



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115826239 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 21

(21) 申请号 202211343077.X

(22) 申请日 2018.10.15

(30) 优先权数据

255049 2017.10.16 IL

257039 2018.01.21 IL

(62) 分案原申请数据

201880081103.1 2018.10.15

(71) 申请人 奥里姆光学有限公司

地址 以色列雷霍沃特

(72) 发明人 Y.阿米泰 M.阿米泰

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

司 72001

专利代理师 周学斌 陈岚

(51) Int. Cl.

G02B 27/01 (2006.01)

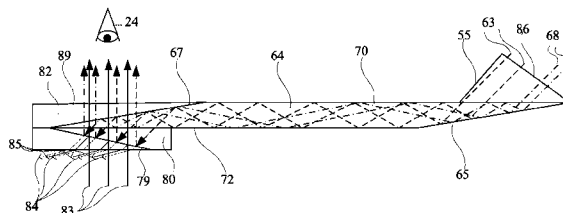
权利要求书1页 说明书26页 附图28页

(54) 发明名称

高效紧凑型头戴式显示系统

(57) 摘要

本发明涉及高效紧凑型头戴式显示系统。提供了一种光学设备,包括输入光孔和输出光孔(86、89);透光基板(64);位于该基板外部的耦进元件(55),用于将具有视场的光波耦合到该基板中;第一平坦反射表面(65),其位于透光基板的两个主表面(70、72)之间,用于来自主表面的耦进光波的全内反射;以及第二平坦反射表面(67),其位于两个主基板表面之间,用于将光波耦出该基板,以便由光学元件(80)重定向到观看者的眼睛中。基板和耦进元件(55)由有很大不同的光学材料形成,并且从基板耦出到观看者的眼睛中的光波的视场与在基板内部耦合的光波的视场之间的比率大幅大于基板的折射率。



1. 一种光学设备,包括:  
透光基板,其具有至少两个平行的主表面、边缘和输出光孔;  
光学元件,其用于将光波耦合到所述基板中以实现全内反射;  
至少一个重定向元件,其位于所述基板外部,以及  
至少一个反射表面,其具有位于所述透光基板的两个主表面之间的至少一个有效侧,用于将光波耦出所述基板,  
其中在所述基板内部被捕获的光波通过相对于所述基板主表面的法线大幅倾斜的输出光孔从所述基板耦出,并且从所述重定向元件反射到观察者的眼睛中,以及  
其中所述重定向元件是平行于所述基板的主表面的单个平坦反射表面。
2. 根据权利要求1所述的光学设备,其中所述重定向元件被光学附接到所述基板的主表面之一。
3. 根据权利要求1的光学设备,其中所述重定向元件是部分反射表面。
4. 根据权利要求1所述的光学设备,其中在所述基板内部被捕获的光波是平面光波。
5. 根据权利要求1所述的光学设备,其中用于将光波耦合到所述基板中的光学元件是第二反射表面,所述第二反射表面被承载于所述基板的倾斜边缘上并且平行于所述反射表面。
6. 根据权利要求1所述的光学设备,其中被所述重定向元件反射的光波穿过所述基板。
7. 根据权利要求6所述的光学设备,其中被所述重定向元件反射的光波在没有显著反射的情况下基本上穿过所述基板。
8. 根据权利要求1所述的光学设备,其中所述基板可基本上相对于观察者的视线定向。
9. 根据权利要求8所述的光学设备,其中所述基板绕垂直于观察者的视线的轴旋转。
10. 根据权利要求9所述的光学设备,其中所述基板绕水平轴旋转。
11. 根据权利要求9所述的光学设备,其中所述基板以大约 $45^{\circ}$ 的角度旋转。

## 高效紧凑型头戴式显示系统

[0001] 本申请为分案申请,其母案的发明名称为“高效紧凑型头戴式显示系统”,申请日为2018年10月15日,申请号为201880081103.1。

### 技术领域

[0002] 本发明涉及基于基板的光波引导光学设备,并且特别涉及包括由透光基板承载的反射表面和附接到基板的动态部分反射表面的设备。

[0003] 可以实现本发明来在大量的成像应用以及非成像应用中获利,该成像应用诸如是头戴式和平视显示器、蜂窝电话、紧凑型显示器、3-D显示器、紧凑型扩束器,以及该非成像应用诸如是平板指示器、紧凑型照明器和扫描仪。

### 背景技术

[0004] 针对紧凑型光学元件的重要应用之一是在头戴式显示器(HMD)中应用,其中光学模块既充当成像透镜又充当组合器,其中二维显示被成像到无穷远并反射到观察者的眼睛中。可以直接从诸如阴极光线管(CRT)、液晶显示器(LCD)、有机发光二极管阵列(OLED)或扫描源以及类似的设备之类的空间光调制器(SLM),或间接地借助于中继透镜或光纤束获得该显示。该显示包括由准直透镜成像到无限远并且借助于反射或部分反射表面透射到观看者眼中的元素(像素)阵列,该反射或部分反射表面分别充当针对非透视和透视应用的组合器。通常,常规的自由空间光学模块被用于这些目的。随着系统的期望视场(FOV)增加,这种常规的光学模块变得更大、更重且更笨重,并且因此,即使对于中等性能的设备也是不切实际的。这对于所有种类的显示器都是主要的缺点,尤其是在HMD中,在HMD中,系统应该尽可能的轻便和紧凑。

[0005] 对紧凑性的需要已经导致了几种不同的复杂的光学解决方案,其中的所有在一方面对于大多数实际应用而言仍然是不够紧凑的,而在另一方面受到可制造性方面的主要缺点的影响。此外,由这些设计产生的光学视角的眼动盒(EMB)常常是非常小的,通常小于8 mm。因此,即使对于光学系统相对于观看者的眼睛的小移动,光学系统的性能也是非常敏感的,并且不允许足够的瞳孔运动来方便地从这样的显示器读取文本。

[0006] 编号W02017/141239、W02017/141240和W02017/141242的公开中包括的教导通过引用并入本文中。

### 发明内容

[0007] 除其他应用外,本发明便于为HMD提供紧凑的基板。本发明允许相对宽的FOV以及相对大的EMB值。所得的光学系统提供了大的、高质量的图像,该图像还适应眼睛的大幅移动。根据本发明的光学系统是特别有利的,因为它比现有技术的实现方式实质上更紧凑,并且其还可以容易地甚至并入到具有专门配置的光学系统中。

[0008] 本发明的另外的应用是要提供一种紧凑型显示器,其具有宽FOV,以用于诸如蜂窝电话之类的移动手持应用。在当今的无线互联网访问市场中,足够的带宽可用于完整的视

频传输。限制因素仍然是最终用户的设备内显示的质量。移动性要求限制了显示器的物理尺寸,并且结果是具有较差图像观看质量的直接显示。本发明使得能够实现具有大虚像的物理紧凑型显示器。这是移动通信(并且尤其是针对移动互联网访问)中的关键特征,从而解决了对其实实现方式的主要限制之一,由此使得能够在小型手持设备(诸如蜂窝电话)中查看全格式互联网页面的数字内容。

[0009] 因此,根据具体要求,本发明的广泛目的是要减轻现有技术的紧凑型光学显示设备的缺点,并且要提供具有改进性能的其他光学部件和系统。

[0010] 因此,根据本发明,提供了一种光学设备,其包括输入光孔;输出光孔;具有至少两个主表面和边缘的透光基板,该透光基板由第一光学材料构成;耦进元件,其位于基板外部并且由第二光学材料构成,用于将具有视场的光波耦合到基板中;第一平坦反射表面,其位于透光基板的两个主表面之间,用于反射耦进光波,以实现来自基板的主表面的全内反射;第二平坦反射表面,其具有位于透光基板的两个主表面之间的至少一个有效侧,用于将光波耦出基板;以及重定向光学元件,其位于基板外部,用于将从基板耦出的光波重定向到观看者的眼睛中,其中,第一光学材料和第二光学材料的折射率有很大不同,并且从基板耦出到观看者的眼睛中的光波的视场与在基板内部耦合的光波的视场之间的比率大幅大于第一光学材料的折射率。

## 附图说明

[0011] 参考以下说明性附图、结合某些优选实施例来描述本发明,使得可以更充分地理解本发明。

[0012] 详细地具体参照附图,强调的是,所示出的具体项目仅仅是作为示例并且是出于说明性讨论本发明的优选实施例的目的,以及被呈现以提供被认为是本发明的原理和概念方面的最有用且容易理解的描述的内容。在这方面,并未做出尝试来与对于基本理解本发明而言所必要的细节相比更详细地示出本发明的结构细节。利用附图进行的描述将用作对本领域技术人员关于在实践中可以如何体现本发明的若干种形式的指导。

[0013] 在附图中:

图1是现有技术的示例性透光基板的侧视图;

图2A和图2B图示了针对两个入射角范围的在现有技术的示例性透光基板中使用的选择性反射表面的期望的反射比和透射比特性;

图3图示了作为针对示例性介电涂层的入射角的函数的反射比曲线;

图4是透光基板的示意性截面图,其中,耦进元件以及耦出元件都是衍射光学元件;

图5A和图5B图示了透明基板的截面图,该透明基板具有耦进表面和耦出表面,以及部分反射的组合元件;

图6A和图6B是根据本发明的主动折叠部分反射元件的示意性截面图,该主动折叠部分反射元件将耦出光波动态地重定向到观看者的眼睛中;

图7A和图7B是根据本发明的主动折叠部分反射元件的示意性截面图的其他实施例,该主动折叠部分反射元件将耦出光波动态地重定向到观看者的眼睛中;

图8A、图8B和图8C图示了根据本发明的动态部分反射元件的截面图,该动态部分

反射元件包括两个相同的平行镜可转移阵列；

图9A、图9B和图9C图示了根据本发明的另一动态部分反射元件的截面图，该动态部分反射元件包括三个平行镜可转移阵列；

图10A和图10B图示了在一帧时间段期间的现有技术的光学系统的一些光学特性；

图11A和11B图示了根据本发明的在一帧时间段期间的光学系统的一些光学特性；

图12A和图12B图示了根据本发明的在一帧时间段期间的光学系统的一些光学特性，其中该系统的显示源基于时间顺序彩色成像。

[0014] 图13A、图13B和图13C图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括耦进表面、两个耦出表面、动态部分反射元件和动态重耦合表面。

[0015] 图14A、图14B、图14C和图14D图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括耦进表面、三个耦出表面、动态部分反射元件、动态重耦合表面、眼球跟踪单元和动态控制单元；

图15A和图15B图示了根据本发明的动态部分反射元件，其包括电可开关的透反射镜(transreflective mirror)，其被像素化为像素的二维阵列；

图16A和图16B图示了根据本发明的动态部分反射元件，其包括两个相同的可转移镜二维阵列。

[0016] 图17A、图17B和图17C图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括耦进表面、两个耦出表面、一对角度敏感反射元件以及重定向表面阵列；

图18示意性地图示了根据系统的视角和眼动盒(EMB)的耦出表面的有效部分；

图19A和图19B是图示了根据本发明的作为入射角的函数的入射光波在两个不同的角度敏感耦出表面上的反射的曲线图；

图20示意性地图示了根据系统的视角和眼动盒的重定向元件的有效部分，其中耦出元件的至少一部分是角度敏感反射表面；

图21图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括耦进表面、两个耦出表面、角度敏感反射元件阵列以及重定向表面阵列；

图22图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括耦进表面、三个耦出表面、角度敏感反射元件阵列以及重定向表面阵列；

图23图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括角度敏感耦进表面、两个耦出表面、用于将光波耦出基板的一对部分反射元件以及重定向表面阵列；

图24A图示了根据本发明的透明基板的截面图，该透明基板包括角度敏感耦进表面、两个耦出表面、用于将光波耦出基板的一对角度敏感反射元件以及重定向表面阵列；

图24B图示了透明基板的截面图，该透明基板包括角度敏感耦进表面、两个耦出表面、用于将光波耦出基板的一对角度敏感反射元件以及重定向表面阵列，其中基板的不同部分由不同的光学材料构成；

图25A、图25B和图25C是图示了根据本发明的作为入射角的函数的入射光波在三个不同的角度敏感表面上的反射的曲线图；

图26是图示了作为系统的FOV的函数的光波的亮度效率的曲线图；

图27A和图27B图示了透明基板的截面图，该透明基板包括单个耦出表面、重定向棱镜和耦进棱镜，其中基板的不同部分由不同的光学材料构成；

图28A是根据本发明的折叠反射表面的示意性截面图,该折叠反射表面将耦出光波重定向到观看者的眼睛中;

图28B是图示了根据本发明的作为光孔的函数的耦出光波的亮度的曲线图;

图29A、图29B和图29C是根据本发明的HUD系统的示意性截面图,该HUD系统包括主动折叠部分反射元件,该主动折叠部分反射元件将耦出光波动态地重定向到观看者的双眼中;

图30A和图30B是根据本发明的另一个HUD系统的示意性截面俯视图和侧视图,其中光波沿垂直轴在基板内部传播;

图31A、图31B和图31C是根据本发明的又一个HUD系统的示意性截面图,该HUD系统包括至少一对角度敏感耦出表面和单个平坦部分反射元件,该平坦部分反射元件将耦出光波重定向到观看者的双眼中;

图32A和图32B是图示了根据本发明的作为入射角的函数的入射光波在两个不同的角度敏感耦出表面上的反射的曲线图,以及

图33示意性地图示了根据系统的视角和头动盒的单个平坦重定向元件的有效部分,其中耦出元件的至少一部分是角度敏感的反射表面。

## 具体实施方式

[0017] 图1A图示了现有技术的透光基板的截面图。第一反射表面16被准直光波12照射,该准直光波12从显示源4发出并且被位于源4与设备的基板20之间的透镜6准直。反射表面16反射来自该源的入射光,使得光波通过全内反射而被捕获在平面基板20的内部。在离开基板20的主表面26、27的几次反射之后,所捕获的光波到达部分反射元件22,该部分反射元件22将自基板离开的光耦合到观看者的眼睛24(其具有瞳孔25)中。在本文中,基板的输入表面将被定义为输入光波通过其进入基板的表面,并且基板的输出表面将被定义为捕获的光波通过其离开基板的表面。在图1中图示的基板的情况下,输入和输出表面两者都与下表面26重合。然而,可以设想到其他配置,其中来自显示源4的输入和图像光波位于基板的相反侧上或位于基板的边缘之一上。

[0018] 将来自基板的光波耦出的元件可以是如图1A中图示的单个部分反射表面22,或者是如图1B中图示的部分反射表面22a、22b等的阵列。在诸如用于增强现实(AR)应用的HMD之类的透视系统(其中观看者应该穿过基板看到外部场景)中,部分反射表面22应该至少部分透明以使得外部光线33能够穿过基板,并且能够到达观看者的眼睛24。然而,部分反射表面的透射率的最佳值不是恒定的,并且取决于外部场景的照明条件。对于明亮的场景,为了改进投影图像的对比度,要求的是部分反射表面的反射率将是高的,以使图像的亮度最大化,而表面的透射率应该是相对低的,以防止外部场景使观看者眼花。另一方面,对于黑暗的外部场景,要求的是表面的透射率应该是相对高的,以便不会阻挡外部视图。结果,将有利的是具有一种光学系统,其中部分反射表面22的透射率(以及因此反射比)可以被动态地控制,该控制或者由观看者手动地进行或者由测量外部视图的亮度的预设机构自动地进行。不幸的是,对于被用来使透视增强现实系统具体化的大多数当前技术而言,利用主动部分反射表面的可能性是不切实际的。

[0019] 参考图1B中图示的光学实施例,并且假设源的中央光波在垂直于基板表面26的方

向上从基板20耦出,部分反射表面22a、22b是平坦的,并且基板20内部的耦合光波的离轴角为 $\alpha_{in}$ ,那么基板的反射表面与主表面之间的角度 $\alpha_{sur2}$ 为:

$$\alpha_{sur2} = \frac{\alpha_{in}}{2} \quad (1)。$$

[0020] 如可以在图1B中看到的,被捕获的光线从两个不同的方向28、30到达反射表面。在该特定实施例中,在来自基板主表面26和27的偶数次反射之后,被捕获的光线从这些方向28之一到达部分反射表面22,其中被捕获的光线与反射表面的法线之间的入射角 $\beta_{ref}$ 为:

$$\beta_{ref} = \alpha_{in} - \alpha_{sur2} = \frac{\alpha_{in}}{2} \quad (2)。$$

[0021] 在来自基板表面26和27的奇数次反射之后,被捕获的光线从第二方向30到达部分反射表面22,其中离轴角为 $\alpha'_{in} = -\alpha_{in}$ ,并且被捕获的光线与反射表面的法线之间的入射角为:

$$\beta'_{ref} = \alpha'_{in} - \alpha_{sur2} = -\alpha_{in} - \alpha_{sur2} = -\frac{3\alpha_{in}}{2}, \quad (3)$$

其中,负号表示被捕获的光线撞击在部分反射表面22的另一侧上。如在图1B中进一步图示的,对于每个反射表面,每条光线首先从方向30到达该表面,其中一些光线再次从方向28撞击在该表面上。为了防止不期望的反射和重像,对于具有第二方向28的撞击在表面上的光线而言,反射比可忽略不计是很重要的。

[0022] 先前在上面提到的公开中提出了利用薄膜涂层的角度敏感性的针对该要求的解决方案。如果一个角度显著小于另一个,则可以实现两个入射方向之间的期望区分。有可能提供在高入射角下具有非常低反射比并且对于低入射角具有高反射比的涂层。通过消除两个方向之一中的反射比,可以利用此性质来防止不期望的反射和重像。例如,选择 $\beta_{ref} \sim 25^\circ$ ,可以计算出:

$$\beta'_{ref} = 105^\circ; \alpha_{in} = 50^\circ; \alpha'_{in} = 130^\circ; \alpha_{sur2} = 25^\circ \quad (4)。$$

[0023] 如果确定了这样一个反射表面:对于该反射表面没有反射 $\beta'_{ref}$ 但是反射了 $\beta_{ref}$ ,则达成了所期望的条件。

[0024] 现在具体参考图2和图2B,这些图图示了部分反射表面的期望反射比表现。在具有离轴角为 $\beta_{ref} \sim 25^\circ$ 的光线32(图2A)被部分反射并从基板20耦出的同时,以与反射表面的离轴角为 $\beta'_{ref} \sim 75^\circ$ (其等同于 $\beta'_{ref} \sim 105^\circ$ )到达的光线36(图2B)透射通过反射表面34,而没有任何显著反射。

[0025] 图3图示了该特定系统的典型的部分反射表面的反射比曲线,该反射比曲线作为具有波长 $\lambda=550 \text{ nm}$ 的S偏振光的入射角的函数。对于全色显示器,对于适光区域中的所有其他波长,应当实现类似的反射比曲线。该曲线图中有两个重要区域:65°和85°之间,其中反射比非常低,以及10°与40°之间,其中反射比随入射角增加而单调增加。如可以在图2和图3中看到的,图1和图1B中图示的实施例的部分反射表面22的所需反射比表现并不是常规的,并且确实不能够使用本技术而被具体化为主动部分反射表面。此外,即使要在将来发现这样的所需主动技术,为了在较高角度区域处保持低反射比,较低角度区域处的反射比也

不能高于20%-30%，并且因此，最大可实现效率是相当低的。结果，对于图1A和图1B中图示的实施例而言，利用主动部分反射表面的想法是不切实际的。

[0026] 将光波耦合到光导光学元件中以及将光波从光导光学元件耦合出的另一种方法是通过使用衍射元件。如图4中图示的，光线38和40通过衍射元件48耦合到透明基板20中，并且在来自基板的外表面的一些全内反射之后，光线通过第二衍射元件50从基板耦出。如图示的，光线38在元件54上的两个不同点52和54处被耦出至少两次。因此，为了实现均匀的输出光波，元件50的衍射效率应当沿着 $\xi$ 轴逐渐增加。然而，使用本技术来使动态光栅具体化是复杂的，并且对于元件50的特定所需的光栅功能而言，实现同样的目的实际上是不可能的。结果，不可能将利用动态元件的想法应用于图4中图示的衍射实施例。

[0027] 图5A和图5B图示了根据本发明的用于克服上述问题的实施例。代替使用实行将光波耦出基板20以及将光波引导到用户的眼睛24中的双重功能的单个元件(图1A中的22或图4中的50)，将所需功能划分到两个不同的元件中；即，嵌入基板内部的一个元件将光波耦出基板，而位于基板外的第二常规的部分反射元件将光波重定向到观看者的眼睛中。如图5A中图示的，来自从显示源发出的并且由透镜(未示出)准直的平面光波的两条光线63(短划线)穿过耦进棱镜55的输入光孔86、以相对于基板的主表面70、72的入射角 $\alpha_{in}^{(0)}$ 进入具有两个平行主表面70和72的透光基板64。光线撞击在反射表面65上，该反射表面65相对于基板的主表面以角度 $\alpha_{sur1}$ 倾斜。反射表面65反射入射光线，以使得该光线通过来自主表面的全内反射而被捕获在平面基板64内部。为了在被捕获的光波的各种“传播阶数”之间进行区分，上标( $i$ )将表示阶数 $i$ 。以零阶撞击在基板上的输入光波用上标(0)来表示。在每次从耦进反射表面反射之后，被捕获的光线的阶数都增加一，从( $i$ )到( $i+1$ )。被捕获的光线与主表面70、72的法线之间的离轴角 $\alpha_{in}^{(1)}$ 为：

$$\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1} \quad (5)^\circ$$

[0028] 在离开基板表面的几次反射之后，被捕获的光线到达第二平坦反射表面67，该第二平坦反射表面67将光线耦出基板。假设表面67相对于主表面以与第一表面65相同的角度倾斜，也就是说，表面65和67平行且 $\alpha_{sur2} = \alpha_{sur1}$ ，则耦出光线与基板平面的法线之间角度 $\alpha_{out}$ 为：

$$\alpha_{out} = \alpha_{in}^{(1)} - 2 \cdot \alpha_{sur2} = \alpha_{in}^{(1)} - 2 \cdot \alpha_{sur1} = \alpha_{in}^{(0)} \quad (6)^\circ$$

[0029] 也就是说，耦出光线以与入射光线相同的角度相对于基板倾斜。到目前为止，耦进光波表现得类似于图1A中图示的光波。然而，图5A图示了不同的表现，其中具有与光线63相同入射角 $\alpha_{in}^{(0)}$ 的两条光线68(点划线)撞击在反射表面65的右侧上。在来自表面65的两次反射之后，该光波通过全内反射耦合在基板64的内部，并且此时基板内部被捕获的光线的离轴角为：

$$\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(1)} + 2 \cdot \alpha_{sur1} = \alpha_{in}^{(0)} + 4 \cdot \alpha_{sur1} \quad (7)^\circ$$

[0030] 在离开基板的主表面的几次反射之后，被捕获的光线到达第二反射表面67。光线

68从耦出表面67反射两次,并且以与仅从表面65和67反射一次的其他两条光线63相同的离轴角 $\alpha_{out}$  (这也是在基板主平面上的这四条光线的相同入射输入角度)从基板耦出。

[0031] 如图5A中图示的,图像的倾斜角 $\alpha_{out}$ 可以通过添加部分反射表面79来调整,该部分反射表面79相对于基板的表面72以角度 $\frac{\alpha_{in}}{2}$ 倾斜。如所示的,图像被反射和旋转,以使得其再次穿过基本上垂直于基板主表面的基板,并且通过输出光孔89到达观看者的眼睛24。为了使畸变和色差最小化,优选的是将表面79嵌入重定向棱镜80中,并且利用第二棱镜82来使基板64的形状完整,这两个棱镜均由与基板材料类似的材料制造。为了使系统的厚度最小化,如图5B中图示的,有可能用平行的部分反射表面79a、79b等的阵列代替单个反射表面80,其中部分反射表面的数量可以根据系统的要求来确定。

[0032] 存在来自耦出表面67的两个有矛盾的要求。一方面,前两阶图像 $F^{(1)}$ 和 $F^{(2)}$ 应该从该平面反射,而另一方面,来自基板64的零阶图像 $F^{(0)}$ 在从表面79反射之后应该基本上穿过该基板64,而没有显著的反射。另外,对于透视系统,光学系统对于来自外部场景的基本上垂直的入射光线83的透明度应该尽可能高。实现这一点的一种可能方式是在表面67中使用气隙。然而,为了实现刚性系统,优选的是在表面67中施加光学粘合剂,以便使用具有大幅小于基板折射率的折射率的光学粘合剂来将基板64与棱镜82粘合。

[0033] 一种替换方法是利用蛾眼膜或任何类似的超精细结构作为要求的角度敏感反射机制。也就是说,当棱镜82附接到基板64的外表面67时,气隙膜粘合到棱镜82,以使得超精细结构在附接之后面对表面67。因此,当基板64内部的耦进光波以不同的倾斜角度撞击在该超精细结构上时,它们仅“看见”该周期性结构的外部部分。因此,被传入的光学光波“看到”的实际折射率接近于空气的折射率,并且保留了全内反射机制。另一方面,气隙膜对于来自外部场景83的传入光波或对于从基板64耦出并且被表面79往回反射的光波是基本上透明的。在任何所提出的方法中,为了使来自耦出表面67的透射光波的菲涅耳反射最小化,优选的是向该表面施加合适的抗反射(AR)涂层。

[0034] 如以上关于图1A所解释的,在诸如用于增强现实(AR)应用的HMD之类的透视系统中(其中观看者应该穿过基板看到外部场景),部分反射表面79应该是至少部分透明的,以使得外部光线63和68能够穿过基板并到达观看者的眼睛24。由于表面79仅是部分反射的,所以耦合光波63和68的仅一部分被表面79反射并到达观看者的眼睛,而光波84的另一部分穿过表面79,从棱镜80耦出,并且没有到达观看者的眼睛。类似地,由于表面79仅是部分透射的,所以外部光线83的仅一部分穿过表面79并到达观看者的眼睛,而光线85的另一部分从表面79反射,从棱镜80耦出,并且也没有达到观看者的眼睛。自然地,可以由于外部场景而提高投影图像的效率,反之亦然,即,通过提高部分表面79的反射率,提高了耦合光线63和68的亮度。因此,然而,表面79的透射率降低,以及因此,外部图像83的亮度也相应地降低。

[0035] 与图1-4中图示的实施例相矛盾,将来自基板的耦出光反射到观看者的眼睛并且同时透射外部光线的组合器79是常规的部分反射镜,而没有任何特殊或复杂的特性,如分别在图1和图4中图示的实施例的表面22和50那样。结果,有可能根据外部照明条件和被投影到观看者的眼睛的特定图像来动态地控制部分反射表面79的反射率(以及因此透射率)。用以控制表面79的反射率的一种方法是通过使用电可切换透反射镜,其是由特殊液晶材料制成的固态薄膜设备,并且其可以在纯反射状态、部分反射状态和完全透明状态之间快速

切换。可以由用户手动设置该可切换镜的所需状态,或者可以通过使用根据外部亮度控制该镜的反射率的光度计来自动设置该可切换镜的所需状态。为简单起见,此后将假设动态部分反射设备的吸收是可忽略不计的,并且该设备的反射率和透射率之和加起来是近似为一的值。

[0036] 图6A和图6B图示了在两种极端情况下的可切换镜的使用。图6A图示了其中应当阻挡外部场景干扰投影图像的状况,例如,其中投影了视频电影,并且该外部场景的亮度相对较高。如所示的,动态表面79被切换为全反射状态,并且结果是,来自基板的耦出光线63和68被从表面79全部反射到观看者的眼睛,而外部光线83也被全部反射,因此阻止该外部光线83到达观看者的眼睛。图6B图示了不同的状况,其中根本没有必要阻挡来自外部场景的图像,并且在那时没有必要将来自耦合图像的信息投影到观看者的眼睛中。如所示的,动态表面79被切换成完全透明状态,并且结果是,来自基板的耦出光线63和68基本上穿过表面79a和79b,因此被阻止到达观看者的眼睛,而外部光线83也基本上穿过表面79a和79b,因此不受干扰地到达观看者的眼睛。

[0037] 图7A和图7B图示了在两种不同的中间情况中的可切换镜的使用。图7A图示了一种状况,其中投影图像应当与外部图像适当地组合,但是外部场景的亮度相对较高,并且因此,应当主要阻挡该外部场景的亮度以免干扰投影图像。另一方面,投影图像的效率应当足够高以实现合理的对比度。如所示的,动态表面79被切换成主反射状态,即可切换镜的反射比其透射率高得多。结果,来自基板的耦出光线63和68大体上从表面79反射到观看者的眼睛,而仅一小部分光波穿过表面79。另一方面,外部光线83大部分从表面79反射,而只有一小部分到达观看者的眼睛。图7B图示了不同的状况,其中外部场景相对较暗,并且有必要防止投影图像使观看者眼花。如所示的,动态表面79主要被切换到透射状态,并且因此,可切换镜的反射远低于其透射。结果,来自基板的耦出光线63和68大体上穿过表面79a和79b,并且因此,只有一小部分光线到达观看者的眼睛,而外部光线83也大部分穿过表面79a和79b,并且因此基本上不受干扰地到达观看者的眼睛。

[0038] 在图8A-8C中图示了用于实现所要求的动态部分反射元件的另一种方法。如图8A中所示的,平行镜791a、791b等的阵列被嵌入在透明板80a的内部。这些镜相对于基板的主表面72以 $\frac{\alpha_{in}}{2}$ 的角度倾斜。镜在板内部的填充因子为基本上一半。假设镜在主表面72上的投影为 $d$ ,则两个相邻镜之间的横向距离为 $d$ 。另一个相同的板80b与板80a相邻地定位。如图8A中图示的,板的边缘彼此相邻,并且板80b中的每个镜792i ( $i = a, b, c, \dots$ ) 位于板80a中的镜791i的正下方。结果,对于耦出图像波以及对于来自外部场景的光波,图8A的实施例的反射率以及因此透射率基本上为50%。如图8B中图示的,板80b相对于板80a平移了 $d/2$ 的距离,从而导致实施例的反射-透射比被修改为近似75%/25%的比率。在图8C的实施例中,板80b相对于板80a平移了距离 $d$ ,并且该实施例是基本上反射的。最终,板80b可以平移任何其他中间距离,并且因此,该实施例的反射-透射比可以是50%:50%与100%:0%之间的任何值。

[0039] 图8A-8C中图示的实施例的主要缺点在于,最大可实现的透射率受限于值50%。此缺陷对于下述光学系统而言是严重的:在该光学系统中,透射率应当相对较高以使外部场景以最小的干扰到达观看者的眼睛。图9A-9C图示了由三个相同的透明板构成的实施例,其中嵌入式镜的填充因子为1/3,即,假设镜在主表面72上的投影为 $d$ ,则两个相邻镜之间的横

向距离为 $2d$ 。如图示的,两个相邻板的边缘之间的距离为 $0$ 、 $d$ 和 $2d$ ,以及因此,对于图9A、9B和9C的实施例而言反射-透射比分别基本上为33%:67%、67%:33%和100%:0%。最终,板80b和80c可以平移任何其他中间距离,以及因此,实施例的反射-透射比可以是33%:67%与100%:0%之间的任何值。结果,图9A-9C中图示的系统与图8A-8B的系统相比具有更高的动态范围,并且最大可实现的透射率为67%而不是50%。通过使用具有更大数量相同板的实施例,甚至可以进一步增加该动态范围。例如,对于具有 $n$ 个板的实施例,其中在每个板中,镜的填充因子是 $1/n$ ,该实施例的反射-透射比可以是 $\frac{1}{n}:\frac{n-1}{n}$ 与100%:0%之间的任何值。

[0040] 迄今,已经假设可以修改部分反射表面79的反射率,并且因此,可以动态修改从基板耦出的虚像的效率与外部场景之间的比率,以在给定场景中实现最佳性能。然而,在到目前为止图示出的所有实施例中,改进两个图像之一的效率将要损害另一个图像,也就是说,不可能实现这样一种系统,在该系统中,使用上面说明的实施例,投影图像和外部图像的效率同时是非常高的。然而,对于具有比被投影到基板中的图像的帧时间更小的切换时间的动态部分反射元件,有可能改进系统的总效率,即,有可能增加投影图像的亮度以及外部图像的亮度,该外部图像达到观看者的眼睛,而不会增加光学系统的功耗。

[0041] 图10A-10B图示了在一个帧时间段 $\tau_f$ 期间的常规系统的光学特性。假设耦进图像 $B_0$ 和外部场景 $B_s$ 的平均亮度是常数,并且部分反射元件的反射基本上为50%,即,潜在效率在投影图像与外部图像之间被均等划分,并且特别地,被投影到观看者的眼睛中的虚像的亮度和外部场景的亮度(忽略了基板内部的残留损耗和来自外表面的菲涅耳反射)分别为 $B_0/2$ 和 $B_s/2$ 。

[0042] 图11A图示了一种改进的系统,其中在每个帧时间期间,仅在具有时段为 $\tau_f/n$ 的有限时隙期间将图像从显示源投影并将其耦合到基板中。在该时隙期间,耦进图像的平均亮度增加到 $n$ 至 $n \cdot B_0$ 倍。假设的是,投影图像的亮度以线性方式取决于显示源的功耗。由于对于图10A和11A的两个系统而言,操作时段与平均亮度的乘积是相同的,所以它们将具有基本上相同的功耗。图11B图示了部分反射元件的反射曲线,其中该元件仅在具有时段 $\tau_f/n$ 的有限时隙期间是基本上反射的,其中该时隙与图11A中图示的投影亮度的时隙同步。在其余的帧时间期间,部分反射元件基本上是透射的。结果,投影图像的平均亮度从 $B_0/2$ 到 $B_0$ 增加到两倍,而外部场景的亮度增加到 $\frac{n-1}{n} \cdot B_s$ 。自然地,通过减少实际切换时间,即,通过增加因子 $n$ ,有可能改进外部场景的效率。

[0043] 图12A和12B图示了图11A和11B中所示的系统的修改版本。这里的显示源是基于时序彩色成像,其中彩色图像是通过在单个图像帧中按顺序放下红、绿和蓝(RGB)三种基本颜色的光而生成的,这通常持续 $1/f$ 秒,其中 $f$ 是系统的频率,通常为50或60赫兹。帧时间 $\tau_f$ 被划分为三个相等的子时段 $\tau_f/3$ ,其中在每一个中,只有一种颜色正照亮显示器。还假设的是,可以控制该动态部分反射元件以在三原色中的每一种中产生高反射,而同时对于其他两种颜色具有高透射比。如图12A中图示的,在针对三原色中的每一个的每个帧时间期间,仅在具有时段 $\tau_f/n$ 的有限时隙期间将图像从显示源投影并将其耦合到基板中。在该时隙期间,耦进图像的平均亮度为 $\frac{n \cdot B_0}{3}$ 。图12B图示了部分反射元件的反射曲线,其中该元件对于

三原色中的每一种仅在具有时段 $\tau_f/n$ 的有限时隙期间才是基本上反射的,其中这三个时隙中的每一个与所投影的亮度的相应时隙同步,如图12A中图示的。投影图像的平均亮度为 $B_0$ ,而外部场景的亮度为 $\frac{n-1}{n} \cdot B_s$ 。

[0044] 对于图13A中图示的多小面元件255而言,利用动态局部反射元件可能是特别有利的。如所示的,反射表面256被嵌入基板258的内部。表面256具有与表面67相同的反射特性,并且平行于耦进表面65和耦出表面67。在从表面65反射一次之后,具有离轴角为 $\alpha_{in}$ 的光线260耦合到基板258中,并且在从基板258的主表面反射几次之后,该光线260撞击在表面256上。该光线从基板258耦出,并且然后以与图5A-5B中图示的方式类似的方式被部分反射到观看者的眼睛中。然而,在这种情况下,如图5A和图5B中图示的实施例中那样,反射的光线不会不受干扰地传播到观看者的眼睛中。而是,反射的光线撞击在部分反射表面264a上,该部分反射表面264a与表面79a平行并耦合在平坦棱镜267内部,该平坦棱镜267附着到基板268的上表面70。撞击在表面264a上的光线260的一部分强度作为光线260a穿过表面,并且继续朝向观看者的眼睛传播。由于表面79a和264a是平行的,因此光线260的另一部分强度作为具有离轴角为 $\alpha_{in}$ 的光线260b从表面264a反射,并且再次撞击在表面256上。在从表面256反射两次之后,其在基板258内传播,并且在从耦出表面67再反射两次之后,光线260b从基板258耦出,具有相同的离轴角 $\alpha_{in}$ 。然后,光线从表面79d(其平行于表面79a)反射到观看者的眼睛中,具有与光线260a相同的方向。

[0045] 如在图13A中图示的,另一条光线262在从表面65反射两次之后耦合到基板258中,并且在从基板258的主表面反射几次之后,光线262撞击在表面256上。光线从基板258耦出,具有离轴角 $\alpha_{in}$ ,并且然后以与光线260类似的方式被平行于表面79a的表面79b部分反射到观看者的眼睛中。经反射的光线撞击在部分反射表面264b上,该部分反射表面264b与表面79b和264a平行并耦合在棱镜267内部。入射在表面264b上的光线262的一部分强度作为光线262a穿过表面,并且继续朝向观看者的眼睛传播。因为表面79b和264b是平行的,所以光线262的另一部分强度作为具有离轴角为 $\alpha_{in}$ 的光线262b从表面264b反射,并且再次撞击在表面256上。在从表面256反射一次之后,其在基板258内部传播,并且在从耦出表面67反射一次之后,光线262b从基板258耦出,具有相同离轴角 $\alpha_{in}$ 。然后,光线从与表面79b平行的表面79c反射到观看者的眼睛中,具有与光线260a相同的方向。因此,源自显示源上的同一点的所有四条光线260a、260b、262a和262b到达观看者的眼睛,具有相同的传播方向。

[0046] 结果,基板258的输出光孔是表面256和67的组合。因此,与图5中图示的基板64相比,基板258的输出光孔的有效区域增加了一倍,而基板的厚度保持不变。另一方面,与基板64相比,从基板258耦出的光波的亮度降低到二分之一。此外,不仅虚像的耦出光波260和262撞击在部分反射表面264A和264B上,而且来自外部场景的光线82也撞击在部分反射表面264A和264B上。结果,这些光波的亮度相应地以相同因子降低。然而,存在一些方式来改进两个图像的耦出光波的亮度。对于其中在基板内部耦合的光波被线性偏振的实施例,诸如其中显示源是LCD或LCOS显示器的系统,部分反射表面79i以及264i( $i=a, b, \dots$ )可以被设计为偏振敏感的反射表面。这些表面对于一种偏振(优选地对于s偏振)是反射的(或部分反射的),并且对于正交偏振(优选地对于p偏振)基本上是透明的。在这样的情况下,由于整个元件255现在对于偏振基本上是透明的(该偏振正交于耦合在基板内部的光波的偏振),

因此可以改进用于透视应用的外部场景的透射比。虽然反射表面79i对于相关的偏振可以是全反射的(这与耦合在基板内部的光波相同),但是表面264i对于该偏振应当是部分反射的,其中表面的确切反射系数可以根据系统中反射表面264i的数量来确定的。对于图13A中图示的实施例,其中两个反射表面256和67被嵌入基板258内部,0.5的反射系数可以产生对于耦合在基板内部的光波的50%的总亮度效率,以及对于外部场景的50%的透射比。

[0047] 在图13B和图13C中图示了用于改进两个图像的效率的替换实施例,其可以被应用于偏振图像源以及非偏振图像源。在这里,除了表面264i之外,表面79i是动态反射表面。如图11A和11B中图示的,在每个帧时间期间,仅在具有时段为 $\tau_f/n$ 的有限时隙期间将图像从显示源投影并将其耦合到基板中,其中耦进图像的平均亮度为 $n \cdot B_0$ 。另外,如图13B中图示的,元件79i和264i仅在相同的时隙期间是反射的,其中表面79i基本上是反射的,并且表面264i的反射率为50%左右。如图13C中图示的,在其余的帧时间期间,反射元件79i和264i基本上是透射的,并且外部光线在没有任何干扰的情况下到达观看者的眼睛。结果,即使对于非偏振图像,投影图像的平均亮度也从 $B_0/4$ 到 $B_0/2$ 增加到两倍,同时外部场景的亮度增加到 $\frac{n-1}{n} \cdot B_s$ 。

[0048] 如图13A和13B中图示的通过将反射表面256嵌入基板258中来扩大输出光孔的实施例并不限于单个反射表面。对于具有宽FOV以及相对大的EMB值的光学系统,可以内部地在基板内嵌入与输出反射表面67平行的 $n$ 个平坦反射平面256i ( $i=a, b, \dots$ )的阵列,以将基板的输出光孔增加到 $n+1$ 倍。因此,反射表面264i ( $i=a, b, \dots$ )的数量应当相应地增加,以完全覆盖嵌入表面256i的输出光孔。每个反射表面264i的反射比和横向延伸应当被设计成确保耦合到观看者的眼睛中的光波的均匀性特性。

[0049] 如图14A至图14D中图示的,可以通过向光学系统添加眼球跟踪单元272来提高具有附加数量的耦出小面256i的系统的效率。眼球跟踪是测量眼睛的位置、凝视点或眼睛相对于显示器的运动的过程,即,眼球跟踪器是一种用于测量眼睛位置和眼睛移动的设备。用于操作此设备最流行的方法是通过利用用于测量眼睛运动的光学方法。来自发射器的光(通常是红外光)从眼睛反射,并且被摄像机或一些其他特殊设计的光学传感器所感测。然后对信息进行分析,以从反射的变化中提取眼睛旋转和平移。基于视频的眼动仪通常使用角膜反射和瞳孔中心作为特征来随时间的推移进行跟踪。

[0050] 根据本发明,物理地组合两个光学单元——即动态控制的立体显示器和眼球跟踪单元——将是有利的。该系统还应当包含动态控制单元276,该动态控制单元276将能够通过识别观看者的眼睛的位置和凝视点来设置针对每一个反射表面264i的操作时间和反射比。在图14A中看到的光学系统,其中三个耦出表面256a、256b和67被嵌入基板258内部。为了实现在整个输出光孔上具有均匀亮度的耦出光波,与耦出表面256a和256b相邻的部分表面264i的反射比应当被分别设置为67%和50%。在这种情况下,耦出光波的最大效率为近似33%。

[0051] 然而,对于具有大EMB值的光学系统,并非同时利用从基板耦出的所有光波。结果,由于其他光波,通过增加到达观看者的眼睛的光波的亮度,可以改进光学系统的效率。如图14B中图示的,观看者的眼睛位于EMB的右侧部分中。因此,眼睛大部分被通过表面256a耦出的光波所照射,并且因此,由于通过表面256b和67耦出的光波,增加这些光波的亮度将是

利的。可以通过减小与表面256a相邻的表面264a和264b的反射比来实现这种改进。因此,大多数光波将穿过表面264a和264b传递到观看者的眼睛中,并且仅一小部分光波将被反射并再次耦进到基板中。

[0052] 在图14C中图示了不同的情况,其中观看者的眼睛位于EMB的中央部分。因此,眼睛大部分被通过表面256b耦出的光波照射,并且因此,由于通过表面256a和67耦出的光波,增加这些光波的亮度将是有利的。可以通过增加与表面256a相邻的表面264a和264b的反射比,并减小与表面256b相邻的表面264c和264d的反射比,来实现这种改进。因此,大多数光波将从表面264a和264b反射,再次耦进到基板258中,并且通过表面256b耦出。现在,大多数剩余的光波将穿过表面264c和264d传递到观看者的眼睛中,而仅一小部分光波将被反射并再次耦进到基板中。

[0053] 在图14D中图示了另外的不同情况,其中观看者的眼睛位于EMB的左侧部分中。因此,眼睛大部分被通过表面67耦出的光波照射,并且因此,由于通过表面256a和256b耦出的光波,增加这些光波的亮度将是有利的。可以通过增加分别与表面256a和256b相邻的表面264a和264b以及表面264c和264d的反射比来实现这种改进。结果,大多数光波将从表面264a和264b以及从表面264c和264d反射,将再次耦进到基板258中,以及然后通过表面67耦出,以便不受干扰地到达观看者的眼睛。最终,控制单元将根据观看者的眼睛的位置和凝视点、光学系统的EMB和FOV以及其他可能的相关参数来设置表面264i的反射比的精确值。

[0054] 在此之前,已经假设动态部分反射元件的反射率(以及因此透射率)在其整个光孔上是恒定的。然而,存在以下情况,在这些情况中,使用其中可以局部修改其反射比的动态元件将会是有益的。也就是说,动态元件的不同部分将具有各种程度的反射率。通过将这种能力与眼球跟踪单元272和动态控制单元276进行组合,将有可能最优地调整动态元件的局部反射。可以根据被投影到观看者的眼睛的信息的类型、图像的FOV中的符号或视频的位置、外部场景的亮度以及观看者的眼睛的位置和凝视点来设置确切的局部反射率。

[0055] 图15A和15B图示了用于实现所需动态元件的可能实施例。如图15A所示,将电可切换透反射镜280的反射率的有效区域像素化为像素281的二维阵列,其中每个像素的反射率可以由动态控制单元276(未示出)单独设置。如图15B中展示的,元件280的子区域282已被设置为基本上是反射的;另外两个子区域283和286是部分反射的,而元件280的另一个有效区域289是基本上透射的。

[0056] 在图16A和图16B中图示了用于实现所需动态部分反射元件的不同方法。如图16A中所示,该动态元件由子镜295的两个相同的阵列(291和292)构成,其中每个子镜可以由动态控制单元276(未示出)单独平移。由于子镜可以是小巧且轻便的元件,因此有可能使用压电器件来平移它们。每个阵列的填充因子为50%,并且阵列291中的每个子镜都基本上与阵列292中的相对子镜相邻地定位。结果,在动态元件290的整个区域上,元件290的反射率和透射比在这里为50%左右。图16B图示了不同的情况,其中在两个不同的位置296和297中,已经横向平移了阵列292中的一些子镜以在这些区域中产生高反射比。

[0057] 在图13A至图13C以及图14A至图14D中图示的实施例中,已经利用附接到基板258的上表面70的外部部分反射表面264扩展了光学系统的输出光孔。图17A至图17C图示了用于扩大输出光孔的替换实施例,其中,耦出表面256对耦合的光波的入射角是敏感的。如图17A中所示,具有输入方向为 $\alpha_{in}^{(0)}$ 的光线320a和320b撞击在由两个基板310a和310b构成的光

学元件309上,其中基板310a的下表面311a附接到基板310b的上表面312b,从而限定了界面平面317。

[0058] 存在来自基板310a与310b之间的界面平面317的两个有矛盾的要求。一方面,前两阶图像 $F^{(1)}$ 和 $F^{(2)}$ 应当从该平面反射,而来自上基板310a的零阶图像 $F^{(0)}$ 在从表面256和67反射之后应当基本上穿过该基板310a,而没有显著的反射。类似地,表面317应当对具有输入角 $\alpha_{in}^{(0)}$ 的通过元件318进入基板的光线320a和320b是透明的。另外,对于透视系统,对于基本上垂直的入射光,光学系统的透明度应当尽可能高。实现这一点的可能方式是在界面平面317中使用气隙,然而,为了实现刚性系统,优选的是在界面平面317中施加光学粘合剂,以便将基板310a和310b粘合。利用具有以下参数的光学系统来说明此方法:

$$\begin{aligned} \alpha_{sur1} = \alpha_{sur2} = 9^\circ; F^{(0)} = \{32^\circ, 44^\circ\}; F^{(1)} = \{50^\circ, 62^\circ\} \\ F^{(2)} = \{68^\circ, 80^\circ\} \end{aligned} \quad (8)$$

[0059] 光波是s偏振的。基板310a和310b的光学材料是具有折射率为 $n_d = 1.8467$ 的Schott N-SF57,并且光学粘合剂为NOA 1315,其具有折射率为 $n_d = 1.315$ 。因此,临界角为 $\alpha_{cr} > 45.4^\circ$ 。所有较高阶 $F^{(1)}$ 和 $F^{(2)}$ 中的光学射线具有高于临界角的离轴角,并且因此都从界面平面317全反射。所有零阶中的光学射线都以低于临界角的入射角撞击在界面平面上,并且因此它们穿过该界面平面。然而,为了使来自界面平面的耦出光波的菲涅耳反射最小化,优选的是向该平面施加合适的抗反射(AR)涂层。

[0060] 与图13A至图14D中图示的基板相对比,耦出元件256a和256b不是如基板258中的表面256那样的常规的反射表面,而是角度敏感的反射表面。每一个表面对于相应基板内部的耦进光波的角度范围的一部分是基本上全反射的,并且对于该角度范围的另一部分是基本上透明的。与表面256a和256b不同,表面67a和67b可以是常规的反射表面,诸如图5A和图5B的实施例中的表面67。结果,光学系统的效率得以显著改进,并且与输入图像的亮度类似,耦出图像的亮度基本上得以保持。为了实现该改进,利用了以下事实:不要求从基板耦出的光波照射耦出表面的整个有效区域。

[0061] 如图18中图示的,示出了应当撞击在部分反射表面79上以照射EMB 197的光线,图像的两个边缘(107R, 107L)光波和中央(107M)光波从基板耦出,并被重定向到观看者的眼睛24中。如所示的,具有零阶离轴角 $\alpha_{in}^{(0)}(\max)$ 、 $\alpha_{in}^{(0)}(\text{mid})$ 和 $\alpha_{in}^{(0)}(\min)$ 的光波107R、107M和107L分别仅照射部分反射表面79的部分79R、79M和79L,该光波107R、107M和107L反射到EMB 197中。结果,可以找到一种方法,其中耦进光波以这样的方式被拆分,该方式使得它们将仅照射表面79的所要求的相应部分,并且原始亮度将得以保留。为了实现这一点,光波的角度范围 $F_{sur1}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$ , (该光波以入射角 $\alpha_{sur}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + \alpha_{sur1} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在角度敏感耦出表面256a和256b上)(图17A)被划分为三个基本上相等的区段: $F_{low}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{m1}\}$ 、 $F_{mid}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$ 和 $F_{max}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m2}, \alpha_{max}\}$ 。该实施例的目的是:具有在 $F_{max}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m2}, \alpha_{max}\}$ 的FOV中的较高入射角的光波将通过角度敏感耦出元件256a和256b从基板310a、310b耦出;具有在 $F_{min}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{m1}\}$ 的FOV中的较低入射角的光波将通过耦出元件67a和67b从基板310a、310b耦

出,并且在  $F_{mid}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$  的FOV中的光波将通过耦出元件256b从上基板310a耦出,并且通过角度敏感耦出元件256b从下基板310b耦出。

[0062] 为了实现这一点,表面256a和256b应当基本上反射  $F_{max}^{(1)}$  中的所有光波,以使得它们将从基板310a和310b耦出,并且基本上透射  $F_{min}^{(1)}$  中的所有光波,以使得它们将继续在基板内部传播并通过反射表面67a和67b耦出。另外,  $F_{min}^{(1)}$  中的光波应当穿过角度敏感表面256a,继续在基板310a内部传播,并通过表面67a耦出,但是将通过角度敏感表面256b从基板310b耦出。

[0063] 因此,对于整个相关的适光范围,角度敏感反射表面256a和256b应当满足以下三个特性:

- a. 对于角度范围  $\{\alpha_{m2}, \alpha_{max}\}$  是基本上全反射的;
- b. 对于角度范围  $\{\alpha_{min}, \alpha_{m1}\}$  是基本上透明的;以及
- c. 在下表面256b对于角度范围  $\{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$  是基本上全反射的同时,上表面256a对于相同的角度范围  $\{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$  是基本上透明的。

[0064] 有可能通过在表面256a和256b上施加角度敏感的介电涂层来实现这些要求,但是用于实现这些涂层的过程可能相当复杂的。一种更简单的方式是使用具有适当折射率的光学粘合剂将与表面256a和256b相邻的光学部件进行粘合,该光学粘合剂分别在表面256a和256b处产生临界角  $\alpha_{m1}$  和  $\alpha_{m2}$ 。使用适当的AR涂层可以实现针对小于相应临界角的角度的高透明性。为了简化角度敏感表面的制造过程,通常要求光学粘合剂和基板的光学材料的阿贝数将是类似的,以避免图像中不期望的色效应(chromatic effect)。然而,即使是对于粘合剂和光学材料的阿贝数有很大不同的情况,也有可能利用适当的薄膜涂层设计技术来实现所要求的反射曲线。

[0065] 图17A图示了具有入射角为  $\alpha_{si}^{(1)} < \alpha_{m1}$  的来自同一平面输入波的两条光线320a和320b,它们分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。作为在上文陈述的条件(b)的结果,两条光线都穿过表面256a和256b。光线320a从耦进元件65a反射三次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(3)} = \alpha_{in}^{(0)} + 6 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310a内部,并且从表面256a反射两次,然后以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256a的左侧部分上。光线320b从耦进元件65b反射两次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(0)} + 4 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310b内部,并且从表面256b反射一次,然后以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256b的左侧部分上。在穿过表面256a之后,光线320a继续以离轴角  $\alpha_{in}^{(1)}$  在基板310a内部传播,并且在从表面67a反射单次之后,从基板310a耦出,并且通过部分反射表面79b而被重定向到观看者的眼睛中。在穿过表面256b之后,光线320b从表面256b的左侧反射一次,继续以离轴角  $\alpha_{in}^{(2)}$  在基板310b内部传播,以及在从表面67b反射两次之后,从基板310b耦出,并且通过部分反射表面79b而被重定向到观看者的眼睛中。

[0066] 图17B图示了具有入射角为  $\alpha_{si}^{(0)} > \alpha_{m2}$  的来自同一平面输入波的两条光线321a和321b,它们分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。作为在上文陈述的条件(a)的结果,两条光线分别从表面256a和256b反射,并且分别通过这些角度敏感反射表面从基板310a和310b耦出。光线321a从耦进元件65a反射一次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310a内部,并且以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256a的右侧部分上。光线320b从耦进元件65b反射两次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(0)} + 4 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310b内部,并且从表面256b反射一次,然后以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256b的左侧部分上。在从基板反射并耦出之后,光线321a和321b通过部分反射表面79a重定向到观看者的眼睛中。

[0067] 图17C图示了具有入射角为  $\alpha_{m1} < \alpha_{si}^{(0)} < \alpha_{m2}$  的来自同一平面输入波的两条光线322a和322b,它们分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。光线322a从耦进元件65a反射一次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310a内部,并且以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256a的右侧部分上。作为在上文陈述的条件(c)的结果,光线322a穿过表面256a,并且在从表面256a的左侧反射单次之后,光线322a继续以离轴角  $\alpha_{in}^{(2)}$  在基板310a内部传播,并且在从表面67a反射两次之后从基板310a耦出,并且通过部分反射表面79b重定向到观看者的眼睛中。光线322b从耦进元件65b反射一次,以离轴角  $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$  而被捕获在基板310b内部,并且以入射角  $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$  撞击在表面256b的右侧部分上。作为在上文陈述的条件(c)的结果,光线322b从表面256b反射,从基板310b耦出,并且被部分反射表面79a重定向到观看者的眼睛中。

[0068] 在本文中利用具有光学系统309的以下参数的光学系统说明了在图17A、图17B和图17C的实施例中利用的角度敏感反射表面256a和256b的实现方式:

$$\begin{aligned} \alpha_{sur1} = \alpha_{sur2} = 9^\circ; F^{(0)} = \{32^\circ, 44^\circ\}; F^{(1)} = \{50^\circ, 62^\circ\} \\ F^{(2)} = \{68^\circ, 80^\circ\}; F_{sur1}^{(1)} = \{41^\circ, 53^\circ\}; F_{sur1}^{(2)} = \{59^\circ, 71^\circ\}, \end{aligned} \quad (9)$$

光波是s偏振的。使用Schott N-SF57的基板64的光学材料具有的折射率为  $n_d = 1.846$ ,并且在图17A-17C中的与表面256a和256b相邻的光学粘合剂是NOA-139和NOA1315,其具有的折射率分别为  $n_d = 1.315$  和  $n_d = 1.39$ 。耦进图像的总FOV为  $F^{(0)} = \{32^\circ, 44^\circ\}$  (实际上在空气中是  $22^\circ$  的FOV),并且  $F_{sur1}^{(0)} = \{41^\circ, 53^\circ\}$  的角度范围被划分为三个基本上相等的区段:  $F_{low}^{(0)} = \{41^\circ, 45^\circ\}$ 、 $F_{mid}^{(0)} = \{45^\circ, 49^\circ\}$  和  $F_{max}^{(0)} = \{49^\circ, 53^\circ\}$ 。

[0069] 图19A图示了作为针对三种不同波长:450 nm, 550 nm和650 nm的入射角的函数的、来自图17A、图17B和图17C中的涂覆有适当的AR介电涂层的角度敏感反射表面256b的反射的曲线图。如所示的,对于  $45.4^\circ$  以上的角度谱,由于全内反射,反射为100%,而对于  $\{41^\circ, 44.9^\circ\}$  的入射角,反射是非常低的。图19B图示了作为针对三种不同波长:450 nm, 550

nm和650 nm的入射角的函数的、来自图17A、图17B和图17C中的涂覆有适当的AR介电涂层的角度敏感反射表面256a的反射的曲线图。如图所示的,对于48.8°以上的角度谱,由于全内反射,反射为100%,而对于{41°,48.6°}的入射角,反射是非常低的。

[0070] 由于两个基板310a、310b中的每一个基板独立地起作用,因此不再对每个相邻的耦进表面和耦出表面的共线性存在任何约束。仅有的约束是,对于每个单独的基板310a或310b,主表面以及耦进表面和耦出表面应当分别彼此平行。此外,根据光学系统的要求,每个单独的基板可以具有不同的厚度和不同的倾斜角。

[0071] 图20图示了图像的两个边缘光波和中央光波,它们从基板耦出并被重定向到观看者的眼睛24中。如图所示的,具有零阶离轴角  $\alpha_{in}^{(0)}(\min)$ 、 $\alpha_{in}^{(0)}(\max)$  和  $\alpha_{in}^{(0)}(\text{mid})$  的光波320、321和322均仅照射部分反射表面79a和79b的被要求照射EMB 197的部分;最右侧的光波321(点划线)仅从右表面79a反射;最左边的光波320(虚线)仅从左表面79b反射,而中央光波322(短划线)从右表面79a的左侧部分和左表面79b的右侧部分反射。所有的光波都在EMB 197的整个范围内到达观看者的眼睛。因此,图17A至图17C和图20中图示的实施例的EMB 197具有与图5A和图5B中图示的实施例相同的亮度,同时输出光孔被加倍。显然,通过利用部分反射表面79,可以进一步增加耦出光波的亮度,可以根据事先关于图6A至图12B图示的方法来动态地控制该部分反射表面79。结果,可以将到达观看者的眼睛的耦出图像波的亮度增加到非常接近被耦合到基板中的光波的亮度的水平,即,元件的亮度效率可以近乎为1。

[0072] 图17A至图17C和图20图示了包括一对基板以及分别嵌入这些基板内部的两个角度敏感耦出表面的实施例的轮廓,其中,在不降低投影图像的亮度的情况下,输出光孔被增加到两倍。然而,存在一些系统,其具有宽FOV和远离EMB定位的输入光孔,这会显著增加主基板的所要求的输出光孔。在这些情况下,将光孔增加到两倍是不够的,并且要求更高的增加因子。为了实现该目标,可以将上面图示的增加方法推广到 $n>2$ 的增加因子。

[0073] 假设有必要将图像的光孔增加到 $n$ 倍,如图21中图示的,应当分别将 $n-1$ 对角度敏感耦出表面插入基板中。对于每一对,表面应当以与表面256a和256b位于基板310a和310b中的方式相同的方式相邻地定位。另外,下部角度敏感耦出表面在基板的主表面上的投影应当与连续对的上部角度敏感耦出表面的投影相邻地定位。撞击在耦出表面上的光波的角度范围  $F_{sur1} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$  现在通过设置 $2n-2$ 个均等分开的角度 $\alpha_j$ 而被划分为 $2n-1$ 个基本上相等的区段。即,  $F_1 \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_1\}$ 、 $F_2 \equiv \{\alpha_1, \alpha_2\}$ 、 $\dots \dots F_j \equiv \{\alpha_{j-1}, \alpha_j\}$  和  $F_{2n-1} \equiv \{\alpha_{2n-2}, \alpha_{max}\}$ 。假设角度敏感耦出表面被表示为 $S_j$ ,其中 $j$ 是从右( $j=1$ )到左( $j=2n-2$ )的运行索引,则对于整个相关的适光范围, $2n-2$ 个元件的每个表面 $S_j$ 应当满足以下条件:

- a. 对于角度范围  $\alpha_{si}^{(0)} > \alpha_{2n-j-1}$  是基本上全反射的,以及
- b. 对于角度范围  $\alpha_{si}^{(0)} < \alpha_{2n-j-1}$  是基本上透明的,

其中,耦出元件 $S_j$ 应当反射具有的入射角大于极限角 $\alpha_{2n-j-1}$ 的所有撞击光波,以将这些光波从基板耦出,并且朝向下一个耦出元件 $S_{j+2}$ 基本上透射所有其他光波。如上面解

释的,达到这些要求的最简单方式是,使用具有适当折射率的光学粘合剂来粘合与相应耦出表面相邻的光学部件,该适当的折射率产生 $\alpha_{2n-j-1}$ 的临界角。而且,如先前所述,使用适当的AR涂层可以实现针对低于相应临界角的入射角的高透明性。

[0074] 包括 $n-1$ 对角度敏感耦出表面的以上说明的实施例将具有以下特性:

a. 通过每个表面 $S_j$  ( $j = 1 \dots 2n - 2$ ) 耦出的光波是在  $\{\alpha_{2n-j-1}, \alpha_{2n-j+1}\}$  的角度范围 ( $\alpha_{min}$  和  $\alpha_{max}$  在这里被分别表示为  $\alpha_0$  和  $\alpha_{2n-1}$ ) 中的那些光波。通过常规的耦出元件67a和67b耦出的光波是分别在  $\{\alpha_0, \alpha_2\}$  和  $\{\alpha_0, \alpha_1\}$  的角度范围中的那些光波,而通过第一表面 $S_1$ 耦出的光波是在  $\{\alpha_{2n-2}, \alpha_{max}\}$  的角度范围中的那些光波。

[0075] b. 具有入射角为  $\alpha_{j-1} < \alpha_s < \alpha_j$  ( $j = 1 \dots 2n - 1$ ) 每个光波(在撞击在上部对的输入表面上的光波的角度范围  $F_{sur1} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$  内)通过两个相邻的表面—— $S_{2n-j}$  和  $S_{2n-j+1}$ ——耦出,并且因此被 $k$ 个部分反射表面 $79_i$  ( $i=1 \dots k$ )的相应部分重定向到观看者的眼睛中。因此,通过全内反射耦合在本实施例内部的每个光波通过总体耦出元件的 $1/n$ 部分来耦出。然而,通过适当的设计,基本上所有耦合光波将会覆盖系统的指定EMB。

[0076] 先前已经假设利用两个相邻的基板来将输出光孔增加到 $n$ 倍而不降低投影图像的亮度。然而,对于具有相对宽的FOV的系统,利用三个而不是两个相邻的基板将是更合适的。在那种情况下,如图22中图示的,应当将 $n-1$ 个三元组的角度敏感耦出表面分别插入三个基板301a、310b和310c中。对于每个三元组,表面应当相邻地定位,并且下部角度敏感耦出表面的投影应当以迄今关于双基板所描述的方式与连续三元组的上部角度敏感耦出表面的投影相邻地定位。撞击在耦出表面上的光波的角度范围  $F_{sur1} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$  现在通过设置 $3n-3$ 个均等分开的角度  $\alpha_j$  而被划分成 $3n-2$ 个基本上相等的区段。即,  $F_1 \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_1\}$ 、 $F_2 \equiv \{\alpha_1, \alpha_2\}$ 、 $\dots$ 、 $F_j \equiv \{\alpha_{j-1}, \alpha_j\}$  和  $F_{3n-2} \equiv \{\alpha_{3n-3}, \alpha_{max}\}$ 。如先前的,该 $3n-3$ 个元件的每个表面 $S_j$ 对于  $\alpha_{si}^{(0)} > \alpha_{3n-j-2}$  的角度范围应当是基本上全反射的,并且对于  $\alpha_{si}^{(0)} < \alpha_{3n-j-2}$  的角度范围应当是基本上透明的。

[0077] 也就是说,耦出元件 $S_j$ 应当反射具有的入射角大于极限角 $\alpha_{3n-j-2}$ 的所有撞击光波,以将这些光波从基板耦出,并且朝向下一个耦出元件 $S_{j+3}$ 基本上透射所有其他光波。

[0078] 包括 $n-1$ 个三元组的角度敏感耦出表面的以上说明的实施例将具有以下特性:

a. 通过每个表面 $S_j$  ( $j = 1 \dots 3n - 3$ ) 耦出的光波是在  $\{\alpha_{3n-j-2}, \alpha_{2n-j+1}\}$  的角度范围 ( $\alpha_{min}$  和  $\alpha_{max}$  在这里被分别表示为  $\alpha_0$  和  $\alpha_{3n-2}$ ) 中的那些光波。通过常规的耦出元件67a、67b和67c耦出的光波是分别和在  $\{\alpha_0, \alpha_3\}$ 、 $\{\alpha_0, \alpha_2\}$  和  $\{\alpha_0, \alpha_1\}$  的角度范围中的那些光波,而通过第一表面 $S_1$ 耦出的光波是在  $\{\alpha_{3n-3}, \alpha_{max}\}$  的角度范围中的那些光波。

[0079] b. 具有入射角为  $\alpha_{j-1} < \alpha_s < \alpha_j$  ( $j = 1 \dots 3n - 2$ ) 的每条光波(在  $F_{sur1} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$

的角度范围内)通过三个相邻的基板—— $S_{3n-j-1}$ 、 $S_{3n-j}$ 和 $S_{3n-j+1}$ ——耦出,并且因此通过k个部分反射表面 $79_i$  ( $i=1\cdots k$ )的相应部分重定向到观看者的眼睛中。

[0080] 显然,可以被利用来增加输出光孔的相邻基板的数量不限于三个。可以根据光学系统的各种参数来利用任何数量 $m$ 个相邻基板以及 $(n-1) \cdot m$ 个角度敏感表面。

[0081] 图23图示了用于扩大输出光孔的替换实施例,其中不仅耦出表面,还有耦进表面中的一些都是对输入波的入射角敏感的。如所示的,光学射线364撞击在由两个基板360a和360b构成的光学元件355上,其中基板360a的下表面361b附接到基板360b的上表面361c,从而限定了界面平面368。第一基板360a的耦进元件365是角度敏感反射表面,其中下表面的耦进元件366是位于表面365下方的反射表面。通过中间棱镜367的前表面363进入上基板360a的输入光线364可以被表面365全反射并且耦合在上基板360a内部(短划线),可以基本上穿过表面364以通过表面367耦合在下基板360b内部(虚线),或者可以被表面364部分反射并且耦合在基板360a内部,以及耦合在基板360b内部。

[0082] 耦合在上基板360a内部的光线364a可以被角度敏感反射表面362a全反射以作为光线364aa从元件355耦出,或者基本上穿过表面362a以通过表面362a再次耦合在上基板360a内部并且作为光线364ab通过耦出元件67a从元件355耦出,或者可以被表面362a部分反射并且作为光线364aa和364ab从元件耦出。

[0083] 耦合在下基板360b内部的光线364b可以被角度敏感反射表面362b全反射以作为光线364ba从元件355耦出,或者可以基本上穿过表面362b以通过表面362b再次耦合在下基板360b内部并且作为光线364bb通过耦出元件67b从元件355耦出,或者被表面362b部分反射并且作为光线364ba和光线364bb从元件耦出。

[0084] 用以获得元件355的最简单方式是通过将元件362a, 362b和365设计为对输入波的入射角不敏感的常规分束器。结果,每条输入光线将被部分反射表面均匀地拆分,并且因此作为光线364aa、364ab、364ba和364bb从所有反射表面耦出。因此,对于每条输入光波,输出光孔将是表面362a、362b、67a和67b在下表面361d上的投影。与输入光孔相比,输出光孔被扩大到4倍,其是表面365和367在表面361d上的投影。然而,因此,与输入光波的亮度相比,耦出光波的亮度衰减到四分之一。

[0085] 用以实现元件355的另一种方式是将以入射角 $\alpha_{sur}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + \alpha_{sur1} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在角度敏感耦进表面365和耦出表面362a和362b上光波的角度范围 $F_{sur1}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{max}\}$ 划分为四个基本上相等的区段: $F_{low}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{m1}\}$ 、 $F_{mid1}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$ 、 $F_{mid2}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m2}, \alpha_{m3}\}$ 和 $F_{max}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m3}, \alpha_{max}\}$ 。该实施例的目的在于:具有在 $F_{max}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m2}, \alpha_{max}\}$ 的FOV中的较高入射角的光波将被角度敏感表面365反射,并且被耦合到上基板360a中,而具有在 $F_{min}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_2\}$ 的FOV中的较低入射角的光波将穿过角度敏感表面365,并且被耦合到下基板360b中。在耦合到上基板中之后,具有在 $F_{max}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m3}, \alpha_{max}\}$ 的FOV中的最高入射角的光波将被角度敏感表面362a反射,并且从基板耦出,而在 $F_{mid2}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m2}, \alpha_{m3}\}$ 的FOV中的第二高入射角将穿过角度敏感表面362a,并且通过耦出元件67a从基板耦出。在耦合到下基板中之后,具有在

$F_{mid1}^{(1)} \equiv \{\alpha_{m1}, \alpha_{m2}\}$ 的FOV中的第三高入射角的光波将被角度敏感表面362d反射,并且从基板耦出,而在 $F_{min}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{m2}\}$ 的FOV中的最低入射角将穿过角度敏感表面362b,并且通过耦出元件67b从基板耦出。此选项的主要优点是输出光孔增加到4倍,但不利的是,系统的可实现EMB实际上为零。

[0086] 替换实施例是要修改角度敏感表面365、362a和362b的反射曲线,使得作为入射角的函数的反射曲线将不会像图19A和图19B中所示的表面256a和256b的反射曲线那样急剧下降。如看到的,光波的一部分将被耦合到上基板和下基板两者中,并且被耦合在给定基板360i (i=a,b)内部的光波的一部分将通过角度敏感表面362i和耦出元件67i耦出。具体来说,在第二高角度区段 $F_{mid2}^{(1)}$ 中的光波的一部分将穿过表面365,并且被耦合在下基板360b内部,而在角度区段 $F_{mid2}^{(1)}$ 中的光波的一部分将被表面365反射,并且被耦合在上基板360a内部。具有在 $F_{up}^{(1)} \equiv \{\alpha_{up}, \alpha_{max}\}$ 的FOV中的入射角的光波将被耦合在上基板360a内部(其中 $\alpha_{up} < \alpha_{m2}$ ),而具有在 $F_{low}^{(1)} \equiv \{\alpha_{min}, \alpha_{low}\}$ 的FOV中的入射角的光波将被耦合在下基板360b内部(其中 $\alpha_{low} > \alpha_{m2}$ )。结果,具有在 $F_{both}^{(1)} \equiv \{\alpha_{up}, \alpha_{low}\}$ 的FOV中的入射角的光波将被耦合在上基板360a以及下基板360b内部。

[0087] 类似地,在第二高角度区段 $F_{mid2}^{(1)}$ 中的光波的一部分将被表面362a反射,并且耦出基板360a,而在角度区段 $F_{max}^{(1)}$ 中的光波的一部分将穿过表面362a,并且通过耦出元件67a从基板360a耦出。另外,在角度区段 $F_{min}^{(1)}$ 中的光波的一部分将被表面362b反射,并且从基板360b耦出,而在角度区段 $F_{mid1}^{(1)}$ 中的光波的一部分将穿过表面362b,并且通过耦出元件67b从基板360b耦出。通过适当的设计,耦出光波的输出亮度将被适度衰减,但是系统的所需EMB将被输出光波的角度范围所覆盖。

[0088] 要考虑的另一个问题是被投影到观看者的眼睛中的图像的最大可实现FOV。在大多数基于基板引导的HMD技术中,无论是反射型还是衍射型,光波都基本上垂直于基板的主表面而从引导基板耦出。因此,由于来自基板的斯涅尔折射,图像的外部FOV为:

$$F^{(out)} \sim F^{(in)} \cdot v_s \quad (10)$$

其中基板内部的FOV为 $F^{(in)}$ ,并且基板的折射率为 $v_s$ 。耦合在基板内部的光波的各阶应当被严格分开,即,

$$\alpha_{min}^{(1)} = \alpha_{min}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1} > \alpha_{max}^{(0)} \quad (11)$$

[0089] 因此,内部FOV受到以下约束的限制

$$F^{(in)} = \alpha_{max}^{(0)} - \alpha_{min}^{(0)} < 2 \cdot \alpha_{sur1} \quad (12)$$

其中通常应当在 $\alpha_{max}^{(0)}$ 与 $\alpha_{min}^{(1)}$ 之间保持至少2度的裕度,以确认两个阶之间的分

离。方程(12)的限制得到了以下系统：在该系统中，基板、耦进元件和耦出元件的折射率相等。

[0090] 参考图24A和图24B，基板360a和360b、耦进棱镜367和重定向棱镜80全部都由相同的光学材料制成，并且结果是，耦合在元件355内部的两条边缘光线371和372仅在穿过系统的输入表面363和输出表面361a时才被折射到不同的方向中。由于构成元件355的光学材料之间的相似性，当耦合光线分别穿过基板与耦进元件367和重定向棱镜80之间的界面表面369、81时，该耦合光线不会经历任何折射。由于光学射线仅在紧密接近进入表面363和离开表面361a的法线的角度下折射，因此光线的方向根据以下近似方程进行修改：

$$\alpha_{out} \sim \frac{v_{in}}{v_{out}} \cdot \alpha_{in}, \quad (13)$$

以及随后，维持方程(10)的限制。

[0091] 可以利用光学射线以高度倾斜角度进入基板这一事实来改进以上限制。如图24B中图示的，耦进棱镜367和重定向棱镜80由具有下述折射率的相同光学材料制成，该折射率具有以下光学特性：

$$v_p < v_s; A_p \sim A_s \quad (14)$$

其中  $v_p$  是棱镜367和80的折射率，并且  $A_p$ 、 $A_s$  分别是棱镜和基板的阿贝数。由于基板360a、360a的光学材料与耦进棱镜367和重定向棱镜80的光学材料之间的相异性，以及光线371和372入射在界面表面369和81处的高倾斜度，光线在穿过界面表面369和81时当前会经历到很大的折射。由于棱镜367和80具有相同的光学特性，所以对于每条穿过光线，在表面369和81处的折射将分别具有相同的量值和相反的方向，以及因此它们将相互补偿。可以根据以下近似方程来计算作为在基板内部的偏差的函数的在棱镜内部的两条不同光线之间的角度偏差：

$$\Delta\alpha_p \sim \frac{v_s}{v_p} \cdot \frac{\cos\alpha_s}{\cos\alpha_p} \cdot \Delta\alpha_s, \quad (15)$$

其中  $\alpha_s$  和  $\alpha_p$  分别是在基板和棱镜内部的离轴角。类似地，在元件355外面的光线之间的角度偏差为：

$$\Delta\alpha_{out} \sim v_p \cdot \Delta\alpha_p \quad (16)。$$

[0092] 因此，在元件355外面与在基板360a和360b内部的角度偏差之间的比率为：

$$\Delta\alpha_{out} \sim v_s \cdot \frac{\cos\alpha_s}{\cos\alpha_p} \cdot \Delta\alpha_s, \quad (17)$$

或者

$$F^{(out)} \sim F^{(in)} \cdot v_s \cdot \frac{\cos\alpha_s}{\cos\alpha_p} \quad (18)。$$

[0093] 也就是说，通过修改棱镜369和80的光学材料，有可能将系统在空气中的FOV增加到  $\frac{\cos\alpha_s}{\cos\alpha_p}$  倍。

[0094] 应当注意的是,为了保持方程(12)的约束,具有入射角为 $\alpha_{in}^{(1)} < \alpha_{up}$ 的光波不应当耦合在上基板360a内部,并且具有入射角为 $\alpha_{in}^{(1)} > \alpha_{low}$ 的光波不应当耦合在下基板360b内部。可以采用与如关于图19A和图19B所图示的表面256a和256b的构造类似的方式,通过将界面表面369构造为角度敏感反射表面来实现第一要求,该角度敏感反射表面将对于角度范围 $\{\alpha_{up}, \alpha_{max}\}$ 是基本上全反射的,并且对于角度范围 $\{\alpha_{min}, \alpha_{up}\}$ 是基本上透明的。结果,将被表面365反射的、在角度范围 $\{\alpha_{min}, \alpha_{up}\}$ 中的所有光波将通过表面369从上基板耦出到棱镜367中,并且被棱镜367的表面379阻挡。第二要求可以通过以下方式实现:使在角度范围 $\{\alpha_{low}, \alpha_{max}\}$ 中的所有光波被表面365全内反射,并且因此将该光波耦合在仅上基板360a内部。

[0095] 在这里还应当注意的是,对于大多数相关的显示系统,应当在整个适光区域内满足这两个要求。如关于角度敏感表面256a和256b的制造过程所提到的,通常要求的是,与基板的表面和光学材料相邻的光学粘合剂的阿贝数将是类似的,以避免图像中的不期望的色效应。然而,存在一些情况,其中粘合剂和光学材料的阿贝数有很大不同。由于阿贝数之间的变化所致的色散可以通过选择用于棱镜367和80的耦进和重定向的、具有与基板360a和360b的阿贝数不同的阿贝数的光学材料来补偿。通过适当选择,阿贝数之间的差异会引发具有相同量值和相反方向的色散。结果,两个引发的色散将相互补偿。

[0096] 在本文中图示的图24B的实施例中所利用的角度敏感反射表面362a、362b和365的实现方式利用一种光学系统,其具有用于基板360a的以下参数:

$$\alpha_{sur1} = \alpha_{sur2} = 8^\circ; F^{(0)} = \{38^\circ, 50^\circ\}; F^{(1)} = \{54^\circ, 66^\circ\} \quad (19)$$

$$F^{(2)} = \{70^\circ, 82^\circ\}; \alpha_{sur}^{(1)} = \{46^\circ, 58^\circ\}; \alpha_{sur}^{(2)} = \{62^\circ, 74^\circ\},$$

以及用于基板360b的以下参数:

$$\alpha_{sur1} = \alpha_{sur2} = 10.5^\circ; F^{(0)} = \{31^\circ, 43^\circ\}; F^{(1)} = \{52^\circ, 64^\circ\} \quad (20)$$

$$F^{(2)} = \{73^\circ, 85^\circ\}; \alpha_{sur}^{(1)} = \{41.5^\circ, 53.5^\circ\}; \alpha_{sur}^{(2)} = \{62.5^\circ, 74.5^\circ\}$$

[0097] 光波是非偏振的。基板360a和360b的光学材料有利地是折射率为 $n_d = 1.917$ 、阿贝数为30.6的Ohara S-LAH88,并且棱镜367和80的光学材料是折射率为 $n_d = 1.592$ 和阿贝数为35.3的OharaS-FTM-88。与表面369、365、368(和81)、362a和362b相邻的光学粘合剂是NOA 142、NOA 76、NOA 148、NOA 170和NOA 61,它们具有的折射率分别为 $n_s = 1.42$ 、1.51、1.48、1.70和1.56。基板360a和360b内部的耦进图像的总FOV为 $F^{(0)} = \{31^\circ, 50^\circ\}$ 。棱镜80和367内部的耦进图像的总FOV为 $F^{(0)} = \{38^\circ, 67^\circ\}$ ,并且空气中的耦进图像的总FOV为 $F^{(0)} = \{-23^\circ, 23^\circ\}$ ,即系统沿单个轴线的FOV为 $46^\circ$ 。每个基板的厚度为1 mm,并且输出光孔和输入光孔的有效区域分别为25.5 mm和6.5 mm。

[0098] 如观看者看到的,空气中的FOV与基板360a和360b内部的组合FOV相比被扩大到

2.4倍,并且因此,克服了方程(10)中给出的限制。通过利用图24B中图示的扩展,其中棱镜367和80的折射率大幅小于基板360a和360b的折射率,有可能使以下这样一种系统具体化:在该系统中,空气中的外部FOV与基板内部的FOV之间的比率显著大于基板的折射率。不仅可以将这种扩展用于图24B中图示的特定配置,还可以通常将其用于任何基板,即使是具有单个耦出元件(其具有与耦进棱镜和重定向棱镜不同的光学材料)。

[0099] 图25A至图25C图示了作为基板内部的归一化FOV的函数的角度敏感反射表面362a、362b和365的反射比曲线。

[0100] 图26图示了作为FOV的函数的元件355的效率。如所示的,在大多数FOV中,该效率在45%至50%之间,而在FOV的边缘处,该效率大幅更高。即使输出光孔扩大到四倍,效率也仅衰减到二分之一。关于在FOV边缘处的效率的不均匀性,对于大多数背面照明和正面照明的显示器(诸如LCD和LCOS),照度以及因此显示源的亮度通常在显示器的中心处更强,这是由于照明光源的高斯分布的结果。因此,系统的非均匀的效率曲线可以补偿非均匀的照明,并且另外,可以改进耦出图像的亮度。对于具有均匀亮度分布的显示源,有可能通过减小图24B的表面67b对FOV左边缘处的光波的反射比以及通过减小表面81对FOV右边缘处的光波的透射,来以电子方式或以光学方式衰减图像边缘处的较高强度。

[0101] 该扩展不仅可以用于图24B中图示的特定配置,而且可以一般地用于任何基板。如图27A中图示的,该扩展被用于具有单个基板64和单个耦出表面67的系统,其中两条边缘光线382和383通过耦进棱镜367耦合到基板中,并且通过重定向棱镜80重定向到观看者的眼睛24中,其中基板64具有与耦进棱镜和重定向棱镜不同的光学材料。图27B图示了一个实施例,其中边缘光线386和389通过来自耦进棱镜367的外表面363的反射而被耦合到基板中。

[0102] 将参照图28A来提及投影到观看者的眼睛中的图像的非均匀性。三条不同光线331、332和333a通过耦出元件67从基板64耦出,并且然后通过部分反射表面79a和79b重定向到观看者的眼睛中。另一方面,光线333b在被表面79a反射之前穿过表面79b。结果,在到达观看者的眼睛之前,光线333b的亮度作为表面79b的透射率的函数而被该表面衰减。如图28B中图示的,该图28B标绘了作为输出光孔89的横坐标x的函数的耦出光波的归一化亮度,输出亮度在输出光孔的中央部分处减小。该亮度图案在明亮的背景上具有暗条纹的形式,或者对于几个部分反射表面79a、79b、79c……的阵列,该亮度图案是交替的暗条纹和亮条纹的图案(未示出)。对于近眼显示器,眼睛整合从单个视角发出的光波,并将其聚焦到视网膜上的一个点上,并且由于眼睛的响应曲线是对数的,因此显示器的亮度中的小变化(如果有的话)将不是明显的。因此,如果条纹足够密集(即,每个条纹的横向尺寸显著小于眼睛的瞳孔),并且如果眼睛被定位得足够靠近基板,则即使在具有条纹的情况下,观看者仍可以体验高质量图像。然而,对于诸如平视显示器(HUD)之类的定位在离眼睛一定距离处的显示器,观看者的眼睛将明显看到条纹,这会显著降低图像质量和光学系统的总体性能。因此,必须找到对条纹现象的解决方案,以允许将本申请中所提出的投影元件用于远眼(far-from-eyes)应用。

[0103] 存在几种不同的替换方式用于实现HUD配置。如图29A中图示的,准直图像322a、322b从观看者的头部的侧面部分耦合到基板310a、310b中,并且沿着水平轴线在基板内部传播。在那种情况下,光学系统255a的出射光瞳由观看者的两只眼睛确定,并且因此,与其中将图像投影到观看者的单个眼睛中的近眼系统的EMB相比,显著扩展了光学系统255a的

出射光瞳。因此,光学系统的输出光孔应当相应增加,单个耦出元件是不够的,并且应当利用至少一些不同的耦出元件来实现所要求的光孔。

[0104] 图29A图示了其中根据关于图17的实施例来利用四个耦出元件256a、256b、67a和67b的可能实施例。在该实施例中出现了关于暗条纹的问题:在光线322ba和322bb分别通过耦出元件67a和256b从基板310a和310b耦出,并且然后由部分反射表面79d和79b将其重定向到观看者的眼睛中的同时,并且光线322ba在被表面79c反射到观看者的眼睛中之前被表面79b衰减。对于非均匀性问题的一种可能的解决方案是利用单个部分反射表面79(如图5A中图示的)而不是表面阵列。然而,利用该解决方案的结果是,棱镜80的厚度以及因此整个光学系统的尺寸将增加到超出系统合理使用的点。另一个可能的解决方案是利用密集的表面阵列,其中每个元件的横向尺寸大约为1-2mm。结果,每个元件中的部分阻挡区段的横向尺寸将大约为0.1-0.2 mm,并且在30-50 cm的观看距离处将是不明显的。

[0105] 在图29B和图29C中图示了对非均匀性问题的替换解决方案,其利用了动态控制的部分反射表面。假设将动态表面79i ( $i = a, b, \dots$ ) 作为每个帧时间的全反射 $p$ 区段 ( $p < 1$ ) 进行操作,以产生具有反射率为 $p$ 且透射率为 $(1-p)$ 的系统。代替同时操作所有动态表面的反射比,有可能交替地操作它们,即,在每个帧时间期间的两个专门分开的操作时间下,将具有奇数索引的表面和具有偶数索引的表面激活为反射表面。由于每个表面仅被其右相邻表面部分地阻挡,并且两个相邻表面不再被同时激活,因此避免了该局部阻挡问题。如图29B中图示的,在第一时间段 $p$ 期间,仅表面79a、79c和79e被激活为完全反射的,而表面79b和79d是完全透明的。结果,光线322ba不再被表面79b阻挡,并且在被表面256b耦出之后被重定向到观看者的眼睛中。如图29C中图示的,在第二时间段 $p$ 期间,仅表面79b和79d被激活为完全反射的,而表面79a、79c和79e是完全透明的。现在,光线322a和322bb分别通过耦出元件67a和256b从基板310a和310b耦出,然后被主动反射表面79d和79b重定向到观看者的眼睛中,同时光线322ba穿过透明表面79c。利用这一提出的实施例,不同的光线在不同的时隙到达观看者的眼睛。然而,对于图像的所有光线,所有这些时隙都被包含在同一帧时间中。因此,由于视觉的持久性,来自显示源的所有像素的光线将被整合到观看者的眼睛中,由此创建单个图像。由于两组表面在单个时间帧期间以两个不同的时间段 $p$ 交替地操作,因此 $p$ 的值应当满足以下条件:

$$p < 0.5 \quad (21).$$

[0106] 结果,被投影到观看者的眼睛中的图像的效率不能超过50%的值。

[0107] 在图30A至图30B图示了一种用于HUD实施例的替换配置,其中显示源和准直模块360位于光学模块的下部(或上部),并且耦合光波正沿垂直轴传播。在这里,出射光瞳沿着法线轴线延伸到基板内部的传播方向,并且光孔应当相应地延伸。在这里,也可以类似于参考图29A至图29C所图示的方式来解决非均匀性问题,但是在这里可以利用甚至更简单的解决方案。与其中组合器应当基本上垂直于观看者视线的近眼显示器的实施例不同,对于HUD配置,有可能使组合器绕水平轴线(或垂直于观看者视线的另一轴线)以相当大的角度(其通常为 $45^\circ$ 左右)旋转。

[0108] 如图31A中图示的,有可能设计耦进元件和耦出元件的配置,以使得图像的中央光波(即,位于图像的FOV的中央的光波)在通过耦出元件耦出之后,在以相对于基板的主表面成近乎 $45^\circ$ 的很大的离轴角而定向的方向下从基板折射。结果,由于基板以近似 $45^\circ$ 的角度

旋转,部分反射表面79不应当相对于主表面旋转以使光波重定向到观看者的眼睛中。元件79可以是单个平坦的部分反射元件,其附接到基板的主表面72。因此,从基板耦出的光波通过平坦的均匀表面重定向到观看者的眼睛中,并且非均匀性问题完全被消除。

[0109] 图31A至图31C图示了可能的实施例,其中根据关于图17A至图17C的前述实施例,利用四个耦出元件256a、256b、67a和67b来沿垂直轴线扩展输出光孔。在图31A中看到是具有入射角为 $\alpha_{m1} < \alpha_{si}^{(0)} < \alpha_{m2}$ 的来自同一平面输入波的两条光线420a和420b,其分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。光线420a从耦进元件65a反射一次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$ 而被捕获在基板410a内部,并且以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在表面256a的右侧部分上。作为在上文参照图17A至图17C所描述的条件(c)的结果,光线420a穿过表面256a,并且在从表面256a的左侧单次反射之后,其继续以离轴角 $\alpha_{in}^{(2)}$ 在基板410a内部传播,并且在从表面67a反射两次之后从基板410a耦出,并且通过平坦的部分反射表面79重定向到观看者的眼睛中。光线420b从耦进元件65b反射一次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$ 而被捕获在基板410b内部,并且以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在表面256b的右侧部分上。作为在上文描述的条件(c)的结果,光线420b从表面256b反射,从基板410b耦出,并且被平坦的部分反射表面79重定向到观看者的眼睛中,其中平行光线420a和420b基本上与观看者的视线共线地传播。

[0110] 图31B图示了具有入射角为 $\alpha_{si}^{(1)} < \alpha_{m1}$ 的来自同一平面输入波的两条光线421a和421b,其分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。作为上文中参考图17A至图17C描述的条件(b)的结果,两条光线都穿过表面256a和256b。光线421a从耦进元件65a反射两次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(0)} + 4 \cdot \alpha_{sur1}$ 而被捕获在基板410a内部,并且从表面256a反射一次,之后以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在表面256a的左侧部分上。光线421b从耦进元件65b反射一次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$ 而被捕获在基板410b内部,并且以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在表面256b的左侧部分上。在穿过表面256a之后,光线421a继续以离轴角 $\alpha_{in}^{(1)}$ 在基板410a内部传播,并且在从表面67a反射单次之后从基板410a耦出,并且通过平坦的部分反射表面79重定向到观看者的眼睛中。在穿过表面256b之后,光线421b从表面256b的左侧反射一次,并且继续以离轴角 $\alpha_{in}^{(2)}$ 在基板410b内部传播,并且在从表面67b反射两次之后从基板410b耦出,并且通过平坦的部分反射表面79重定向到观看者的眼睛中。

[0111] 图31C图示了具有入射角为 $\alpha_{si}^{(0)} > \alpha_{m2}$ 的来自同一平面输入波的两条光线422a和

422b,其分别撞击在角度敏感耦出元件256a和256b上。作为在上文参照图17A至图17所描述的条件(a)的结果,两条光线分别从表面256a和256b反射,并且通过这些角度敏感反射表面从基板410a和410b耦出。光线422a从耦进元件65a反射一次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(1)} = \alpha_{in}^{(0)} + 2 \cdot \alpha_{sur1}$

而被捕获在基板410a内部,并且以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 撞击在表面256a的右侧部分上。

光线422b从耦进元件65b反射两次,以离轴角 $\alpha_{in}^{(2)} = \alpha_{in}^{(0)} + 4 \cdot \alpha_{sur1}$ 而被捕获在基板410b内

部,并且从表面256b反射一次,之后以入射角 $\alpha_{si}^{(1)} = \alpha_{in}^{(1)} - \alpha_{sur1}$ 入射在表面256b的左侧部分上。在被基板反射并从基板耦出之后,光线422a和422b被平坦的部分反射表面79重定向到观看者的眼睛中。

[0112] 在本文中利用具有以下参数的光学系统来说明在图31A至图31C的实施例中利用的旋转式HUD系统的实现方式:

$$\begin{aligned} \alpha_{sur1} = \alpha_{sur2} = 12^\circ; F^{(0)} = \{18^\circ, 28^\circ\}; F^{(1)} = \{42^\circ, 52^\circ\} \\ F^{(2)} = \{66^\circ, 76^\circ\}; F_{sur1}^{(1)} = \{30^\circ, 40^\circ\}; F_{sur1}^{(2)} = \{54^\circ, 64^\circ\}, \end{aligned} \quad (22)$$

光波是s偏振的,并且该系统具有波长为 $\lambda=550$  nm的准单色显示源。基板64的光学材料是具有折射率为 $v_d = 1.846$ 的Schott N-SF57,以及与表面256a和256b相邻的光学粘合剂是NOA 1315,其具有的折射率为 $v_d = 1.315$ 。耦进图像的总FOV为 $F^{(0)} = \{18^\circ, 28^\circ\}$ (实际上是在空气中的 $F^{(air)} = \{35^\circ, 61^\circ\}$ 的FOV)。 $F_{sur1}^{(0)} \equiv \{30^\circ, 40^\circ\}$ 的角度范围被划分成三个基本上相等的区段: $F_{low}^{(0)} \equiv \{30^\circ, 33.3^\circ\}$ 、 $F_{mid}^{(0)} \equiv \{33.3^\circ, 36.7^\circ\}$ 和 $F_{max}^{(0)} \equiv \{36.7^\circ, 40^\circ\}$ 。对于具有折射率

为 $v_d = 1.846$ 的基板产生 $33.3^\circ$ 和 $36.7^\circ$ 的临界角的光学材料应当分别为1.013和1.103。实际上无法找到具有所要求的光学指数的光学材料。因此,对于使用准单色光的光学系统,有可能利用适当的介电涂层来使角度敏感表面的反射比曲线向左“偏移”。

[0113] 图32A图示了作为针对550的波长的入射角的函数的、来自涂覆有适当介电涂层的图31A至图31C中的角度敏感反射表面256a的反射的曲线图。如图所示的,对于高于 $37^\circ$ 的角谱,即使在 $45^\circ$ 的临界角以下,反射也基本上为100%,而对于 $\{30^\circ, 36.4^\circ\}$ 的入射角,反射则是非常低的。图32B图示了作为针对550的波长的入射角的函数的、来自涂覆有适当介电涂层的图31A至图31C中的角度敏感反射表面256b的反射的曲线图。如图所示的,对于高于 $33.7^\circ$ 的角谱,即使在 $45^\circ$ 的临界角以下,反射也为100%,而对于 $\{30^\circ, 33^\circ\}$ 的入射角,反射则是非常低的。

[0114] 图33图示了图像的两个边缘光波和中央光波,它们从基板耦出并被重定向到观看者的眼睛24R和24L中。如图所示的,具有零阶离轴角 $\alpha_{in}^{(0)}(\min)$ 、 $\alpha_{in}^{(0)}(\max)$ 和 $\alpha_{in}^{(0)}(\mid)$ 的光波420、421和422均仅照射平坦的部分反射表面79的照射EMB所要求的部分。也就是说,最右边的光波422(点划线)仅从表面79的右侧部分反射,最左边的光波421(短划线)仅从表面79的

左侧部分反射,而中央光波420(虚线)从表面79的中央部分反射。所有的光波都在HMB 297的整个范围内到达观看者的眼睛。因此,在没有减少图像的亮度的情况下并且在非均匀性问题被完全解决时,图33中图示的实施例的HMB 297已经被延伸。通过利用动态控制的部分反射表面79,甚至可以另外增加耦出光波的亮度。动态表面79的最大效率目前不限于图29中图示的实施例中的50%,并且实际上可以将其增加到近乎100%。也就是说,到达观看者的眼睛的耦出图像波的亮度可以接近耦合到基板中的光波的亮度。

[0115] 对于本领域技术人员将显而易见的是,本发明不限于前文所说明的实施例的细节,并且在不脱离本发明的精神或基本属性的情况下,可以以其他特定形式来体现本发明。因此,当前的实施例要在所有方面都被视为是说明性的而非限制性的,本发明的范围由所附权利要求而不是由前文的描述来表明,并且落入权利要求的等同方式的范围和含义内的所有改变因此都意图被涵盖于权利要求中。

[0116] 特别地,应当注意的是,参照一个或多个实施例描述的特征是作为示例而不是作为对那些实施例的限制而进行描述的。因此,除非另行陈述或除非特定的组合是明确不可接纳的,否则假设参照仅一些实施例描述的可选特征被认为同样也可适用于所有其他实施例。

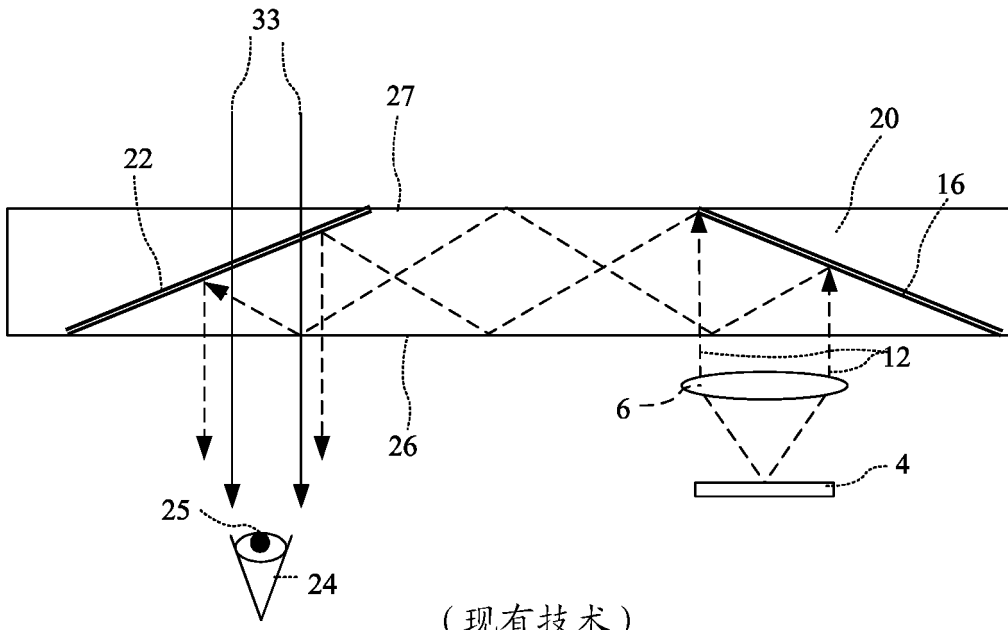


图 1A

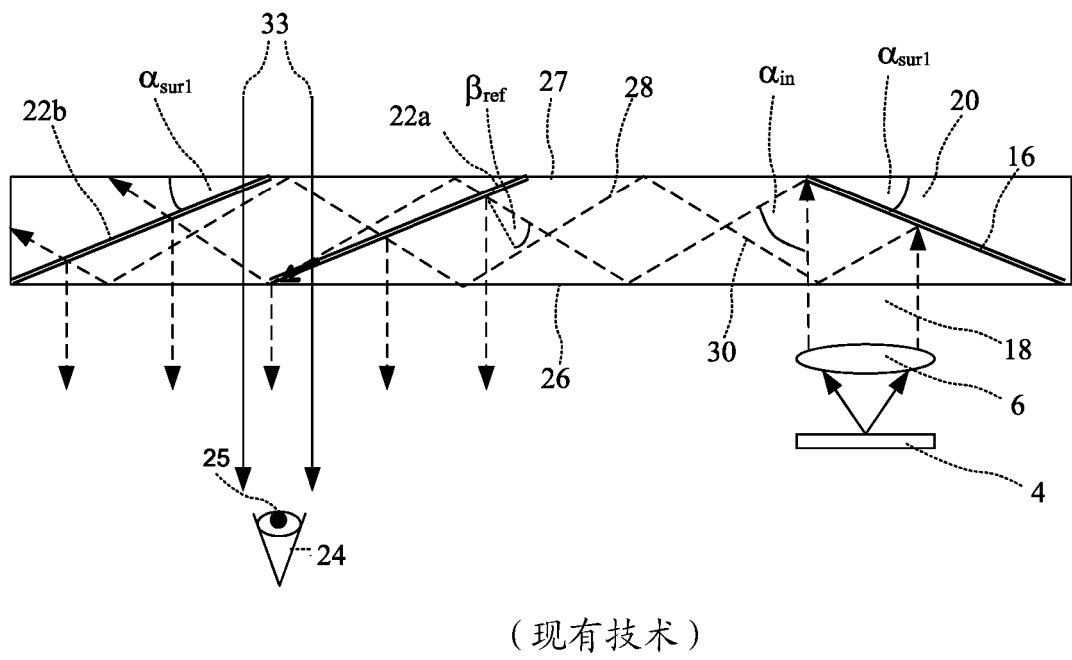


图 1B

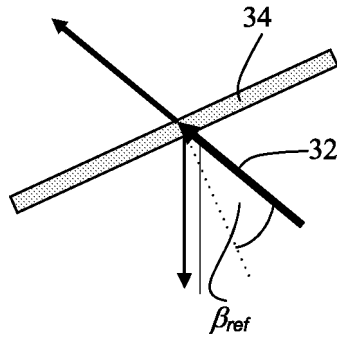


图 2A

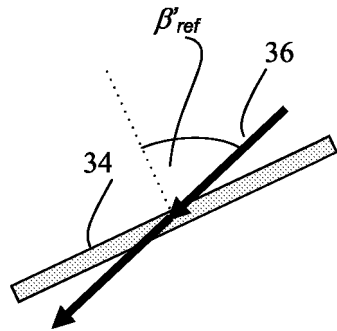


图 2B

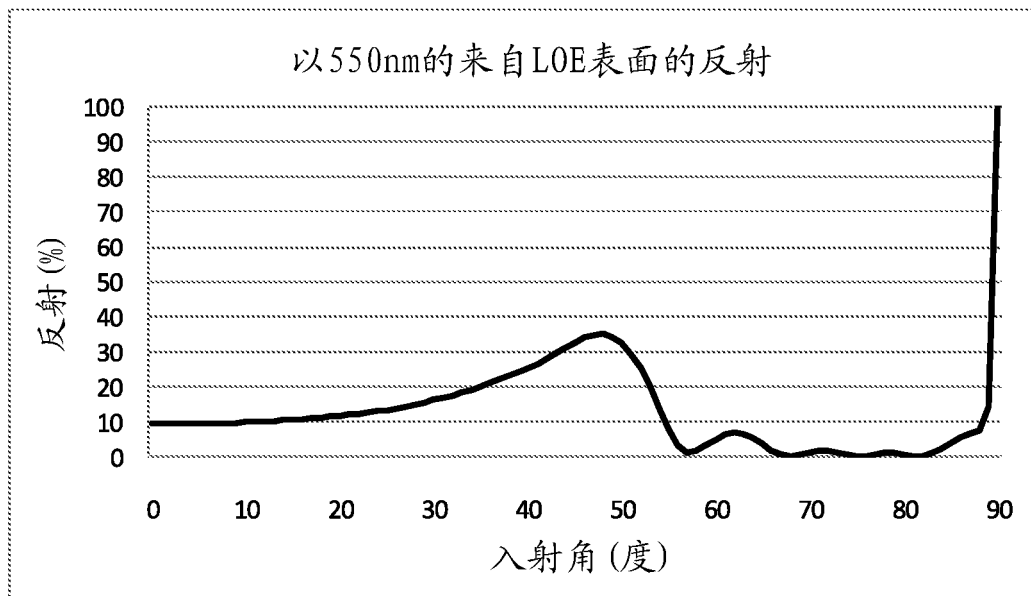
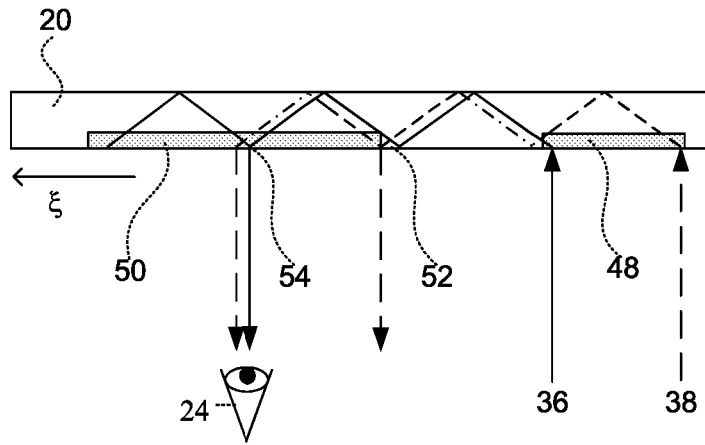


图 3



(现有技术)

图 4

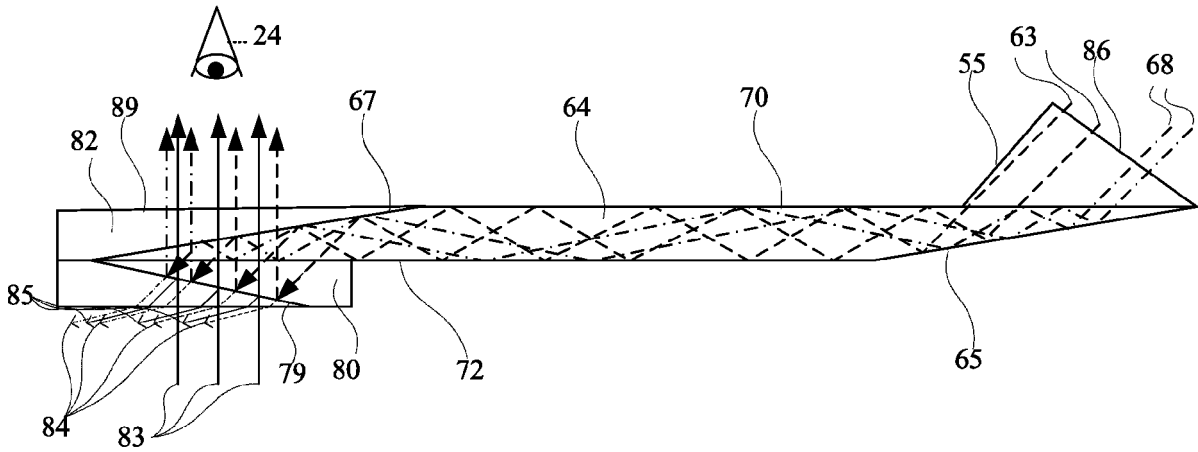


图 5A

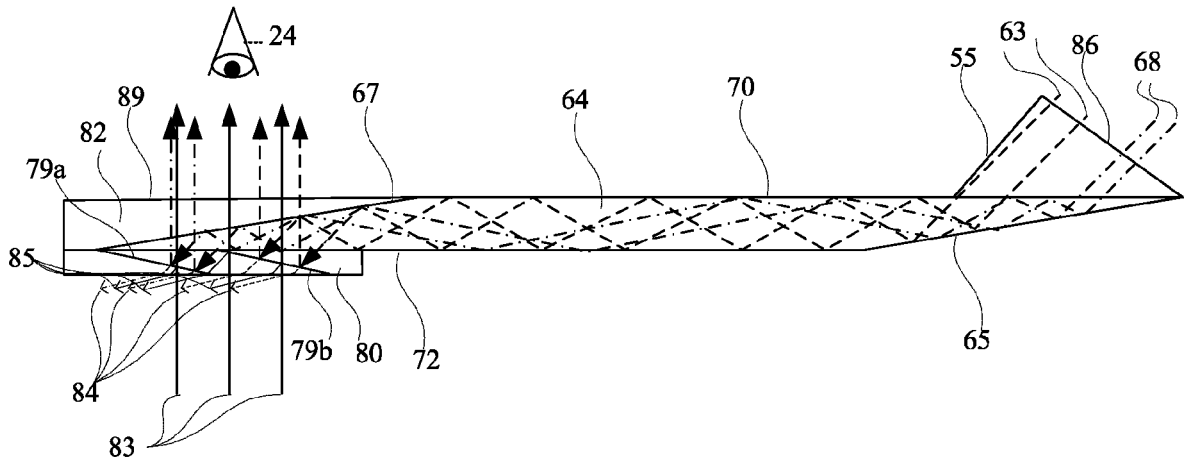


图 5B

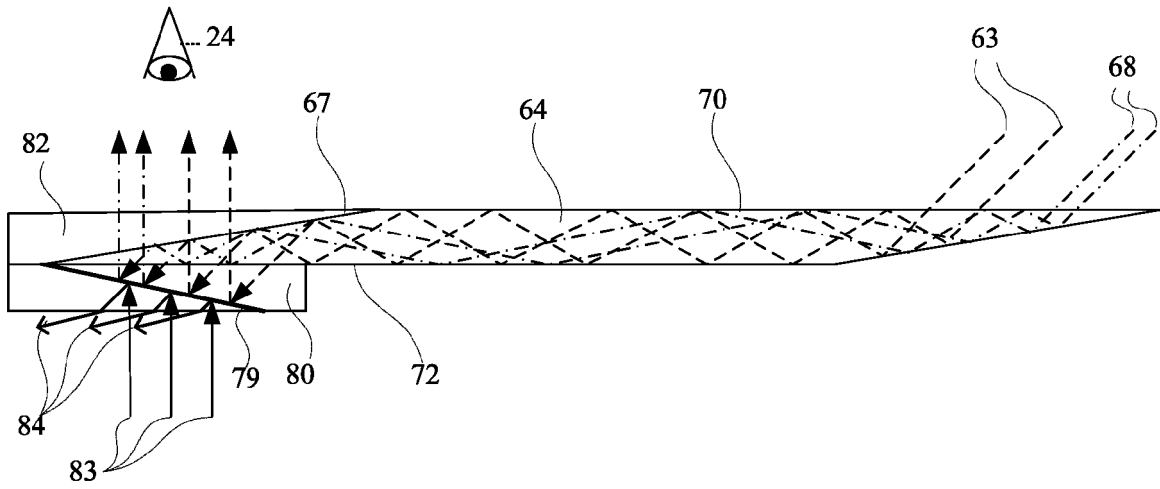


图 6A

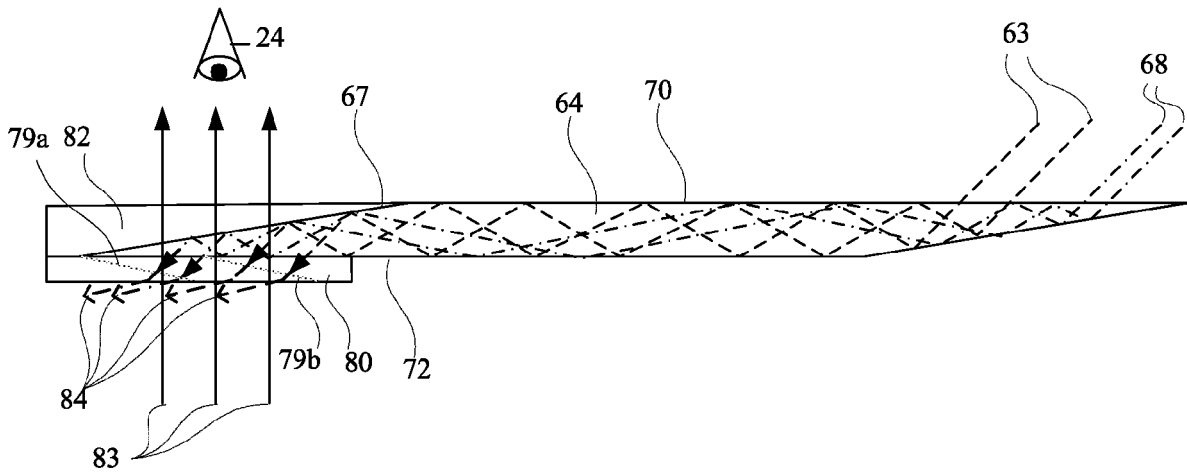


图 6B

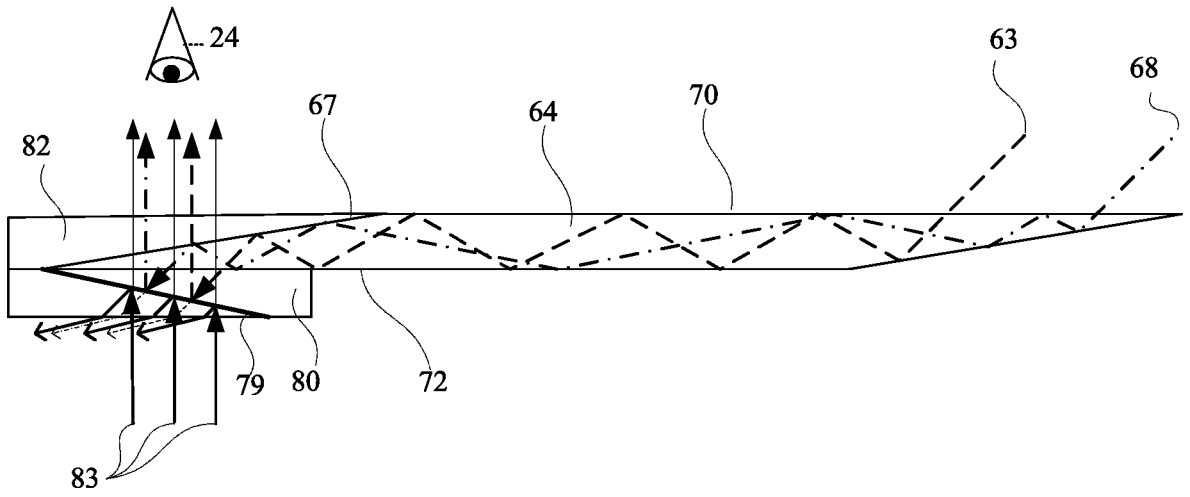


图 7A

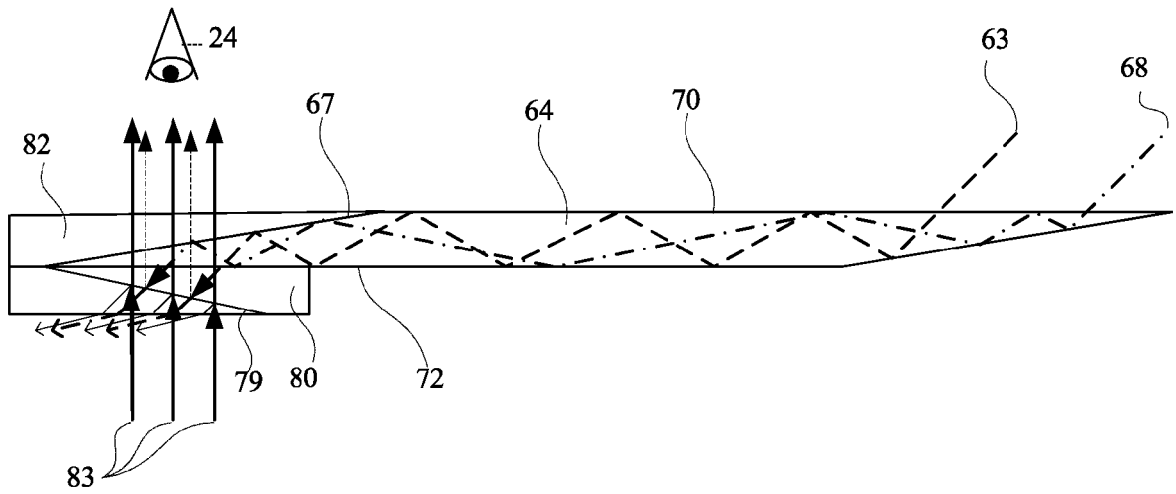


图 7B

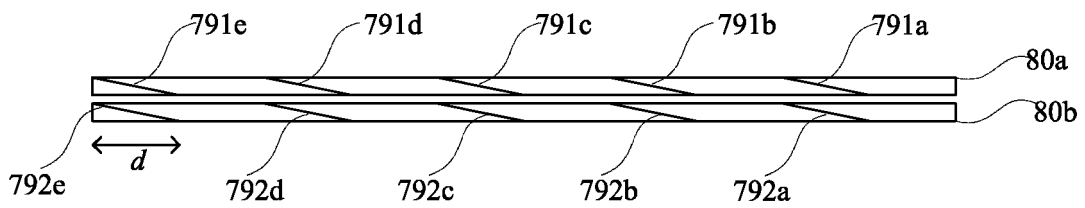


图 8A

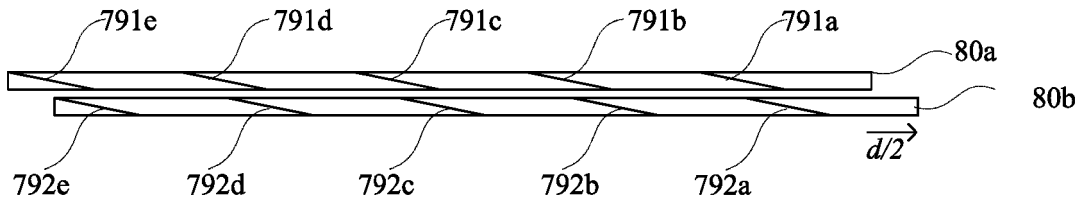


图 8B

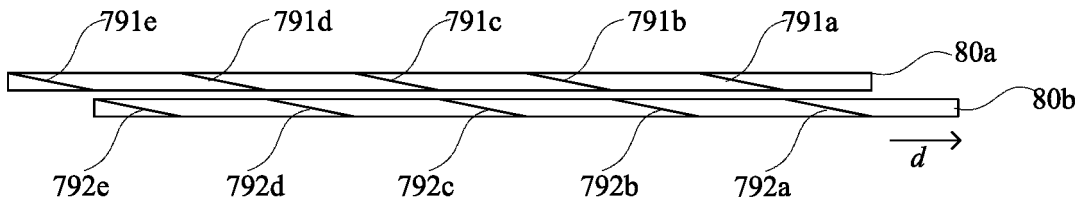


图 8C

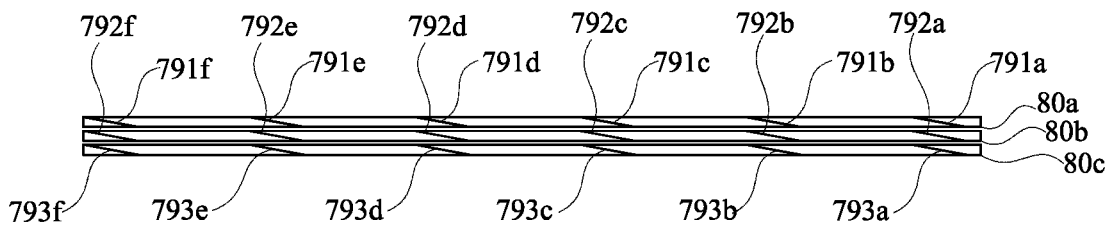


图 9A

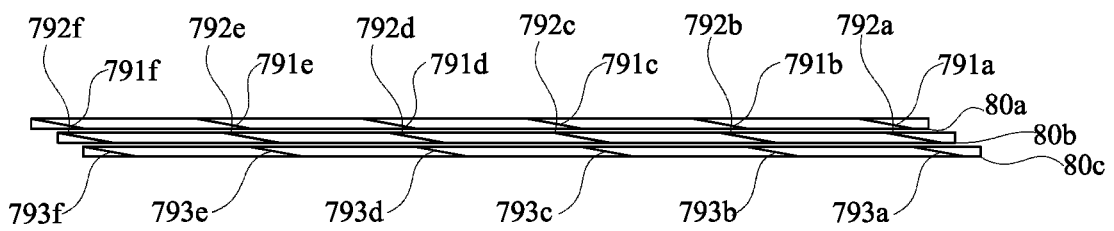


图 9B

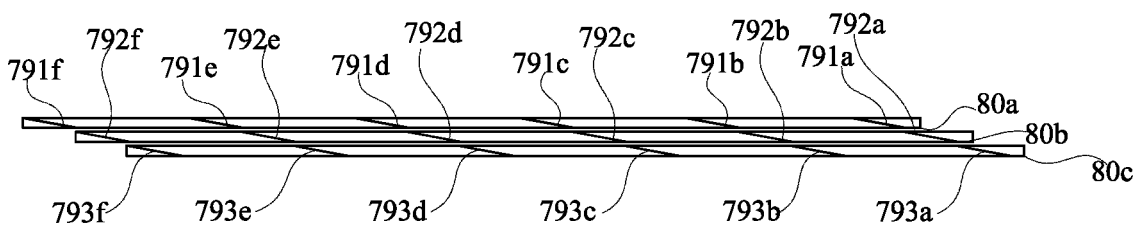


图 9C

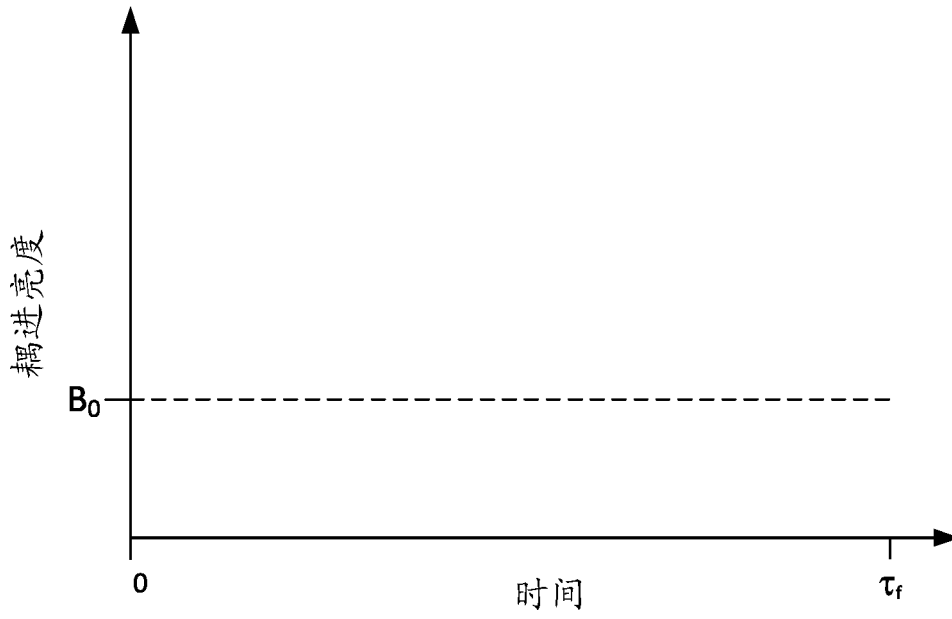


图 10A

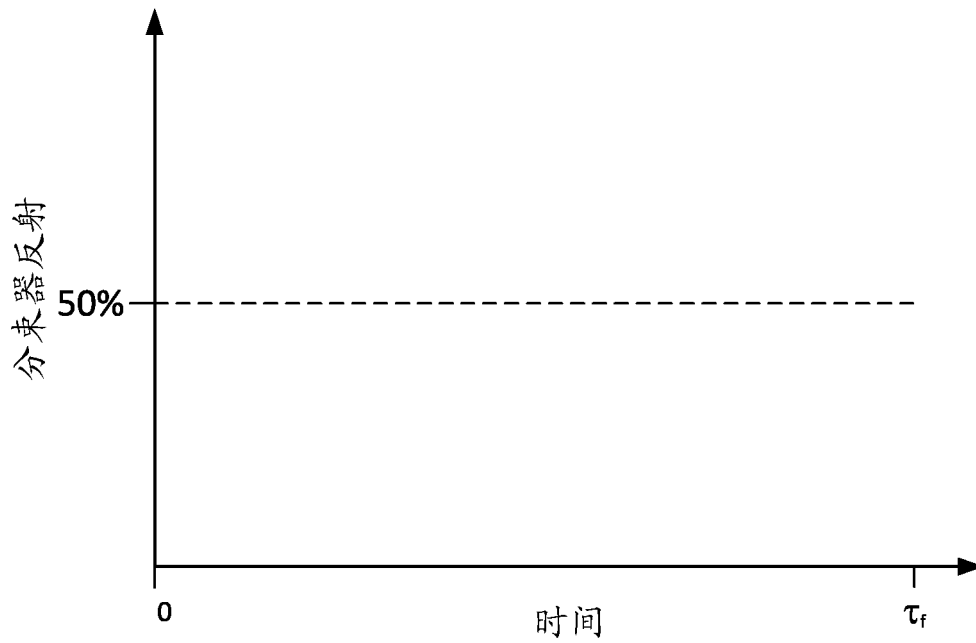


图 10B

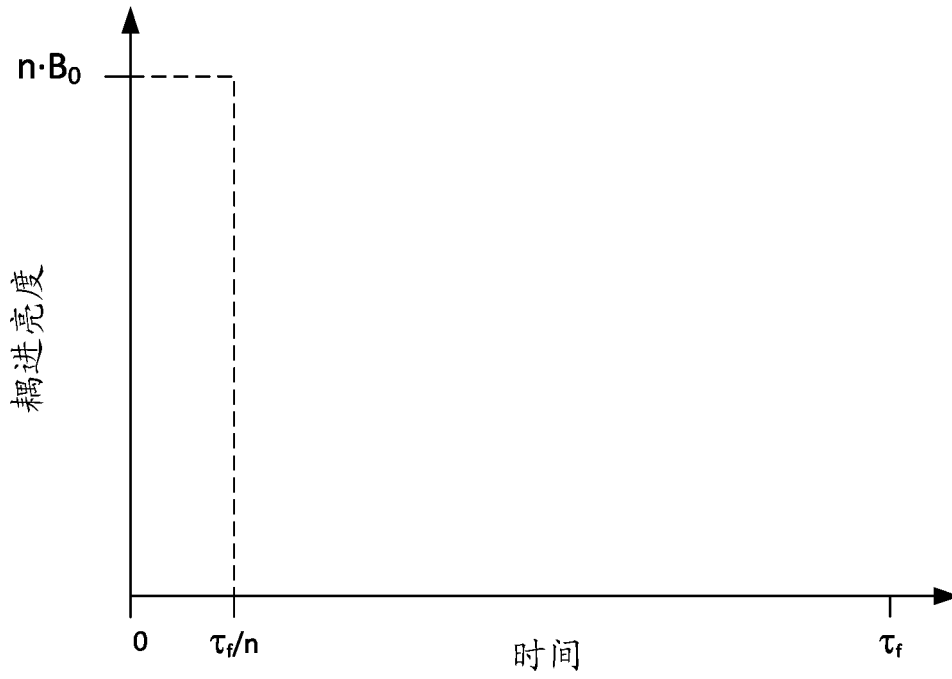


图 11A

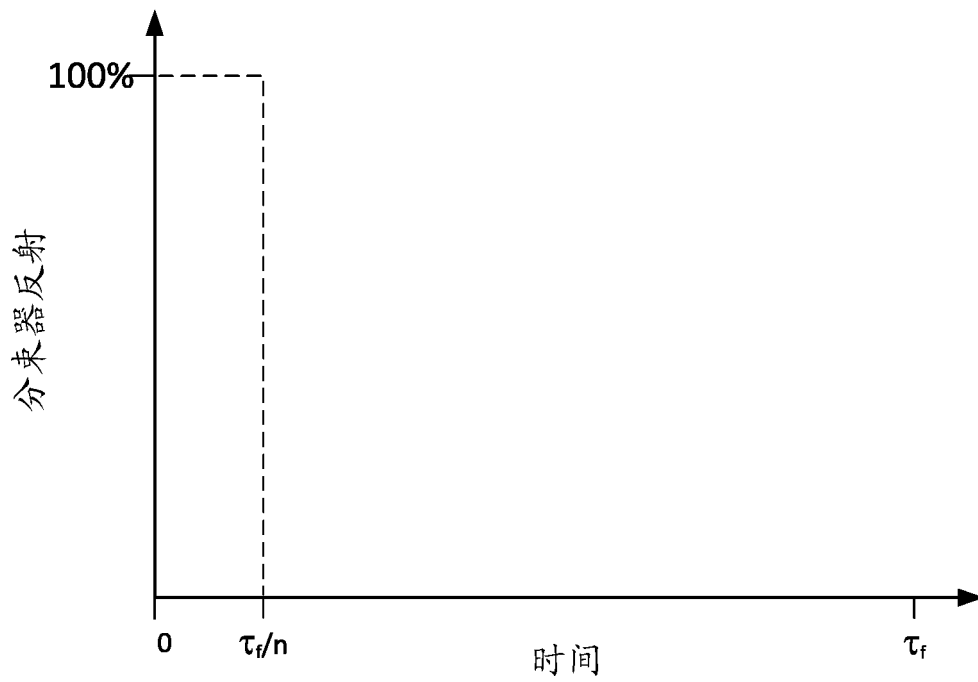


图 11B

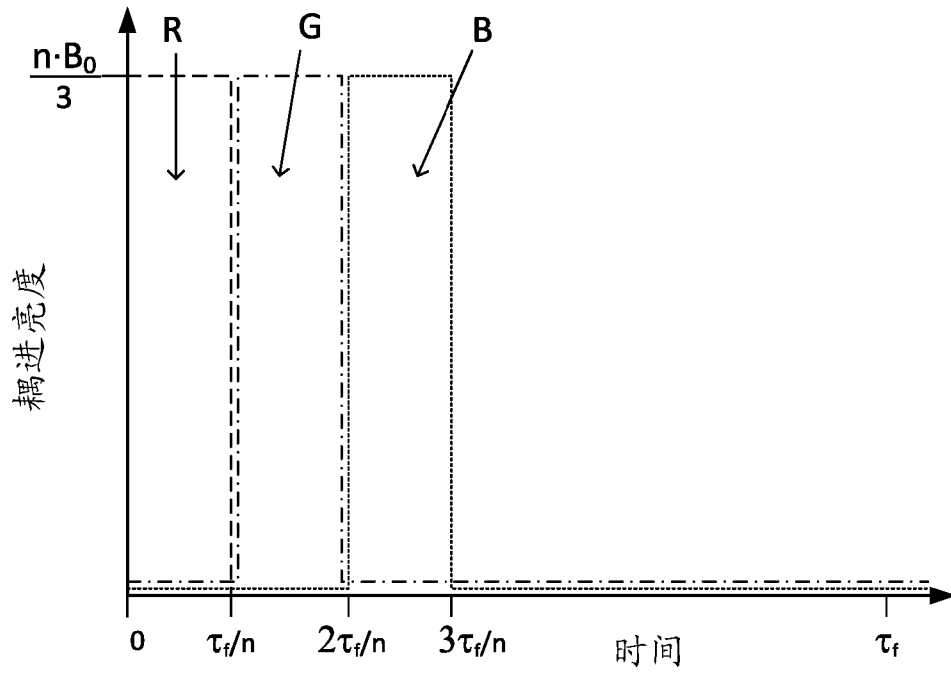


图 12A

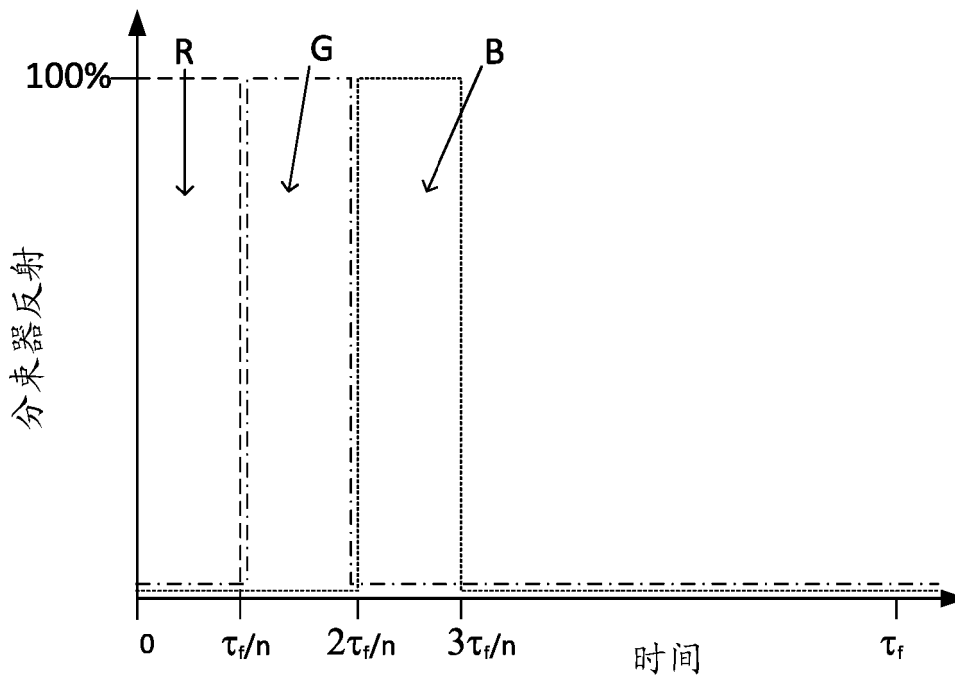


图 12B

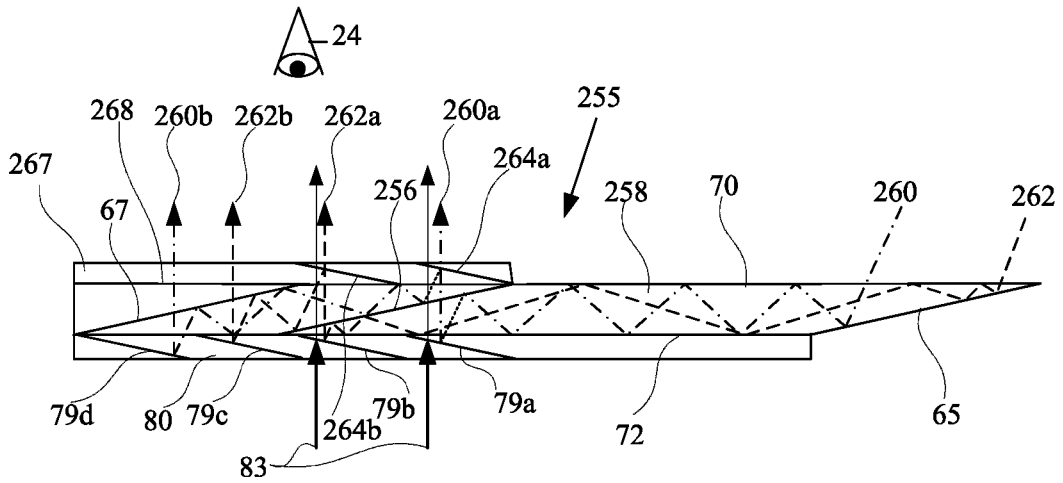


图 13A

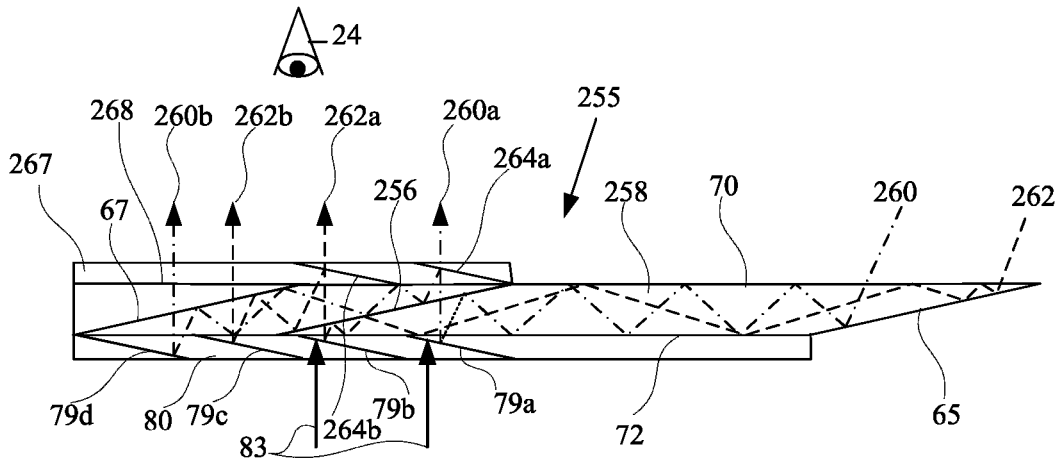


图 13B

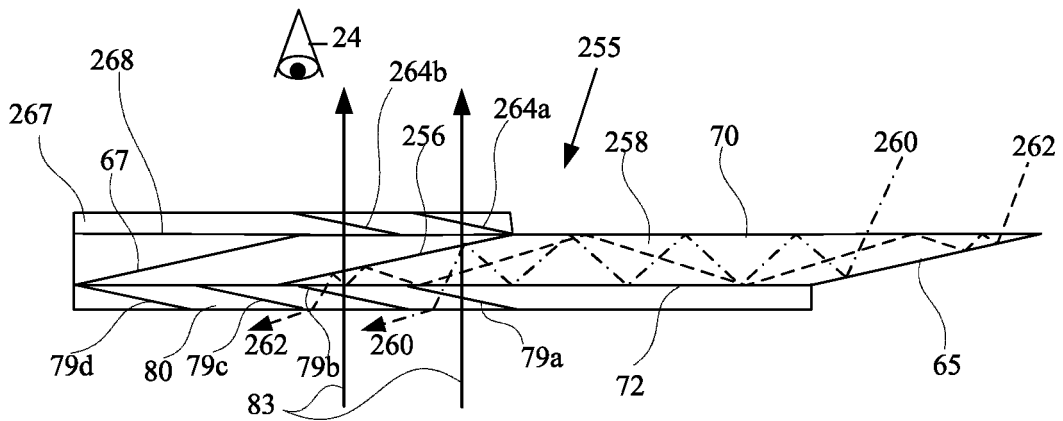


图 13C

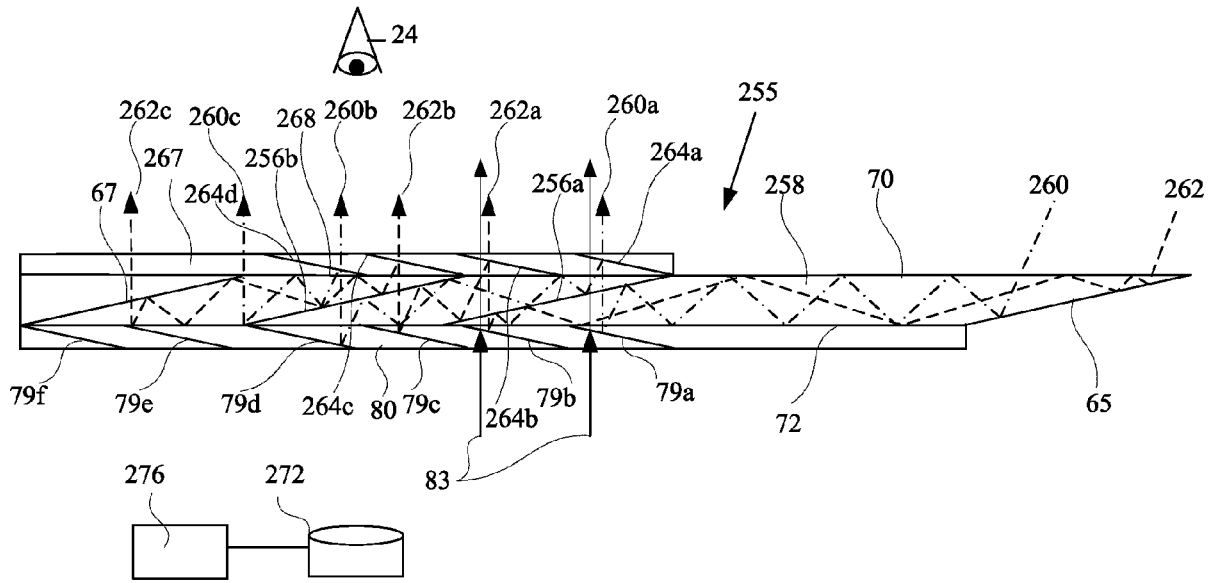


图 14A

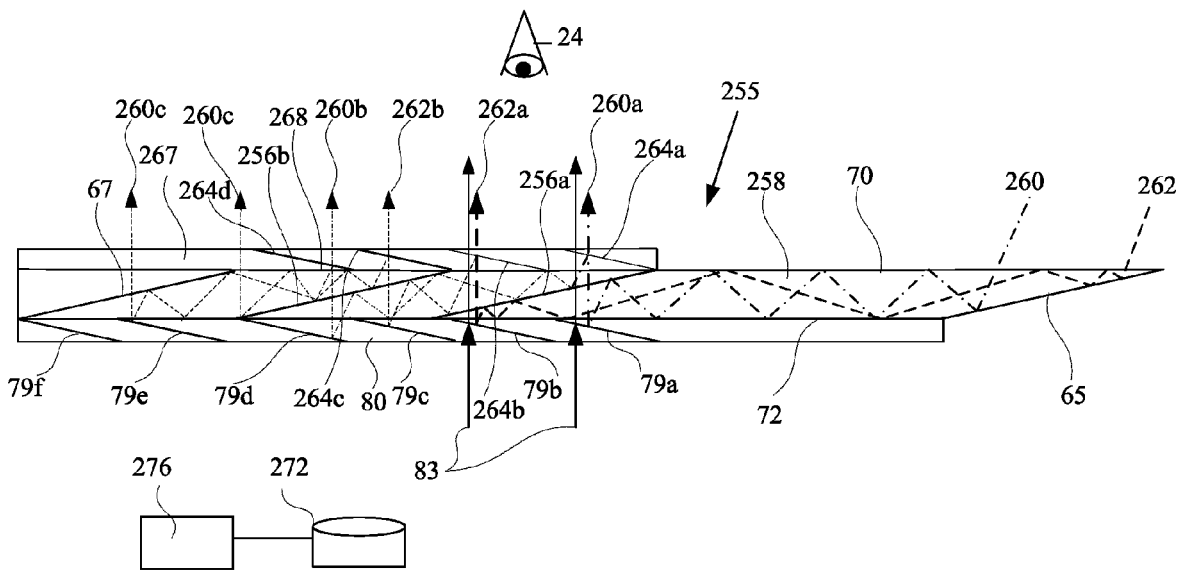


图 14B

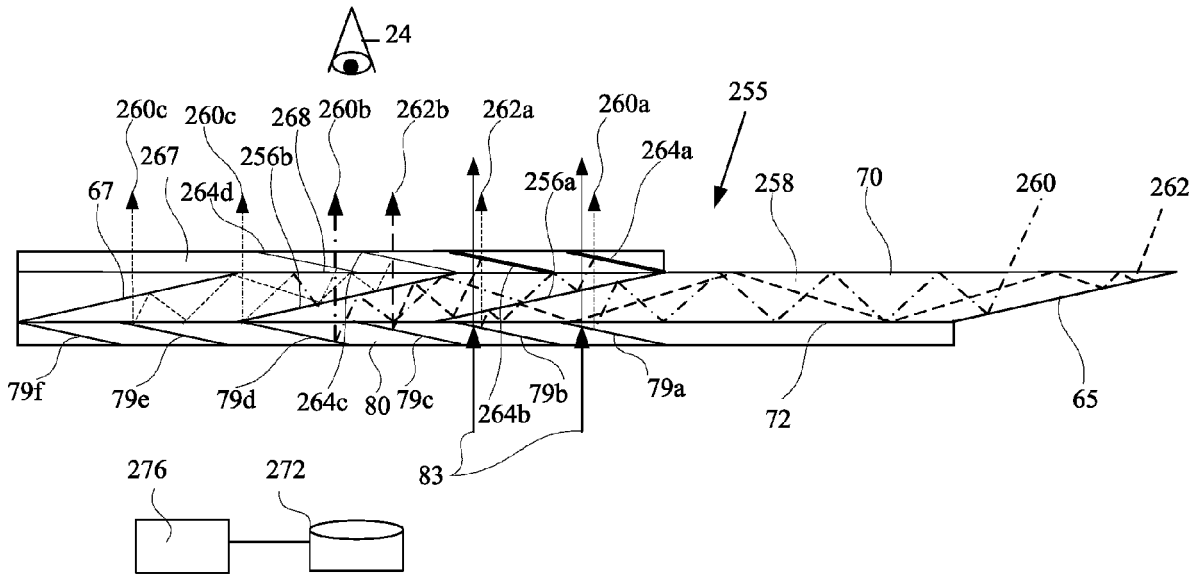


图 14C

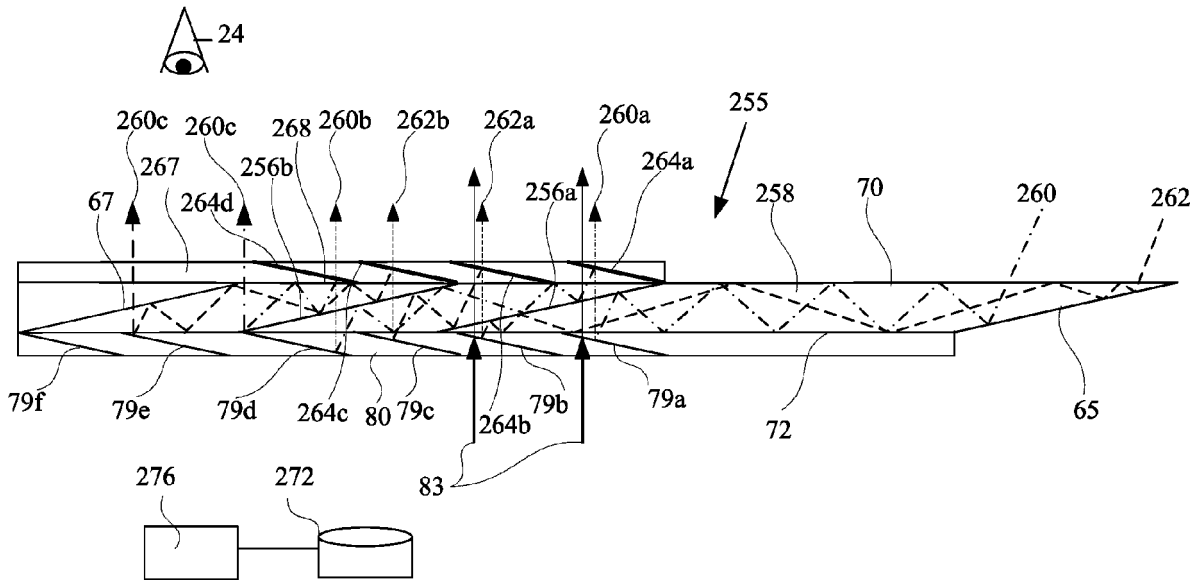


图 14D

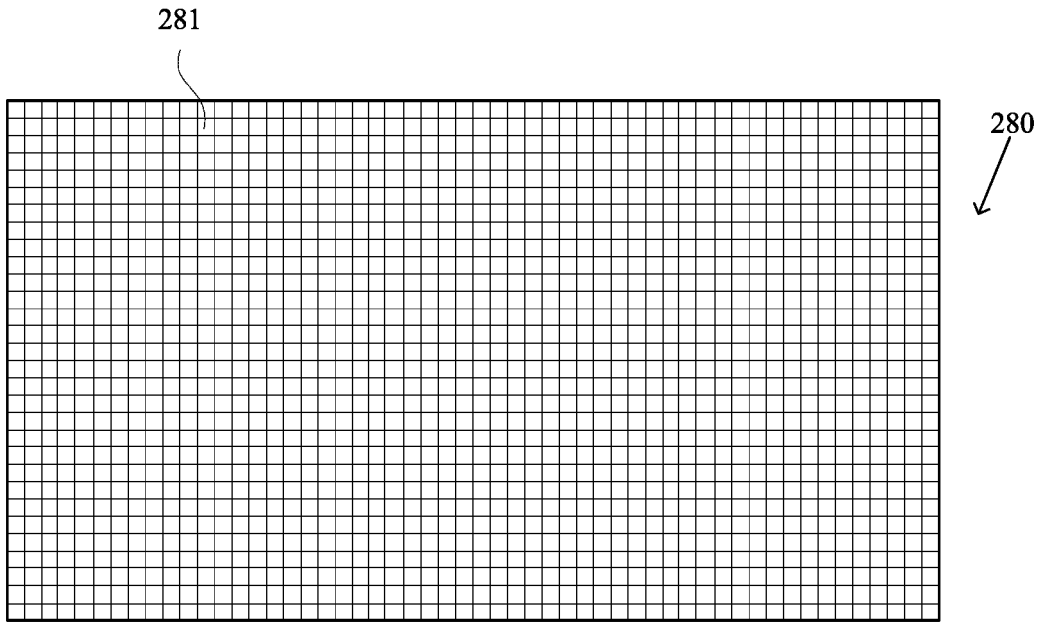


图 15A

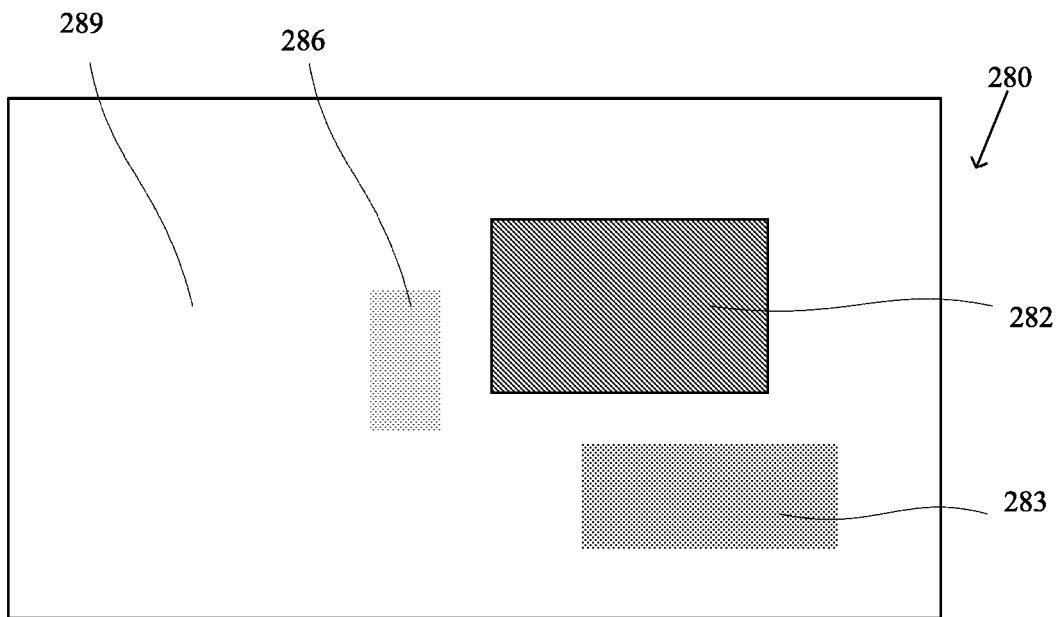


图 15B

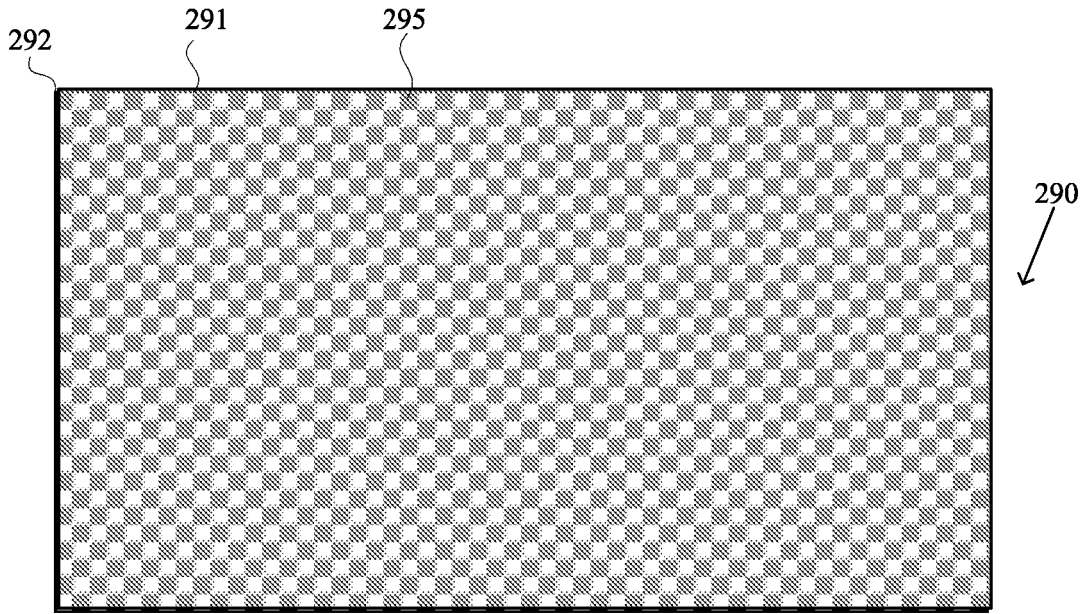


图 16A

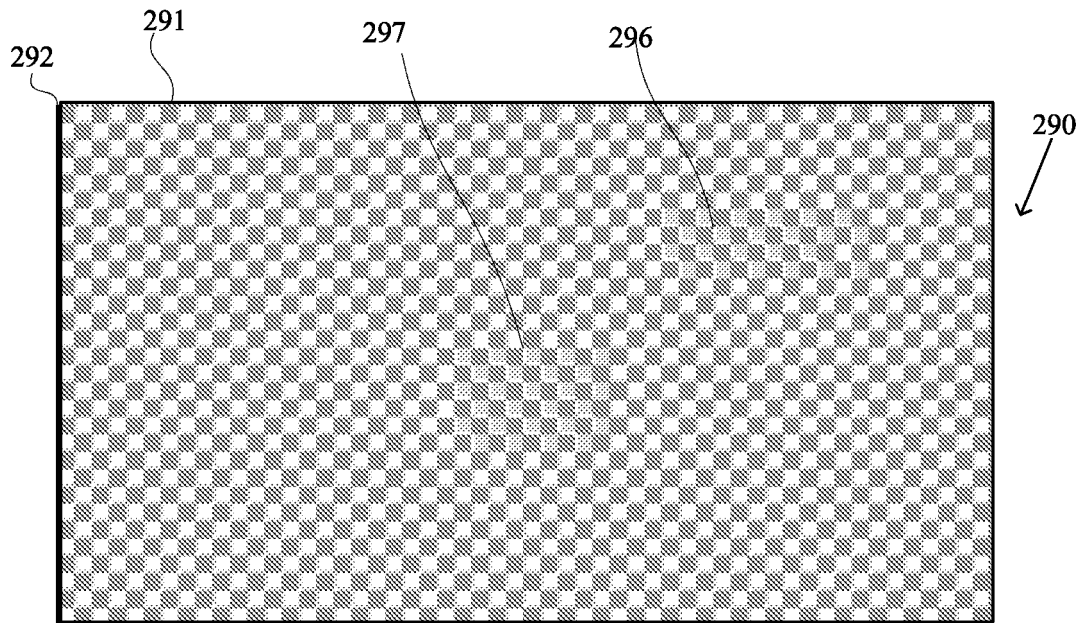


图 16B

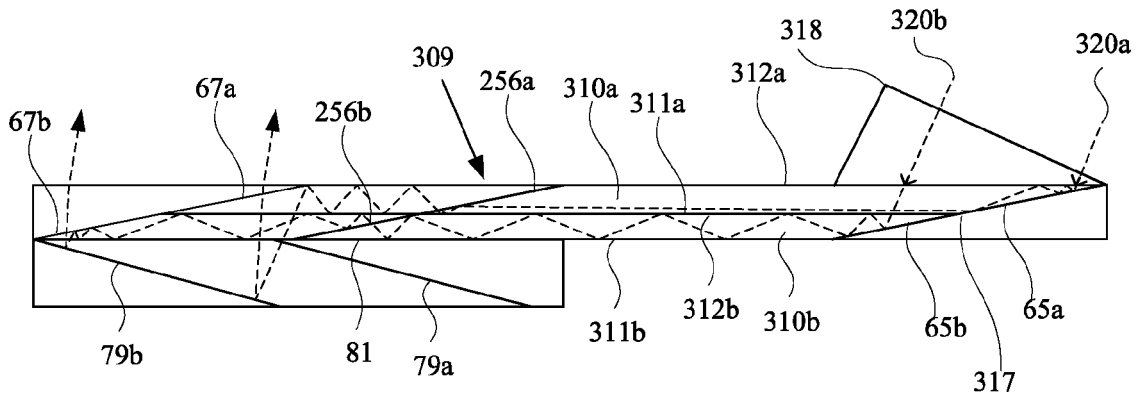


图 17A

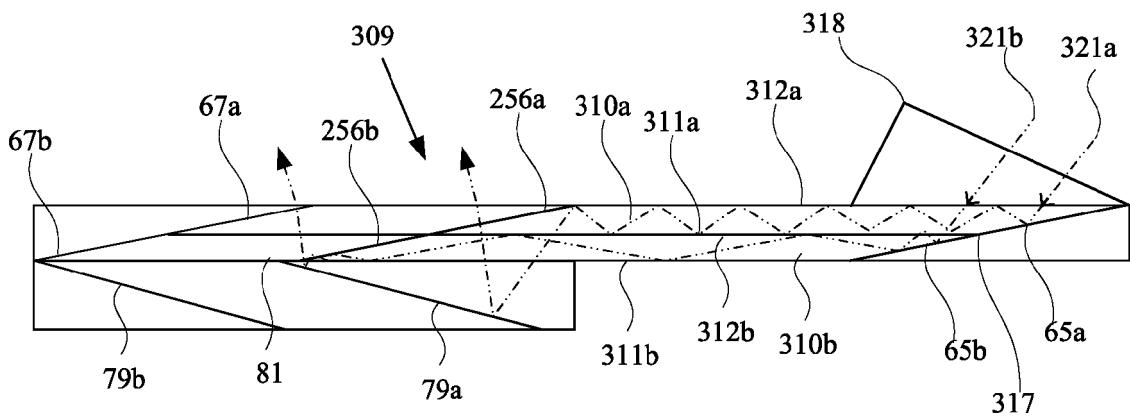


图 17B

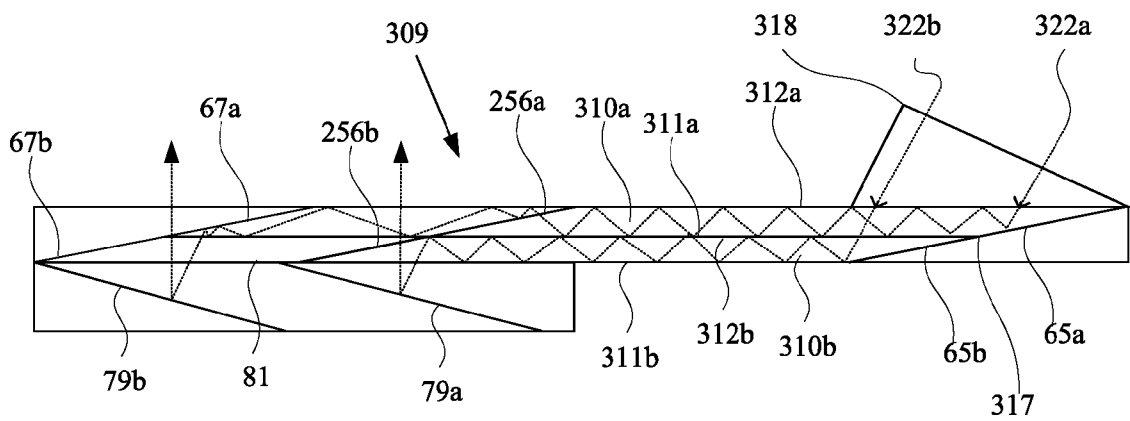


图 17C

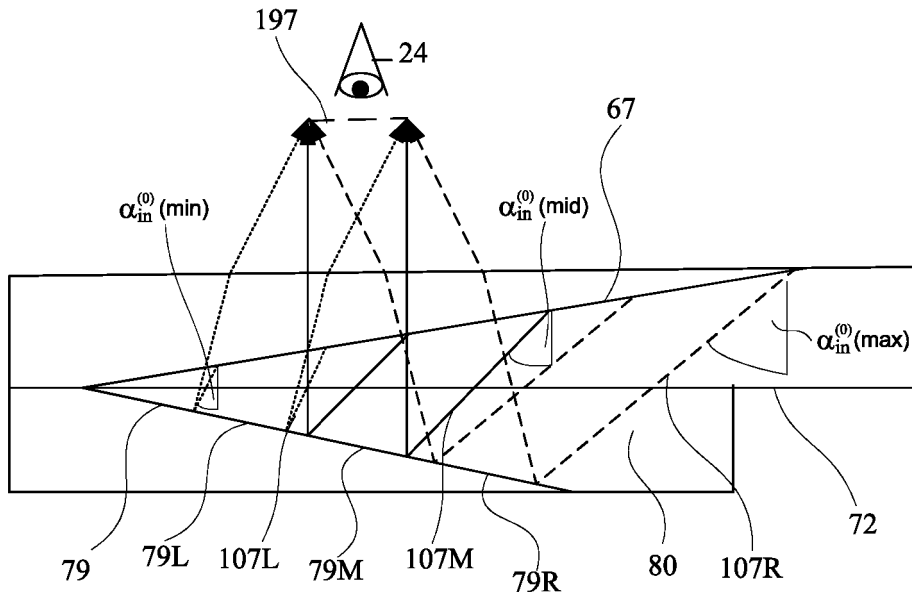


图 18

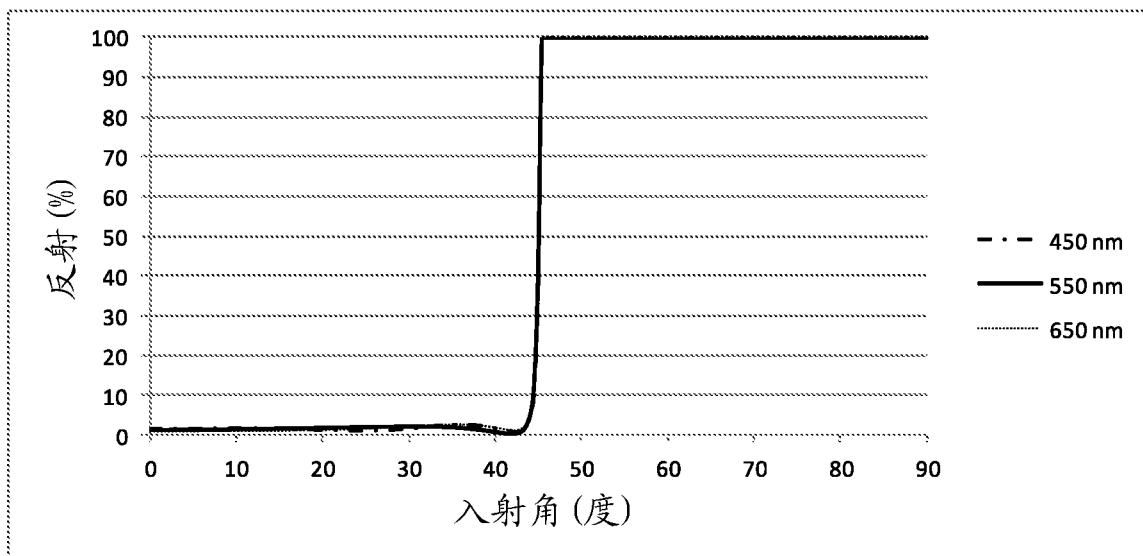


图 19A

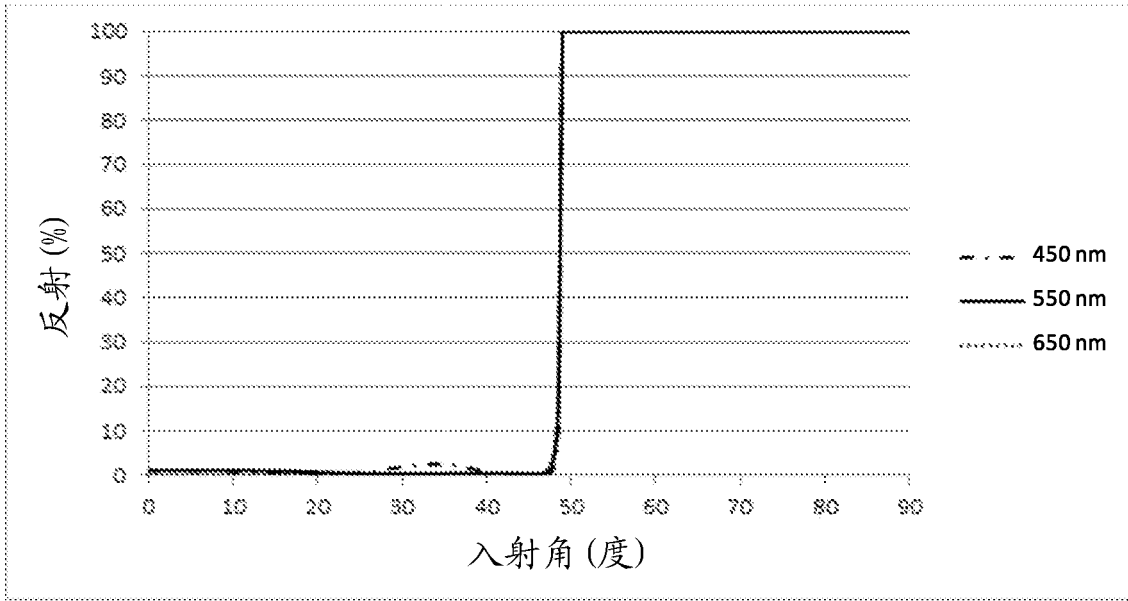


图 19B

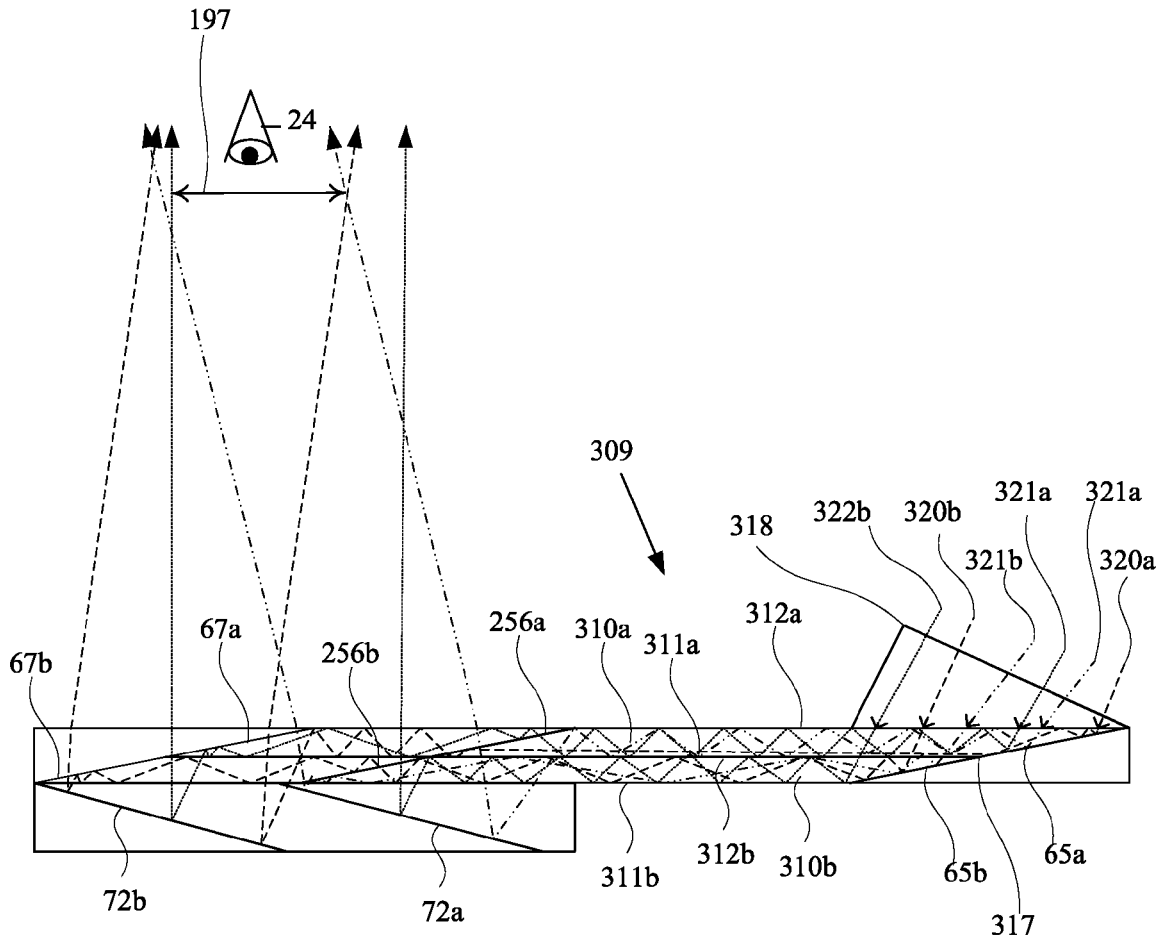


图 20

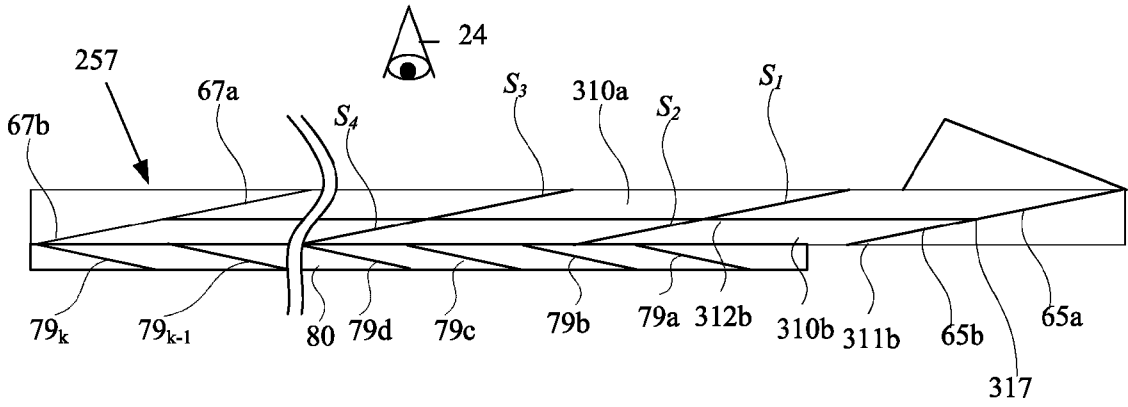


图 21

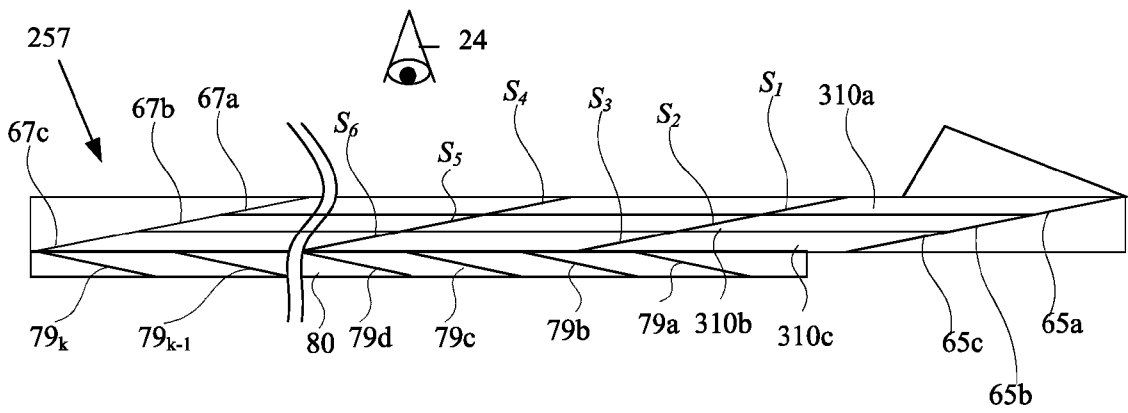


图 22

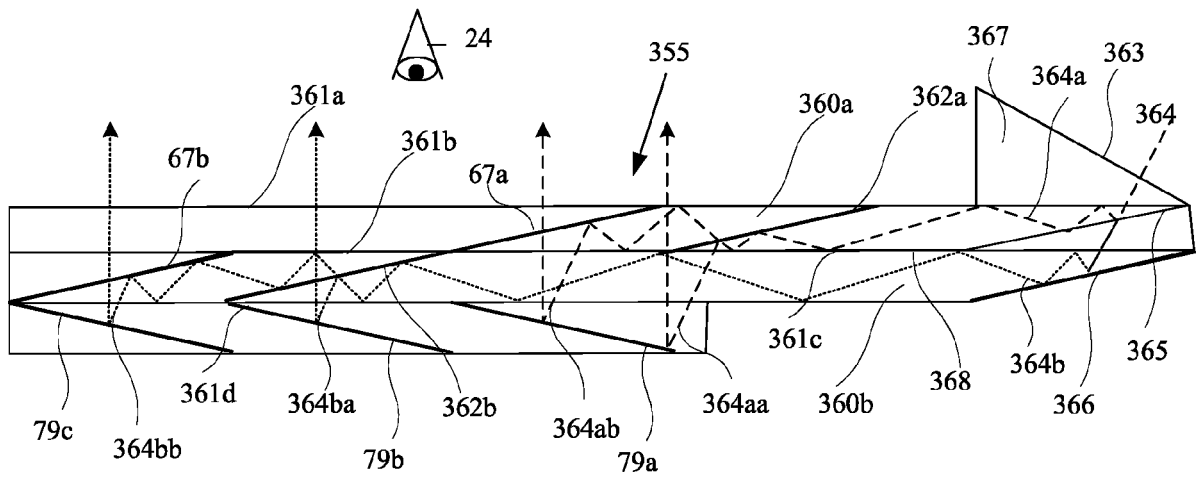


图 23

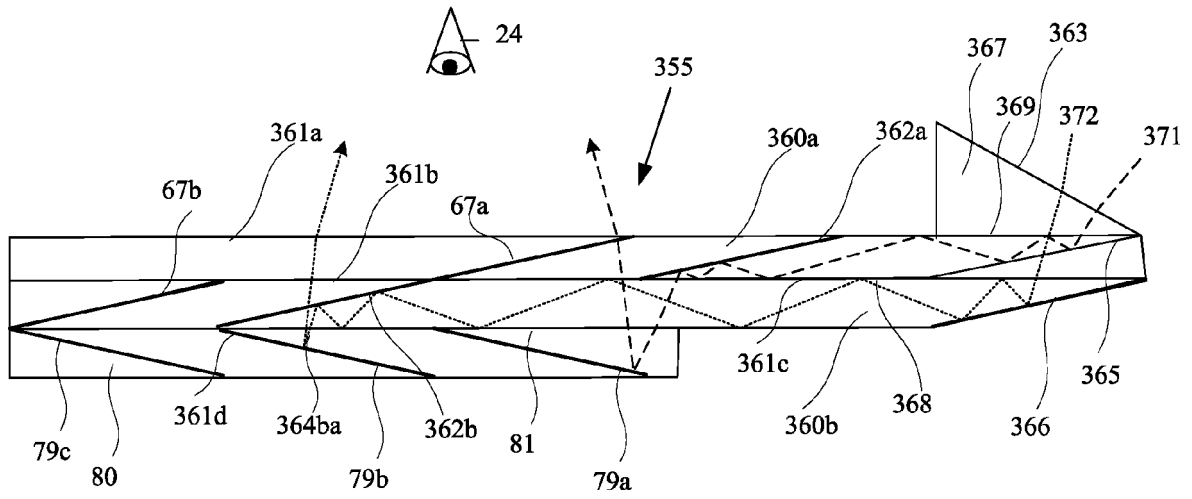


图 24A

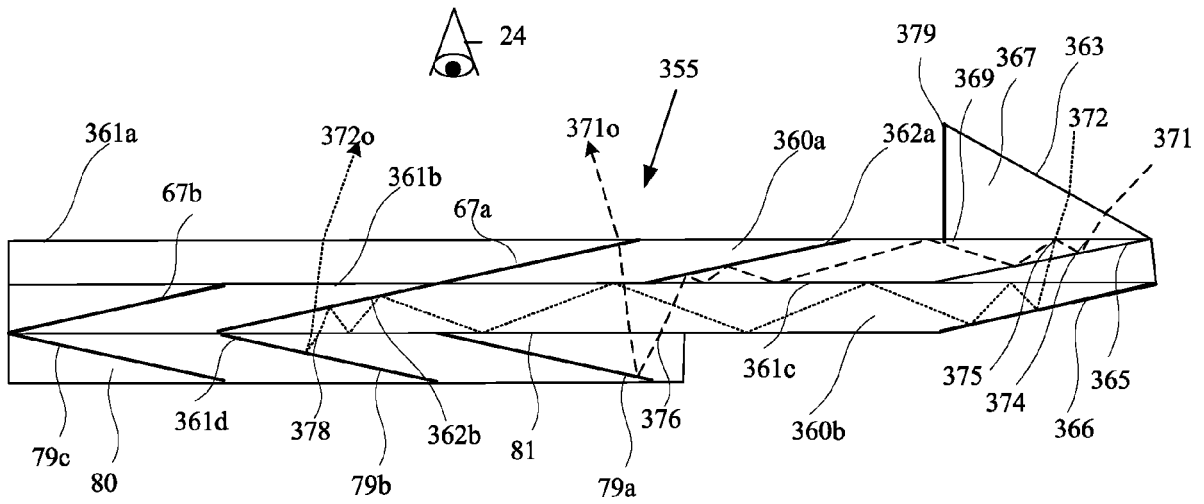


图 24B

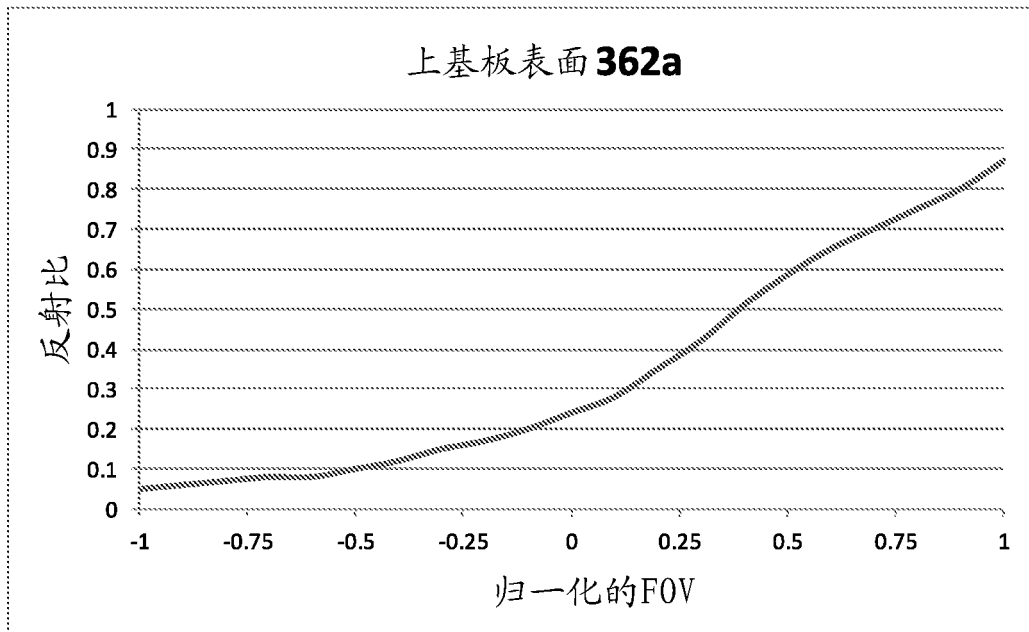


图 25A

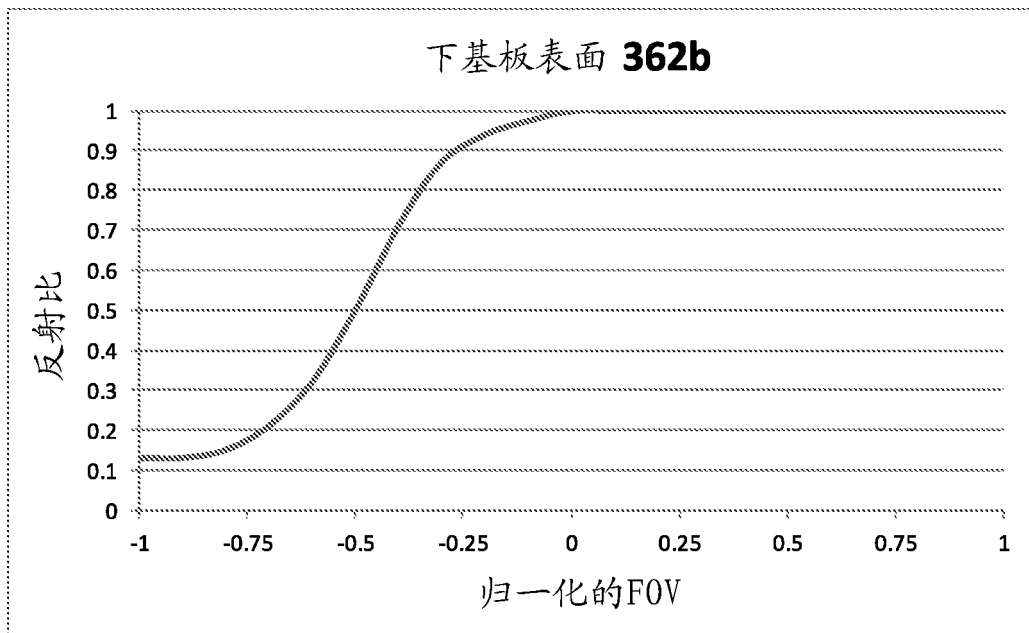


图 25B

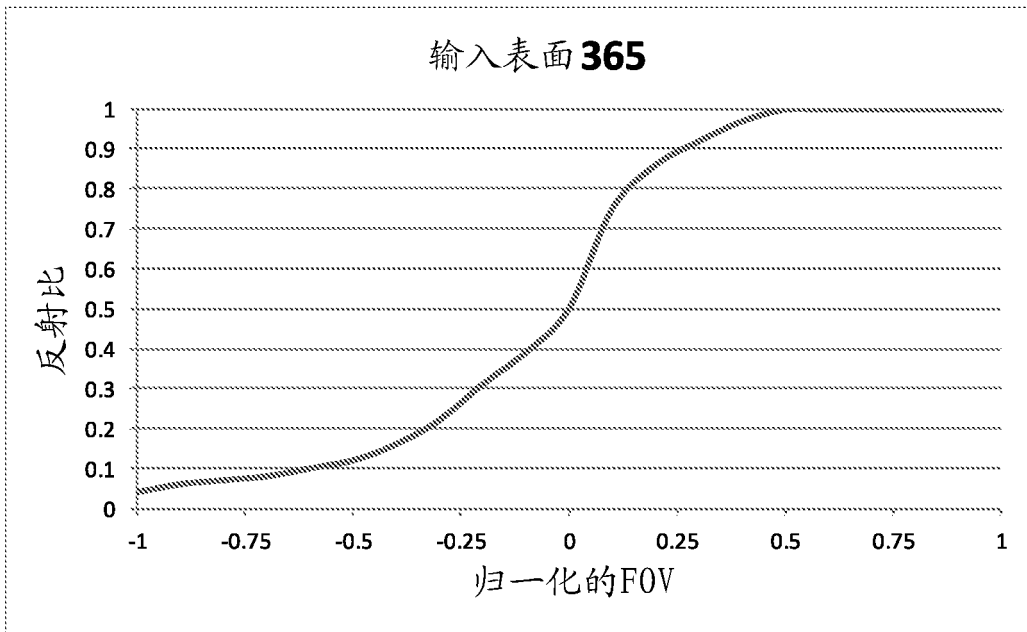


图 25C

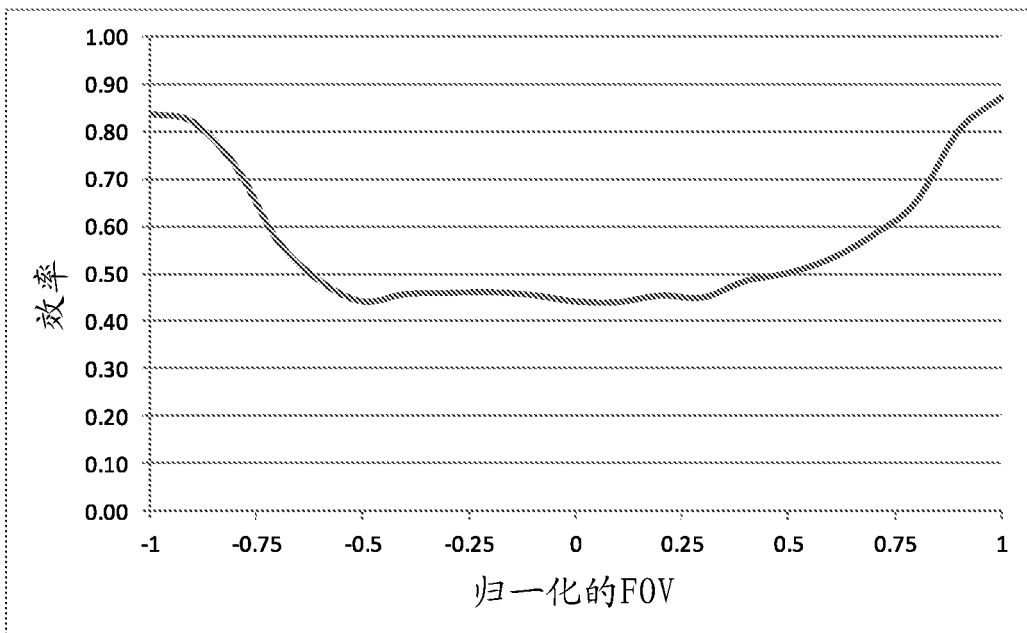


图 26

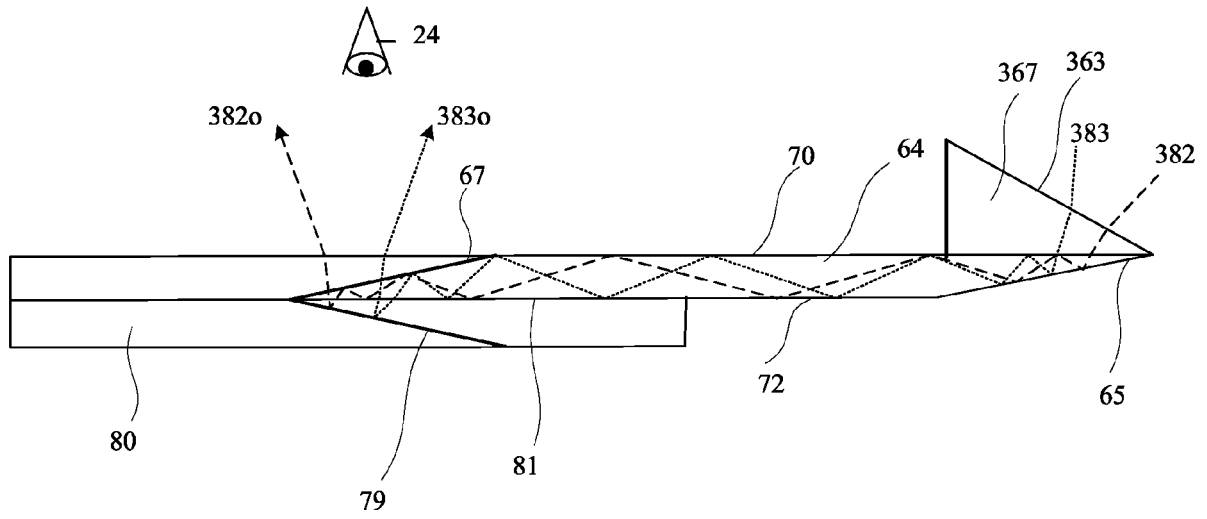


图 27A

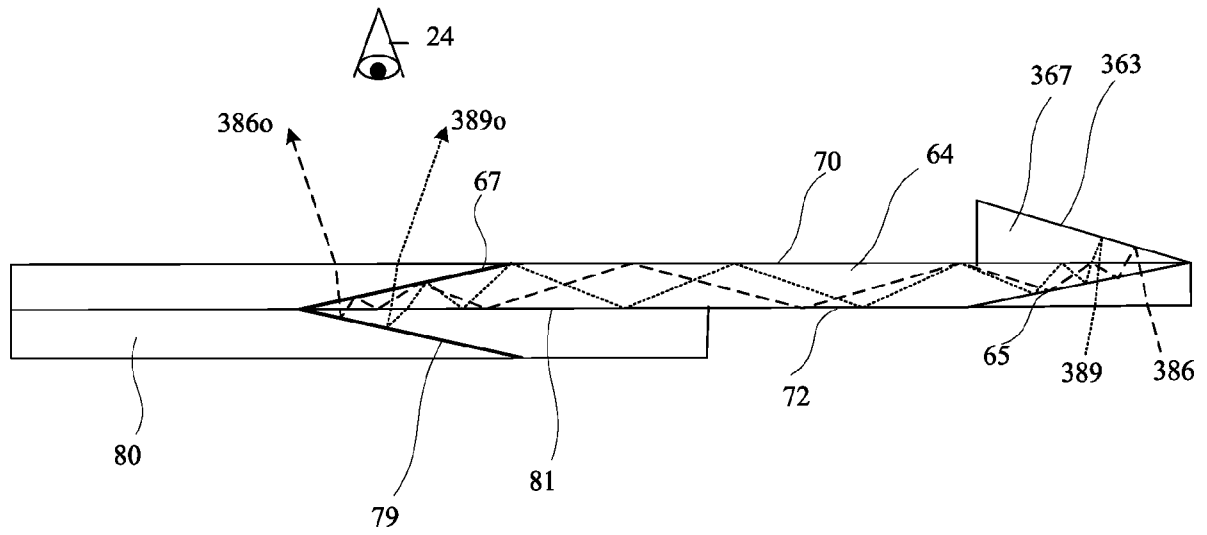


图 27B

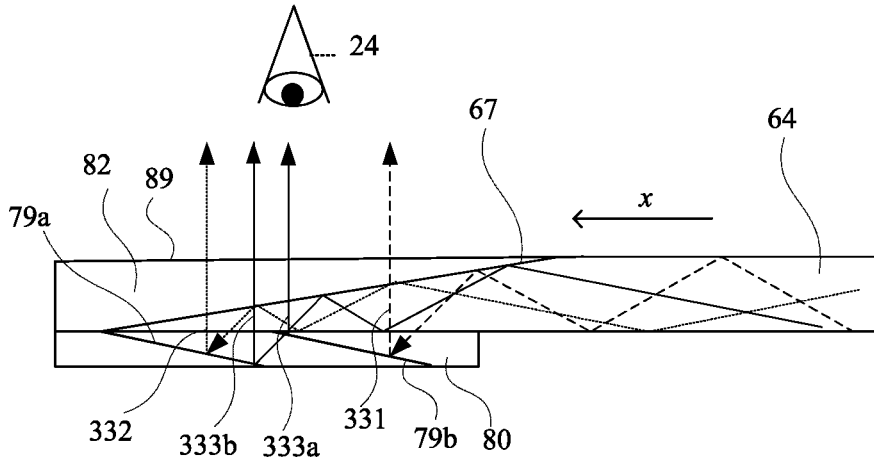


图 28A

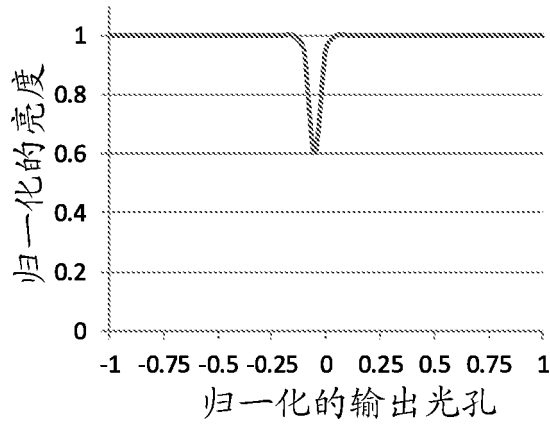


图 28B

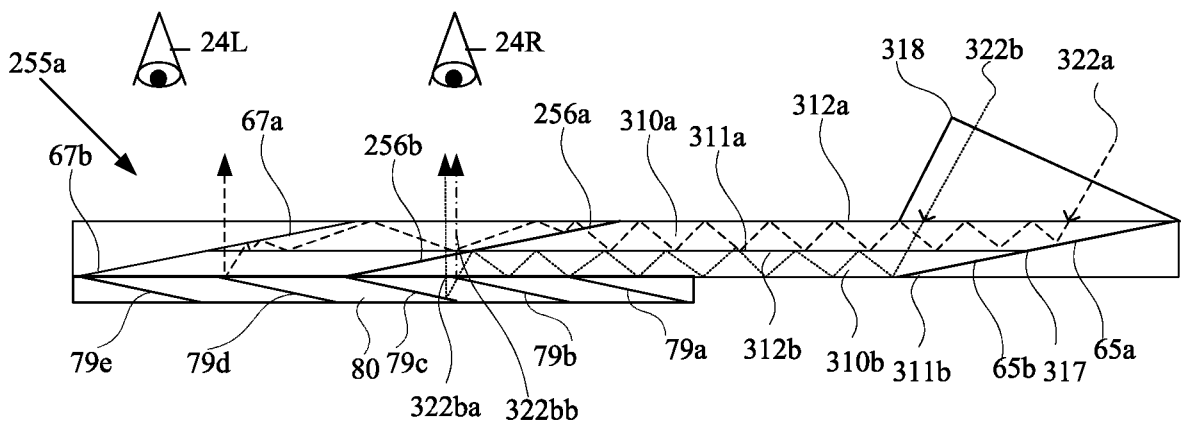


图 29A

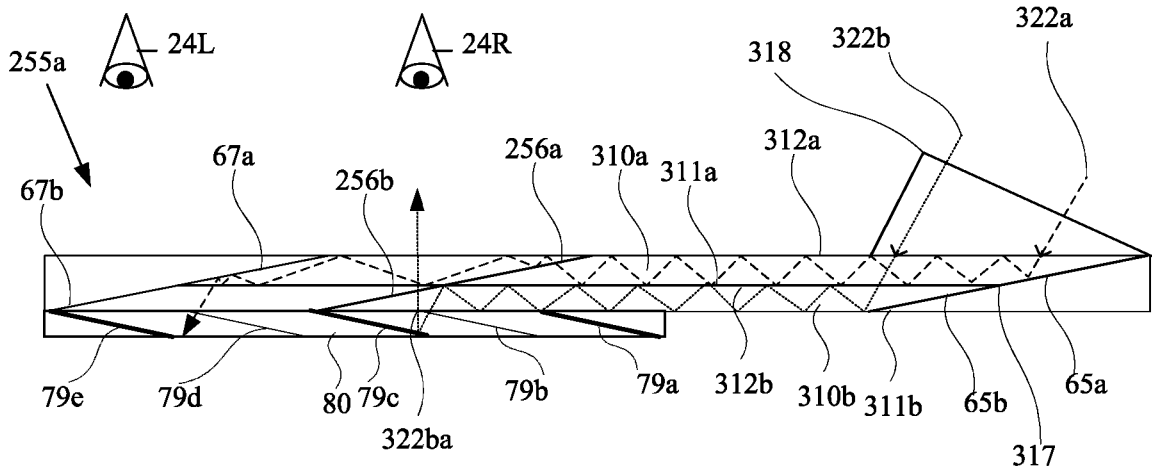


图 29B

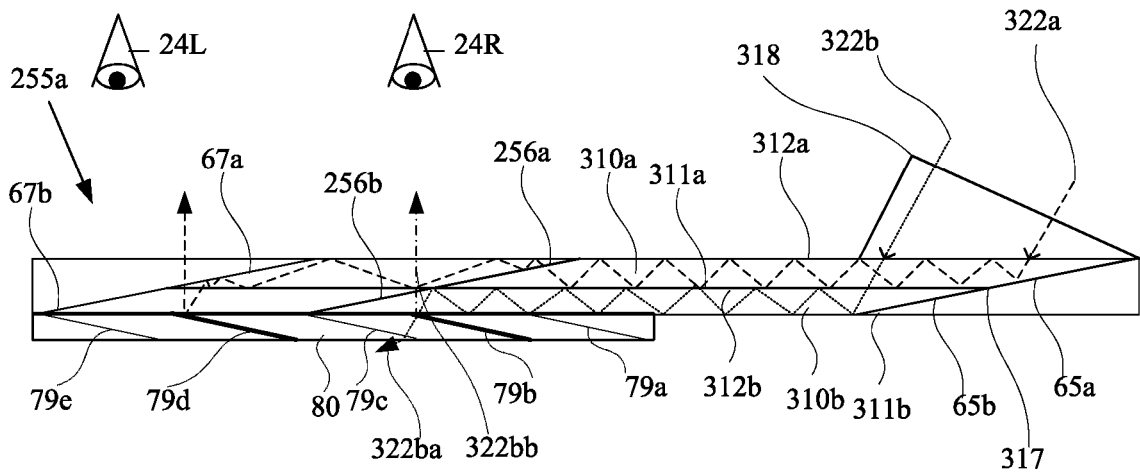


图 29C

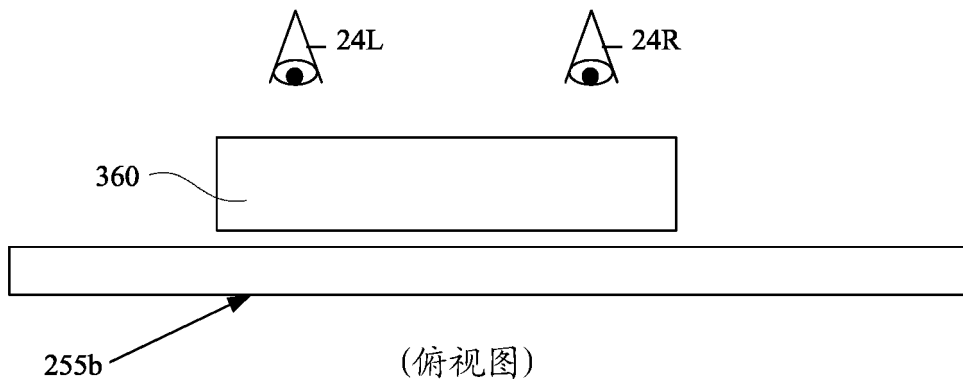


图 30A

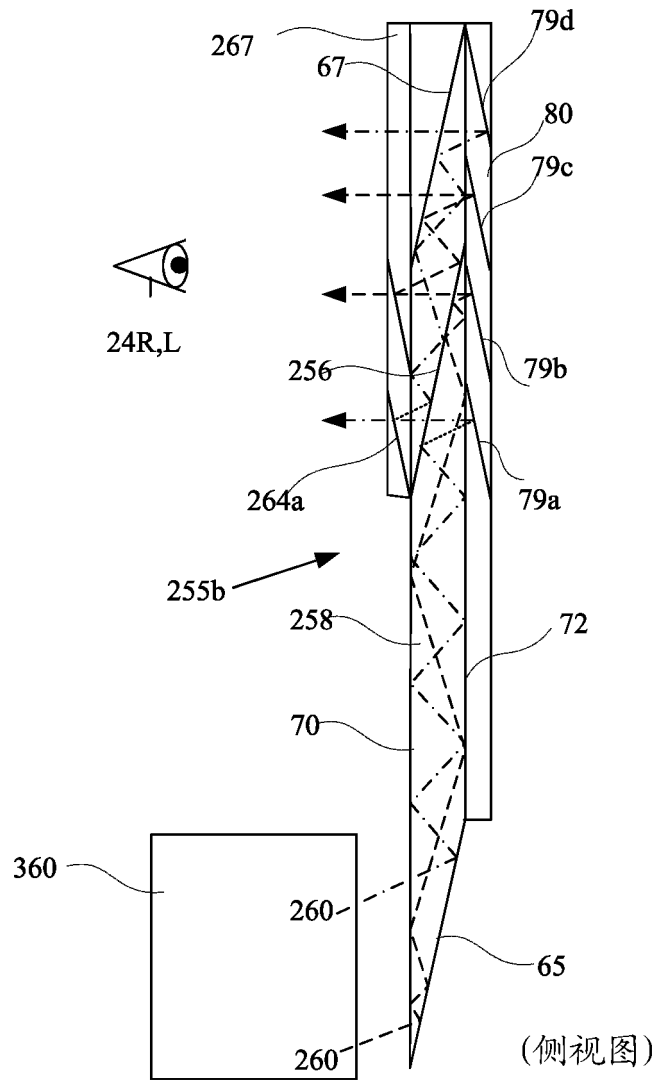


图 30B

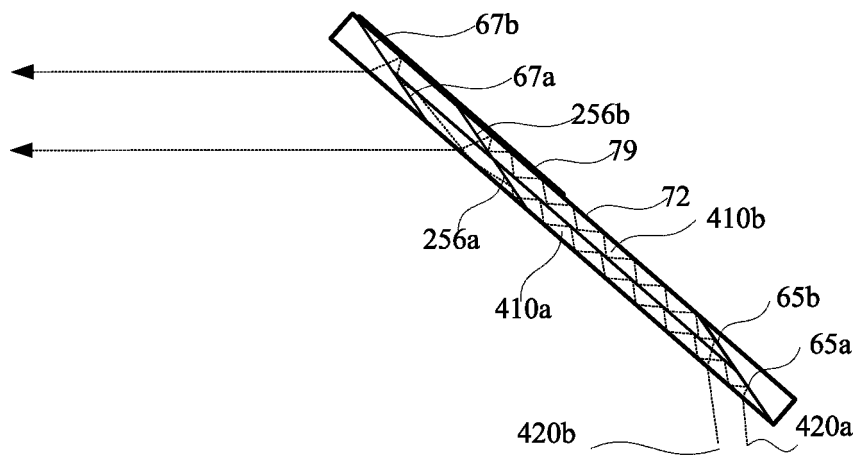


图 31A

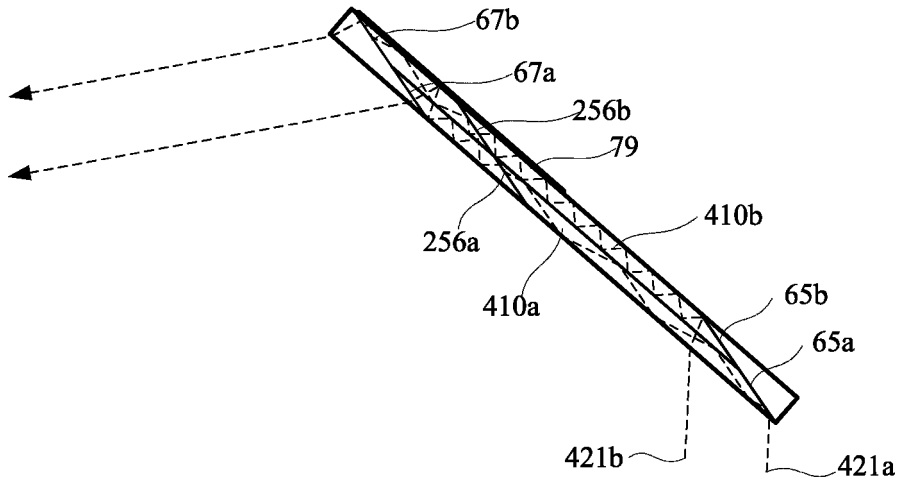


图 31B

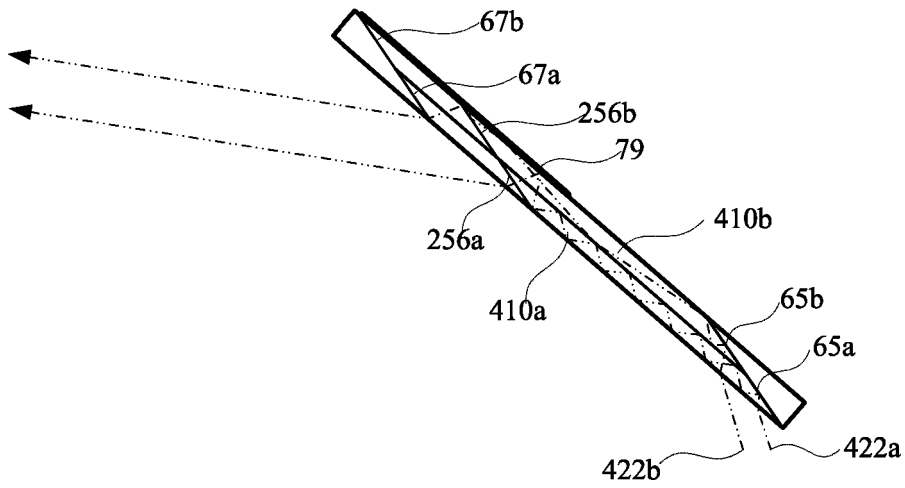


图 31C

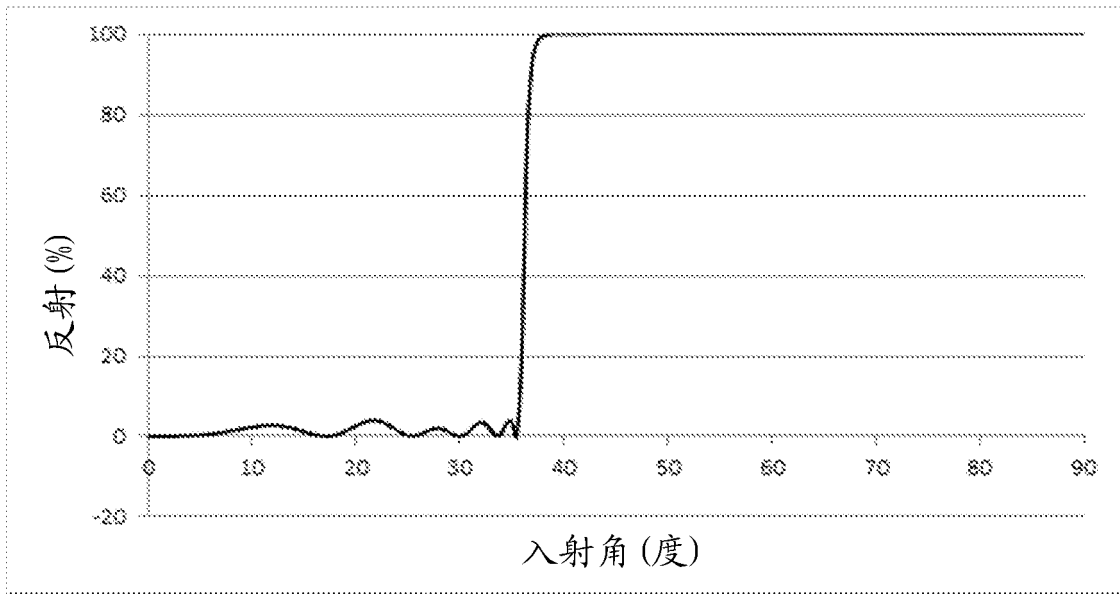


图 32A

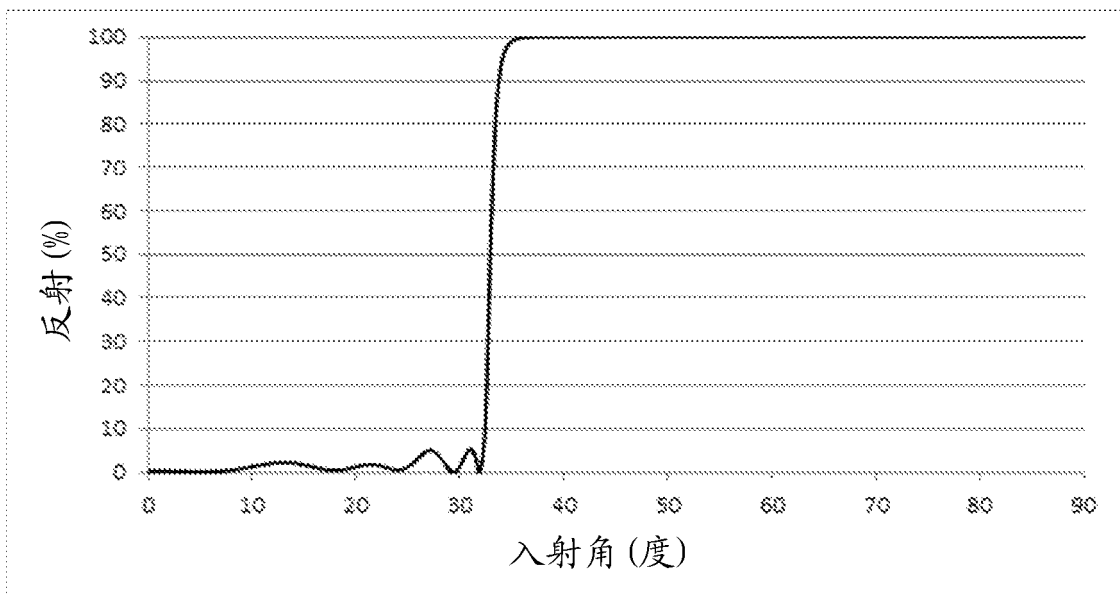


图 32B

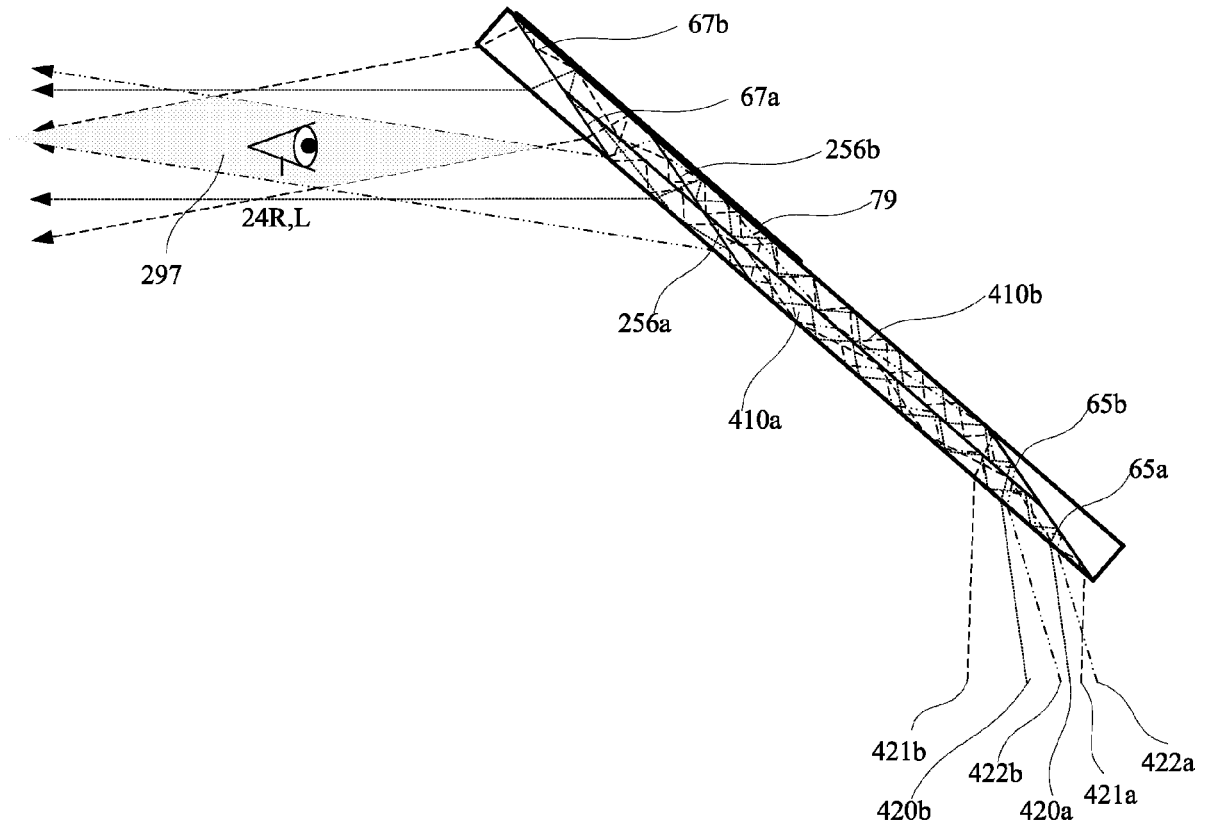


图 33

## **Abstract**

The present invention relates to highly efficient compact head-mounted display system. An optical device includes input and output apertures (86, 89), a light-transmitting substrate (64), a coupling-in element (55) positioned outside of the substrate for coupling light waves having a field-of view into the substrate, a first flat reflecting surface (65) located between two major surfaces (70,72) of the light-transmitting substrate for total internal reflection of the coupled-in light waves from the major surfaces, and a second flat reflecting surface (67) located between the two major substrate surfaces for coupling light waves out of the substrate for redirecting into a viewer's eye by an optical element (80). The substrate and coupling-in element (55) are formed of substantially different optical materials and the ratio between the fields of view of the light waves coupled-out from the substrate into the viewers' eye and of the light waves coupled inside the substrate, is substantially bigger than the refractive index of the substrate.