \quad (9)$$

[0174] 其中: $\theta_{\text{倾斜}}$ 是倾斜角,即倾斜轴相对于表面法线的内角;

[0175] θ_{R1} 是相对于表面法线的第一记录光束内角;和

[0176] θ_{R2} 是相对于表面法线的第二记录光束内角。

[0177] 从图13中可以看出,第一记录光束和第二记录光束1354、1355关于倾斜轴1361对称,使得相对于倾斜轴1366的第一记录光束内角加上相对于倾斜轴1367的第二记录光束内角等于180度。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴1366、1367的内角分别易于根据第一记录光束内角和第二记录光束内角1356、1357以及倾斜角1364来计算。

[0178] 第一记录光束和第二记录光束中的每一者通常是源自激光光源的准直平面波束。可以使用每个记录光束的多个光线描绘来说明平面波束。然而,为了清楚起见,在图13中,使用每个记录光束的单个光线描绘来示出第一记录光束和第二记录光束。

[0179] 图13中象征性地而不是严格定量地示出了空气/棱镜交界处的折射,例如其中第一记录光束1354与第一棱镜1359A的空气/棱镜交界相交,并且其中第二记录光束1355与第二棱镜1359B的空气/棱镜交界相交。因为棱镜通常与光栅介质1310折射率匹配,所以通常可以忽略棱镜/光栅介质交界处的折射。在实施方案中,光栅介质和棱镜各自具有约1.50的折射率。

[0180] 全息图的倾斜角(包括全息图集合的平均倾斜角)可与反射轴角度基本相同,这意味着倾斜角或平均倾斜角在反射轴角度的1.0度内。本领域的技术人员将会认识到,倾斜角和反射轴角度在理论上可以是相同的。然而,由于系统精度和准确度的限制,在记录全息图期间发生的记录介质的收缩以及其他误差源,测量的或基于记录光束角度估计的倾斜角或平均倾斜角可能不完全匹配根据斜交镜反射的光的入射角和反射角测量的反射轴角度。尽管如此,基于记录光束角度确定的倾斜角可以在基于入射光及其反射的角度确定的反射轴角度的1.0度内,即使其中中等收缩和系统缺陷会带来估计倾斜角和反射轴角度的误差。当参考制造斜交镜时(例如当描述在斜交镜光栅介质中记录全息图时),倾斜轴/反射轴通常被称为倾斜轴,并且当参考斜交镜的光反射特性时称为反射轴。

[0181] 通过分别旋转第一光束反射镜和第二光束反射镜1352A、1352B来调节第一记录光束和第二记录光束1354、1355入射到光栅介质上的角度。由旋转箭头1353指示的光束反射镜的旋转不仅调节入射角,而且还将改变光栅介质1310中记录光束彼此干涉的位置。因此,当旋转光束反射镜以调节入射角时,光栅介质1310和棱镜1359A、1359B平移移动,以便在光栅介质中在与先前记录的全息图大致相同的位置记录新的全息图。光栅介质 1310的平移由平移箭头1360指示。

[0182] 在示例性系统1350的变型中,使用可变波长激光器来改变第一记录光束和第二记录光束的波长。当第一记录光束和第二记录光束的波长改变时,第一记录光束和第二记录光束的入射角可以但并非必须保持恒定。

[0183] 制造斜交镜的第一种方法

[0184] 图14中示出了制造斜交镜的第一种方法。第一种方法的斜交镜是第一实施方案的斜交镜1100,在图11A和图11B中也有示出,并且其反射特性如上所述。第一种方法通常利用用于制造斜交镜的系统,诸如图13所示和上文所述的示例性系统1350。然而,为了清楚起见,在图14中省略了第一棱镜和第二棱镜,并且示出了记录光束,而未示出记录光束在空气/光栅介质交界处或空气/棱镜交界处的折射。然而,本领域的技术人员将认识到,折射通常发生在空气/棱镜交界处(或空气/光栅介质交界处,其中不使用折射率匹配棱镜),并且在设计系统或方法以实现描述的内角时应予以考虑。

[0185] 第一记录光束1154和第二记录光束1155用于第一实施方案的光栅介质1110,其中记录光束彼此干涉以产生干涉图案,该干涉图案在光栅介质 1110中被记录为体积全息图。记录光束通常是通过将来自外腔、可调谐二极管激光器的405nm的光束分成两个独立的光束而形成的。使用偏振分束器分离光束,并且使用半波片将两个独立的光束之一的极性从p偏振改变为s偏振,使得两个独立的光束都是s偏振。s偏振光束中的一个光束成为第一记录光束1154,而另一个s偏振光束成为第二记录光束1155。第一记录光束和第二记录光束中的每一者都是具有405nm波长的准直平面波束。

[0186] 第一实施方案的斜交镜受益于具有反射特性,所述反射特性允许其反射与记录光束波长基本上不同并且特别是波长长于记录光束波长的光。其中第一实施方案的全息图用405nm波长的记录光束记录的AK174-200光栅介质,对于200 μ m厚的介质以约0.07吸光度单位吸收405nm的光。相反, AK174-200光栅介质对于大于425nm的可见光波长的吸光度可以忽略不计(保守估计,每200 μ m小于0.002吸光度单位;可忽略不计的吸光度通常与零不可区分)。因此,AK174-200光栅介质吸收记录光束(在405nm 处)的强度比吸收第一实施方案的斜交镜被配置为反射的绿光(例如,在 503nm至537nm的范围内)的强度大至少35倍。

[0187] 通过在光栅介质1110中记录48个体积全息图来创建第一实施方案的斜交镜1100的光栅结构1105。48个全息图中的每一个全息图都以其自身唯一的第一记录光束内角1156和其自身唯一的第二记录光束内角1157记录。第一记录光束内角1156是第一记录光束1154相对于光栅介质1110的表面法线1122的内角,并且第二记录光束内角1157是第二记录光束1155 相对于表面法线1122的内角。光束差角(α) 1158是第一记录光束和第二记录光束1154、1155相对于彼此的角度。

[0188] 用于第一实施方案斜交镜的第一记录光束和第二记录光束中的每一个记录光束具有约3mW/cm²辐照度。通常,48个全息图中的第一个全息图以 35mJ/cm²的能量剂量记录,并且对于随后的每个全息图,剂量增加约 1.5%。记录全部48个全息图的总能量剂量通常为约2.5J/cm²。在此描述的辐照度和能量剂量仅仅是示例性的。斜交镜的其他实施方案和制造斜交镜的方法可以使用不同水平的辐照度和能量剂量。

[0189] 使用+53.218度的第一记录光束内角1156和+154.234度的第二记录光束内角1157记录第一全息图,导致101.016度的光束差角(α) 1158。48个全息图中的每一个全息图的倾斜轴1161相对于表面法线1122具有+13.726度的倾斜角1164,并且因此48个全息图的平均倾斜角也为+13.726度。根据上述等式(9) 计算每个全息图的倾斜角。对于光栅结构的每个后续的全息图,第一记录光束内角和第二记录光束内角1156、1157通常改变量值彼此大致相等但具有相反符号的量,这保持了第一记录光束和第二记录光束关于倾斜轴的对称性。

[0190] 例如,对于第二全息图,将第一记录光束内角改变+0.091度,并且将第二记录光束内角调节-0.091度,使得第一记录光束内角1156变成+53.309 度,第二记录光束内角变成+154.143度; α =100.834度。从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变量值在48个体积全息图上变化很小(即从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变),从用于从第一全息图到第二全息图的记录光束内角中的改变的0.091度到用于从第47个全息图到第48个全息图的记录光束内角中的改变的0.084度。然而,对于第一记录光束内角和第二记录光束内角的每个改变,改变的量值是相同的,并且对于第一光束角和第二光束角中的每个光束角而言,变化的量值相同,符号相反。第一实施方案的光栅结构1105的

最后一个(第48个)全息图的第一记录光束内角和第二记录光束内角1156、1157分别为 + 57.332度和+150.120度,并且 $\alpha=92.788$ 度。在一些实施方案中,第一记录光束内角的变化量值可与第二记录光束内角的变化量值略有不同,这样可以补偿系统不精确性、斯奈尔效应、色散或由记录全息图引起的光栅介质的收缩。

[0191] 在记录一个全息图与下一个全息图之间调节光栅介质1110的位置(如平移箭头1160所示),使得48个全息图中的每个全息图的至少一部分记录在与48个全息图的所有其他全息图的至少一部分共享的光栅介质中的公共空间中。因此,48个全息图中的每一个全息图至少部分地在空间上与光栅介质中的48个全息图中的所有其他全息图重叠。

[0192] 第一记录光束内角1156的范围在+53.218度到+57.332度(4.114度的范围)之间,并且第二记录光束内角1157的范围在+154.234度到+150.120度(4.114度的范围)之间。如图14所示,对于第一种方法的每个全息图,第一记录光束和第二记录光束1154、1155关于倾斜轴1161对称,使得第一记录光束相对于倾斜轴1166的内角(对于第一全息图而言为+38.492度)加上第二记录光束相对于倾斜轴1167的内角(对于第一全息图而言为+141.508度)等于180度($38.492^\circ + 141.508^\circ = 180^\circ$)。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴1166、1167的内角分别易于根据第一记录光束内角和第二记录光束内角1156、1157以及倾斜角1164来计算。在表7中列出了第一记录光束和第二记录光束的第一记录光束内角和第二记录光束内角(其定义为相对于光栅介质的表面法线的内角)以及相对于倾斜轴的内角。在记录48个体积全息图之后,通过本领域的技术人员熟知的过程使 AK174-200记录介质光固化。[更多内容]

[0193] 根据等式(10)和(11),可以使用束角差 α 来计算 K_G 。

$$[0194] \quad K_G \equiv |\vec{K}_G| = \sqrt{2k^2(1 - \cos \alpha)} \quad (10)$$

$$[0195] \quad k \equiv |\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (11)$$

[0196] 其中: \vec{K}_G 是全息图在k空间中的光栅矢量,包括 \vec{K}_{G+} 和 \vec{K}_{G-} ;

[0197] \vec{k}_1 以及 \vec{k}_2 是分别用于记录全息图的第一记录光束和第二记录光束在k空间中的波矢量;

[0198] α 是如上所述的光束差角;

[0199] λ 是第一记录光束和第二记录光束的光的真空波长;和

[0200] n 是全息图的平均折射率(称为“体积指数”,其中记录有全息图的光栅介质的折射率被用作近似值)。

[0201] \vec{K}_G 和 \vec{k} 的更详细的解释可见于本说明书上文的标题为kSpace Formalism for Holography的章节。

[0202] 对于用于第一实施方案斜交镜的AK174-200光栅介质而言,对于405nm的光,估计 n 为1.50。用于记录用于制造第一实施方案斜交镜的全息图的第一记录光束和第二记录光束的波长为405nm= 405×10^{-9} m。因此,对于AK174-200光栅介质中的第一记录光束和第二记录光束而言, $k=2.327 \times 10^7$ 弧度/米(rad/m)。对于第一实施方案斜交镜的全息图而言, K_G 的范围从第一全息图的 3.592×10^7 rad/m到第48个全息图的 3.370×10^7 rad/m。

[0203] 任何两个全息图之间光栅矢量的差的绝对值 $|\Delta K_G|$ 可以是用于描述全息图“间

距”(即,任何两个全息图的光栅矢量在k空间中彼此接近的程度)的有用度量。对于每个第一实施方案的全息图及其相邻全息图而言, $|\Delta K_G|$ 相对恒定,所有48个全息图的平均值为 $4.715 \times 10^4 \text{ rad/m}$,变化系数为 0.11%。每个全息图的相邻全息图由与每个全息图的 K_G 相比具有次高或次低 K_G 的一个或多个全息图组成。对于每个第一实施方案的全息图以及其相邻全息图而言, $|\Delta K_G|$ 驻留在 $4.70 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 到小于 $4.73 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 的范围内。第一全息图与第48个全息图之间的 $|\Delta K_G|$ 为 $2.22 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 。

[0204] 在斜交镜的实施方案中,在全息图和相邻全息图(其可以被称为相邻 $|\Delta K_G|$) 之间的 $|\Delta K_G|$ 具有多个全息图的平均值,所述多个全息图通常但不一定驻留在 $5.0 \times 10^3 \text{ rad/m}$ 到 $1.0 \times 10^7 \text{ rad/m}$ 的范围内,更通常地在 $1.0 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 到 $5 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 的范围内,更通常地还在 $1.0 \times 10^4 \text{ rad/m}$ 到 $1.0 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 的范围内。在一些实施方案中,多个全息图的平均相邻 $|\Delta K_G|$ 驻留在 8.0×10^4 到 $5.0 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 的范围内,并且可以驻留在 $1.0 \times 10^5 \text{ rad/m}$ 到 $1.0 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 的范围内。

[0205] 在一些实施方案中,多个全息图的平均相邻 $|\Delta K_G|$ 强烈影响斜交镜的性能。一组全息图的相对较小的平均相邻 $|\Delta K_G|$ 可对应于相对较高的斜交镜图像保真度。然而,其中一组全息图的相邻 $|\Delta K_G|$ 相对较小,为了跨越给定的全息图组的 $|\Delta K_G|$ 范围,该组中的全息图的总数较大。此外,由于光栅介质的记录容量通常受动态范围(通常表示为 $M/\#$) 的限制,因此在一组中记录更多的全息图通常意味着该组中的每个全息图较弱(即,在介质中较为模糊地记录)。因此,在全息图组具有相对较小相邻 $|\Delta K_G|$ (需要较多全息图,其他情况相同) 和该组具有较大相邻 $|\Delta K_G|$ 之间存在张力,这使得能够记录更少但较强的全息图。较少较强的全息图通常会导致斜交镜较强的反射。此外,相对宽带照明源的使用(例如,LED,而不是激光器)可以减少具有较大平均相邻 $|\Delta K_G|$ 的斜交镜中图像保真度的损失。在一些实施方案中,存在一个最佳点,其中多个全息图的相邻 $|\Delta K_G|$ 的平均值驻留在 $5.0 \times 10^3 \text{ rad/m}$ 到 $1.0 \times 10^7 \text{ rad/m}$ 的范围中。其中平均相邻 $|\Delta K_G|$ 驻留在最佳点中的斜交镜的实施方案通常表现出图像保真度和反射率的理想平衡。

[0206] 对于第一实施方案的斜交镜的48个全息图中的每一个全息图而言, α 、 K_G 和 $|\Delta K_G|$ 的值可见于表7。

表 7 制造斜交镜的第一种方法的记录光束角度；相对于表面法线，倾斜角=13.726°

#	第一记录光束 角度 (内部，相对于表面法线，以度为单位)	第二记录光束 角度	第一记录光束 相对于倾斜轴 的内角 (度)	第二记录光束 相对于倾斜轴 的内角 (度)	与先前的 全息图的 角度差的 大小 (度)	α (度)	K_G ($\times 10^7$ rad/m)	全息图 与其之 前的相 邻全息 图之间 的 $ \Delta K_G $ ($\times 10^4$ rad/m)
1	53.218	154.234	39.492	140.508		101.016	3.592	
2	53.309	154.143	39.583	140.417	0.091	100.833	3.587	4.709
3	53.400	154.052	39.674	140.326	0.091	100.652	3.582	4.704
4	53.491	153.961	39.765	140.235	0.091	100.470	3.578	4.713
5	53.581	153.871	39.855	140.145	0.091	100.289	3.573	4.708
6	53.672	153.780	39.946	140.054	0.090	100.109	3.568	4.709
7	53.762	153.690	40.036	139.964	0.090	99.928	3.563	4.704
8	53.852	153.600	40.126	139.874	0.090	99.748	3.559	4.713
9	53.942	153.510	40.216	139.784	0.090	99.568	3.554	4.707
10	54.031	153.421	40.305	139.695	0.090	99.389	3.549	4.709
11	54.121	153.331	40.395	139.605	0.090	99.210	3.545	4.710
12	54.210	153.242	40.484	139.516	0.089	99.031	3.540	4.712
13	54.300	153.152	40.574	139.426	0.089	98.853	3.535	4.713
14	54.389	153.063	40.663	139.337	0.089	98.674	3.530	4.707
15	54.478	152.974	40.752	139.248	0.089	98.496	3.526	4.715
16	54.567	152.885	40.841	139.159	0.089	98.319	3.521	4.710
17	54.655	152.797	40.929	139.071	0.089	98.142	3.516	4.711
18	54.744	152.708	41.018	138.982	0.089	97.965	3.512	4.719
19	54.832	152.620	41.106	138.894	0.088	97.788	3.507	4.712
20	54.920	152.532	41.194	138.806	0.088	97.612	3.502	4.713
21	55.008	152.444	41.282	138.718	0.088	97.436	3.497	4.714
22	55.096	152.356	41.370	138.630	0.088	97.260	3.493	4.715
23	55.184	152.268	41.458	138.542	0.088	97.085	3.488	4.708
24	55.271	152.181	41.545	138.455	0.088	96.909	3.483	4.716
25	55.359	152.093	41.633	138.367	0.087	96.734	3.479	4.717

[0207]

	26	55.446	152.006	41.720	138.280	0.087	96.560	3.474	4.717
	27	55.533	151.919	41.807	138.193	0.087	96.386	3.469	4.710
	28	55.620	151.832	41.894	138.106	0.087	96.211	3.464	4.718
	29	55.707	151.745	41.981	138.019	0.087	96.038	3.460	4.718
	30	55.794	151.658	42.068	137.932	0.087	95.864	3.455	4.718
	31	55.881	151.571	42.155	137.845	0.087	95.691	3.450	4.718
	32	55.967	151.485	42.241	137.759	0.086	95.518	3.446	4.711
	33	56.053	151.399	42.327	137.673	0.086	95.346	3.441	4.719
	34	56.139	151.313	42.413	137.587	0.086	95.173	3.436	4.719
	35	56.225	151.227	42.499	137.501	0.086	95.001	3.431	4.718
	36	56.311	151.141	42.585	137.415	0.086	94.829	3.427	4.718
	37	56.397	151.055	42.671	137.329	0.086	94.658	3.422	4.718
	38	56.483	150.969	42.757	137.243	0.086	94.486	3.417	4.718
[0208]	39	56.568	150.884	42.842	137.158	0.086	94.315	3.413	4.725
	40	56.654	150.798	42.928	137.072	0.085	94.145	3.408	4.717
	41	56.739	150.713	43.013	136.987	0.085	93.974	3.403	4.717
	42	56.824	150.628	43.098	136.902	0.085	93.804	3.398	4.724
	43	56.909	150.543	43.183	136.817	0.085	93.634	3.394	4.723
	44	56.994	150.458	43.268	136.732	0.085	93.464	3.389	4.715
	45	57.079	150.373	43.353	136.647	0.085	93.295	3.384	4.722
	46	57.163	150.289	43.437	136.563	0.085	93.126	3.380	4.721
	47	57.248	150.204	43.522	136.478	0.085	92.956	3.375	4.728
	48	57.332	150.120	43.606	136.394	0.084	92.788	3.370	4.719

								平均值	4.715
								标准差	0.0054
								%CV	0.11

[0209] 在制造斜交镜的第一种方法的变型中,如上所述,在保持第一记录光束和第二记录光束关于倾斜轴的对称性的同时,通过连续同步地调节第一记录光束内角和第二记录光束内角来创建全息图。因此,单个全息图在第一记录光束从+53.218度的第一记录光束内角扫描到+57.332度的第一记录光束角度时被记录。同时,第二记录光束从+154.234度的第二记录光束内角扫描到+150.120度。因此,当记录单个全息图时, α 在101.016度到 92.788度之间变化并且 K_G 在 $3.592 \times 10^7 \text{ rad/m}$ 到 $3.370 \times 10^7 \text{ rad/m}$ 之间变化。在记录单个全息图的同时调节光栅介质的位置,使得单个全息图被记录在光栅介质中的相对紧凑的空间中,而不是在记录光束角度改变时在相对宽的空间上摊开。因此,单个全息图表现出与用48组唯一的第一记录光束内角和第二记录光束内角记录的48个离散全息图非常相似的反射特性,并且用于记录单个全息图的总能量剂量通常与用于记录48个全息图的总能量剂量相同(2.5 J/cm^2)。

[0210] 制造斜交镜的第二种 方法

[0211] 下面描述制造斜交镜的第二种方法。由第二种方法制成的斜交镜是第二实施方案的斜交镜1200,在图12A和图12B中也有示出,并且其反射特性如上所述。

[0212] 第二种方法除了第一记录光束内角和第二记录光束内角与第一种方法的不同之外,与第一种方法相同,这使得第二实施方案的斜交镜反射特性与第一实施方案的斜交镜反射特性不同。在本示例中,第二种方法使用不同于第一种方法(AK174-200)的光栅介质(AK233-200)进行。与第一实施方案类似,第一实施方案的斜交镜受益于具有反射特性,所述反射特性允许其反射与记录光束波长基本上不同并且特别是波长长于记录光束波长的光。

[0213] 通过在光栅介质1210中记录49个体积全息图来创建第二实施方案的斜交镜1200的光栅结构1205。第二种方法的49个全息图中的每一个全息图都以其自身唯一的第一记录光束内角和其自身唯一的第二记录光束内角记录。第一记录光束内角是第一记录光束相对于光栅介质的表面法线的内角,并且第二记录光束内角是第二记录光束相对于表面法线的内角。用于第一实施方案斜交镜的第一记录光束和第二记录光束中的每一个记录光束具有约 $3\text{mW}/\text{cm}^2$ 辐照度。通常,49个全息图中的第一个全息图以 $35\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的能量剂量记录,并且对于随后的每个全息图,剂量增加约1.5%。记录全部49个全息图的总剂量通常为约 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0214] 根据第二种方法,使用+55.913度的第一记录光束内角和+153.323度的第二记录光束内角记录第一全息图;因此, α 为97.410度。49个全息图中的每一个全息图的倾斜轴相对于表面法线具有+14.618度的倾斜角。根据上述等式(9)计算每个全息图的倾斜角。对于光栅结构的每个后续的全息图,第一记录光束内角和第二记录光束内角通常改变量值彼此大致相等但具有相反符号的量,这保持了第一记录光束和第二记录光束关于倾斜轴的对称性。

[0215] 例如,为了根据第二种方法记录第二全息图,将第一记录光束内角改变+0.095度,并且将第二记录光束内角调节-0.095度,使得第一记录光束内角变成+56.008度,第二记录光束内角变成+153.228度; $\alpha=97.220$ 度。从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变量值通常在49个体积全息图上变化很小(即从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变),从用于从第一全息图到第二全息图的记录光束内角中的改变的0.095的量值到用于从第48个全息图到第49个全息图的记录光束内角中的改变的0.087的量值。然而,对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的量值相同,并且对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的符号相反。第二实施方案光栅结构的最后一个(第49个)全息图的第一记录光束内角和第二记录光束内角分别为+60.252度和+148.984度,并且 $\alpha=88.732$ 。在一些实施方案中,第一记录光束内角的改变量值可与第二记录光束内角的改变量值略有不同,以便补偿诸如系统不精确性、斯奈尔效应、色散或由记录全息图引起的光栅介质的收缩等因素。

[0216] 在记录一个全息图与下一个全息图之间调节光栅介质的位置,使得49个全息图中的每个全息图的至少一部分记录在与49个全息图的所有其他全息图的至少一部分共享的公共空间中。因此,49个全息图中的每一个全息图至少部分地在空间上与光栅介质中的49个全息图中的所有其他全息图重叠。

[0217] 因此,根据第二种方法,第一记录光束内角的范围在+55.913度到+60.252度(4.339度的范围)之间,第二记录光束内角的范围在+153.323度到+148.984度(4.339度的范围)之间。与第一种方法一样,对于第二种方法的每个全息图,第一记录光束和第二记录光束关于倾斜轴对称,使得第一记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+41.295度)加上第二记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+138.705度) $=180$ 度($41.295^\circ+138.705^\circ=180^\circ$)。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴的内角分别易于根据相对于表面法线的第一记录光束内角和第二记录光束内角以及倾斜角来计算。对于制造斜交镜的第二种方法,在表8中列出了第一记录光束和第二记录光束的第一记录光束内角和第二记录光束内角(其定义为相对于光栅介质的表面法线的内角)以及相对

于倾斜轴的内角。在记录49个体积全息图之后,通过本领域的技术人员熟知的过程使AK233-200记录介质光固化。例如,在一些实施方案中,光固化包括暴露于来自发光二极管的近紫外均匀相干光,直到其他光敏化学品的基本上所有的光引发剂、光敏单体已被消耗。

表 8 制造斜交镜的第二种方法的记录光束角度; 相对于表面法线, 倾斜角=14.618°

#	第一记录光束 角度 (内部, 相对于 表面法线, 以度 为单位)	第二记录光束 角度	第一记录光束 相对于 倾斜轴 的内角 (度)	第二记录光束 相对于 倾斜轴 的内角 (度)	与先前的 全息图的 角度差的 大小 (度)	α (度)	K_G ($\times 10^7$ rad/m)	ΔK_G ($\times 10^4$ rad/m)
1	55.913	153.323	41.295	138.705		97.410	3.497	
2	56.008	153.228	41.390	138.610	0.095	97.220	3.492	5.098
3	56.102	153.134	41.484	138.516	0.094	97.032	3.487	5.053
4	56.196	153.040	41.578	138.422	0.094	96.844	3.482	5.063
5	56.290	152.946	41.672	138.328	0.094	96.656	3.477	5.072
6	56.384	152.852	41.766	138.234	0.094	96.468	3.471	5.081
7	56.477	152.759	41.859	138.141	0.093	96.282	3.466	5.037
8	56.571	152.665	41.953	138.047	0.094	96.094	3.461	5.100
9	56.664	152.572	42.046	137.954	0.093	95.908	3.456	5.055
10	56.757	152.479	42.139	137.861	0.093	95.722	3.451	5.064
11	56.849	152.387	42.231	137.769	0.092	95.538	3.446	5.019
12	56.942	152.294	42.324	137.676	0.093	95.352	3.441	5.082
13	57.034	152.202	42.416	137.584	0.092	95.168	3.436	5.036
14	57.127	152.109	42.509	137.491	0.093	94.982	3.431	5.100
15	57.219	152.017	42.601	137.399	0.092	94.798	3.426	5.054
[0218] 16	57.311	151.925	42.693	137.307	0.092	94.614	3.421	5.063
17	57.402	151.834	42.784	137.216	0.091	94.432	3.416	5.017
18	57.494	151.742	42.876	137.124	0.092	94.248	3.411	5.081
19	57.585	151.651	42.967	137.033	0.091	94.066	3.406	5.034
20	57.676	151.560	43.058	136.942	0.091	93.884	3.401	5.043
21	57.767	151.469	43.149	136.851	0.091	93.702	3.396	5.051
22	57.858	151.378	43.240	136.760	0.091	93.520	3.391	5.060
23	57.949	151.287	43.331	136.669	0.091	93.338	3.385	5.068
24	58.040	151.196	43.422	136.578	0.091	93.156	3.380	5.077
25	58.130	151.106	43.512	136.488	0.090	92.976	3.375	5.029
26	58.220	151.016	43.602	136.398	0.090	92.796	3.370	5.038
27	58.310	150.926	43.692	136.308	0.090	92.616	3.365	5.046
28	58.400	150.836	43.782	136.218	0.090	92.436	3.360	5.054
29	58.490	150.746	43.872	136.128	0.090	92.256	3.355	5.063
30	58.579	150.657	43.961	136.039	0.089	92.078	3.350	5.015
31	58.669	150.567	44.051	135.949	0.090	91.898	3.345	5.079
32	58.758	150.478	44.140	135.860	0.089	91.720	3.340	5.031
33	58.847	150.389	44.229	135.771	0.089	91.542	3.335	5.039
34	58.936	150.300	44.318	135.682	0.089	91.364	3.330	5.047
35	59.025	150.211	44.407	135.593	0.089	91.186	3.325	5.055
36	59.113	150.123	44.495	135.505	0.088	91.010	3.320	5.006
37	59.202	150.034	44.584	135.416	0.089	90.832	3.315	5.071
38	59.290	149.946	44.672	135.328	0.088	90.656	3.310	5.022
39	59.378	149.858	44.760	135.240	0.088	90.480	3.305	5.030

	40	59.466	149.770	44.848	135.152	0.088	90.304	3.300	5.037
	41	59.554	149.682	44.936	135.064	0.088	90.128	3.295	5.045
	42	59.642	149.594	45.024	134.976	0.088	89.952	3.290	5.053
	43	59.730	149.506	45.112	134.888	0.088	89.776	3.285	5.061
	44	59.817	149.419	45.199	134.801	0.087	89.602	3.280	5.011
	45	59.904	149.332	45.286	134.714	0.087	89.428	3.275	5.018
	46	59.991	149.245	45.373	134.627	0.087	89.254	3.270	5.026
[0219]	47	60.078	149.158	45.460	134.540	0.087	89.080	3.264	5.033
	48	60.165	149.071	45.547	134.453	0.087	88.906	3.259	5.041
	49	60.252	148.984	45.634	134.366	0.087	88.732	3.254	5.048
								平均	5.050
								值	
								标准	
								差	0.0235
								%CV	0.47

[0220] 对于用于第二实施方案斜交镜的AK233-200光栅介质而言,对于 405nm的光,估计 n 为1.50。用于记录用于制造第二实施方案斜交镜的全息图的第一记录光束和第二记录光束的波长为 $405\text{nm}=405\times 10^{-9}\text{m}$ 。因此,对于AK233-200光栅介质中的第一记录光束和第二记录光束而言, $k=2.327\times 10^7\text{rad/m}$ 。对于第二实施方案斜交镜的全息图而言, K_G 的范围从第一全息图的 $3.497\times 10^7\text{rad/m}$ 到第49个全息图的 $3.254\times 10^7\text{rad/m}$ 。

[0221] 第二实施方案全息图的相邻 $|\Delta K_G|$ 相对恒定,所有49个全息图的平均值为 $5.050\times 10^4\text{rad/m}$,变化系数为0.47%。每个第二实施方案全息图的相邻 $|\Delta K_G|$ 驻留在 5.01×10^4 到 $5.10\times 10^4\text{rad/m}$ 的范围内。介于第一全息图与第49个全息图之间的 $|\Delta K_G|$ 为 $2.42\times 10^6\text{rad/m}$ 。

[0222] 在制造斜交镜的第二种方法的变型中,如上所述,在保持第一记录光束和第二记录光束关于倾斜轴的对称性的同时,通过连续同步地调节第一记录光束内角和第二记录光束内角来创建全息图。因此,单个全息图在第一记录光束从+55.913度的第一记录光束内角扫描到+60.252度的第一记录光束角度时被记录。同时,第二记录光束从+153.323度的第二记录光束内角扫描到+148.984度。因此,单个全息图相当于记录有49组唯一的第一记录光束和第二记录光束内角的49个离散的全息图。用于记录单个全息图的总能量剂量通常为单个全息图 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0223] 制造斜交镜的第三种方法

[0224] 下面描述制造斜交镜的第三种方法。与第一种方法类似,第三种方法通常利用用于制造斜交镜的系统,诸如图13所示和上文所述的示例性系统 1350。

[0225] 根据第三种方法,通过在光栅介质中记录三组全息图来创建光栅结构。第一全息图组包括21个全息图,第二全息图组包括19个全息图,并且第三全息图组包括16个全息图,总计56个全息图。在一些实施方案中,第一全息图组、第二全息图组和第三全息图组中的每一组包括至少6个全息图或至少9个全息图。第一全息图组中的多个全息图中的每一个全息图通常至少部分地在空间上与第一全息图组中的多个全息图中的至少另一个全息图重叠,并且第一全息图组中的多个全息图中的至少一个全息图可至少部分地在空间上与第二全息图组中的全息图中的至少一个全息图重叠。在一些实施方案中,第一全息图组中的多个全息图中的每一个全息图至少部分地在空间上与第一全息图组中的多个全息图中的全

部其他全息图重叠。

[0226] 类似地,第二全息图组中的多个全息图中的每一个全息图通常至少部分地在空间上与第二全息图组中的多个全息图中的至少另一个全息图重叠,并且第二全息图组中的多个全息图中的至少一个全息图可至少部分地在空间上与第一全息图组或第三全息图组中的全息图中的至少一个全息图重叠。在一些实施方案中,第二全息图组中的多个全息图中的每一个全息图至少部分地在空间上与第二全息图组中的多个全息图中的全部其他全息图重叠。

[0227] 类似地,第三全息图组中的多个全息图中的每一个全息图通常至少部分地在空间上与第三全息图组中的多个全息图中的至少另一个全息图重叠,并且第三全息图组中的多个全息图中的至少一个全息图可至少部分地在空间上与第二全息图组中的全息图中的至少一个全息图重叠。在一些实施方案中,第三全息图组中的多个全息图中的每一个全息图至少部分地在空间上与第三全息图组中的多个全息图中的全部其他全息图重叠。在一些实施方案中,第一全息图组、第二全息图组和第三全息图组的所有全息图至少部分地在空间上彼此重叠。

[0228] 使用第一记录光束和第二记录光束记录总共56个全息图中的每一个全息图,第一记录光束和第二记录光束以其自身唯一的第一记录光束内角和其自身唯一的第二记录光束内角入射到光栅介质上。在一些实施方案中,不是每个第一记录光束内角和第二记录光束内角都是唯一的。例如,在一些实施方案中,具有彼此相同的记录光束内角的多个全息图可被写入斜交镜中彼此不同的位置中。第一记录光束内角是第一记录光束相对于光栅介质的表面法线的内角,并且第二记录光束内角是第二记录光束相对于表面法线的内角。用于第一实施方案斜交镜的第一记录光束和第二记录光束中的每一个记录光束是具有约 $3\text{mW}/\text{cm}^2$ 辐照度的单色准直光束。通常,56个全息图中的第一个以 $35\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的能量剂量记录,并且对于随后的每个全息图,剂量增加约0.9%。记录全部56个全息图的总剂量通常为约 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0229] 第三种方法的第一全息图组包括使用 $+43.519^\circ$ 的第一记录光束内角和 $+163.882^\circ$ 的第二记录光束内角记录的第一全息图,导致 120.363° 的光束差角(α)。第一全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有 13.700° 的倾斜角的倾斜轴对称。对于第一全息图组的每个后续的全息图,第一记录光束内角和第二记录光束内角通常改变量值彼此大致相等但具有相反符号的量。例如,为了记录第一全息图组的第二全息图,将第一记录光束内角改变 $+0.351^\circ$,并且将第二记录光束内角调节 -0.355° ,使得第一记录光束内角变成 $+43.870^\circ$,第二记录光束内角变成 $+163.527^\circ$ ($\alpha=119.657^\circ$)。第二全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有 13.699° 的倾斜角的倾斜轴对称。从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变量值通常在第一全息图组的21个体积全息图上变化很小(即从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变),从用于从第一全息图到第二全息图的记录光束内角中的改变的约0.353的量值到用于从第20个全息图到第21个全息图的记录光束内角中的改变的约0.299的量值。然而,对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的量值大致相同,并且对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的符号相反。第一全息图组的最后一个(第21个)全息图的第一记录光束内角和第二记录光束内角分别为 $+49.960^\circ$ 和 $+157.379^\circ$,并且 $\alpha=107.419^\circ$ 。第

21个全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有 13.670度的倾斜角的倾斜轴对称。

[0230] 根据第三种方法,第一全息图组的第一记录光束内角的范围在+43.519 度到+49.960度(6.441度的范围)之间,第一全息图组的第二记录光束内角的范围在+163.882度到+157.379度(6.503度的范围)之间。对于第一全息图组的每个全息图而言,第一记录光束及其相应的第二记录光束关于倾斜轴对称。因此,第一记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+29.819度)加上第二记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+150.182度)等于180.0度($29.818^{\circ}+150.182=180.0^{\circ}$)。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴的内角分别易于根据第一记录光束内角和第二记录光束内角以及倾斜角来计算。第一全息图组的所有全息图的平均倾斜角为13.685度,并且第一组的所有倾斜角在平均值的0.015度内。对于制造斜交镜的第三种方法的第一全息图组而言,在表9中列出了相对于光栅介质的表面法线的第一记录光束内角和第二记录光束内角以及相对于倾斜轴的内角。

[0231] 对于许多斜交镜应用而言,为了实现足够的反射性能,一组全息图的所有倾斜角都应在该组的所有全息图的平均倾斜角的2.0度以内。在一些斜交镜应用中,为了实现足够的反射性能,一组全息图的所有倾斜角都在全息图组平均倾斜角的1.0度以内。对于要求更高的应用,为了实现足够的反射性能,一组全息图的所有倾斜角都在全息图组平均倾斜角的0.5度以内。对于更严苛的应用,为了实现足够的反射性能,一组全息图的所有倾斜角都在全息图组平均倾斜角的0.10度以内。对于特别严苛的应用,一组全息图的所有倾斜角都在全息图组平均倾斜角的0.01度以内。

[0232] 对于第一全息图组的全息图而言, K_G 的范围从第一全息图的 $4.140 \times 10^7 \text{rad/m}$ 到第21个全息图的 $3.846 \times 10^7 \text{rad/m}$,基于405nm的光, $n=1.538$ 和AK283光敏光栅介质,导致 $k=2.386 \times 10^7 \text{rad/m}$ 。第三种方法可以使用厚度为500 μm 的AK283光栅介质来实施,但这不是必须的。对于第一全息图组的每个全息图而言,相邻 $|\Delta K_G|$ 为 $1.469 \times 10^5 \text{rad/m}$ 。介于第一全息图与第21个全息图之间的 $|\Delta K_G|$ 为 $2.939 \times 10^6 \text{rad/m}$ 。对于第三种方法的第一全息图组的21个全息图中的每一个全息图而言, α 、 K_G 和 $|\Delta K_G|$ 的值可见于表9。

[0233] 第三种方法的第二全息图组包括使用+53.704度的第一记录光束内角和 +153.696度的第二记录光束内角记录的第一全息图,导致 $\alpha=99.992$ 度。第一全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有13.700度的倾斜角的倾斜轴对称。为了记录第二全息图组的第二全息图,将第一记录光束内角改变+0.272度,并且将第二记录光束内角调节-0.275度,使得第一记录光束内角变成+53.976度,第二记录光束内角变成+153.421度($\alpha=99.445$ 度)。第二全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有13.699度的倾斜角的倾斜轴对称。从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变量值通常在第二全息图组的19个体积全息图上变化很小(即从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变),从用于从第一全息图到第二全息图的记录光束内角中的改变的约0.274的量值到用于从第18个全息图到第19 个全息图的记录光束内角中的改变的0.252的量值。然而,对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的量值大致相同,并且对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言,改变的符号相反。第二全息图组的最后一个(第19个)全息图的第一记录光束内角和第二记录光束内角分别为+58.393度和+148.957度,并且 $\alpha=90.564$ 度。第 19个全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有

13.675度的倾斜角的倾斜轴对称。

[0234] 对于第二全息图组的全息图而言, K_G 的范围从第一全息图的 3.655×10^7 到第19个全息图的 3.391×10^7 ($n=1.538$; $k=2.386 \times 10^7$)。对于第二全息图组的每个全息图而言, 相邻 $|\Delta K_G|$ 为 1.469×10^5 。介于第一全息图与第 19 个全息图之间的 $|\Delta K_G|$ 为 $2.645 \times 10^6 \text{ rad/m}$ 。对于第三种方法的第二全息图组的19个全息图中的每一个全息图而言, α 、 K_G 和 $|\Delta K_G|$ 的值可见于表9。

[0235] 根据第三种方法, 第二全息图组的第一记录光束内角的范围在+53.704 度到+58.393度(4.689度的范围) 之间, 第二全息图组的第二记录光束内角的范围在+153.696度到+148.597度(4.736度的范围) 之间。对于第二全息图组的每个全息图而言, 第一记录光束及其相应的第二记录光束关于倾斜轴对称。因此, 第一记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+40.004度) 加上第二记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+139.996度) 等于180.0度($40.004^\circ + 139.996 = 180.0^\circ$)。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴的内角分别易于根据第一记录光束内角和第二记录光束内角以及倾斜角来计算。第二全息图组的所有全息图的平均倾斜角为13.688度, 并且第一组的所有倾斜角在平均值的0.013度内。对于制造斜交镜的第三种方法的第二全息图组而言, 在表9中列出了相对于光栅介质的表面法线的第一记录光束内角和第二记录光束内角以及相对于倾斜轴的内角。

[0236] 第三种方法的第三全息图组包括使用+63.696度的第一记录光束内角和 +143.704度的第二记录光束内角记录的第一全息图, 导致 $\alpha=80.008$ 度。第一全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有13.700度的倾斜角的倾斜轴对称。为了记录第三全息图组的第二全息图, 将第一记录光束内角改变+0.229度, 并且将第二记录光束内角调节-0.231度, 使得第一记录光束内角变成+63.925度, 第二记录光束内角变成+143.473度 ($\alpha=79.548$ 度)。第一全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有13.699度的倾斜角的倾斜轴对称。从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变量值通常在第三全息图组的16个体积全息图上变化很小(即从一个全息图到下一个全息图的记录光束内角中的改变), 从用于从第一全息图到第二全息图的记录光束内角中的改变的约0.230的量值到用于从第18个全息图到第19 个全息图的记录光束内角中的改变的约0.219的量值。然而, 对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言, 改变的量值大致相同, 并且对于第一记录光束内角和第二记录光束内角中的每一个而言, 改变的符号相反。第三全息图组的最后一个(第16个) 全息图的第一记录光束内角和第二记录光束内角分别为+67.051度和+140.313度, 并且 $\alpha=73.262$ 度。第16个全息图的第一记录光束和第二记录光束关于具有13.682度的倾斜角的倾斜轴对称。

[0237] 对于第三全息图组的全息图而言, K_G 的范围从第一全息图的 3.068×10^7 到第16个全息图的 2.847×10^7 ($n=1.538$; $k=2.386 \times 10^7$)。对于第三全息图组的每个全息图而言, 相邻 $|\Delta K_G|$ 为 1.469×10^5 。介于第一全息图与第 16 个全息图之间的 $|\Delta K_G|$ 为 2.204×10^6 。对于第三种方法的第三全息图组的 16 个全息图中的每一个全息图而言, α 、 K_G 和 $|\Delta K_G|$ 的值可见于表9。

[0238] 根据第三种方法, 第三全息图组的第一记录光束内角的范围在+63.696 度到+67.051度(3.355度的范围) 之间, 第三全息图组的第二记录光束内角的范围在+143.704度

到+140.313度(3.391度的范围)之间。对于第三全息图组的每个全息图而言,第一记录光束及其相应的第二记录光束关于倾斜轴对称。因此,第一记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+49.996度)加上第二记录光束相对于倾斜轴的内角(对于第一全息图而言为+130.004度)等于180.0度($49.996^{\circ}+130.004=180.0^{\circ}$)。第一记录光束和第二记录光束相对于倾斜轴的内角分别易于根据第一记录光束内角和第二记录光束内角以及倾斜角来计算。第三全息图组的所有全息图的平均倾斜角为13.691度,并且第一组的所有倾斜角在平均值的0.009度内。对于制造斜交镜的第三种方法的第三全息图组而言,在表9中列出了相对于光栅介质的表面法线的第一记录光束内角和第二记录光束内角以及相对于倾斜轴的内角。

表9 制造斜交镜的第三种方法的记录光束角度以及相关数据

#	第一记录光束 角度 (内角,以度为单位,相对于表面法线)	第二记录光束 角度 (内角,以度为单位,相对于表面法线)	倾斜角 度(内角,以度为单位,相对于表面法线)	第一记录光束 相对于倾斜轴 的内角 (度)	第二记录光束 相对于倾斜轴 的内角 (度)	与先前的全息图的角度差的大小	α (度)	K_G ($\times 10^7 \text{rad/m}$)
第一组全息图								
1	43.519	163.882	13.700	29.819	150.182		120.363	4.140
2	43.870	163.527	13.699	30.171	149.829	0.354	119.657	4.126
3	44.218	163.177	13.697	30.521	149.479	0.351	118.959	4.111
4	44.562	162.830	13.696	30.866	149.134	0.347	118.268	4.096
5	44.903	162.486	13.695	31.208	148.792	0.344	117.583	4.082
6	45.240	162.146	13.693	31.547	148.453	0.340	116.906	4.067
[0239] 7	45.574	161.809	13.692	31.883	148.117	0.337	116.235	4.052
8	45.905	161.475	13.690	32.215	147.785	0.334	115.570	4.037
9	46.233	161.144	13.689	32.545	147.455	0.331	114.911	4.023
10	46.558	160.816	13.687	32.871	147.129	0.328	114.258	4.008
11	46.880	160.491	13.686	33.195	146.805	0.325	113.611	3.993
12	47.200	160.169	13.684	33.515	146.485	0.322	112.969	3.979
13	47.516	159.849	13.683	33.834	146.166	0.320	112.333	3.964
14	47.830	159.532	13.681	34.149	145.851	0.317	111.702	3.949
15	48.142	159.218	13.680	34.462	145.538	0.314	111.076	3.935
16	48.451	158.905	13.678	34.773	145.227	0.312	110.455	3.920
17	48.757	158.596	13.676	35.081	144.919	0.310	109.838	3.905

1 8 1 9 2 0 2 1	49.061	158.288	13.675	35.387	144.613	0.307	109.227	3.891
	49.363	157.983	13.673	35.690	144.310	0.305	108.620	3.876
	49.663	157.680	13.672	35.991	144.009	0.303	108.017	3.861
	49.960	157.379	13.670	36.290	143.710	0.301	107.419	3.846
平均倾斜角=			13.685					

[0240]

第二组全息图								
1	53.704	153.696	13.700	40.004	139.996		99.992	3.655
2	53.976	153.421	13.699	40.278	139.722	0.275	99.445	3.641
3	54.247	153.148	13.698	40.550	139.450	0.273	98.900	3.626
4	54.517	152.876	13.696	40.820	139.180	0.272	98.359	3.611
5	54.785	152.605	13.695	41.090	138.910	0.270	97.821	3.597
6	55.051	152.336	13.694	41.357	138.643	0.269	97.286	3.582
7	55.316	152.069	13.692	41.624	138.377	0.268	96.753	3.567
8	55.579	151.803	13.691	41.888	138.112	0.266	96.223	3.553
9	55.842	151.538	13.690	42.152	137.848	0.265	95.696	3.538
1 0	56.102	151.274	13.688	42.414	137.586	0.264	95.172	3.523
1 1	56.362	151.012	13.687	42.675	137.325	0.262	94.650	3.509
1 2	56.620	150.751	13.685	42.935	137.065	0.261	94.131	3.494
1 3	56.877	150.491	13.684	43.193	136.807	0.260	93.614	3.479
1 4	57.133	150.232	13.683	43.450	136.550	0.259	93.100	3.464
1 5	57.387	149.975	13.681	43.706	136.294	0.257	92.588	3.450
1 6	57.640	149.719	13.680	43.961	136.039	0.256	92.079	3.435
1 7	57.892	149.464	13.678	44.214	135.786	0.255	91.571	3.420
1 8	58.143	149.210	13.677	44.467	135.533	0.254	91.067	3.406
1 9	58.393	148.957	13.675	44.718	135.282	0.253	90.564	3.391
平均倾斜角=			13.688					

第三组全息图

1	63.696	143.704	13.700	49.996	130.004		80.008	3.068
2	63.925	143.473	13.699	50.226	129.774	0.231	79.548	3.053
3	64.153	143.243	13.698	50.455	129.545	0.230	79.090	3.038
4	64.380	143.013	13.697	50.683	129.317	0.230	78.633	3.024
5	64.607	142.785	13.696	50.911	129.089	0.229	78.178	3.009

	6	64.833	142.556	13.694	51.138	128.862	0.228	77.724	2.994
	7	65.058	142.329	13.693	51.364	128.636	0.227	77.272	2.980
	8	65.282	142.102	13.692	51.590	128.410	0.227	76.821	2.965
	9	65.506	141.877	13.691	51.815	128.186	0.226	76.371	2.950
	10	65.728	141.651	13.690	52.039	127.961	0.225	75.923	2.935
	11	65.951	141.427	13.689	52.262	127.738	0.225	75.476	2.921
[0241]	12	66.172	141.203	13.687	52.485	127.515	0.224	75.031	2.906
	13	66.393	140.979	13.686	52.707	127.293	0.223	74.586	2.891
	14	66.613	140.757	13.685	52.928	127.072	0.223	74.144	2.877
	15	66.832	140.534	13.683	53.149	126.851	0.222	73.702	2.862
	16	67.051	140.313	13.682	53.369	126.631	0.222	73.262	2.847
平均倾斜角=				13.691					

[0242] 多色斜交镜实施方案

[0243] 由制造斜交镜的第三种方法产生的斜交镜可以称为多色斜交镜,因为其光栅介质被配置为关于基本上恒定的反射轴反射蓝光、绿光和红光。第一全息图组被配置为关于基本上恒定的第一反射轴反射位于可见光谱的蓝色区域中的入射光,该第一反射轴与光栅介质的表面法线相差至少2.0度。出于本公开的目的,可见光谱的蓝色区域中的入射光具有在405nm至492nm范围内的波长。更具体地讲,第一全息图组被配置为关于具有+13.685度的平均反射轴角度的基本上恒定的第一反射轴反射具有463nm波长的蓝色入射光,其中(i)蓝色入射光具有范围在+8.615度到-8.606度之间的内入射角(相对于表面法线),并且(ii)内入射角包括至少21个不同的入射角,其中每个入射角与至少21个不同的入射角的所有其他入射角分开0.52度或更多。在一些实施方案中,蓝色入射光的内入射角包括至少4个不同的入射角,其中每个入射角与至少4个不同的入射角的所有其他入射角分开1.0度或更多。

[0244] 入射光分别以从+18.785度到+35.946度的内反射角(相对于表面法线)反射,并且反射光具有与入射光相同的波长。本领域的技术人员认识到,入射光及其反射是可互换的,使得在463nm入射光具有范围在+18.785度到+35.946度之间的内入射角的情况下,其关于基本上恒定的反射轴分别以从+8.615度至-8.606度范围内的内反射角反射。

[0245] 第二全息图组被配置为关于基本上恒定的第二反射轴反射位于可见光谱的绿色区域中的入射光,该第二反射轴与光栅介质的表面法线相差至少2.0度。出于本公开的目的,可见光谱的绿色区域中的入射光具有在493nm至577nm范围内的波长。更具体地讲,第二全息图组被配置为关于具有+13.688度的平均反射轴角度的基本上恒定的第二反射轴反射具有522nm波长的绿色入射光,其中(i)绿色入射光具有范围在+7.813度到-8.993度之间的内入射角(相对于表面法线),并且(ii)内入射角包括至少19个不同的入射角,其中每个入射角与至少19个不同的入射角的所有其他入射角分开0.60度或更多。在一些实施方案中,绿色入射光的内入射角包括至少4个不同的入射角,其中每个入射角与至少4个不同的入射角的所有其他入射角分开1.2度或更多。

[0246] 绿色入射光分别以从+19.587度到+36.342度的内反射角反射,并且反射光具有与

入射光相同的波长。本领域的技术人员认识到,入射光及其反射是可互换的,使得在522nm入射光具有范围在+19.587度到+36.342度之间的内入射角的情况下,其关于基本上恒定的反射轴分别以从+7.813度至- 8.993度范围内的内反射角反射。

[0247] 第三全息图组被配置为关于基本上恒定的第三反射轴反射位于可见光谱的红色区域中的入射光,该第三反射轴与光栅介质的表面法线相差至少 2.0度。出于本公开的目的,可见光谱的红色区域中的入射光具有在610nm 至780nm范围内的波长。更具体地讲,第三全息图组被配置为关于具有 +13.691度的平均反射轴角度的基本上恒定的第三反射轴反射具有622nm波长的红色入射光,其中(i)红色入射光具有范围在+10.370度到-8.391度之间的内入射角(相对于表面法线),并且(ii)内入射角包括至少16个不同的入射角,其中每个入射角与至少16个不同的入射角的其他入射角分开0.74度或更多。在一些实施方案中,红色入射光的内入射角包括至少4个不同的入射角,其中每个入射角与至少4个不同的入射角的所有其他入射角分开 1.5度或更多。

[0248] 红色入射光分别以从+17.030度到+35.791度的内反射角反射,并且反射光具有与入射光相同的波长。本领域的技术人员认识到,红色入射光及其反射是可互换的,使得在622nm入射光具有范围在+17.030度到+35.791 度之间的内入射角的情况下,其关于基本上恒定的反射轴分别以从+10.370 度至-8.391度范围内的内反射角反射。

[0249] 如上所述,第一全息图组被配置为关于具有+13.7度的平均反射轴角度的基本上恒定的反射轴反射具有463nm波长的蓝色入射光,其中463nm光以相对于表面法线的从-8.6度到+8.6度范围内的多个内角入射到光栅介质上。第二全息图组被配置为关于具有+13.7度的平均反射轴角度的基本上恒定的反射轴反射具有522nm波长的绿色入射光,其中522nm光以相对于表面法线的从-9.0度到+7.8度范围内的多个内入射角入射到光栅介质上。第三全息图组被配置为关于具有+13.7度的平均反射轴角度的基本上恒定的反射轴反射具有622nm波长的红色入射光,其中622nm光以相对于表面法线的从-8.4度到+10.4度范围内的多个内角入射到光栅介质上。

[0250] 因此,多色斜交镜的反射特性使其能够关于具有+13.7度的平均反射轴角度的基本上恒定的反射轴反射蓝色、绿色和红色入射光,其中蓝色、绿色和红色入射光以相对于表面法线的从-8.4度到+7.8度范围内(16.2度的范围)的内入射角入射到镜上。在实施方案中,斜交镜的反射特性使其能够关于基本上恒定的反射轴反射蓝色、绿色和红色入射光,其中蓝色、绿色和红色入射光以跨越至少4.0度或至少8.0度的多个内入射角入射到光栅介质上。

[0251] 制造斜交镜的多波长方法

[0252] 在制造斜交镜的多波长方法中,在AK233-200光栅介质中记录了六个体积全息图,六个全息图中的每一个全息图都使用其自身唯一的第一记录光束内入射角和第二记录光束内入射角记录。另外,对于六个体积全息图中的每一个全息图,使用可变波长激光器将第一记录光束和第二记录光束的波长连续同步地从403nm调节到408nm。在记录六个体积全息图中的每一个全息图时,第一记录光束和第二记录光束的波长彼此保持相等。根据多波长方法记录六个体积全息图所传输的总能量剂量通常但不一定为 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$,表10提供了制造斜交镜的多波长方法的第一记录光束内入射角和第二记录光束内入射角。由多波长方法制造的斜交镜具有与上述第二实施方案斜交镜相同的反射特性。

[0253] 表10制造斜交镜的多波长方法的记录光束角度

[0254]	全息图	第一记录光束入射角*	第二记录光束入射角*
	1	56.235°	153.001°
	2	57.033°	152.203°
	3	57.813°	151.423°
	4	58.568°	150.668°
	5	59.303°	149.933°
	6	60.018°	149.218°

[0255] *内角,相对于光栅介质表面法线

[0256] 其他斜交镜实施方案

[0257] 可以在包括诸如光敏记录介质的体积电介质的光栅介质中创建斜交镜的实施方案。如本文所述,可通过约束空间电介质调制谱来形成斜交镜实施方案。在实施方案中,通过在光敏记录介质中记录两个或更多个相干光束的干涉图案全息地实现电介质调制。在其他实施方案中,电介质调制可通过其他手段来实现。

[0258] 图15示出了另一个斜交镜实施方案,包括反射轴1561相交的若干斜交镜1500的“自恋者的镜”。自恋者可以坐在收敛点,看到他们自己的若干图像。

[0259] 斜交镜制造

[0260] 根据一个实施方案,可以全息地记录斜交镜。斜交镜可全息地记录或通过根据实施方案的非全息方式制造。

[0261] 全息记录

[0262] 图16A和图16B示出了用于记录斜交镜的附加方法。在图16A中,使用基本准直的记录光束照射光栅介质以产生期望的 $\Delta n(\vec{k})$ 分布。在一个实施方案中,如图16A所示,包括第一记录光束1654A和第二记录光束1655A 的波长为 λ 记录光束对照射光栅介质1610,以记录期望的线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布的第一点状子集,例如最高的空间频率分量 ($\Delta n(\vec{k})$ 的外部尖端)。然后调节记录装置的入射角 θ_1 和 θ_2 ,以产生包括另一第一记录光束1654B和另一第二记录光束1655B的另一组记录光束,其波长亦为 λ 。其他第一和第二记录光束1654B,1655B照射介质,以记录期望的线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布的第二点状子集。使用包括又一第一记录光束1654C和又一第二记录光束1655C的又一组记录光束重复该过程,直到整个期望的线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布被记录。

[0263] 在一些实施方案中,该记录可以在一次连续曝光中进行,其中 θ_r 和 θ_s 被连续地同步调整以产生期望的分布。在其他实施方案中,使用单独、离散的曝光,其中 θ_r 和 θ_s 在曝光过程中是固定的,只在曝光之间发生改变。其他实施方案可以组合这些方法。在一些实施方案中, $\Delta n(\vec{k})$ 可以以任意次序写入。在一些实施方案中,强度可以在一个或两个光束之间变化以控制空间衍射效率分布。在一些实施方案中,可以将相位控制元件(例如,安装在压电致动器上的反射镜)插入一个或两个光束路径中,以控制每个曝光的相位。在一些实施方案中,多于一个斜交镜或宽带斜交镜可能被记录到相同的介质中。

[0264] 在离散曝光的情况下,曝光的数量和角密度足以产生平滑、连续的线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布。本领域技术人员将容易地使用Kogelnik理论计算由离散曝光所产生的每个全息图的角度选择性。在一个实施方案中,以对应于该角度选择性的函数的角度增量进行曝光,例如在衍射效率峰值的四分之一最大值全宽度(FWQM)的角度间隔处进行曝光。在其他实施方案中,为了确保平滑的最终分布,角度曝光密度可以比这更精细。

[0265] 横跨线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布的必要FWQM峰值数可被视为形成该分布所需全息图的同等数量M。因此,可以通过 $\eta = (M/M/\#)^2$ 估计所得斜交镜的最大可能衍射效率,其中 η 是衍射效率,M/#是表征记录介质动态范围的材料参数。本领域技术人员将容易地确定如何根据每个单独曝光的几何结构或相邻曝光的重叠来细化该估计。

[0266] 图16B示出了一个实施方案,其中结合第一棱镜1659A和第二棱镜 1659B以产生光束内角,否则,该光束内角由于光栅介质1610表面处的折射是不可获得的。例如,该方法通常用于制造图12B所示的斜交耦合器。本领域技术人员将容易地理解如何修改图13的构造以实现所需的分布。

[0267] 在一些实施方案中,可选择单个记录波长 λ 以写入整个线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布。例如,在一个实施方案中,可以仅使用405nm激光源写入在所有可见波长范围操作的斜交镜。这具有仅需在单一波长处具有足够记录介质灵敏度的优点,以及简单性的优点。在一些实施方案中,使用多于一个的记录波长。在其他情况下,使用连续可变的波长源。在一个此类实施方案中,记录角 θ_r 和 θ_s 保持恒定,转而改变记录波长以产生整个线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布或其子集。

[0268] 其他制造方法

[0269] 用于制造斜交镜的其他方法落入本发明的范围内。在一个实施方案中,例如,使用传统的光学涂层装置建立非常厚的电介质层结构。该结构通常通过重复传统的宽带反射涂层设计被设计成在子层内产生宽带反射率。然后将厚结构研磨并抛光以产生与涂层成斜角的表面。所得到的结构通常相对于基本上由涂层的法线而不是抛光表面所限定的反射轴呈现出镜像行为,并因此构成斜交镜。在一些实施方案中,精确到原子级的制造方法能够通过一个原子一个原子的方式形成电介质结构来制造斜交反射镜,而无需考虑外表面。

[0270] 非平面反射镜

[0271] 从两种意义上来讲,斜交镜可以说是非平坦的:1)当记录介质的物理形状不平坦时;以及2)当全息条纹不平坦时。

[0272] 非板状反射镜

[0273] 根据本发明的反射镜的实施方案(包括斜交镜、宽带镜和全息镜的示例)包括记录在形状非板状的介质中的全息图。在一个示例中,在一个实施方案中,记录层被铸造成具有均匀厚度,但是是在弯曲表面上。在另一个例子中,利用非均匀记录层(例如,楔形)。在又一个示例中,模制任意形状(例如,球形)。在这些非板状镜的情况下,“斜交镜”的名称是否合适取决于相关表面的几何形状。非板状全息镜通常呈现宽带镜像特性。

[0274] 具有非平面全息条纹的反射镜

[0275] 在一些实施方案中,期望将光功率或其他有意识的像差引入到反射中。这可以通过局部地改变反射轴的方向利用反射镜的实施方案实现,例如使得平面波入射光束被反射以形成球面反射光束,如常规抛物面镜所发生的那样。例如,可以通过在图13的制造方法中

使用一个会聚光束和一个发散光束,并且通过在改变波长而不是入射角的同时进行记录来制造此类斜交镜。也可以通过抛光沉积在非平坦表面上的电介质层来制造此类反射镜,或者通过使用先进的原子级精确制造方法来制造。

[0276] 其他制造实施方案

[0277] 一些全息记录系统实施方案包含反射镜、透镜和棱镜,以将第一记录光束和第二记录光束引导到光栅介质中,使得在大致相同的光栅介质中的位置处,以变化的记录光束内角记录多个全息图,而无需光栅介质的平移。

[0278] 在一些实施方案中,除了耦合棱镜以外,还可以使用棱镜来制造斜交镜。在一些实施方案中,可以使用各种耦合棱镜和平坦的玻璃片。在一些实施方案中,可以使用多个波长 λ_N 的多个光束 E_{r_N} 和 E_{s_N} 。在一些实施方案中,可以使用多个波长来制造多个离散的线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布。在一些实施方案中,可以使用多个波长来制造线段状 $\Delta n(\vec{k})$ 分布,该分布可能是连续的或者可能包括间隔很近的部分。在一些实施方案中,信号和/或参考光束的入射角可以被调整以补偿样本材料的收缩。在一些实施方案中,可以旋转样本以补偿样本材料的收缩。在一些实施方案中,可以改变波长以补偿样本材料的收缩。

[0279] 替代实施方案和变型形式

[0280] 附图中示出和/或上面描述的各种实施方案及其变型形式仅仅是示例性的,并不旨在限制本发明的范围。应当理解,考虑到本公开的益处,本发明的许多其他变型形式已经被考虑,这对于本领域的普通技术人员来说是显而易见的。在所附权利要求书中阅读到的本发明的所有变型形式都旨在并涵盖在本发明的范围内。

[0281] 术语

[0282] 除非在背景中另有明确说明,否则在整个文件包括权利要求书中,本节中用引号(“”)表示的术语和短语都具有本术语部分所赋予它们的含义。此外,如果适用,所述定义适用于所定义的字词或短语的单数和复数变型,而不管字词或短语的情况如何。

[0283] 说明书中对“一个实施方案”、“实施方案”、“另一个实施方案”、“优选实施方案”、“替代实施方案”、“一个变型形式”、“变型形式”以及类似短语的引用意味着结合实施方案或变型形式描述的特定特征、结构或特性包括在本发明的至少一个实施方案或变型中。在说明书各处使用的短语“在一个实施方案中”、“在一个变型形式中”或类似的短语不一定意味着指代相同的实施方案或相同的变型形式。

[0284] 如在本说明书和所附权利要求书中使用的术语“大约”是指给定值 $\pm 10\%$ 。

[0285] 在本说明书和所附权利要求书中使用的术语“约”是指给定值 $\pm 20\%$ 。

[0286] 在本说明书和所附权利要求书中使用的术语“通常”是指多半地或大部分。

[0287] 在本说明书和所附权利要求书中关于反射光使用的术语“主要”是指由光栅结构反射的光。主要以所述角度反射的光包括比以任何其他角度反射的光更多的光(不包括表面反射)。主要关于所述反射轴反射的光包括比关于任何其他反射轴反射的反射光更多的反射光(不包括表面反射)。当考虑主要反射光时,不包括由设备表面反射的光。

[0288] 在本说明书和所附权利要求中使用的术语“反射轴”是指平分入射光线相对于其反射光线的角度的轴。入射光线、反射轴和反射光线全部存在于一个共同的平面中,这个平面可以被称为入射平面。斜交镜的入射平面不必与表面法线重合,尽管这是可以的。入射光线相对于反射轴的入射角的大小等于反射光线相对于反射轴的反射角的大小。为了上述

“反射轴”的定义,角度是内角。对于常规的电介质和金属反射镜,反射轴与表面法线重合,即反射轴垂直于反射镜表面,入射平面也是如此。相反,根据本发明的斜交镜的实施方案可以具有不同于表面法线的反射轴,或者可以具有与表面法线重合的反射轴。斜交镜的反射轴是否与表面法线重合不取决于斜交镜的入射平面是否与表面法线重合。入射角和反射角通常但不一定是凭经验确定的,通常使用多次测量(通常为三次或更多次)来产生平均值。

[0289] 术语“反射”和类似术语在通常“衍射”被认为是适当术语的一些情况下用于本公开中。“反射”的使用与斜交镜所展现的镜像特性一致,并且有助于避免可能混淆的术语。例如,在称光栅结构被配置为“反射”入射光的情况下,常规技术人员可能更倾向于说光栅结构被配置为“衍射”入射光,因为通常认为光栅结构通过衍射作用于光。然而,术语“衍射”的此类使用将导致出现诸如“入射光关于大致稳定的反射轴衍射”的表述,这可能造成困惑。因此,在表述为入射光被光栅结构“反射”的情况下,依据本公开,本领域的普通技术人员将意识到光栅结构实际上是通过衍射机制对光进行“反射”的。“反射”的此类使用在光学中并非没有先例,常规电介质反射镜就通常被表述为“反射”光,尽管衍射在这种反射中发挥主要作用。本领域技术人员因此认识到,大多数“反射”包括衍射的特性,并且由斜交镜或其部件进行的“反射”也包括衍射。

[0290] 在本说明书和所附权利要求书中使用的术语“角度间隔”是指在所述入射角范围内,入射到斜交镜上的多个光束之间的角度间隔。

[0291] 在本说明书和所附权利要求书中使用的术语“全息图”和“全息光栅”是指记录由多个交叉光束之间的干涉产生的干涉图案。全息图或全息光栅是光栅结构的一个示例。

[0292] 虽然本文已经描述和图示了各种发明实施方案,但是本领域普通技术人员将容易地想到各种其他手段和/或结构,用于执行相应功能,并且/或者获得本文所述的相应结果和/或益处中的一个或多个,并且此类变型形式和/或修改中的每一个都被认为是在本文描述的发明实施方案的范围内。更一般地,本领域技术人员将容易理解,本文所述的所有参数、尺寸、材料和构造都是示例性的,并且实际参数、尺寸、材料和/或构造将取决于特定应用或使用本发明的教导的应用。本领域的技术人员在仅仅使用常规实验方法的情况下就将认识到或者能够确定本文所述的特定发明实施方案的许多等同形式。因此,应当理解,前述实施方案仅以示例性的方式呈现,并且在所附权利要求书及其等同内容的范围内,可以以不同于具体描述和要求保护的方式来实践发明实施方案。本公开的发明实施方案针对本文描述的每个单独的特征、系统、制品、材料、套件和/或方法。此外,此类特征、系统、制品、材料、工具、套件和/或方法中的两个或多个的任意组合都包括在本公开的发明范围内(如果此类特征、系统、制品、材料、工具、套件和/或方法相互之间未有矛盾)。

[0293] 上述实施方案可以以多种方式中的任意一种来实现。例如,可以使用硬件、软件或其组合来实施设计和制造本文公开的技术的实施方案。当在软件中实施时,不论是在单个计算机中提供还是分布在多个计算机中,软件代码可以在任何合适的处理器或处理器集合上执行。

[0294] 此外,应该理解,计算机可以体现为任意种形式,诸如机架式计算机、台式计算机、膝上型计算机或平板电脑。另外,计算机可以嵌入在通常不被视为计算机但具有适当处理能力的设备中,包括个人数字助理(PDA)、智能电话或任何其他合适的便携式或固定电子设备。

[0295] 另外,计算机可具有一个或多个输入和输出设备。除此之外,这些设备可用于呈现用户界面。可用于提供用户界面的输出设备示例包括打印机或用于输出的视觉呈现的显示屏,以及扬声器和用于输出的听觉呈现的其他声音生成设备。可以用于用户界面的输入设备示例包括键盘和指向设备诸如鼠标、触控板以及数字化平板电脑。又如,计算机可以通过语音识别或其他可听格式接收输入信息。

[0296] 此类计算机可以通过采用任意形式的一个或多个网络包括局域网或广域网(诸如企业网络、智能网络(IN)或互联网)进行互连。此类网络可以基于任何合适的技术并且可以根据任何合适的协议进行操作,并且可以包括无线网络、有线网络或光纤网络。

[0297] 本文概述的各种方法或过程(例如,设计和制造上面公开的耦合结构和衍射光学元件)可被编码为可在采用各种操作系统或平台中的任何一个的一个或多个处理器上执行的软件。另外,可以使用多种合适的编程语言和/或编程或脚本工具中的任何一种编写此类软件,并且所述软件还可以编译为在框架或虚拟机上执行的可执行机器语言代码或中间代码。

[0298] 在这方面,各种发明构思可以体现为使用一个或多个程序编码的计算机可读存储介质(或多个计算机可读存储介质)(例如,计算机存储器、一个或多个软盘、压缩盘、光盘、磁带、闪存,现场可编程门阵列或其他半导体设备中的电路配置,或其他非暂时性介质或有形计算机存储介质),所述一个或多个程序当在一个或多个计算机或其他处理器上执行时执行实施上面讨论发明的各种实施方案的方法。计算机可读介质可以是可传输的,使得其上存储的一个或多个程序可以被加载到一个或多个不同的计算机或其他处理器上,以实施如上所述的本发明的各个方面。

[0299] 术语“程序”或“软件”在本文中作为通常意义使用,以指代可用于编程计算机或其他处理器的任意类型的计算机代码或计算机可执行指令集,以实施上文讨论的实施方案的各个方面。另外,应该理解,根据一个方面,执行时实施本发明的方法的一个或多个计算机程序不需要驻留在单个计算机或处理器上,而是可以以模块化方式分布在多个不同的计算机或处理器上以实现本发明的各个方面。

[0300] 计算机可执行指令可以有多种形式,诸如由一个或多个计算机或其他设备执行的程序模块。一般来说,程序模块包括执行特定任务或实现特定抽象数据类型的例程、程序、对象、组件、数据结构等。通常,程序模块的功能可以根据需要在各种实施方案中组合或分布。

[0301] 另外,数据结构可以以任何合适的形式存储在计算机可读介质中。为了简化说明,数据结构可以示出为具有通过数据结构中的位置相关的字段。此类关系同样可以通过为在计算机可读存储介质中具有表达各字段之间关系的位置的字段分配存储区间来实现。然而,可以使用任何合适的机制来建立数据结构字段中的信息之间的关系,包括通过使用指针、标签或建立数据元素之间关系的其他机制。

[0302] 另外,各种发明构思可以体现为已提供示例的一个或多个方法。作为该方法的一部分执行的动作可以以任何合适的方式进行排序。因此,可以构造在其中以不同于所示顺序执行动作的实施方案,其可以包括同时执行一些动作,即使在说明性实施方案中示出为顺序动作。

[0303] 如本文所定义和使用的定义应理解为控制字典定义、通过引用并入的文献中

的定义和/或所定义术语的普通含义。

[0304] 除非有明确的相反说明,否则在本文说明书和权利要求书中使用的不定冠词“一”和“一个”应理解为意指“至少一个”。

[0305] 如在本文说明书和权利要求书中所使用的短语“以及/或者”应理解为意指以此结合的元素的一者或两者,即在某些情况下结合地存在,而在其他情况中则分离地存在。通过“和/或”列出的多个元素应该以相同的方式解释,即如此连接的元素中的一者或多者。除了通过“和/或”子句明确标识的元素之外,不管与具体标识的元素相关还是不相关,其他元素可以可选地存在。因此,作为非限制性示例,当与开放性语言(诸如“包括”)结合使用时,“A和/或B”的引用在一个实施方案中可以仅指A(可选地包括除B以外的元素);在另一个实施方案中,仅指B(可选地包括除A以外的元素);在又一个实施方案中,指A和B两者(可选地包括其他元素);等。

[0306] 如在本文说明书和权利要求书中所使用的,“或者”应被理解为具有与如上所定义的“和/或”相同的含义。例如,当用于分离列表中的项目时,“或者”或“和/或”应被解释为包含性的,即包括若干个元素或元素列表中的至少一个(但也包括多于一个)元素,并且可选地包括其他未列出项目。只有明确指出相反情况的术语,诸如“仅一个”或“恰好一个”,或者当在权利要求书中使用时,“由...组成”将指包括若干元素或元素列表中的恰好一个元素。通常,只有当前面出现排他性术语诸如“任一”、“其中的一个”、“仅其中的一个”或“其中的恰好一个”时,本文使用的术语“或者”才应被解释为指示排他性选择(例如,“一个或另一个,但非两者”)。当在权利要求书中使用时,“基本包含”应具有其在专利法领域中使用的普通含义。

[0307] 如在本文中的说明书和权利要求书中所使用的,关于一个或多个元素列表的短语“至少一个”应该理解为意指选自元素列表中的任意一个或多个元素中的至少一个元素,但不一定包括元素列表中特别列出的每个元素中的至少一个,并且不排除元素列表中元素的任意组合。该定义还允许短语“至少一个”所指的元素列表内明确标识的元素以外的元素可选地存在,而不管所述元素与明确标识的那些元素相关还是不相关。因此,作为非限制性示例,在一个实施方案中,“A和B中的至少一个”(或者等同地,“A或B中的至少一个”;或者等同地,“A和/或B中的至少一个”)可以指至少一个(可选地包括多于一个)元素,包括A而不包括B(并且可选地包括除B以外的元素);在另一个实施方案中,指至少一个(可选地包括多于一个)元素,包括B而不包括A(并且可选地包括除A以外的元素);在又一个实施方案中,指至少一个(可选地包括多于一个)元素,包括A,以及至少一个(可选地包括多于一个)元素,包括B(并且可选地包括其他元素);etc.=等。

[0308] 在权利要求书以及上述说明书中,诸如“包含”、“包括”、“承载”、“具有”、“含有”、“涉及”、“保留”、“由...组成”等所有过渡型短语应被理解为是开放的,即意味着包括但不限于。如在美国专利局手册专利考察程序第221.03节所述,只有过渡型短语“由...组成”和“基本上由...组成”应分别是封闭式或半封闭式过渡型短语。

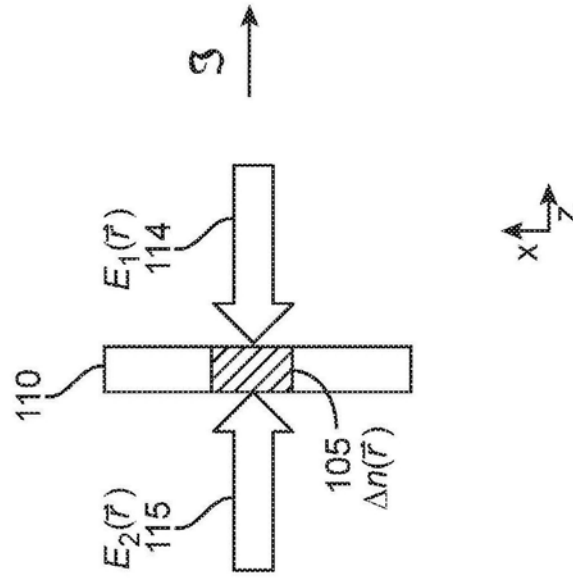


图1A

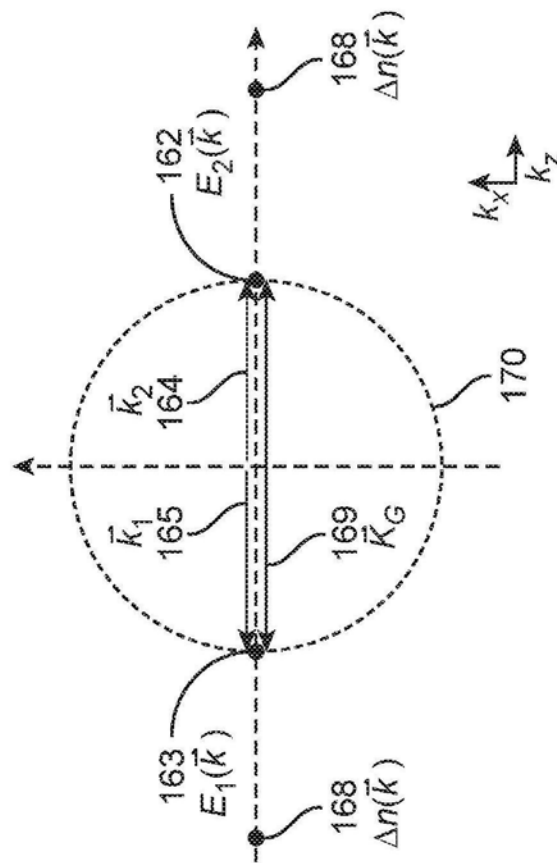


图1B

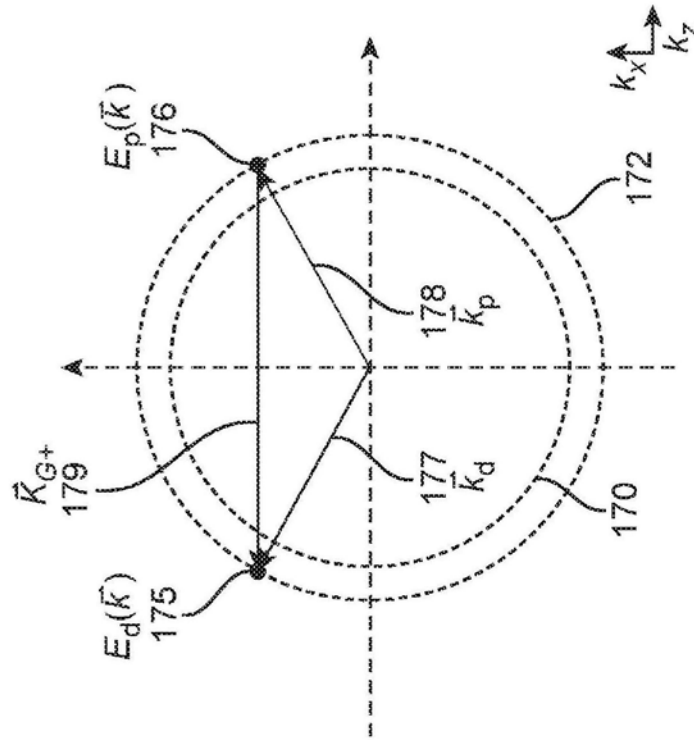


图2A

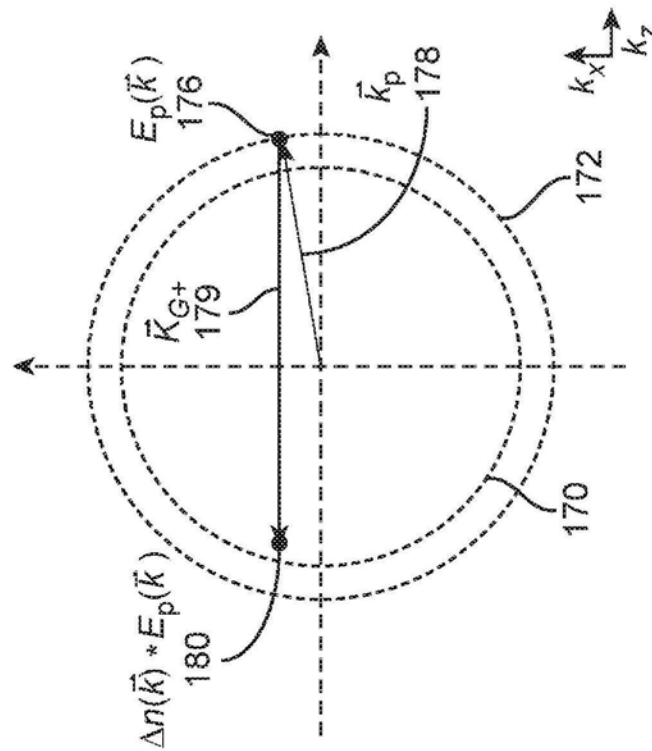


图2B

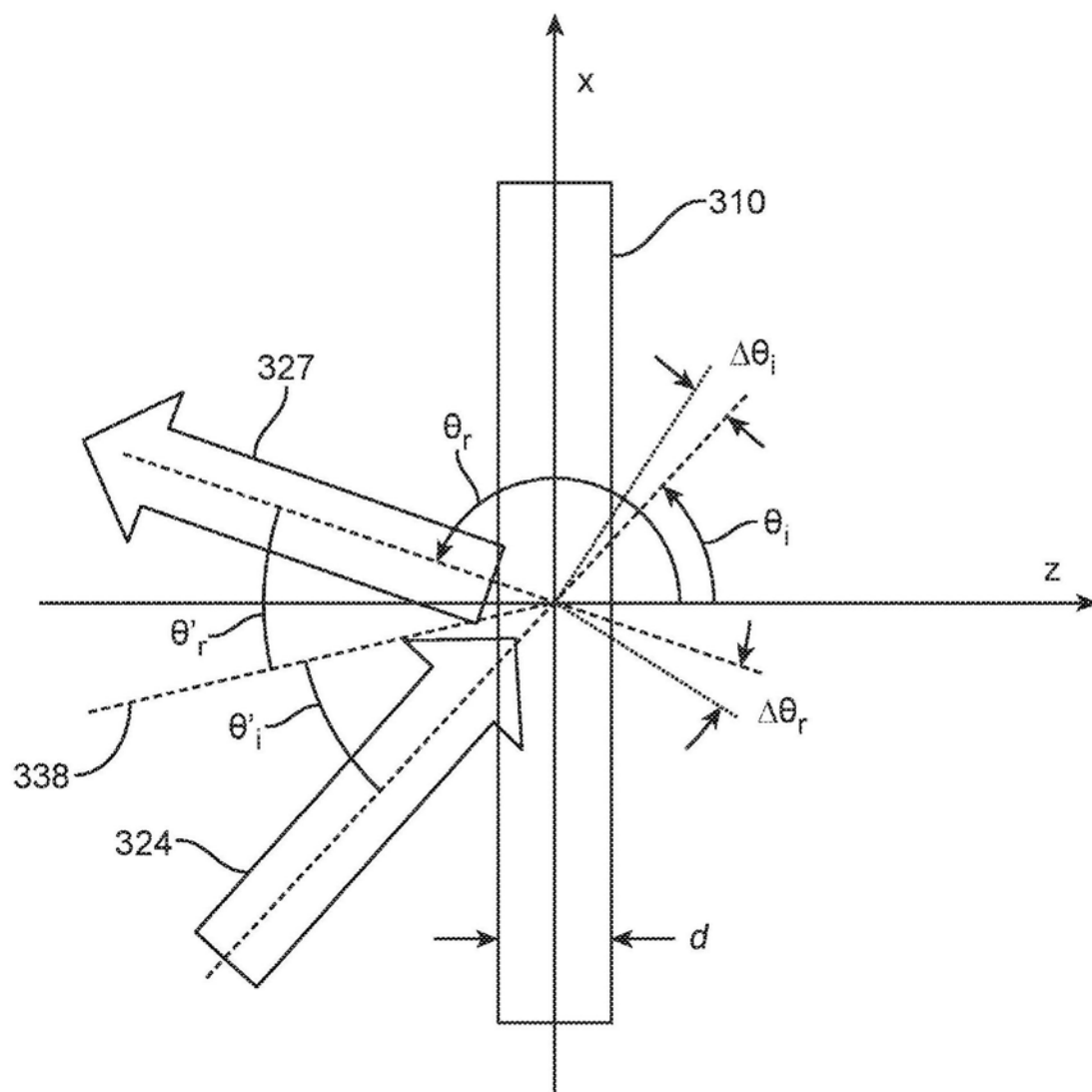


图3

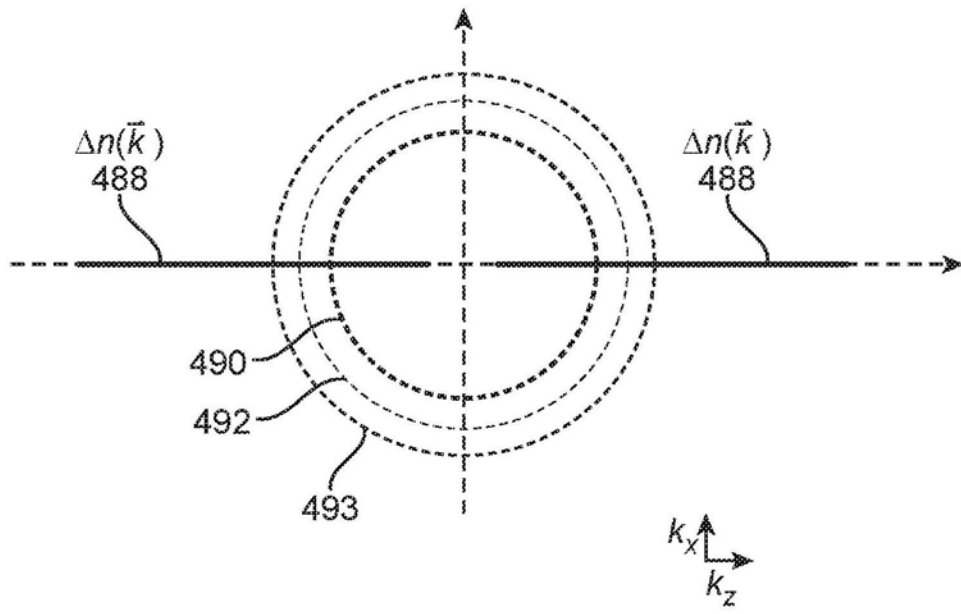


图4A

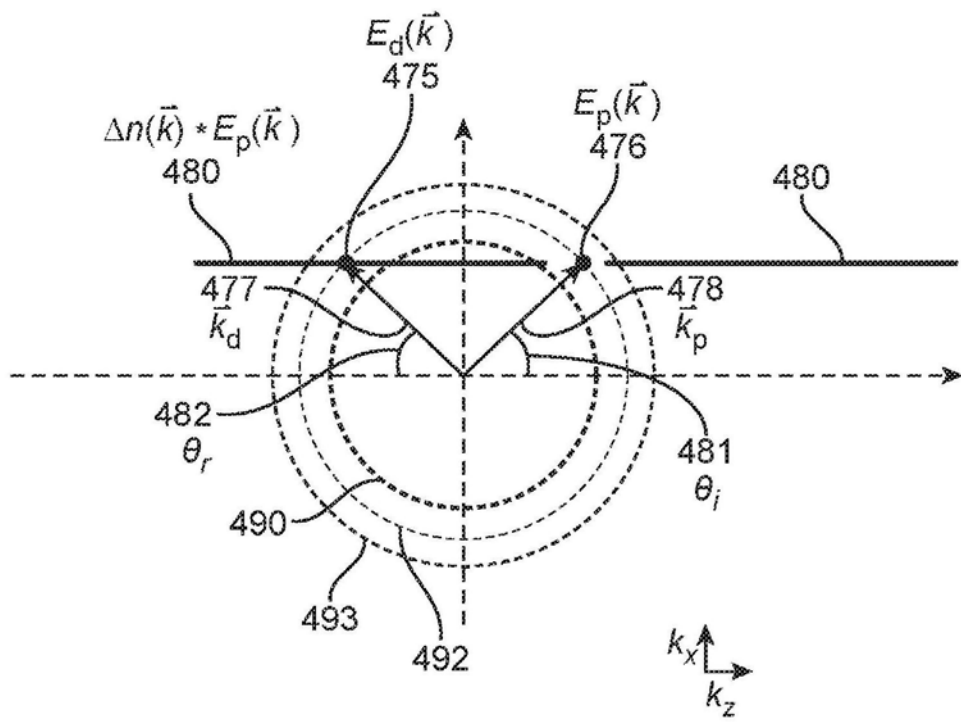


图4B

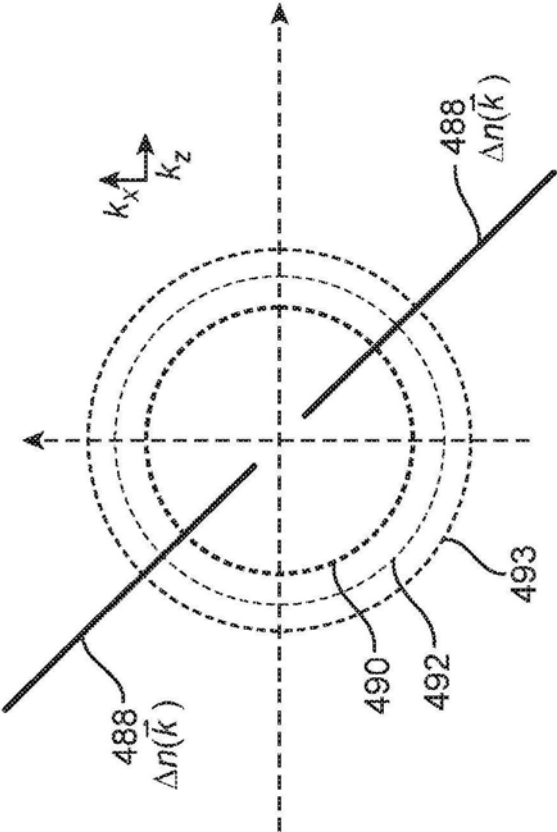


图5A

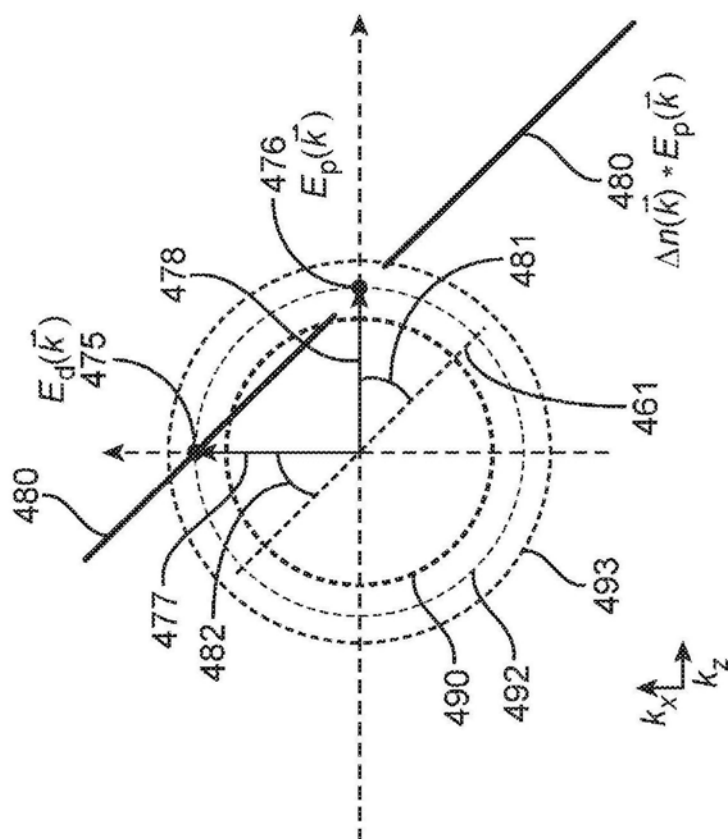


图5B

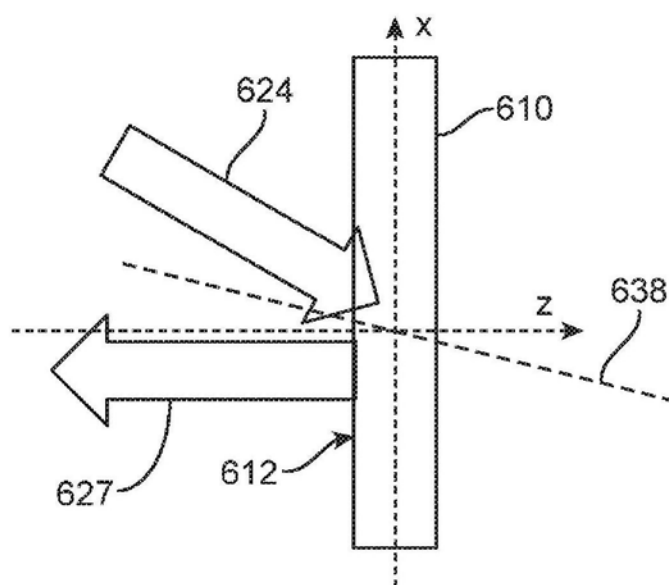


图6A

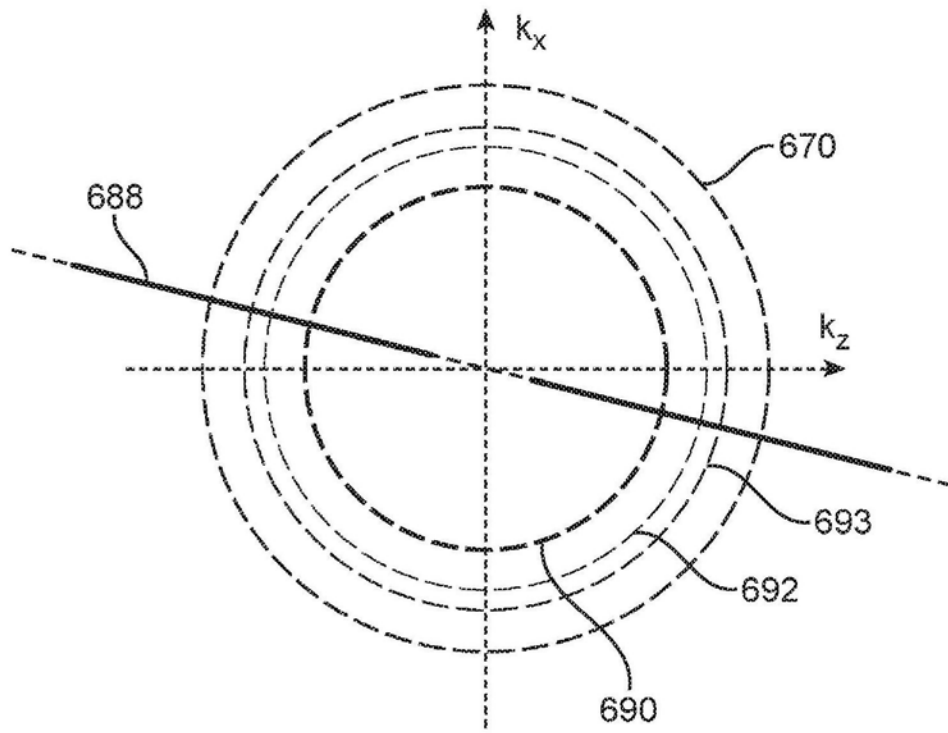


图6B

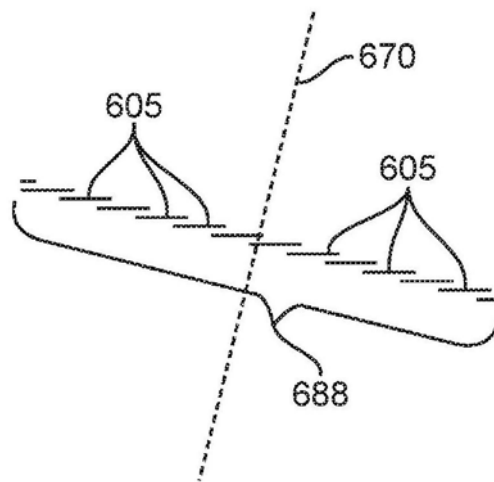


图6C

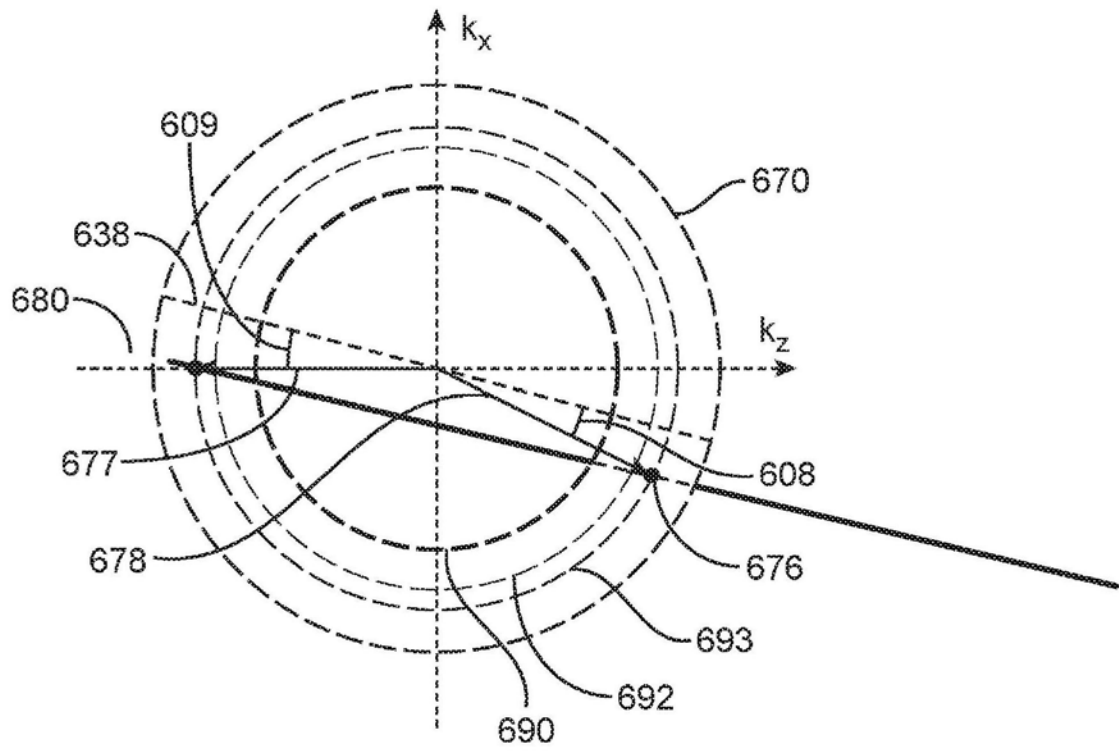


图6D

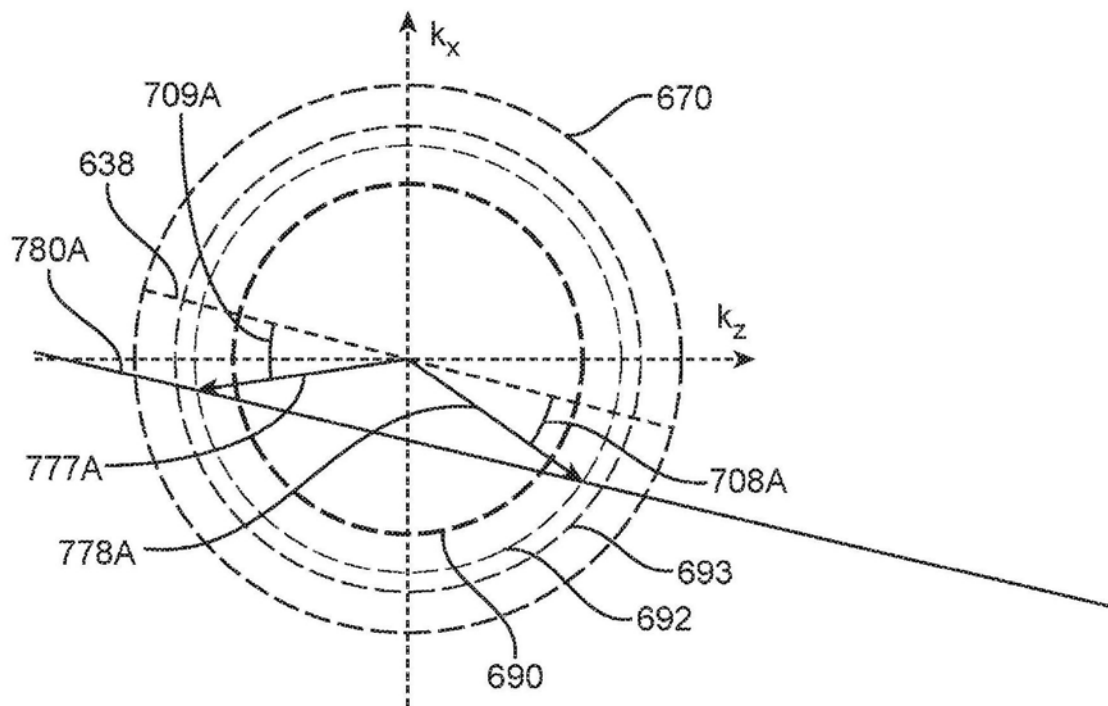


图7A

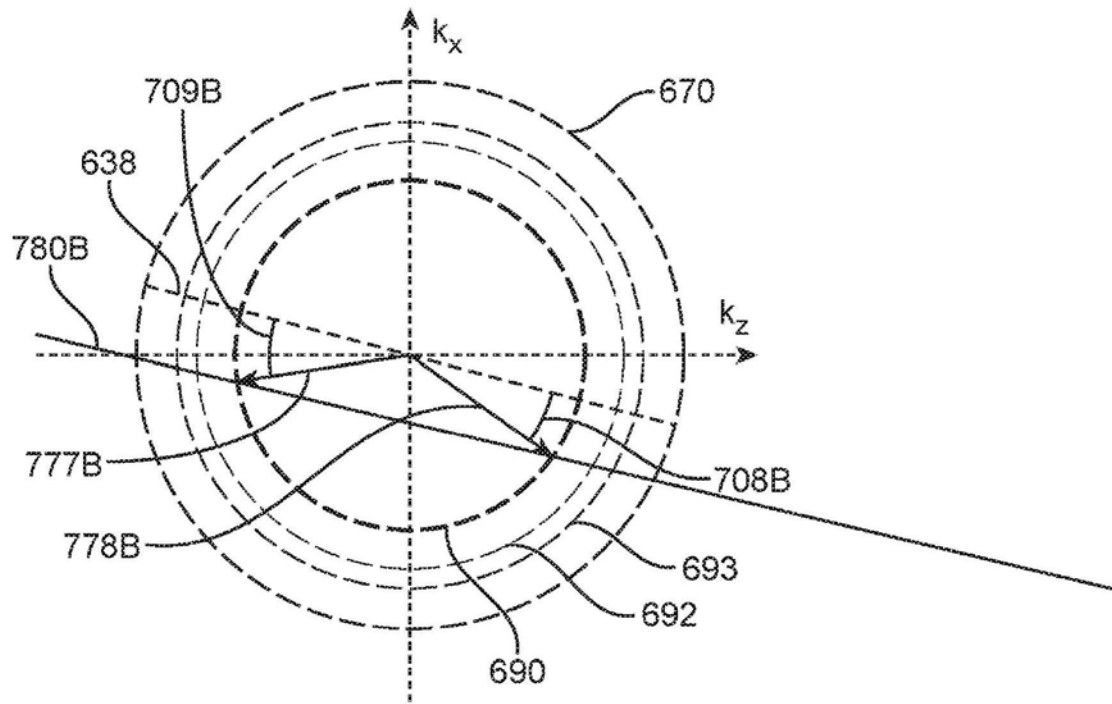


图7B

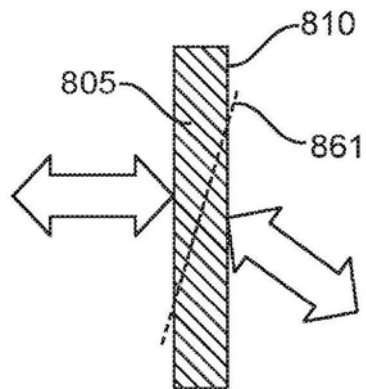


图8A

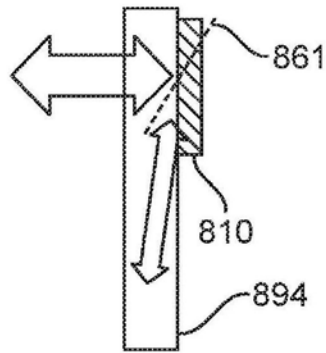


图8B

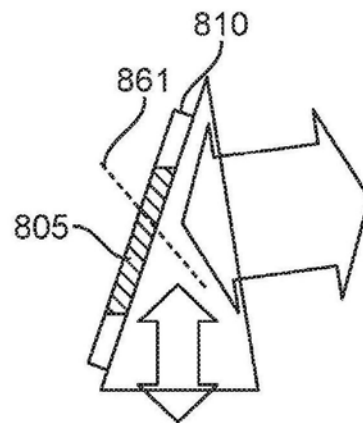


图8C

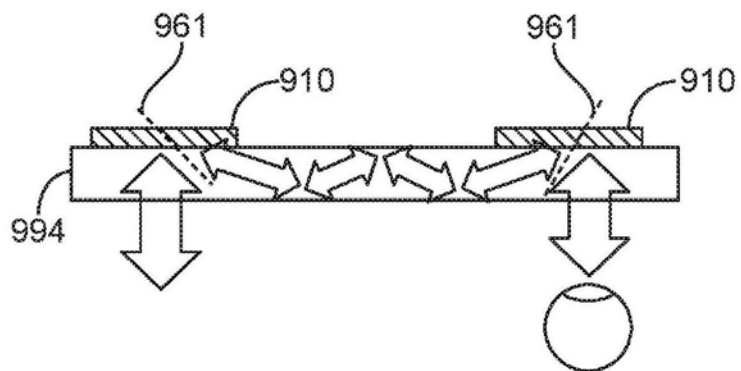


图9A

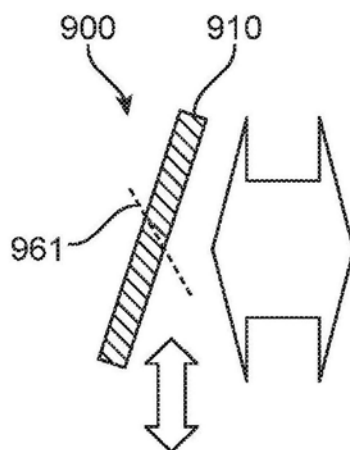


图9B

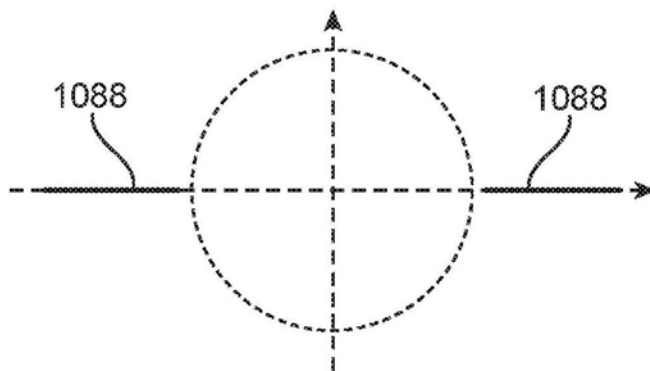


图10A

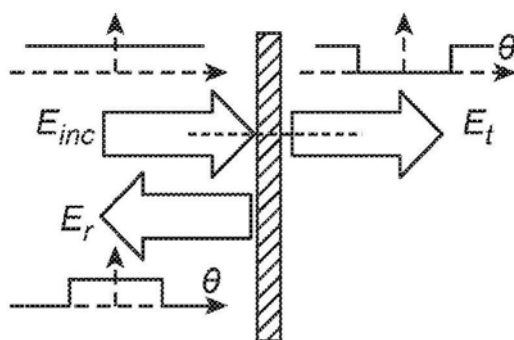


图10B

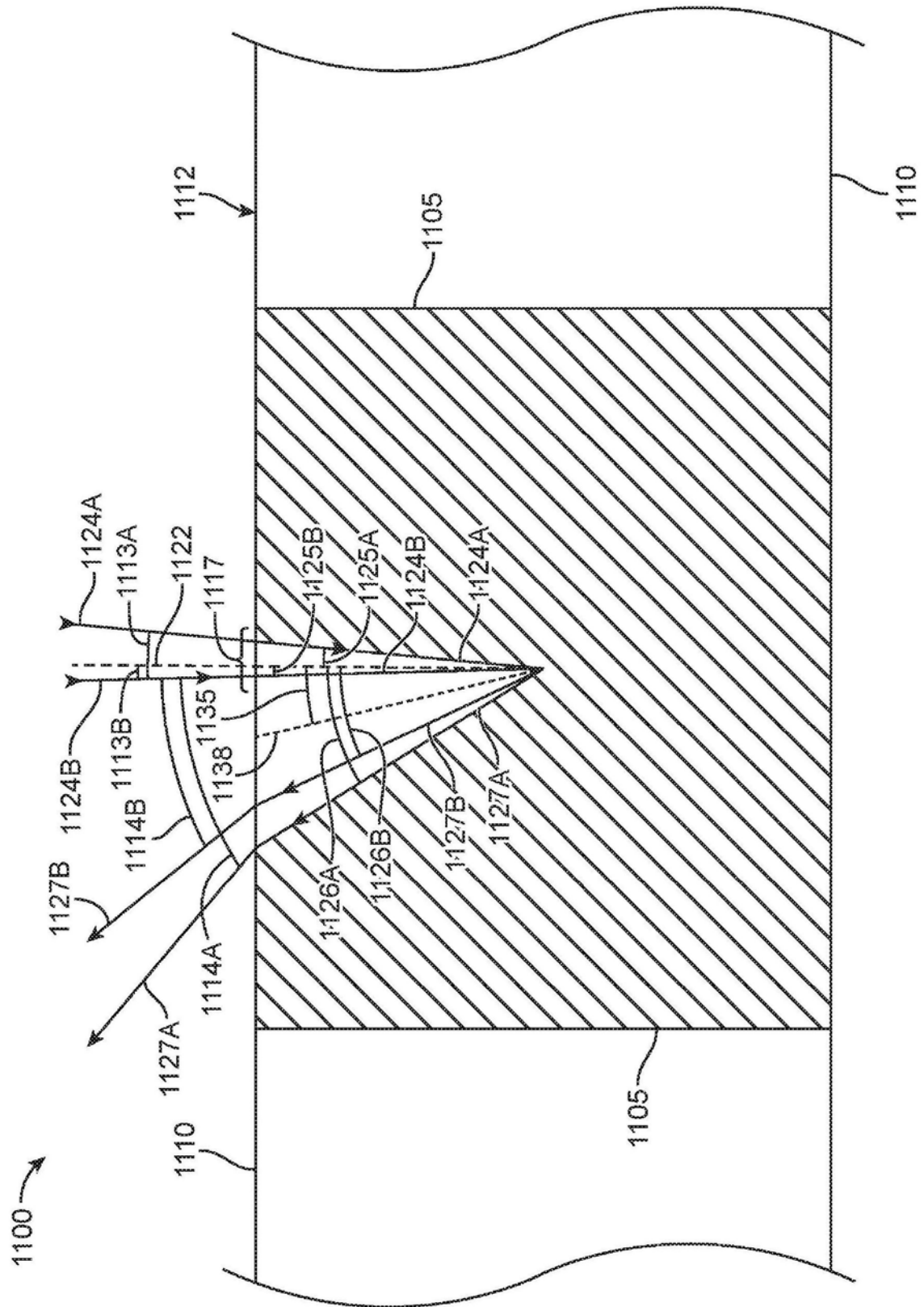


图11A

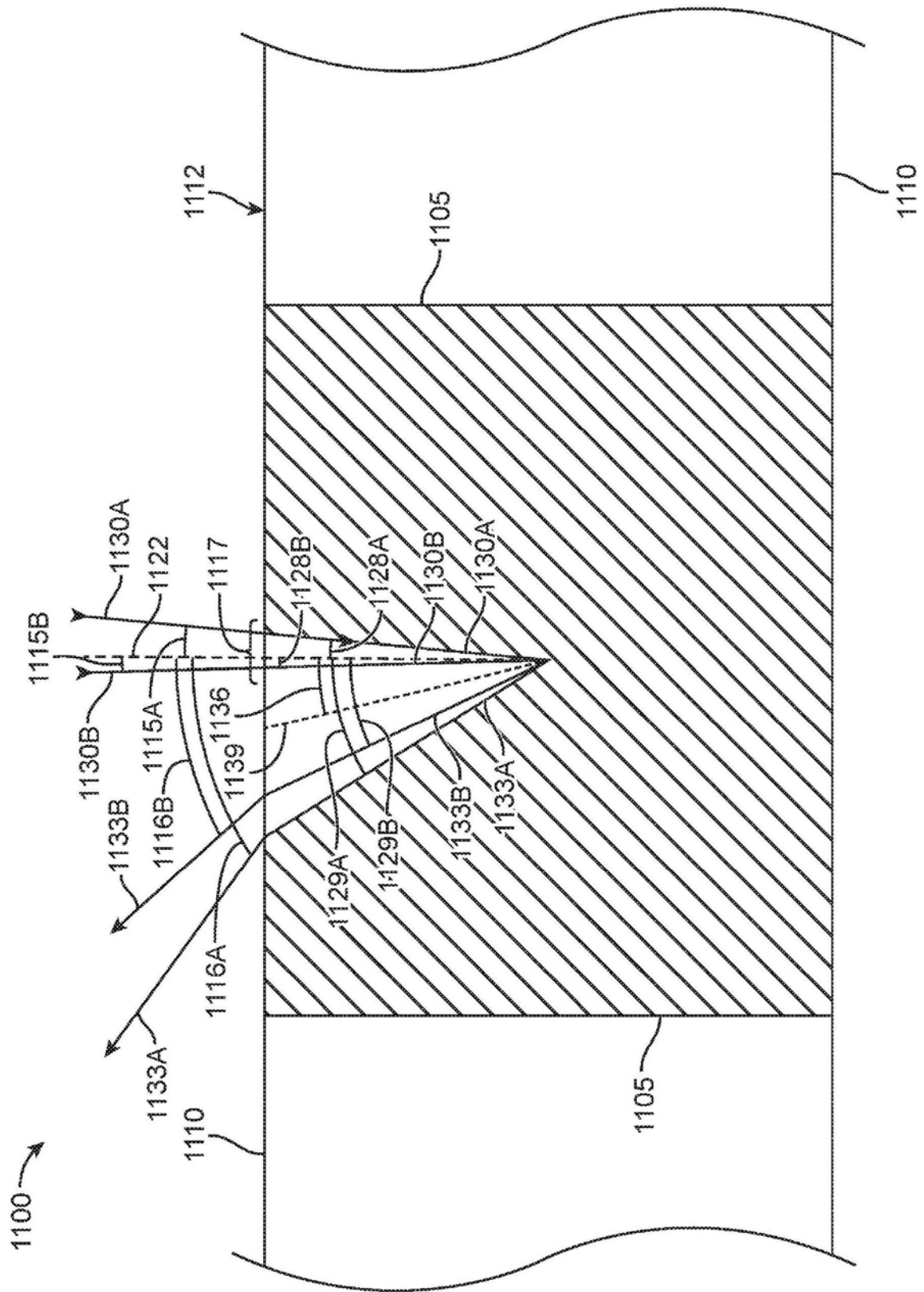


图11B

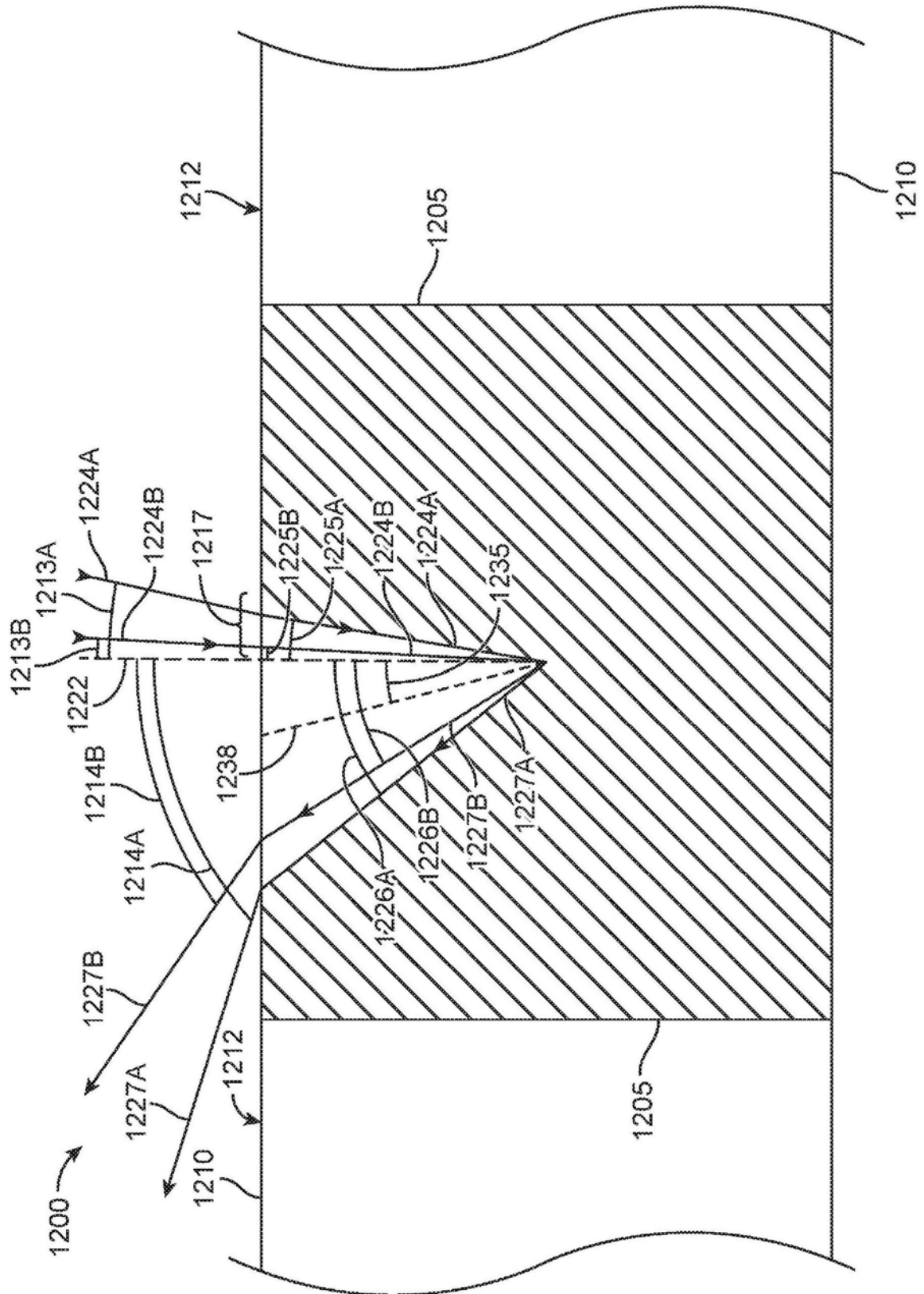


图12A

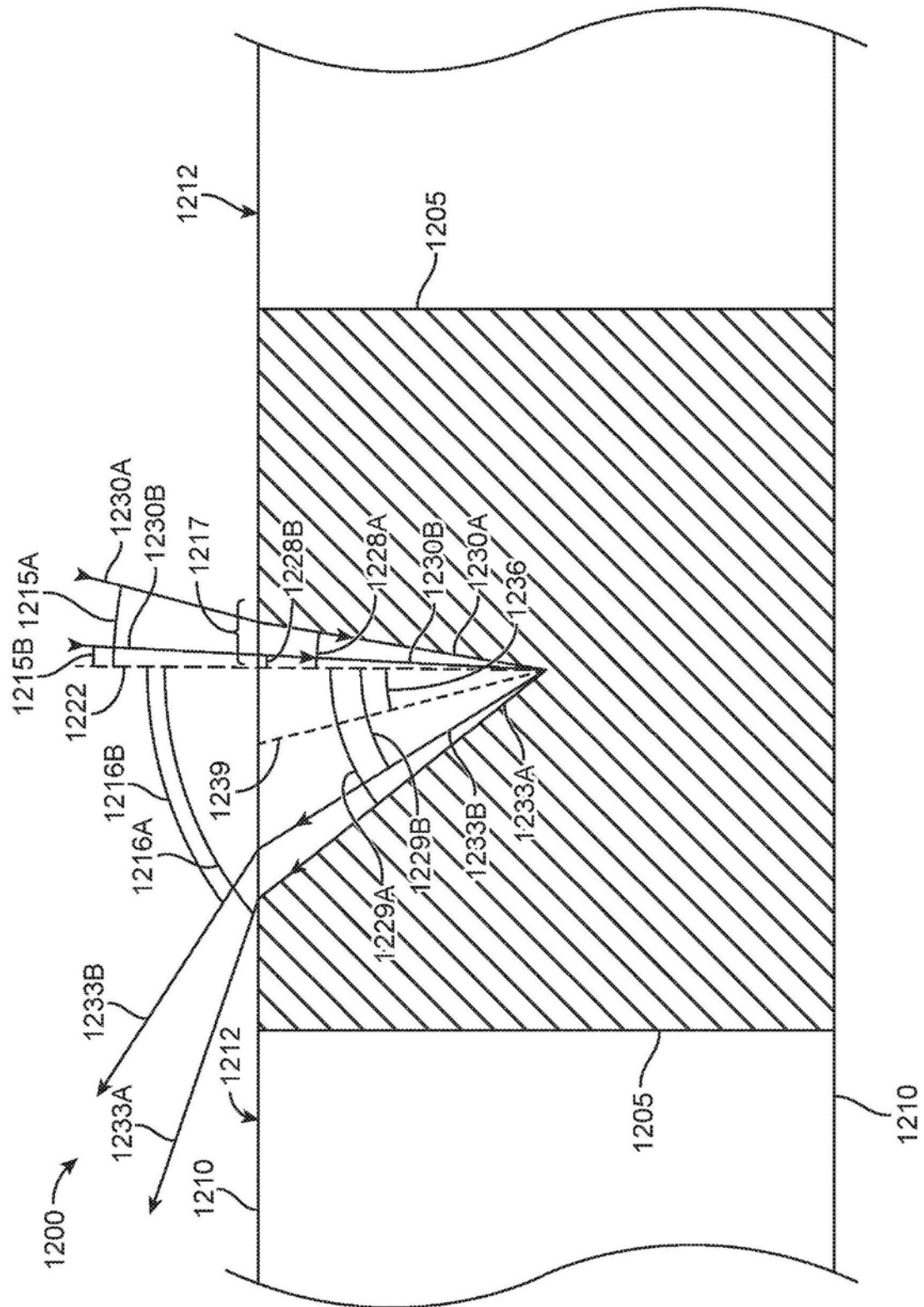


图12B

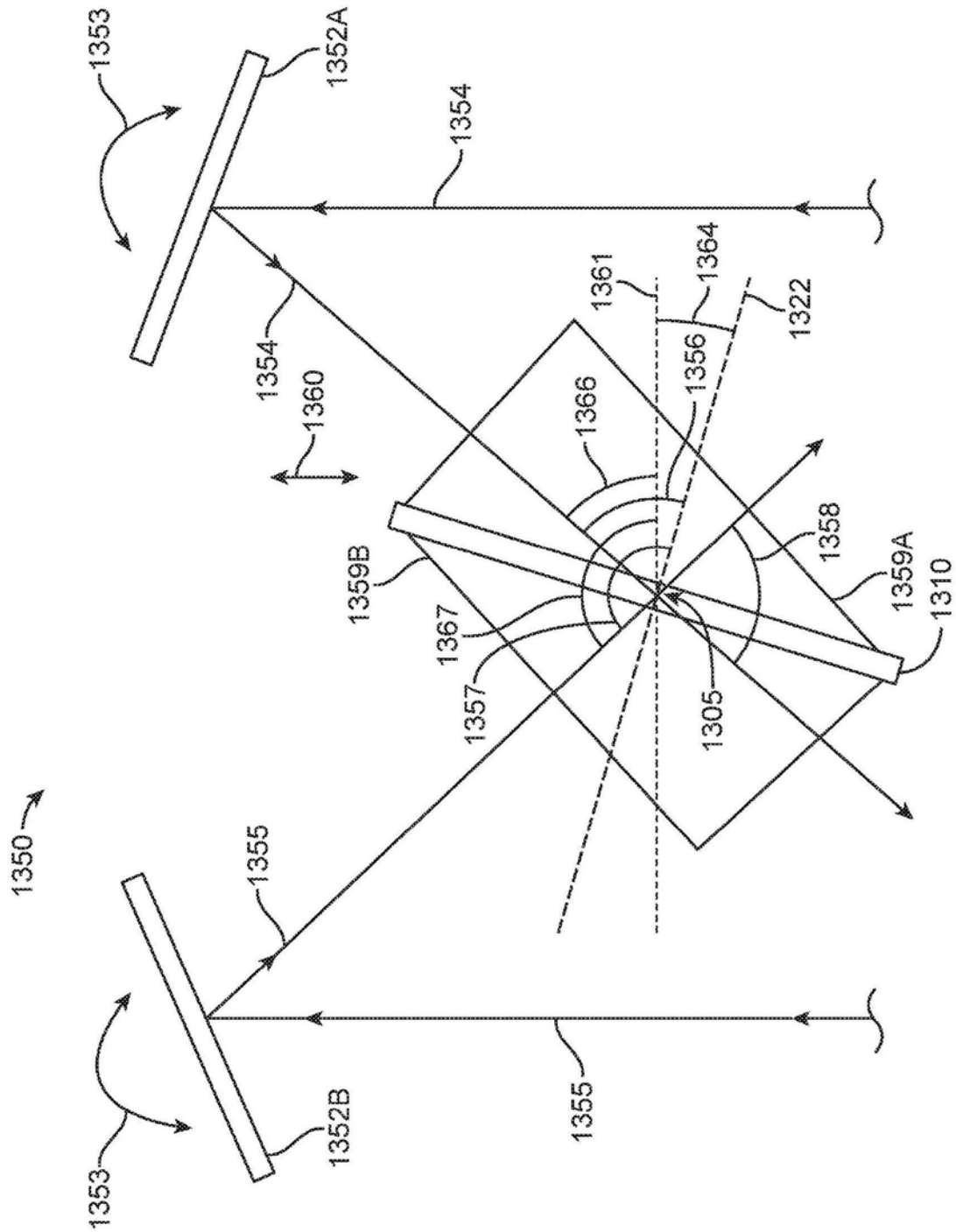


图13

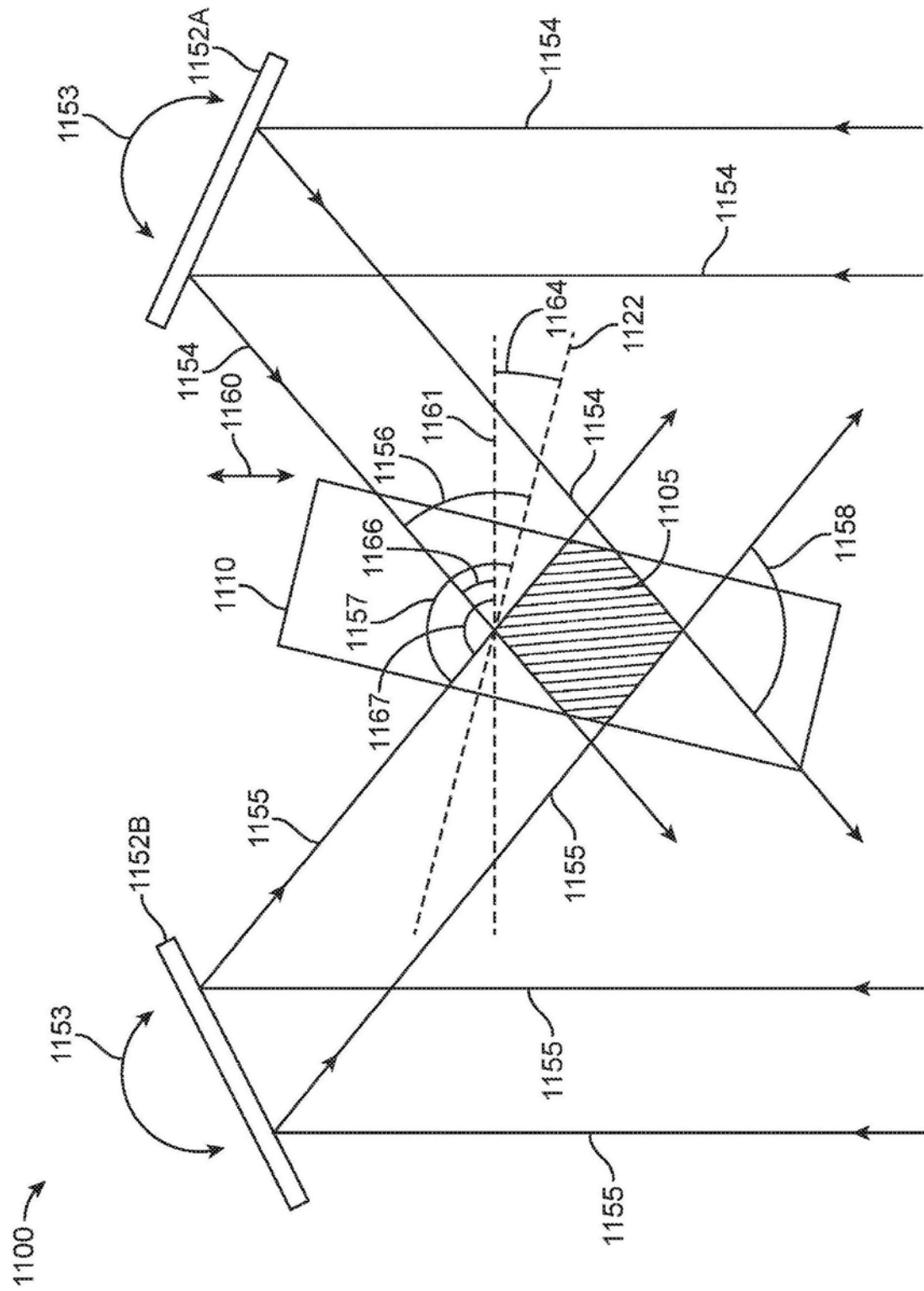


图14

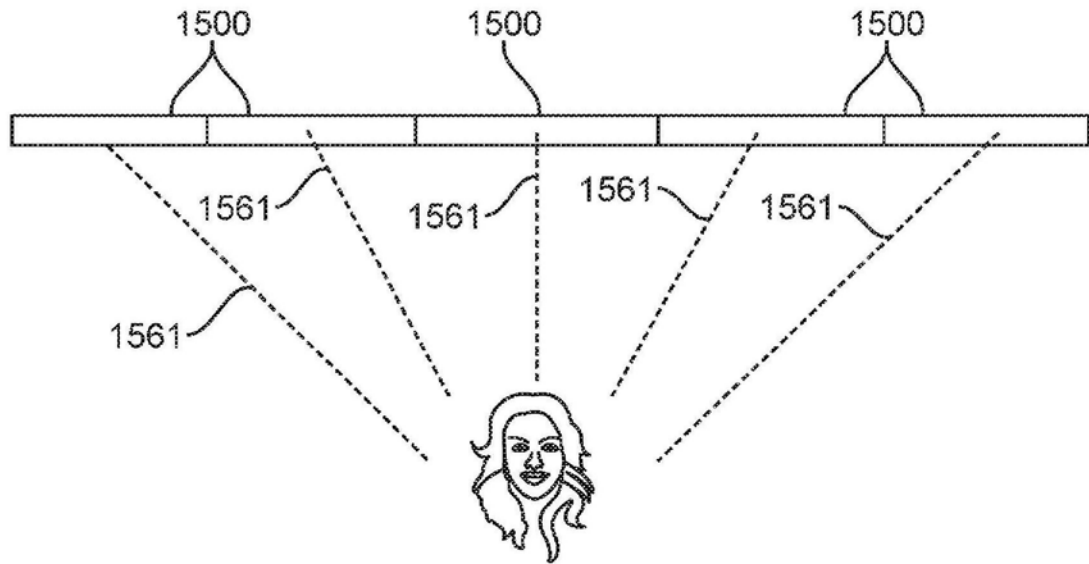


图15

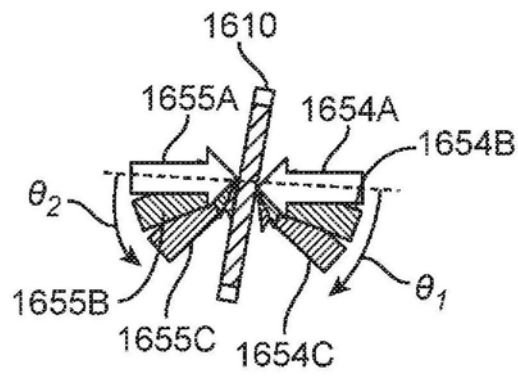


图16A

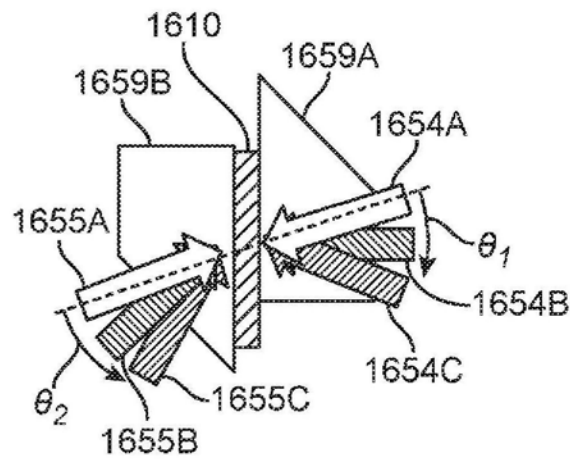


图16B