

[19] Patents Registry [11] 1237884 B
The Hong Kong Special Administrative Region
香港特別行政區
專利註冊處
CN 107179607 B

[12] **STANDARD PATENT (R) SPECIFICATION**
轉錄標準專利說明書

[21] Application no. 申請編號 [51] Int. Cl.
17111790.0 G02B 27/01 (2006.01)
[22] Date of filing 提交日期
14.11.2017

[54] AN ERGONOMIC HEAD MOUNTED DISPLAY DEVICE AND OPTICAL SYSTEM
人體工程學頭戴式顯示設備和光學系統

[30] Priority 優先權 24.12.2010 US 61/427,162	[73] Proprietor 專利所有人 MAGIC LEAP, INC. 4718 ROOSEVELT STREET HOLLYWOOD FL 33021 UNITED STATES OF AMERICA
[43] Date of publication of application 申請發表日期 20.04.2018	[72] Inventor 發明人 GAO, Chunyu HUA, Hong LIN, Yuxiang
[45] Date of publication of grant of patent 批予專利的發表日期 15.01.2021	[74] Agent and / or address for service 代理人及/或送達地址 ZHONGZI IP Room 3, 10/F, Yue Xiu Building 160-174 Lockhart Road, Wanchai HONG KONG
CN Application no. & date 中國專利申請編號及日期 CN 201710316616.3 22.12.2011	
CN Publication no. & date 中國專利申請發表編號及日期 CN 107179607 19.09.2017	
Date of grant in designated patent office 指定專利當局批予專利日期 13.12.2019	



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107179607 B

(45)授权公告日 2019.12.13

(21)申请号 201710316616.3

(74)专利代理机构 北京市中咨律师事务所

11247

代理人 崔雁 杨晓光

(22)申请日 2011.12.22

(51)Int.Cl.

G02B 27/01(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107179607 A

(56)对比文件

CN 104813218 A, 2015.07.29,

(43)申请公布日 2017.09.19

CN 103688208 A, 2014.03.26,

(30)优先权数据
61/427,162 2010.12.24 US

CN 101726856 A, 2010.06.09,

(62)分案原申请数据
201180068447.7 2011.12.22

审查员 吴松江

(73)专利权人 奇跃公司
地址 美国佛罗里达州

(72)发明人 C·高 H·华 Y·林

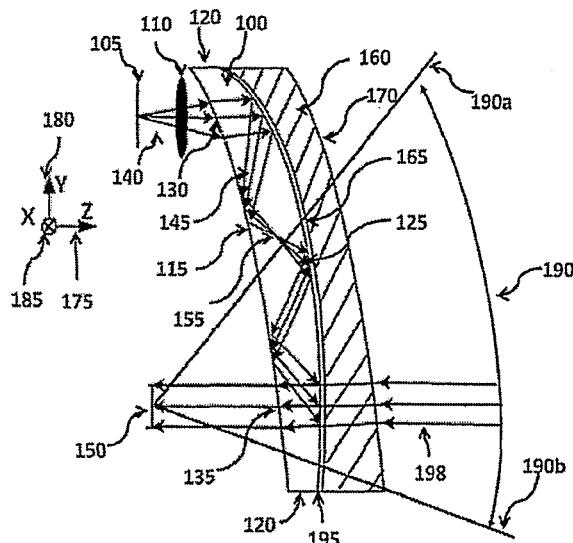
权利要求书2页 说明书14页 附图38页

(54)发明名称

人体工程学头戴式显示设备和光学系统

(57)摘要

B
本发明涉及人体工程学头戴式显示设备和光学系统。本发明设计一种具有眼镜外观的人体工程学光学透视头戴显示设备。所述透视头戴显示设备由用于观察虚拟显示图像的透明自由波导棱镜、当与所述棱镜结合使用时，用于正确观察真实世界场景的透视补偿透镜，以及用于提供显示内容的微型图像显示单元组成。包含多个自由折射和反射表面的所述自由波导将所述微型显示单元产生的光线导入用户瞳孔并允许用户观察放大的显示内容图像。包含多个自由折射表面的透视补偿透镜允许通过组合的波导和透镜正确地观察周围环境。所述波导棱镜和所述透视补偿透镜被正确地设计为在人体工程学上适合人的头部，从而构建出轻型、紧凑的包覆型透视显示系统设计。



1. 一种自由形状波导棱镜，包括至少三个物理表面，每个物理表面包含设置于其上的多个反射和折射自由形状光学表面，其中由所述物理表面限定的内部空间由折射率(n)大于1的折射介质填充，其中所述多个反射和折射表面折叠和延长光路长度，以使所述波导能够适合眼镜形状，这使得图像显示单元能被置于头部的侧面，并实现相对于正前方在太阳穴方向最高达90°、相对于正前方在鼻子方向最高达60°、以及相对于正前方在上方和下方最高达60°的宽广透视视场，其中在适合眼镜形状因素和最大厚度的限制条件下设计其内表面和外表面，以使所述多个自由形状反射和折射光学表面在不产生图像失真的情况下将光导向用户的瞳孔，所述物理和光学表面包括：

a. 朝着所述用户瞳孔设置的物理内表面(115)，其中所述物理内表面被限制为接近眼镜形状因素的预指定曲面，其中所述内表面被配置为以最小失真度将图像反射到所述用户的眼球；

b. 朝着外部场景设置的物理外表面(125)，其中所述物理外表面被配置为以最小失真度将图像反射到所述用户的瞳孔，其中所述物理外表面在所有点上位于所述内表面的最大距离内，其中所述物理外表面包含至少一个折射表面以允许来自所述外部场景的光穿过所述波导并到达所述用户的眼球；

c. 物理边缘表面(120)，其包含使来自图像显示单元的光进入所述波导的折射表面；

d. 被设置于所述物理表面之一上的折射入射表面(130)，其允许来自图像显示单元的光进入所述波导；

e. 被设置于所述物理内表面上、接近所述用户的瞳孔且允许光离开所述波导的折射出射表面(135)；以及

f. 被设置于所述物理内表面和外表面上的为三个或更多个的多个自由形状反射表面，其中通过满足全内反射条件，或者通过在所述波导的所述表面上施加半透明的部分反射涂层来产生每次反射；其中这些反射被优化以最小失真度沿着所述波导的内部引导所述光，其中多次反射延长所述光路长度，以使所述波导实现宽广透视视场、以及适合与人的头部相称的尺寸；因此，来自图像显示单元(105)的光(140)通过所述折射入射表面(130)进入所述波导；

g. 第一参考表面(230)，其接近普通人头部的形状，其中所述内表面被限制为位于所述第一参考表面之外，通过 Y_{ref1} 、 Z_{ref1} 以及 Y_{HIPD} 定义所述第一参考表面，其中 Y_{ref1} 是所述头部的中线与所述第一参考表面的中心之间在Y方向上的距离， Z_{ref1} 是所述瞳孔与所述第一参考表面的中心之间在Z方向上的距离，以及 Y_{HIPD} 是从所述瞳孔到所述头部的中点在Y方向上的距离；

h. 第二参考表面(240)，其限制所述波导从用户的脸部向外投射的程度，其中所述内表面被限制为位于所述第二参考表面之内；

i. 所述物理内表面(115)与物理外表面(125)之间的最大距离；

j. 所述波导在水平维度上从瞳孔到太阳穴的宽度(244)的上下限，以使所述波导到达所述头部的侧面并且足够宽以产生通过其上边界(290a)设定的指定透视视场；

k. 所述波导在所述水平维度上从瞳孔到鼻子方向的宽度(246)的上下限，以使所述波导足够宽以产生通过其下边界(290b)设定的指定透视视场，但是不与鼻梁抵触；

l. 在垂直维度上所述波导从瞳孔开始的高度的下限，以使所述波导足够宽以产生通过

其上边界(290c)或下边界(290d)设定的指定透视视场；

m. 表面分段(215a)，其中所述内表面被限制为适合眼镜形状因素，其中所述表面分段的宽度以投射在所述内表面上的所述指定透视视场在水平方向上的上边界(290a)和下边界(290b)为界，并且所述表面分段的高度以投射在所述内表面上的所述指定透视视场在垂直方向上的上边界(290c)和下边界(290d)为界，其中所述表面分段的局部曲率半径以取决于眼镜形状因素的范围为界；

然后，光(140)沿着所述波导循路径(145)而行，该路径包括在从所述折射入射表面(130)到所述折射出射表面(135)的所述多个反射表面上的所述多次反射，其中通过满足全内反射条件，或者通过在所述表面上施加的半透明涂层来产生每次反射；

然后，光(140)穿过所述折射出射表面(135)，超出该表面，所述用户利用所述瞳孔(150)观察所述图像；

然后，来自所述外部场景的光(198)在到达所述瞳孔(150)之前，通过所述波导的所述物理外表面(125)以及所述波导的所述物理内表面(115)进行折射，其中通过所述波导的所述透视视场在太阳穴方向上最高达90°，在鼻子方向上最高达60°，在正前方的上方和下方最高达60°，

因此，所述波导的内表面和外表面的形状在这些限制内被优化以最小化从所述波导的入射点到所述波导的出射点的光学失真。

2. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中 Y_{ref1} 处于0到40mm之间。
3. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中 Z_{ref1} 处于30到90mm之间。
4. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中 Y_{HIPD} 处于20到40mm之间。
5. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述第一参考表面的曲率半径在水平维度上处于40到100mm之间。
6. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中通过参考尺寸 Z_{ref2} 定义所述第二参考表面，其中 Z_{ref2} 是所述瞳孔与所述第二参考表面之间的距离。
7. 根据权利要求6的自由形状波导棱镜，其中 Z_{ref2} 小于40mm。
8. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述物理内表面与所述物理外表面之间的最大距离小于40mm。
9. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述棱镜从所述瞳孔朝着太阳穴方向上的宽度(244)的上限为80mm。
10. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述棱镜从所述瞳孔朝着太阳穴方向上的宽度(244)的下限为15mm。
11. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述棱镜从瞳孔朝着鼻子方向上的宽度(246)的上限为40mm。
12. 根据权利要求1的自由形状波导棱镜，其中所述棱镜从所述瞳孔朝着鼻子方向上的宽度(246)的下限为8mm。

人体工程学头戴式显示设备和光学系统

[0001] 本申请是申请日为2011年12月22日、申请号为201180068447.7、发明名称为“人体工程学头戴式显示设备和光学系统”的申请的分案申请。

[0002] 交叉引用

[0003] 本申请要求在2010年12月24日提交的序列号为61/427,162的美国临时申请的优先权，该申请的全文通过全部引用并入于此。

技术领域

[0004] 本发明一般地涉及光学透视头戴式显示(OST-HMD)设备。更具体地说，本发明涉及符合人体工程学设计的自由形状(freeform)光学系统，该系统在具有眼镜形状外观和宽广透视视场(FOV)的光学透视HMD中用作光学观察设备。

背景技术

[0005] 长期的应用证明头戴式显示器(HMD)对于跨科学可视化、医学和军事训练、工程设计和原型设计、远程操作和远程呈现、以及个人娱乐系统等领域的许多应用而言极为重要。在混合和增强现实系统中，光学透视HMD是将计算机生成的虚拟场景与真实世界场景视图(view)进行组合的基本方式之一。一般而言，通过光学组合器，OST-HMD在光学上将计算机生成的图像覆盖在真实世界视图上，同时保持直接、品质降级最小的真实世界视图。OST-HMD在创建移动显示解决方案方面具有巨大潜力，移动显示解决方案可提供比诸如智能手机和PDA之类的其它流行移动平台更吸引人的图像质量和屏幕大小。

[0006] 另一方面，尽管HMD设计在过去十几年内取得了非常重要的发展，但是始终存在许多技术与可用性方面的障碍，从而阻止这项技术被要求较高的应用和日常使用广泛接受。HMD的其中一个主要障碍是具有笨拙的头盔形式因素，这样阻止了许多要求较高的应用和新兴的应用接收此技术。所应用的现有光学设计方法几乎没有一种能够创建可用作眼镜式近眼显示器的真正便携、紧凑和轻型的非侵入式HMD设计。太大的重量导致疲劳和不适，并被视为基于HMD应用的主要障碍。此外，提供阻挡最小、品质降级程度最低的宽广透视FOV的能力对于执行日常工作而言至关重要。近几年来，自由形状表面已被引入HMD系统设计[编号为5,699,194、5,701,202、5,706,136的美国专利。D.Cheng, et al., “Design of an optical see-through head-mounted display with low f-number and large field of view using a freeform prism”, Applied Optics, 48(14), 2009]，旨在减小系统重量并创建轻型HMD。但是在当今的市场上，仍然没有能够同时满足人体工程学需求和性能需求的解决方案。我们的工作目标在于开发具有眼镜形式因素和宽广透视FOV的解决方案，同时保持卓越的性能。

发明内容

[0007] 本发明涉及一种具有眼镜外观和自由形状光学系统的人体工程学光学透视头戴式显示(OST-HMD)设备，所述自由形状光学系统在此类显示设备中用作光学观察设备。一般

而言,OST-HMD中的光学观察设备由用于观察显示的虚拟显示图像的光路和用于直接观察真实世界场景的透视路径组成。在本发明中,所述虚拟图像路径包括用于提供显示内容的微型图像显示单元和用户观察放大的显示内容图像时所用的符合人体工程学形状设计的显示观察光学器件。所述显示观察光学器件包括包含多个自由形状折射和反射表面的光导设备(下文中称为自由形状波导棱镜)。所述显示观察光学器件还可以包括额外的耦合光学器件以准确地将来自所述图像显示设备的光入射到所述波导棱镜。所述自由形状表面和所述耦合光学器件的位置和形状被设计为使得观察者能够看到清晰、放大的显示内容图像。所述头戴式显示设备的透视路径由波导棱镜和附着在所述棱镜外表面的自由形状透视补偿透镜组成。包含多个自由形状折射表面的透视补偿透镜允许准确地观察跨极宽广透视视场的周围环境。所述波导棱镜和所述透视补偿透镜被适当地设计为在人体工程学上适合人的头部的人体工程学因素,从而实现具有眼镜形状外观、宽广透视视场、以及卓越光学性能的轻型、紧凑的包覆型(wrap-around)透视显示系统设计。

[0008] 在一方面,本发明提供各种在人体工程学头戴式显示设备中用作光学观察设备的自由形状光学系统的实施例。本发明中的自由形状光学系统被优化以提供具有符合人体工程学形状设计的观察光学器件,所述观察光学器件适合人的头部的人体工程学因素,从而允许它们罩住人脸并提供眼镜式外观替代现有技术中的HMD设计中的头盔式外观。本发明还提供透视功能,允许用户通过观察光学器件观察周围环境以及图像显示设备上的显示内容。本发明提供透视FOV,该FOV比虚拟视图的FOV大得多。

[0009] 在本发明中,OST-HMD设备的虚拟图像路径包括用于提供显示内容的微型图像显示单元和和用户观察放大的显示内容图像时所用的符合人体工程学形状设计的显示观察光学器件。所述显示观察光学器件包括包含多个自由形状折射和反射表面的自由形状波导棱镜,并且还可以包括额外的耦合光学器件。所述波导棱镜充当放大微型图像显示设备上的图像的近眼观察光学器件。从所述图像显示单元射出的光线通过所述棱镜的第一折射表面射入所述波导棱镜。所述光线可以从所述显示设备直接或通过一组耦合透镜入射到所述棱镜。入射的光线经多次反射(通常为3次或更多次)通过所述波导棱镜进行传播,然后经所述棱镜的所述第二折射表面耦合出所述棱镜。出射的光线继续传播并到达所述系统的出射光瞳,其中用户可以利用他/她的眼睛观察虚拟内容。当光通过所述波导棱镜传播时,如果满足反射表面上的全内反射(TIR)条件,则通过反射导致的光损失最小。因此,所有反射最好满足TIR条件,但不是严格要求。但是,另外高度希望在某些反射表面上妥协TIR条件来实现薄波导棱镜设计。对于位于设备的指定透视FOV内的不满足TIR条件的反射表面,在这些表面上施加半透明涂层(coating)以便确保来自微型显示单元的足够光线到达出射光瞳并产生明亮的图像,同时便利光学透视功能。对于位于所述设备的透视FOV之外的反射表面,如果不满足TIR条件,则可以在所述表面上施加高反射镜面涂层以最小化光损失。在本发明中,所述微型图像显示单元可以是可充当图像源的任何类型的自发光或发光像素阵列,其包括但不限于硅基液晶(LCoS)显示设备、液晶显示(LCD)面板、有机发光显示器(OLED)、铁电性硅基液晶(FLCoS)设备、数字微镜设备(DMD),或根据上述或其它类型的微型显示设备构建的微型投射仪。

[0010] 在本发明中,所述头戴式显示设备的透视路径由所述自由形状波导棱镜和自由形状透视补偿透镜组成。所述补偿透镜附着在所述波导棱镜的所述物理外表面上,以便抵消

所述棱镜造成的光线偏移和失真并且保持清晰的真实世界场景透视视图。包含多个(通常2个或更多个)自由形状折射表面的所述补偿透镜允许准确地观察跨极大视场的周围环境。当所述透镜与所述棱镜组合时,所述补偿透镜的表面被优化以最小化引入到来自真实世界场景的光线的偏移和失真,如果所述波导棱镜的附着表面上的反射在虚拟图像显示路径中满足TIR条件,则有必要在所述波导棱镜与所述补偿透镜之间保持小气隙。

[0011] 在本发明中,使用多次反射延长光路长度,以使所述波导棱镜的宽度与普通人的头部的宽度密切匹配。长光路允许便利将所述波导棱镜设计为符合人体工程学形状,同时允许保持大透视FOV。所述棱镜的长光路还允许将所述图像显示单元移到显示架侧,这样降低所述HMD系统的前端重量,并且提高所述系统的人体工程学适合度。此外,所述波导棱镜的所述形状(以及作为整体的所述光学观察设备)可被设计为接近人的头部的自然曲线以实现最佳的人体工程学适合度。例如,在某些实施例中,所述棱镜形状被弯曲为接近一副8基弯眼镜的曲率,并且在某些其它实施例中,所述棱镜形状近似地遵循一副4基弯眼镜的形状因素。而且,专门控制所述波导棱镜和所述补偿透镜的总厚度以实现薄光学器件外形(通常小于30mm)。总之,专门控制的棱镜形状、长光路,以及光学厚度可实现包覆型光学透视HMD设计,该设计在人体工程学上与人的头部适合并且具有吸引人的眼镜式外观。

[0012] 本发明的另一主要方面是能够提供极大的透视视场,通常比虚拟显示的FOV大得多。在本发明中,此功能通过多种机制实现,例如,将所述图像显示设备移到头部的侧面以扩展所述波导棱镜的清晰光学孔径,专门控制所述波导棱镜和所述补偿透镜上的所述自由形状表面以校正光线偏移和失真,并确保跨大FOV的高透视性能。在本发明的某些实施例中,所述透视FOV在水平方向上展开120度,在垂直方面上展开80度。本发明的所述透视FOV可扩展为与人眼的视场匹配。

[0013] 由于与人的头部的宽度或曲率匹配、以及实现大透视FOV需要长光路,因此来自所述图像显示设备的相同点的光线在所述波导棱镜内交叉至少一次,这表示在所述波导内部形成所述虚拟显示的中间图像,尽管光线交叉点可能未很好地形成。

附图说明

- [0014] 图1是本发明的典型实施例的概念图。
- [0015] 图2a图解说明本发明的设计在YZ平面的截面视图内的一组主要结构限制。
- [0016] 图2b图解说明本发明的设计在XZ平面的截面视图内的其它结构限制。
- [0017] 图3以3D视图图解说明参考表面230。
- [0018] 图4示出本发明的波导棱镜的5次反射优选实施例,该波导棱镜具有接近8基弯(base curve)的包覆型外观的内表面。
- [0019] 图5示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例,该波导棱镜具有接近8基弯的包覆型外观的内表面。
- [0020] 图6示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例,该波导棱镜具有位于太阳穴侧的平坦内弧。
- [0021] 图7示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例,该波导棱镜具有类似于图6中的上一实施例的形状。
- [0022] 图8示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例,该波导棱镜具有接近8基

弯的包覆型外观的内表面，并且该实施例基于反射型微型显示器。

[0023] 图9示出与图8中的上一实施例类似的本发明的另一优选实施例，但是该波导棱镜具有接近4基弯的内表面。

[0024] 图10示出本发明的波导棱镜的3次反射优选实施例，该波导棱镜具有接近8基弯的包覆型外观的内表面。

[0025] 图11示出图8所示的实施例5的注释和元件定义。

[0026] 图12-12b在图12中示出实施例5的针对红色波长(625nm)的选定场的MTF曲线，在图12a中示出实施例5的针对绿色波长(525nm)的选定场的MTF曲线，在图12b中示出实施例5的针对蓝色波长(465nm)的选定场的MTF曲线。

[0027] 图13示出图9所示的实施例6的注释和元件定义。

[0028] 图14-14b在图14中示出实施例6的针对红色波长(625nm)的选定场的MTF曲线，在图14a中示出实施例6的针对绿色波长(525nm)的选定场的MTF曲线，在图14b中示出实施例6的针对蓝色波长(465nm)的选定场的MTF曲线。

[0029] 图15示出实施例6的透视路径的光线跟踪实例。

[0030] 图16示出根据本发明的实施例6的具有4基弯外观的示例性OST-HMD设计。

[0031] 图17示出图10所示的实施例7的注释和元件定义。

[0032] 图18-18b在图18中示出实施例7的针对红色波长(625nm)的选定场的MTF曲线，在图18a中示出实施例7的针对绿色波长(525nm)的选定场的MTF曲线，在图18b中示出实施例7的针对蓝色波长(465nm)的选定场的MTF曲线。

[0033] 图19示出图10所示的实施例7的补偿透镜的注释和元件定义。

[0034] 图20示出图10所示的实施例7的透视路径的光线跟踪实例。

[0035] 图21-21b示出图10所示的实施例7的透视路径的选定场的多色MTF曲线。

[0036] 图22示出本发明的实施例7的未修整的3D模型。

[0037] 图23示出根据本发明的实施例7的具有8基弯的包覆型外观的示例性OST-HMD设计。

[0038] 图24示出定义自由形状表面形状的数学方程式。

[0039] 图25示出图8和图11所示的波导的实施例5的表面的参数。

[0040] 图26示出图8和图11所示的实施例5的耦合透镜与物镜的表面参数。

[0041] 图27示出图8和图11所示的实施例5中的光学表面的位置和方位参数。

[0042] 图28示出图9和图13所示的实施例6的波导棱镜的表面参数。

[0043] 图29示出图9和图13所示的实施例6的耦合透镜与物镜的表面参数。

[0044] 图30示出图9和图13所示的实施例6中的光学表面的位置和方位参数。

[0045] 图31示出图10所示的实施例7的波导棱镜的表面参数。

[0046] 图32示出图10和图17所示的实施例7的耦合透镜与物镜的表面参数。

[0047] 图33示出图10和图17所示的实施例7中的光学表面的位置和方位参数。

[0048] 图34示出图10和图19所示的实施例7的补偿透镜的表面参数。

[0049] 图35示出图10和图19所示的实施例7的补偿透镜的位置和方位参数。

具体实施方式

[0050] 将参考附图全面地描述根据本发明的实施例。给出所述描述是为了提供对本发明的理解。但是很明显，可以在没有这些细节的情况下实践本发明。此外，本发明可以通过各种形式实现。但是，下面描述的本发明的实施例不应被视为限制为此处列出的实施例。而是，这些实施例、附图和实例旨在作为示例，为了避免混淆本发明。

[0051] 本发明涉及符合人体工程学设计的自由形状光学系统，该系统在具有眼镜式外观和宽广透视视场 (FOV) 的光学透视HMD中用作光学观察设备。图1所示的本发明的典型实施例是通过自由形状波导棱镜将显示的虚拟图像投射到用户的眼瞳内，从而允许用户看到覆盖在真实世界场景上的显示内容的图像显示系统，包括：

[0052] a.微型图像显示单元105，其充当图像源并将光投射到波导中；

[0053] b.可选的耦合透镜组110，其由一个或多个透镜构成，这些透镜将来自显示单元的光导入自由形状波导棱镜100并校正光学像差；

[0054] c.透明的自由形状光学波导棱镜100，如上所述，其接受来自图像显示单元105的光并传播所述光，直到图像被投射到用户眼瞳内；其中波导允许来自真实世界场景的光穿过并进入用户的眼瞳内；其中波导具有物理内表面115、物理边缘表面120和物理外表面125、第一折射表面130、第二折射表面135，以及多个反射表面；

[0055] d.安装在波导的物理外表面125上的自由形状补偿透镜160，其校正通过波导棱镜观察世界所造成的光学失真；其中补偿透镜160的物理内表面165接近波导棱镜100的物理外表面125的形状，并且在波导的物理外表面125满足TIR条件的表面上保持波导100与补偿透镜160之间的小气隙195；其中所述补偿透镜160被设计为补偿波导100所造成的光线偏移和失真效应，以使用户保持清晰的透视视场190；

[0056] 因此，图像显示单元105可以是可充当图像源的任何类型的自发光或发光像素阵列，其中包括但不限制为硅基液晶 (LCoS) 显示设备、液晶显示 (LCD) 面板、有机发光显示器 (OLED)、铁电性硅基液晶 (LCoS) 设备、数字微镜设备 (DMD)，或根据上述或其它类型的微型显示设备构建的微型投射器；

[0057] 因此，图像显示单元105将光140射入到可选的耦合透镜110内，接着经过波导100，或者通过第一折射表面130直接进入到波导内；

[0058] 然后，光140沿着波导循路径145而行，该路径包括从第一折射表面130到第二折射表面135的多次反射；

[0059] 然后，沿着波导循路径145而行的光线140可以交叉并在波导100内部形成中间图像155；

[0060] 然后，光140穿过第二折射表面135，超出该表面，用户利用他或她的瞳孔150观察图像；

[0061] 然后，来自真实世界场景的光198在到达瞳孔150之前穿过补偿透镜160和波导100。

[0062] 本发明的一方面是符合人体工程学而设计形状的自由形状波导棱镜，其允许图像投射到棱镜的一个折射输入平面，该图像然后进行反射和折射，直到到达用户眼睛。波导棱镜的形状、光路长度和厚度专门进行优化，从而实现光学透视HMD的包覆型设计，该光学透视HMD与人的头部在人体工程学上适合并且具有吸引人的眼镜式外观。

[0063] 在典型实施例中，本发明的自由形状波导棱镜包括至少三个物理表面，每个物理表面包含多个被置于所述物理表面上的反射和折射光学表面，其中物理表面的内部空间由折射率(n)大于1的折射介质填充，所述物理和光学表面包括：

[0064] a.朝着用户眼球设置的物理内表面115，其中包含多个适于将图像传播到用户眼球的反射和折射表面的物理内表面被限制为适合人的头部的人体工程学因素；

[0065] b.朝着外部场景设置的物理外表面125，其中物理外表面包含多个适于将图像反射到用户眼球的反射表面，其中物理外表面在所有点上通常位于内表面的30mm内，其中物理外表面包含至少一个折射表面以允许来自外部场景的光穿过波导并到达用户眼球；

[0066] c.物理边缘表面120，其可能包含使来自图像显示单元的光进入波导的折射表面；

[0067] d.被置于物理表面之一上的折射输入表面130，其允许来自图像显示单元的光进入波导；

[0068] e.被置于物理内表面上的允许光离开波导的折射输出表面135，其接近用户瞳孔，其中折射表面可以被半透明涂层覆盖，也可以不被覆盖；

[0069] f.被置于物理内表面和外表面上的多个反射表面，其中通过满足TIR条件，或者通过在波导表面上施加半透明的部分反射涂层来产生每次反射；

[0070] 因此，来自图像显示单元105的光140通过第一折射表面130进入波导；

[0071] 然后，光140沿着波导循路径145而行，该路径包括从第一折射表面130到第二折射表面135在多个反射表面上的多次反射，其中通过满足全内反射条件，或者通过在表面上施加半透明涂层来产生每次反射；

[0072] 然后，光140穿过第二折射表面135，超出该表面，所述用户利用他或她的瞳孔150观察图像；

[0073] 因此，来自真实世界场景的光198在被补偿透镜160折射后，在到达瞳孔150之前，通过波导100的物理外表面125以及所述波导的物理内表面115进行折射。

[0074] 在典型实施例中，波导的内表面115和外表面125被适当地设计为产生多个在不使图像失真的情况下将光导入用户瞳孔的反射。所述多次反射延长光路长度，以使波导棱镜的宽度密切适合于普通人的头部的宽度。长光路长度允许将波导棱镜设计为符合人体工程学的形状。棱镜的长光路进一步允许将图像显示单元105移到显示架侧，这样减少HMD系统的前端重量并提高系统的人体工程学适合度。

[0075] 在典型实施例中，内表面115被限制为接近所需眼镜形状因素的预指定曲面。外表面125进一步被限制为实现薄外形，内表面与外表面之间的厚度通常不大于30mm。在本领域的一个实践中，我们将内表面与外表面之间的总厚度限制为不超过12mm。波导的内表面和外表面的参数因此被优化为使得投射图像在波导的出射点上具有最小失真。

[0076] 在典型实施例中，波导100的内表面115可以包含多个表面分段(surface segment)；每个表面分段通过一个唯一的参数集进行描述。

[0077] 在典型实施例中，波导100的外表面125可以包含多个表面分段；每个表面分段通过一个唯一的参数集进行描述。

[0078] 在某些实施例中，可以在微型图像显示单元105与波导100的第一折射表面130之间添加耦合透镜110，从而便于将来自显示单元105的光射入到波导内。耦合透镜可用于校正波导光学像差。

[0079] 本发明的另一方面是物理附着在波导棱镜100上自由形状透视补偿透镜160。补偿透镜160被设计为抵消波导棱镜100所造成的光线偏移和失真并提供跨宽广视场的真实世界场景的清晰透视视图。

[0080] 在典型实施例中,本发明的自由形状补偿透镜160包括多个(通常2个或更多个)自由形状折射表面,其中折射表面的内部空间由折射率(n)大于1的折射介质填充,光学表面包括:

[0081] a.朝着外部场景设置的、允许来自外部场景的光198进入补偿透镜的折射外表面170,其中所述折射外表面通常是连续的单折射表面,并且在所有点上通常位于波导棱镜100的物理内表面115的30mm内;

[0082] b.朝着波导棱镜100的外表面125设置的折射内表面165,其允许光离开补偿透镜并进入波导棱镜100,其中包含多个折射表面的折射内表面165通常被限制为接近或适合波导棱镜100的外表面125的形状,

[0083] 因此,来自真实世界场景的光198在到达瞳孔150之前,通过补偿透镜160的折射外表面170和折射内表面165,以及波导100的物理外表面125和物理内表面115进行折射。

[0084] 在典型实施例中,将补偿透镜160和波导棱镜100专门共同优化为允许正确地观察跨极宽广视场190的周围环境。当补偿透镜160与波导棱镜100组合时,补偿透镜160的内表面165和外表面170被优化以使引入到来自真实世界场景的光线的偏移和失真最小化。补偿透镜160的内表面165可以与波导棱镜100的外表面125完全相同,只是沿着z轴轻微偏移。如果波导棱镜100的附着外表面125上的反射在虚拟图像显示路径中满足TIR条件,则有必要在波导棱镜100与补偿透镜160之间保持小气隙195。如果对波导棱镜100的外表面125没有TIR要求,则可以在气隙195中填充折射率匹配粘合剂以将补偿透镜160粘合到波导100上。补偿透镜160的内表面165也可以沿着补偿透镜160的外表面170重新设计以实现更佳的透视性能。对于这种情况,波导棱镜100与补偿透镜160之间的气隙195可被限制为在沿着表面的任意点上小于6mm。对外表面170进一步进行限制以将波导棱镜100和补偿透镜160的总厚度限制为通常不超过30mm。在本领域的一个实践中,我们将棱镜和透镜的总厚度限制为不超过15mm。针对指定透视FOV 190,补偿透镜160的内表面165和外表面170应该足够大。对补偿透镜的形状和厚度专门进行优化,从而实现光学透视HMD的包覆型设计,该光学透视HMD在人体工程学上适合于人的头部并且具有吸引人的眼镜式外观。

[0085] 在典型实施例中,补偿透镜160和波导棱镜100上的内表面和外表面大得足以实现与人眼视场一样大的宽广透视视场190,例如,相对于视场中心,在水平方向上在太阳穴侧最高达90°,在鼻子侧最高达60°,以及在垂直方向上在上侧和在下侧最高达60°。波导棱镜100和补偿透镜160上的自由形状表面被优化为校正光线偏移和失真以确保跨大FOV的高透视性能。

[0086] 上述所有表面为自由形状表面,其包括但不限于球面、非球面、变形的非球面、XYP多项式或其它类型的数学规定,该表面在如图1所示的全局坐标系的YZ平面内不对称,其中坐标系的原点位于出射光瞳150的中心处,其中Z轴175指向外部场景,Y轴180指向太阳穴侧,X轴185沿头部垂直指向。在本发明的通篇内容中,如果没有特别指示,则针对所有附图和描述使用相同的坐标系。

[0087] 本发明的主要目标是设计在光学透视HMD中用作光学观察设备的自由形状光学系

统,从而实现眼镜形状外观和宽广透视视场(FOV)。因此,设计波导棱镜需要优化每个单独表面的参数以最小化适当的光学误差函数,例如,波前误差或系统调制传递函数(MTF)。图1所示的波导棱镜包含多个自由形状表面,与传统旋转对称光学表面相比,这些表面提供更多设计自由。因此,自由形状设计方法提供设计具有更佳的光学性能和人体工程学适合度的光学观察设备的能力,同时与使用传统旋转对称光学表面的类似规范的光学观察设备相比,使用更少的表面。但是,必须对所有表面施加适当的限制,以使产生有效的波导棱镜设计,从而实现保持所需形状因素并提供大透视FOV的主要目标。

[0088] 图2和3示出在我们的设计过程中使用的结构限制。这些控制方法将结构签名植入我们的设计中。

[0089] 图2示出用于波导棱镜设计的一组主要结构限制。图2a和2b分别示出YZ平面和XZ平面中的截面图。在附图中,波导200的出射光瞳250与人眼的瞳孔对齐;虚线230是用于限制波导200的内表面215的形状以及微型图像显示单元205的位置的参考表面。参考表面230在3D空间中为柱面(如图3所示),接近人的头部从脸部的鼻子侧到耳朵侧的自然曲率。水平YZ平面中的参考表面230的半径可以从40mm变化为与100mm一样大,具体取决于目标用户人群的头部大小。在垂直的XZ平面中的参考表面230的半径可以是竖直或弯曲的,只要棱镜的内表面不妨碍用户脸部即可。在本领域的一个实践中,我们选择水平方向上的65mm半径,该半径类似于8基弯眼镜的半径。参考弧线的中心232通过参考尺寸 Y_{ref1} 234、 Z_{ref1} 236和 Y_{HIPD} 238定义,其中 Y_{HIPD} 238是用户瞳孔间距(IPD)的一半,对于95%以上的人群,IPD通常处于40mm到80mm范围内。参考尺寸234、236和238根据特定设计目标选择。在本领域的一个实践中,尺寸234、236和238针对8基弯和64mm的IPD实例分别被选择为10mm、50mm和32mm。通过尺寸 Z_{ref2} 242定义的虚线240是用于限制内表面215的形状的另一参考表面。参考表面240(可以是平面或具有所需形状的曲面)确保补偿透镜260距离用户脸部不会太远,否则会导致光学设计的外观太差。虚线290a和290b标注水平维度上从太阳穴到鼻子的指定透视FOV 290的边界,同时虚线290c和290d标注垂直维度上指定透视FOV 290的边界。

[0090] 为了满足我们的人体工程学设计目标以及所需的透视FOV,对波导200的内表面215施加下面的限制:

[0091] a. 整个内表面215被限制为位于参考表面230之外以确保棱镜不会妨碍用户头部;

[0092] b. 内表面215可以偏离参考表面230,但是被限制为不能穿过参考表面240;

[0093] c. 当有必要将来自单个表面描述的内表面215分为多个表面分段时,每个表面分段具有自己的数学公式,从而增加设计自由度,断点必须位于透视FOV 290的上边界290a之外,或者断开的分段必须邻接中间分段来保持一阶连续性。换言之,内表面215位于透视FOV 290内部的表面分段215a必须是连续平滑的光学表面。表面分段215a的局部曲率半径应该不小于20mm,以使将透视失真保持在可接受的水平上。

[0094] d. 表面分段215a被限制为接近设计的曲率。内表面分段215a的形状决定波导棱镜外观,因为补偿透镜260的外表面270与内表面分段215的形状类似。在本领域的一个实践中,表面分段215a被设计为遵循位于参考表面230之外10mm的8基弯,从而实现8基弯的包覆型设计。

[0095] 波导棱镜200的外表面225比内表面215具有更大的自由度。外表面根据需要被分为多个表面分段。断点可以位于透视FOV 290之内或之外。当断点位于透视FOV 290之内时,

需要在两个相邻表面分段的相交线周围具有至少1mm的无光线间隙以确保两个分段之间的平滑过渡。针对指定的透视FOV 290，外表面225在X和Y方向上必须同时足够宽。外表面225与内表面215之间的最大距离通常被限制为小于30mm以确保波导棱镜不会太厚。在本领域的多个实践中，我们将最大距离限制为小于15mm。尽管希望具有较低的光损失，但外表面225上的反射不需要满足TIR条件。如果不满足TIR条件，则透视FOV 290内的表面分段需要半透明半反射涂层。对于透视FOV 290之外的表面分段，如果不满足TIR条件，则建议使用高反射镜面涂层。

[0096] 除了施加到波导棱镜内表面和外表面的限制之外，波导棱镜200的宽度244（在Y方向上从眼瞳250到太阳穴侧所测量的距离）通过下边界进行限制，以使波导棱镜的宽度在太阳穴侧足以提供所需的透视FOV 290。宽度244进一步通过上边界进行限制，以确保为了实现人体工程学适合度和吸引人的外观，最终形成的波导棱镜在人的头部的太阳穴侧不会伸出太多。在本领域的一个实践中，宽度244通过在Y方向上距离出射光瞳250为50mm的上边界进行设定。

[0097] 波导棱镜的宽度246（在Y方向上从眼瞳250到鼻子侧所测量的距离）通过下边界进行限制，以使波导棱镜200的宽度在鼻子侧足以提供所需的透视FOV 290。宽度246进一步通过上边界进行限制，以确保最终形成的波导棱镜不会妨碍人的头部上的鼻梁。在本领域的一个实践中，宽度246通过在Y方向上距离出射光瞳250为30mm的上边界进行设定。

[0098] 波导棱镜的高度252和254（在X方向上从眼瞳250到前额和面颊所测量的距离）通过下边界进行限制，以使波导棱镜200的高度足以在垂直方向的上方和下方提供所需的透视FOV 290。

[0099] 对微型图像显示单元205施加两个位置限制：(1) 显示单元的任何部分都应位于参考表面230之外；(2) 显示单元不应在Y方向上距离出射光瞳250太远。

[0100] 补偿透镜260被设计为抵消波导棱镜200所造成的光线偏移和失真，并物理附着在波导棱镜200上。当补偿透镜260与波导棱镜200组合时，补偿透镜260的内表面265和外表面270被优化以最小化引入到来自真实世界场景的光线的偏移和失真。补偿透镜260的内表面265可以与波导棱镜200的外表面225完全相同，只是沿着z轴轻微偏移。如果波导棱镜200的所附着的外表面225上的反射在虚拟图像显示路径中满足TIR条件，则有必要在波导棱镜200与补偿透镜260之间保持小气隙295。如果对波导棱镜200的外表面225没有TIR要求，则可以在气隙295中填充折射率匹配的粘合剂以将补偿透镜粘合到波导棱镜上。补偿透镜260的内表面265也可以沿着补偿透镜260的外表面270重新设计以实现更佳的透视性能。对于这种情况，波导棱镜200与补偿透镜260之间的气隙295可被限制为在沿着表面的任意点上小于6mm。外表面进一步进行限制以将波导棱镜200和补偿透镜260的总厚度限制为通常不超过30mm。在本领域的一个实践中，我们将棱镜和透镜的总厚度限制为不超过15mm。针对指定的透视FOV 290，补偿透镜260的内表面265和外表面270应该足够大。

[0101] 图3以3D视图示出参考表面230。图2中的参考弧线230沿X轴扫过成为柱面330。波导棱镜300的整个内表面325应该位于柱面330之外以确保棱镜不会在物理上妨碍用户脸部。圆350标注波导300的出射光瞳位置。

[0102] 下面的图形示出本发明的实施例实例，其具有执行上述部分或全部限制并针对不同的基弯样式导致不同的设计结构。

[0103] 图4示出本发明的波导棱镜的5次反射优选实施例，其具有接近8基弯的包覆型外观的内表面。该实施例可用于实现具有8基弯的包覆型眼镜形状因素的HMD系统。在该实施例中，波导棱镜400的物理内表面415和物理外表面425是两个连续平滑表面，每个表面通过自由形状表面参数集进行描述。波导棱镜400的折射表面430不是内表面415的一部分并通过不同的表面参数集进行描述。在该图中，光线束440a、440b和440c来自微型图像显示单元405上的三个不同像素。在显示单元405与波导棱镜400之间，使用耦合透镜410帮助校正光学像差并提高图像质量。在该实施例中，光线束440a、440b和440c通过折射表面430进入波导棱镜400，然后被外表面425和内表面415连续反射五次(R1到R5)，然后通过折射表面435射出，最后到达出射光瞳450。在五次反射当中，外表面425上的反射R1和内表面415上的反射R2满足TIR条件，而内表面415上的反射R4和外表面425上的反射R3和R5不满足TIR条件。为了增加反射R3、R4和R5的反射效率，有必要同时在内表面415和外表面425上施加半透明涂层。为了针对反射R1和R2保持TIR条件，优选地使用电介质涂层。为确保8基弯的包覆型形状因素，内表面415被限制为在水平维度上接近预定义的8基弯。在波导棱镜400内部，光线束440a、440b和440c重新调焦并分别形成中间图像455a、455b和455c。

[0104] 图5示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例，其中具有接近8基弯的内表面。在该实施例中，波导棱镜500的物理内表面515被分为两个表面分段515a和515b，每个表面分段是通过不同的自由形状表面参数集进行描述的平滑表面。波导棱镜500的物理外表面525是通过自由形状表面参数集进行描述的连续平滑表面。折射表面530和反射表面515a通过相同的自由形状表面参数集进行描述，因此是单个平滑表面；反射表面515b和折射表面535通过相同的自由形状表面参数集进行描述，因此是单个平滑表面。表面分段515a和515b通过表面分段515c连接。表面分段515c被设计为在表面515b与515c之间的相交处保持一阶连续性，前提是相交处位于透视FOV 590的上边界590a内。类似地，如果表面515a与515c之间的相交处位于透视FOV 590的上边界590a内，也有必要在表面515a与515c之间的相交处保持一阶连续性。在五次反射当中，反射R2、R3和R4满足TIR条件，而反射R1和R5不满足TIR条件。为了增加反射效率，在外表面525上覆盖半透明涂层。为了针对表面525上的反射R3保持反射R3的TIR条件，优选地使用电介质涂层。如果分段525a位于透视FOV 590的上边界590a之外，则可以在上表面分段525a上施加镜面涂层。在图像显示单元505与波导棱镜500的折射表面530之间，使用耦合透镜510帮助校正光学像差并提高图像质量。表面分段515b被限制为接近8基弯，而表面分段515a被限制为靠近外表面525移动，从而有利于减小波导棱镜500的整体重量。

[0105] 图6示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例，其具有位于太阳穴侧的平缓内弧。在该实施例中，波导棱镜600的折射表面630不是内表面615的一部分并通过不同的表面参数集进行描述，而内表面615是连续平滑表面。折射表面635与表面615共享相同的表面参数集。波导棱镜600的物理外表面625是连续平滑表面并通过自由形状表面参数集进行描述。在五次反射当中，反射R2、R3和R4满足TIR条件，而反射R1和R5不满足TIR条件。为了增加反射效率，在外表面625上覆盖半透明涂层。为了针对表面625上的反射R3保持TIR条件，优选地使用电介质涂层。如果表面分段625a位于透视FOV 690的上边界690a之外，则可以在上表面分段625a上施加镜面涂层。内表面615不被限制为任何预定的曲率，但是限制表面位置以确保棱镜距离人脸不会太远。在图像显示单元605与波导棱镜600的折射表面630之间，

使用耦合透镜610帮助校正光学像差并提高图像质量。

[0106] 图7示出本发明的波导棱镜的另一5次反射优选实施例，其类似于图6所示的实施例。在该实施例中，波导棱镜700的折射表面730不是内表面715的一部分并通过不同的表面参数集进行描述，而内表面715是连续平滑表面。折射表面735与表面715共享相同的表面参数集。波导棱镜700的物理外表面725被分为两个分段725a和725b，每个分段是通过不同的自由形状表面参数集进行描述的平滑表面。表面分段725a和725b通过表面分段725c连接。表面分段725c被设计为在表面725b与725c之间的相交处保持一阶连续性，前提是相交处位于透视FOV 790的上边界790a内。类似地，如果表面725a与725c之间的相交处位于透视FOV 790的上边界790a内，也有必要在表面725a与725c之间的相交处保持一阶连续性。此外，该实施例不需要在波导棱镜700与微型图像显示单元705之间使用耦合透镜，因为棱镜本身足以校正光学像差。

[0107] 图8示出本发明的波导棱镜的5次反射优选实施例，其具有接近8基弯的内表面，并且该实施例专门针对诸如LCoS或FLCoS型微型显示面板之类的反射型发光像素阵列而设计。在该实施例中，波导棱镜800的物理内表面815被分为两个平面分段815a和815b，每个分段是通过不同的自由形状表面参数集进行描述的平滑表面。折射表面830和反射表面815a是单个平滑表面并通过相同的平面参数集进行描述；反射表面815b和折射表面835是单个平滑表面并通过相同的平面参数集进行描述。表面分段815a和815b通过表面分段815c连接。表面分段815c被设计为在表面815b与815c之间的相交处保持一阶连续性，前提是相交处位于透视FOV 890的上边界890a内。类似地，如果表面815a与815c之间的相交处位于透视FOV 890的上边界890a内，也有必要在表面815a与815c之间的相交处保持一阶连续性。波导棱镜800的物理外表面825被分为两个分段825a和825b，每个分段是通过不同的自由形状表面参数集进行描述的平滑表面。表面分段825a和825b通过表面分段825c连接。表面分段825c被设计为在表面825b与825c之间的相交处保持一阶连续性，前提是相交处位于透视FOV 890的上边界890a内。类似地，如果表面825a与825c之间的相交处位于透视FOV 890的上边界890a内，也有必要在表面825a与825c之间的相交处保持一阶连续性。表面分段815b被限制为接近8基弯，而表面分段815a被限制为靠近外表面825a以有利于减小棱镜的整体重量。在五次反射当中，反射R2、R3和R4满足TIR条件，而反射R1和R5不满足TIR条件。因此，为了增加反射效率，需要在外表面825上覆盖半透明涂层。为了针对表面825b上的反射R3保持TIR条件，优选地使用电介质涂层。如果表面分段825a位于透视FOV 890的上边界890a之外，则可以在上表面分段825a上施加镜面涂层。在微型图像显示单元805与波导棱镜800的折射表面830之间，使用耦合透镜810帮助校正光学像差并提高图像质量。在该实施例中，微型图像显示单元805包含反射式微型显示面板805a（例如，LCoS显示面板）、物镜805b和偏振分光器805c。物镜805b用于在微型显示表面上执行光的聚光远心（tele-centricity）。偏振分光器805c充当合束器以合并显示照明路径（未示出）和显示成像路径。偏振分光器805c还充当起偏器以及微型显示面板805a的入射和出射光的检偏器。该实施例的元件定义在图11中示出，参数在图25-27（表2-4）中给出。

[0108] 图9示出与图8所示的实施例类似的本发明的另一优选实施例，只是波导棱镜900的物理内表面915被优化为接近4基弯而非8基弯。在该实施例中，波导棱镜900与图8中的实施例具有类似的结构特性。但是，内表面分段915b被限制为接近4基弯。因此，该实施例可用

于实现具有与一副4基弯眼镜类似的平坦外观且具有4基弯眼镜形状因素的HMD系统。与图8所示的实施例类似,该实施例专门针对诸如LCoS或FLCoS型微型显示面板之类的反射型发光像素阵列而设计。该实施例的元件定义在图13中示出,参数在图28-30(表5-7)中给出。

[0109] 图10示出本发明的波导棱镜的3次反射优选实施例,其具有接近8基弯包覆型外观的内表面。该实施例可用于实现具有8基弯包覆型形状因素的HMD系统。在该实施例中,波导棱镜1000的物理内表面1015和物理外表面1025是两个连续平滑表面,每个表面通过自由形状表面参数集进行描述。波导棱镜1000的折射表面1030不是内表面1015的一部分并通过不同的表面参数集进行描述。微型图像显示单元1005包含微型显示面板1005a和用于在微型显示表面上实现光的聚焦远心的物镜1005b。微型显示面板1005a可以是反射型微型显示器(例如,LCoS、FLCoS或DMD面板)或透射型微型显示器(例如,LCD面板)或自发光型微型显示器(例如,OLED面板)。在反射型微型显示面板的实例中,在物镜1005b之后需要安装分光器(未示出)以引入照明路径(未示出)。在图像显示单元1005与波导棱镜1000之间,使用耦合透镜1010帮助校正光学像差并提高图像质量。在该设计实例中,来自微型显示器1005a上的三个不同像素的光线束1040a、1040b和1040c通过折射表面1030进入波导棱镜1000,被内表面1015和外表面1025反射三次,然后通过折射表面1035射出,最后到达出射光瞳1050。在该实例中,在三次反射当中,反射R1和反射R2满足TIR条件,而外表面1025上的反射R3不满足TIR条件。为了增加反射R3的反射效率,有必要在外表面1025上施加半透明涂层。为了针对反射R1保持TIR条件,优选地使用电介质涂层。为确保8基弯的眼镜形状因素,内表面1015被限制为接近预定义的8基弯。在波导棱镜1000内部,光线束1040a、1040b和1040c重新调焦并分别形成中间图像1055a、1055b和1055c。该实施例的元件定义在图17中示出,参数在图31-33(表8-10)中给出。

[0110] 在其它实施例中,图像显示单元可以朝着内表面、外表面或边缘表面设置,具体取决于透镜形状、反射次数和所需眼镜形状因素。在具体实施例中,对于8基弯的眼镜形状因素,图像显示装置通常朝着波导的边缘表面设置,而对于4基弯的眼镜形状因素,图像显示装置通常朝着内表面设置。

[0111] 虽然此处描述了所设计的8基弯和4基弯的眼镜,但是可以使用本发明的概念设计其它任何眼镜形状,例如工业标准眼镜形状因素,其中包括但不限于2基弯(2-base)、3基弯、4基弯、5基弯、6基弯、7基弯、8基弯和9基弯。

[0112] 本发明的一个特征是延长的光路长度要求将表面设计为,使得光线束通过棱镜重新聚焦在中间点上。该对光的重新聚焦在通过棱镜的半路产生中间图像,因此,光线在出射折射表面上稍微偏离,这样做的优点是:当虚拟图像路径的视场在OST-HMD中增大时,波导的总厚度不会迅速增加。

[0113] 根据本发明提供了七个实施例(图4-10)。在下文中,提供实施例5-7的数值数据(图8-10)。在实施例中采用三类自由形状表面,并且每种表面类型的数学方程式在图24(表1)中列出。图24(表1)中的方程式通过局部坐标系给出,其原点为表面顶点。表面的位置和方位或者在全局坐标系中直接定义,或者通过参考坐标系定义。如图1的详细说明中描述的那样,全局坐标位于出射光瞳的中心上,其中x轴指向纸张内部,y轴指向上方,z轴指向外部场景。

[0114] 实施例5的数值数据(在图8中描述)

[0115] 图11示出实施例5(图8)的注释和元件定义。该实施例针对0.37"反射型显示器(例如,LCoS或FLCoS)设计,从而产生在Y方向上为26.5°,在X轴方向上为15°,以及在对角线方向上为30°的虚拟FOV。系统焦数(F/number)为2。图25(表2)列出波导棱镜800的表面参数,图26(表3)列出耦合透镜810和物镜805b的表面参数。所有光学表面的位置和方位以及每个光学元件的光学材料在图27(表4)中列出。

[0116] 针对红色(625nm)、绿色(525nm)和蓝色(465nm)波长的选定场的MTF曲线在图12-12b中示出。针对居中的3mm瞳孔以80周期(cycle)/mm的截止空间频率评估MTF性能,所述截止空间频率对应于6.25μm的等价像素大小。

[0117] 实施例6的数值数据(在图8中描述)

[0118] 图13示出实施例6(图9)的注释和元件定义。该实施例针对0.37"反射型显示器(例如,LCoS或FLCoS)设计,从而产生在Y方向上为26.5°,在X轴方向上为15°,以及在对角线方向上为30°的虚拟FOV。系统焦数为2。图28(表5)列出波导棱镜900的表面参数,图29(表6)列出耦合透镜910和物镜905b的表面参数。所有光学表面的位置和方位以及每个光学元件的光学材料在图30(表7)中列出。

[0119] 针对红色(625nm)、绿色(525nm)和蓝色(465nm)波长的选定场的MTF曲线在图14-14b中示出。针对居中的3mm瞳孔以80周期/mm的截止空间频率评估MTF性能,所述截止空间频率对应于6.25μm的等价像素大小。

[0120] 图15示出实施例6的透视路径的光线跟踪实例。总校正透视FOV在水平方向上为75°,在垂直方向上为70°。

[0121] 图16示出根据本发明的实施例6的具有4基弯外观的示例性OST-HMD设计。OST-HMD设备包含实施例6的一对光学部件,眼镜架1602和电子单元1604。每个光学部件包含自由波导棱镜1600、补偿透镜1660、耦合透镜1610、分光器1605c和物镜1605b,以及微型显示面板1605a。位于眼镜架1602的两个眼镜腿内的电子单元1604可用于集成必要的电子器件,其包括但不限于微型显示单元和显示照明单元的电路板、图像视频接收处理单元、音频输入输出单元、图形处理单元、定位单元、无线通信单元和计算处理单元等。该实施例的指定透视FOV 1690在水平维度上在太阳穴侧为45°,在鼻子侧为30°,以及在垂直维度上为±35°(未示出)。

[0122] 实施例7的数值数据(在图10中描述)

[0123] 图17示出实施例7(图10)的注释和元件定义。该实施例针对0.37"反射型显示器(例如,LCoS或FLCoS)设计,从而产生在Y方向上为26.5°,在X轴方向上为15°,以及在对角线方向上为30°的虚拟FOV。系统焦数为2。图31(表8)列出波导棱镜1000的表面参数,图32(表9)列出耦合透镜1010和物镜1005b的表面参数。所有光学表面的位置和方位以及每个光学元件的光学材料在图33(表10)中列出。

[0124] 针对红色(625nm)、绿色(525nm)和蓝色(465nm)波长的选定场的MTF曲线在图18-18b中示出。针对居中的3mm瞳孔以80周期/mm的截止空间频率评估MTF性能,所述截止空间频率对应于6.25μm的等价像素大小。

[0125] 图19示出实施例7(图10)的补偿透镜的注释和元件定义。

[0126] 图20示出实施例6的透视路径的光线跟踪实例。总校正透视FOV在水平方向上为80°,在垂直方向上为70°。

[0127] 透视路径的具有可变衍射极限的选定场的多色MTF曲线在图21-21b中示出。针对居中的3mm瞳孔以60周期/mm的截止空间频率评估MTF性能。

[0128] 图22示出实施例7的未修整的3D模型。该模型包含波导棱镜、补偿透镜、耦合透镜和物镜。该模型还包括分光器空间从而为插入分光器提供空间，以引入反射型微型显示器的照明路径。该模型进一步包括微型显示器的防护玻璃。

[0129] 图23示出根据本发明的实施例7的具有8基弯外观的示例性OST-HMD设计。OST-HMD设备包含实施例7的一对光学部件，眼镜架2302和电子单元2304。每个光学部件包含自由波导棱镜2300、补偿透镜2360、耦合透镜2310、物镜2305b、以及微型显示面板2305a。位于眼镜架2302的两个眼镜腿内的电子单元2304可用于集成必要的电子器件，其包括但不限于微型显示单元和显示照明单元的电路板、图像视频接收处理单元、音频输入输出单元、图形处理单元、定位单元、无线通信单元和计算处理单元等。该实施例的指定透视FOV 2390在水平维度上在太阳穴侧为65°，在鼻子侧为35°，以及在垂直维度上为±35°（未示出）。

[0130] 通过上述描述，除了此处描述的内容之外，本发明的各种修改对于本领域的技术人员而言也是显而易见。这些修改也旨在位于所附权利要求的范围之内。本申请中引用的每个参考文献通过全部引用的方式并入于此。

[0131] 尽管已经示出和描述了本发明的优选实施例，但是本领域的技术人员很容易理解，可以对这些优选实施例做出不超出所附权利要求范围的修改。因此，本发明的范围仅由下面的权利要求限定。

[0132] 下面的权利要求中列出的参考标号只是为了便于审查本专利申请，并且是实施例性的，并非旨在以任何方式将权利要求的范围限制为在附图中具有对应附图标记的特定特征。

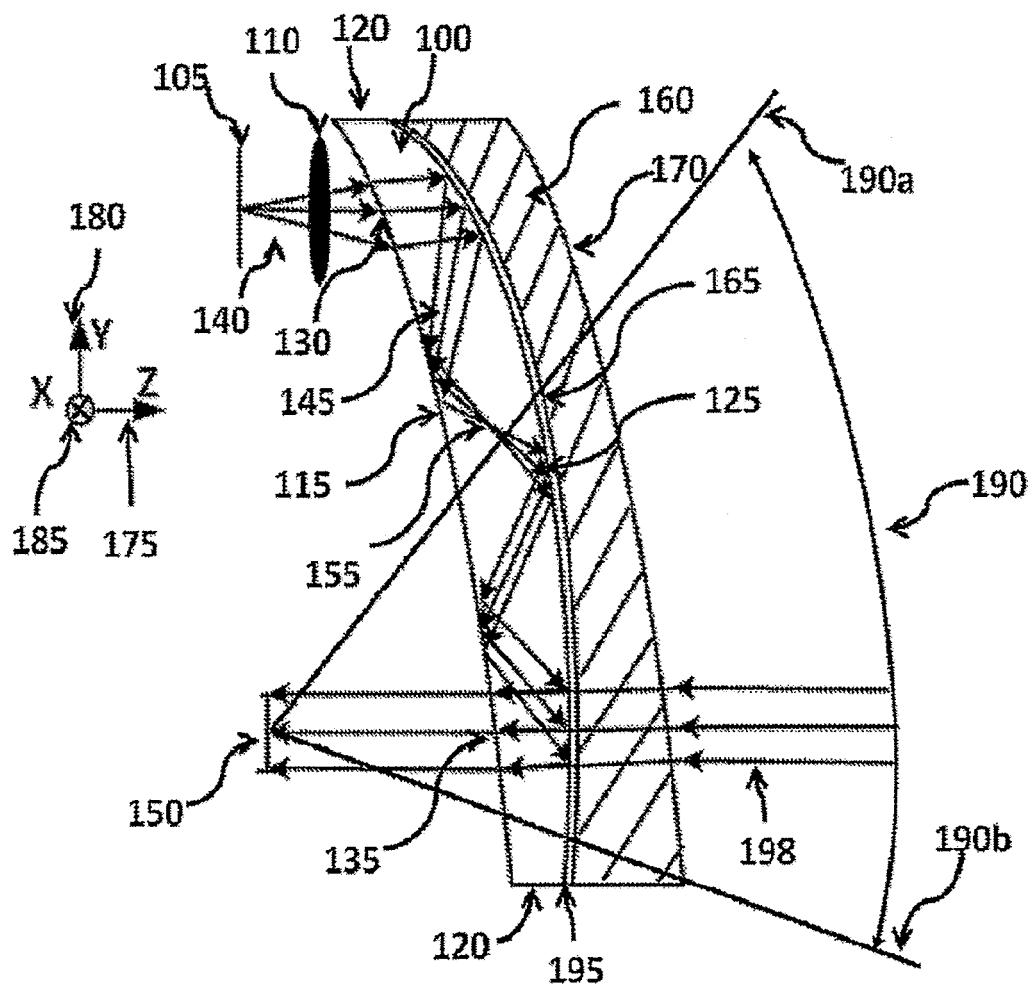


图1

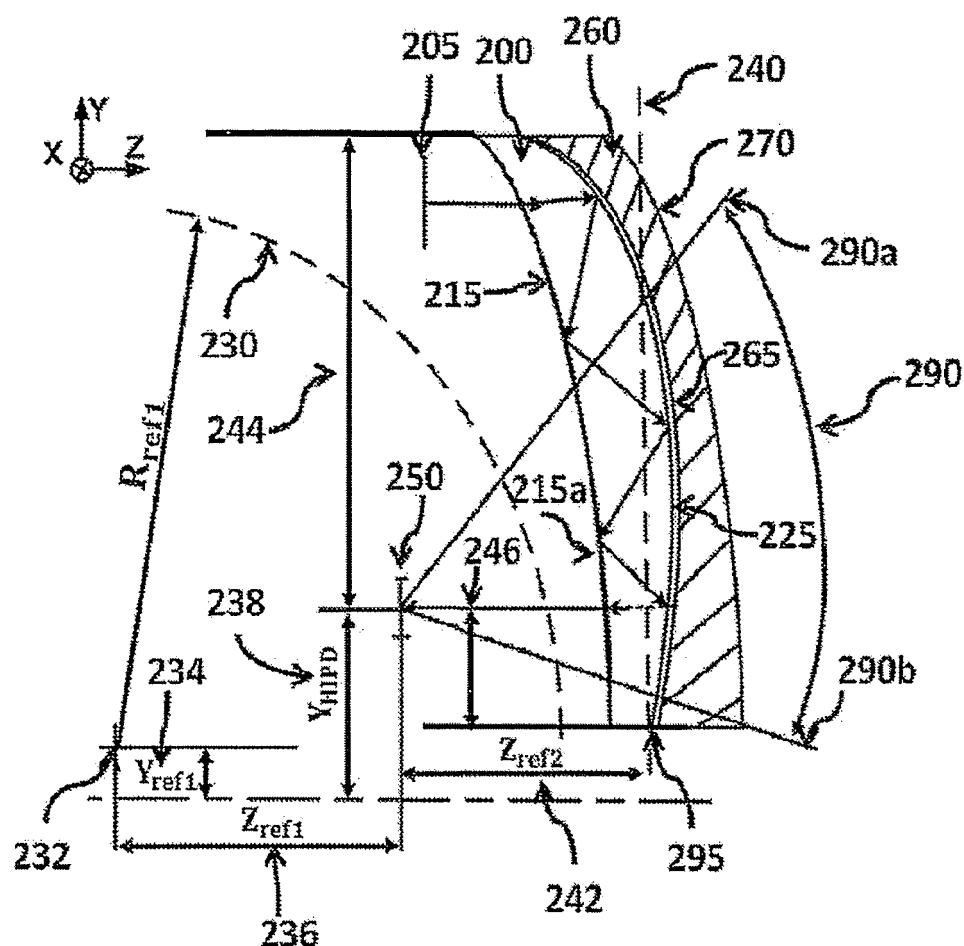


图2a

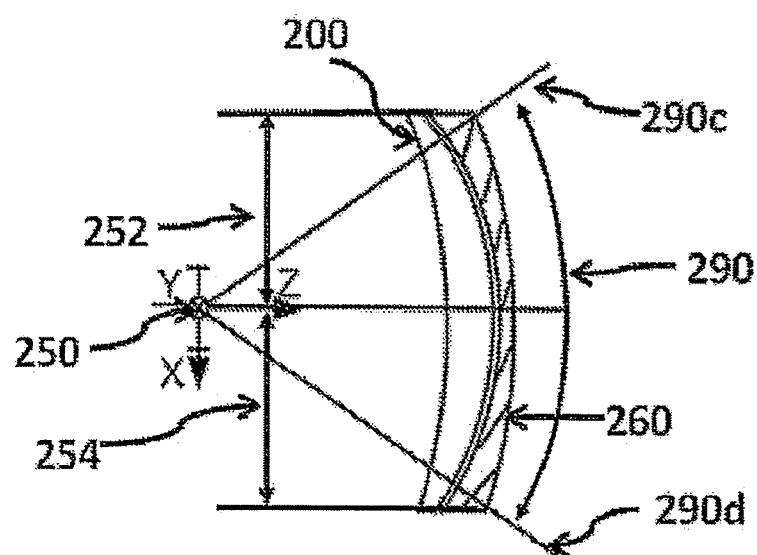


图2b

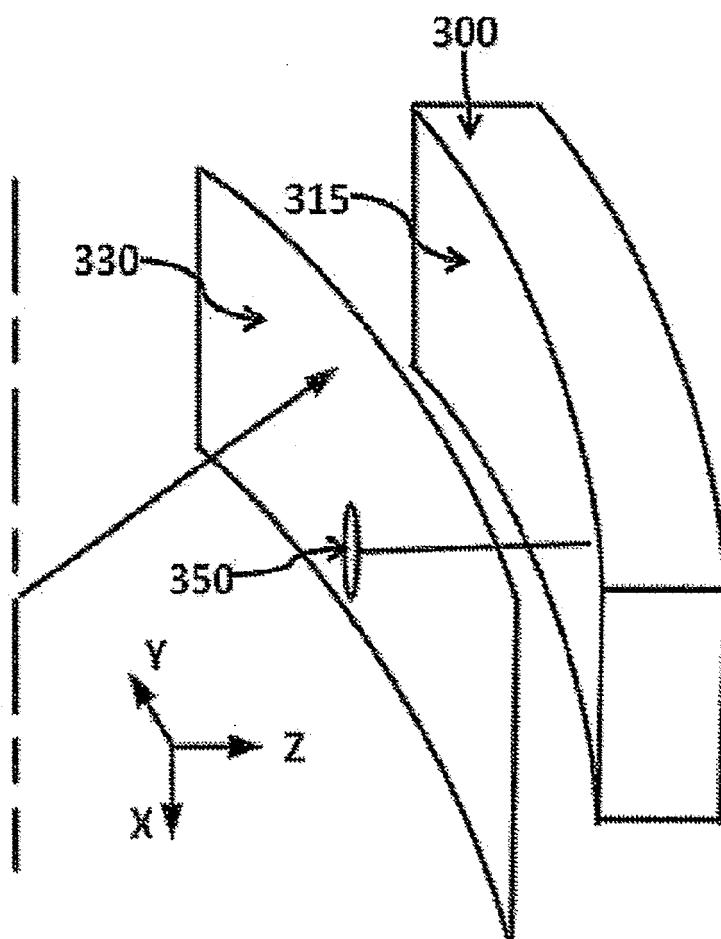


图3

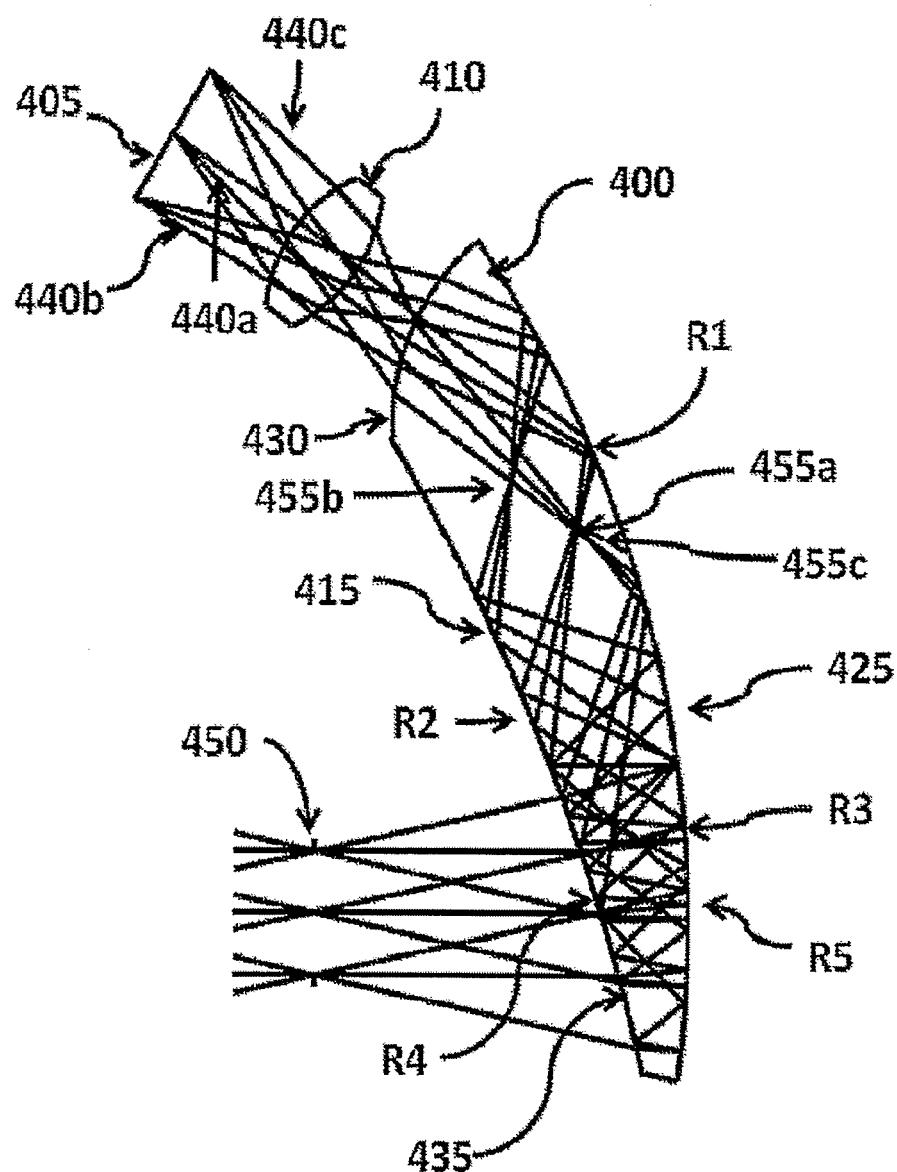


图4

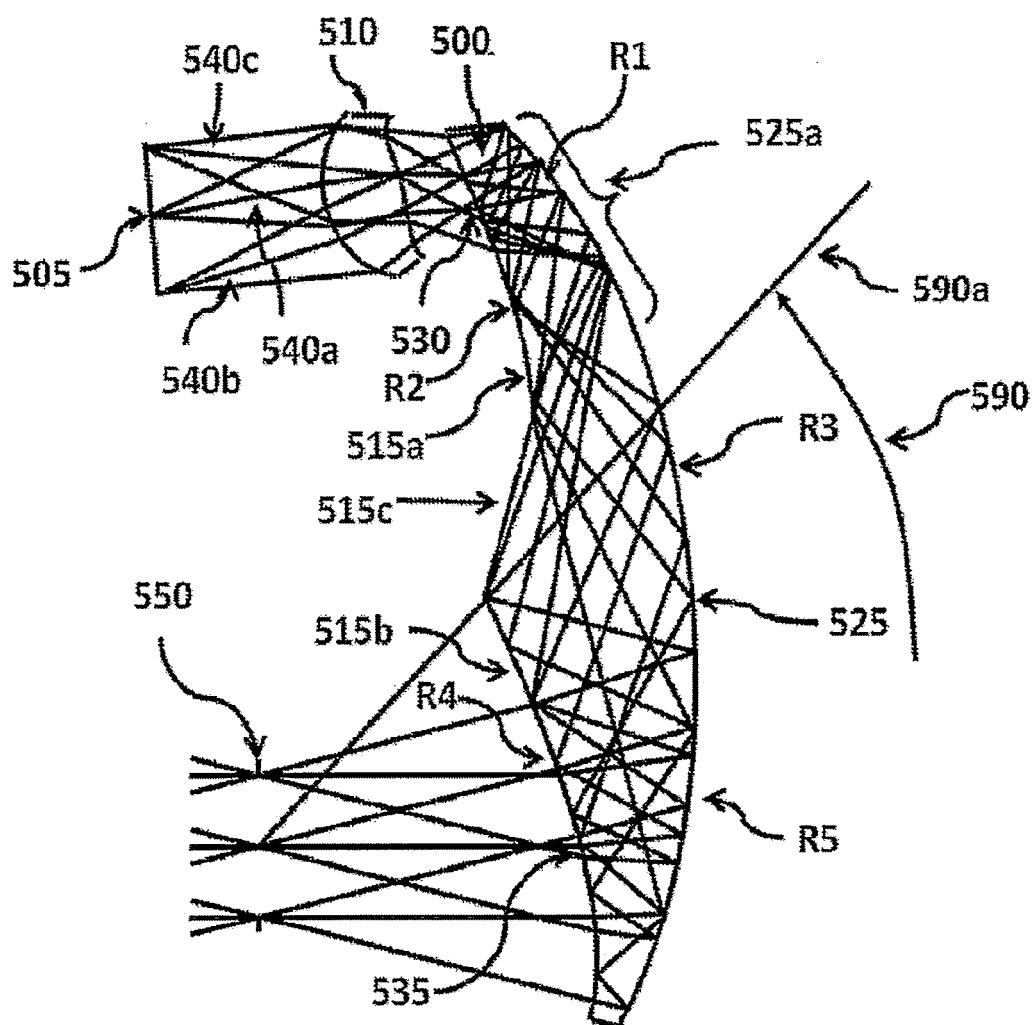


图5

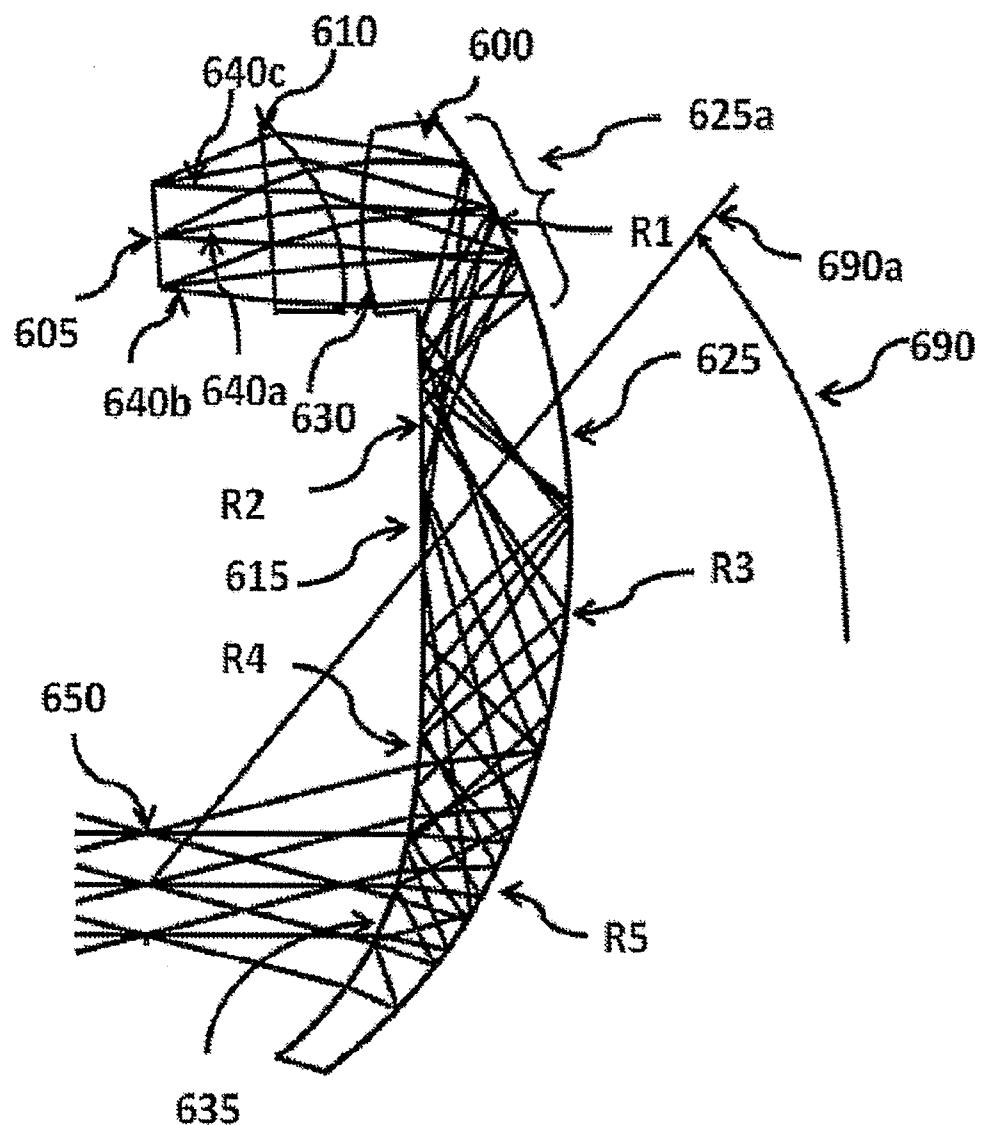


图6

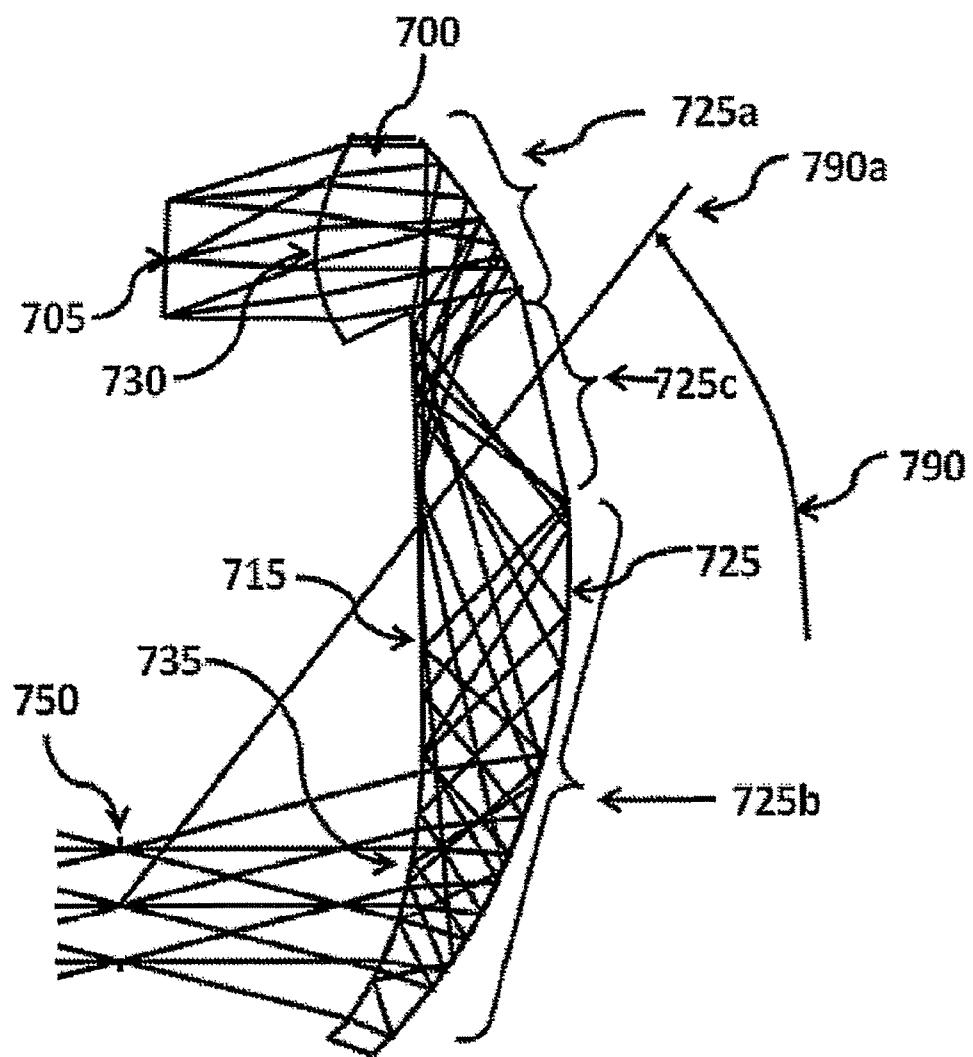


图7

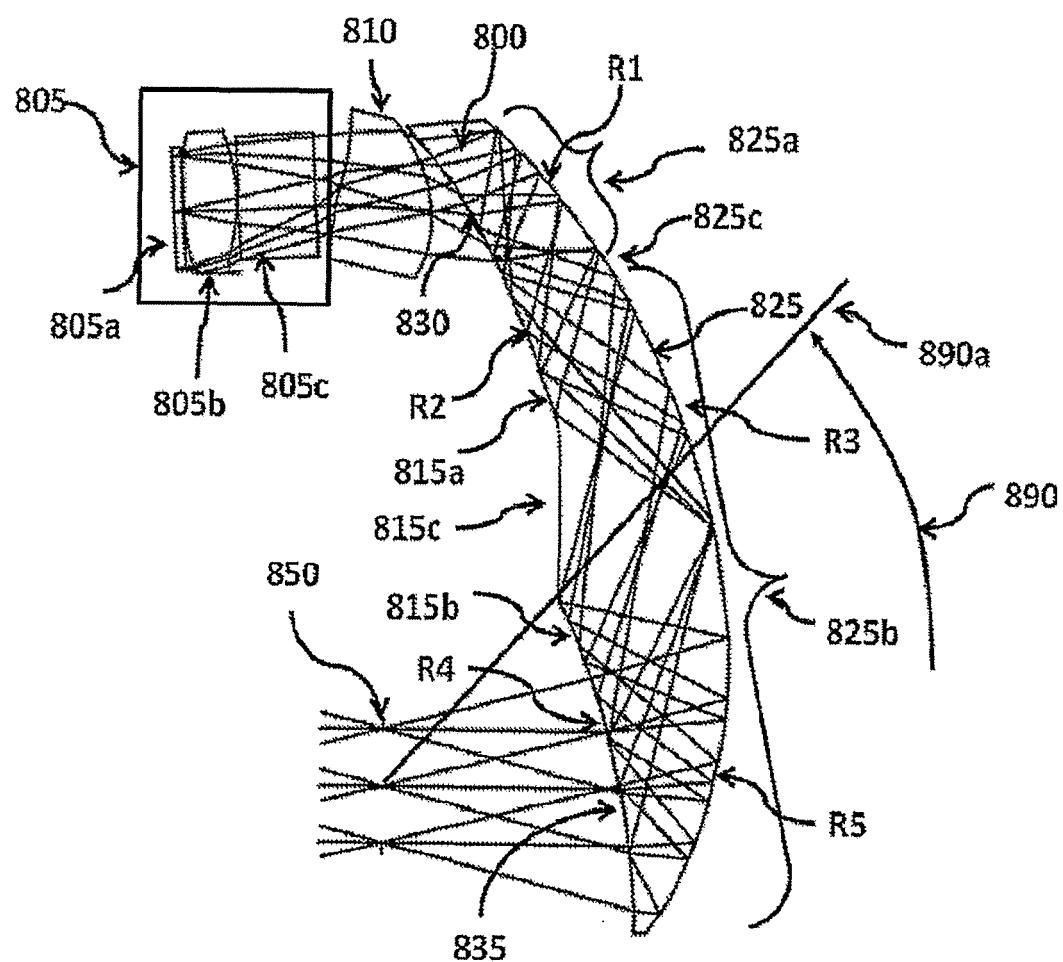


图8

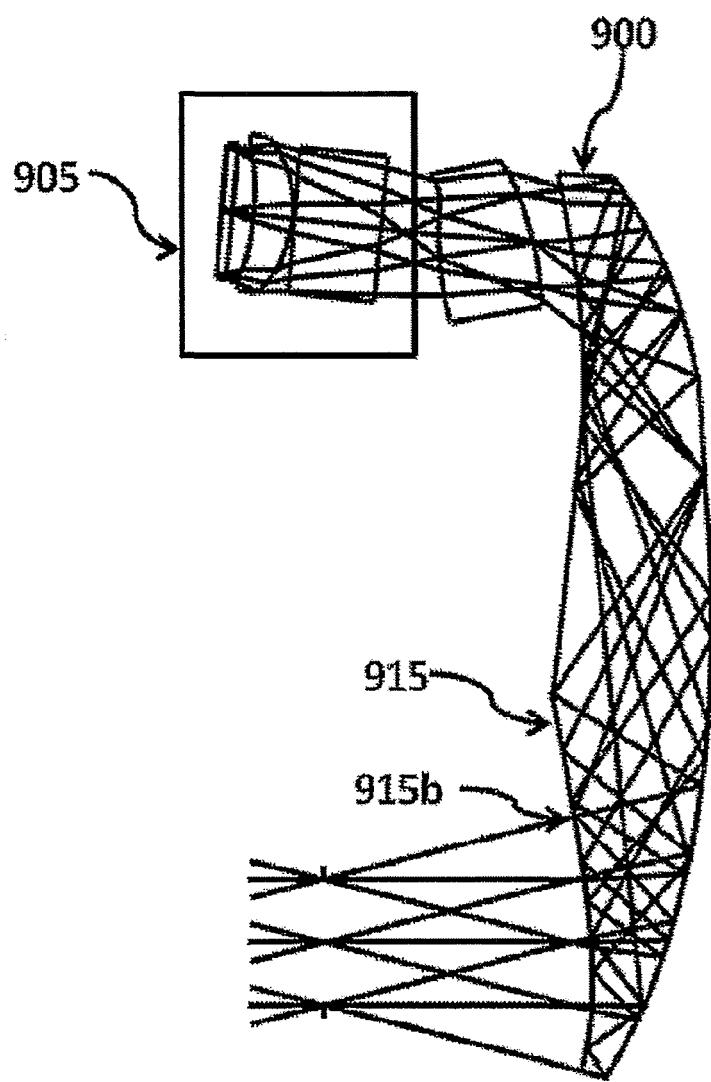


图9

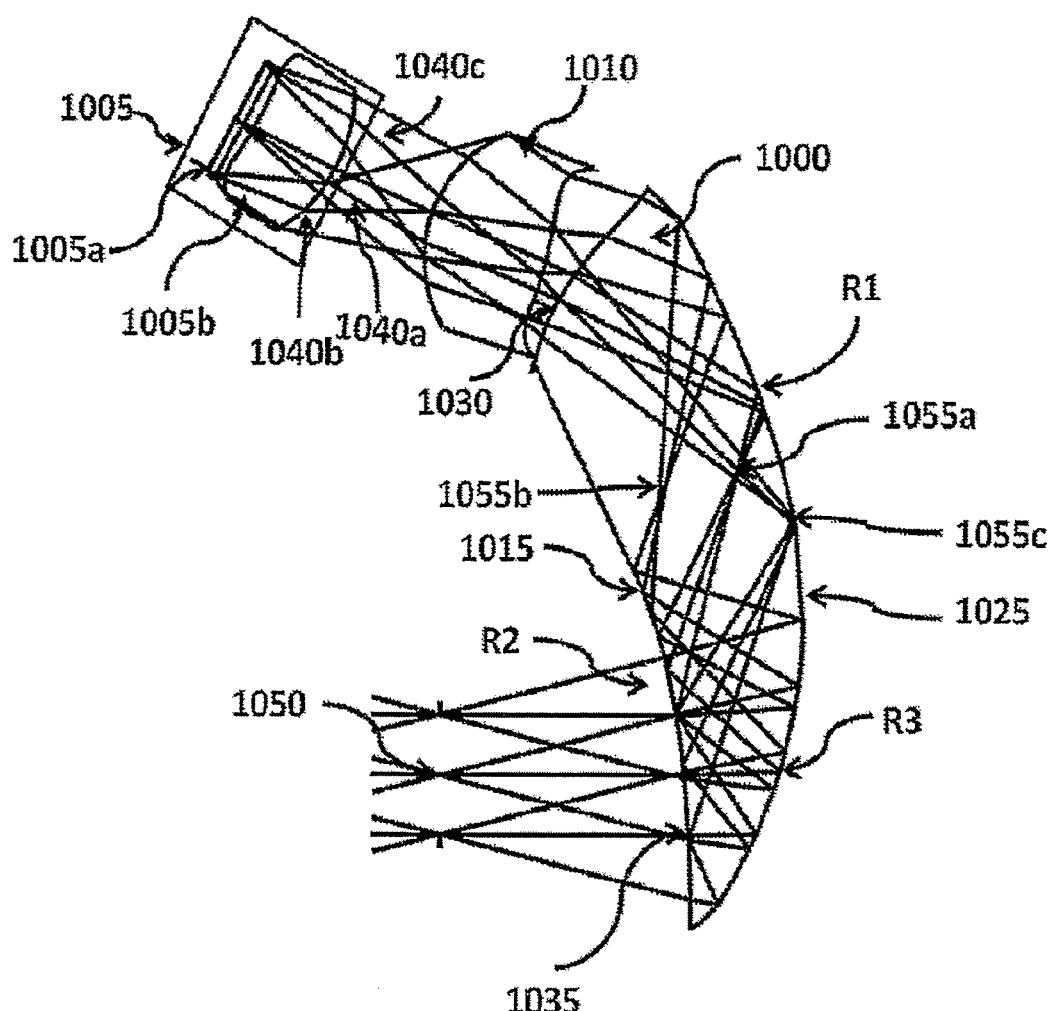


图10

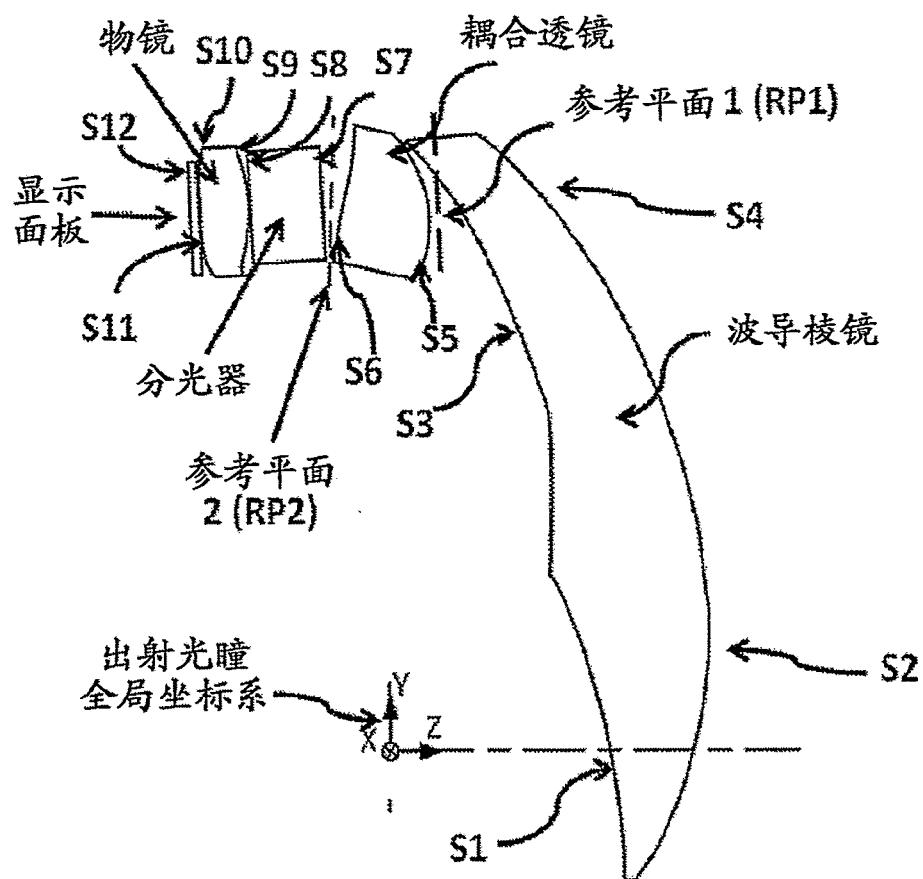


图11

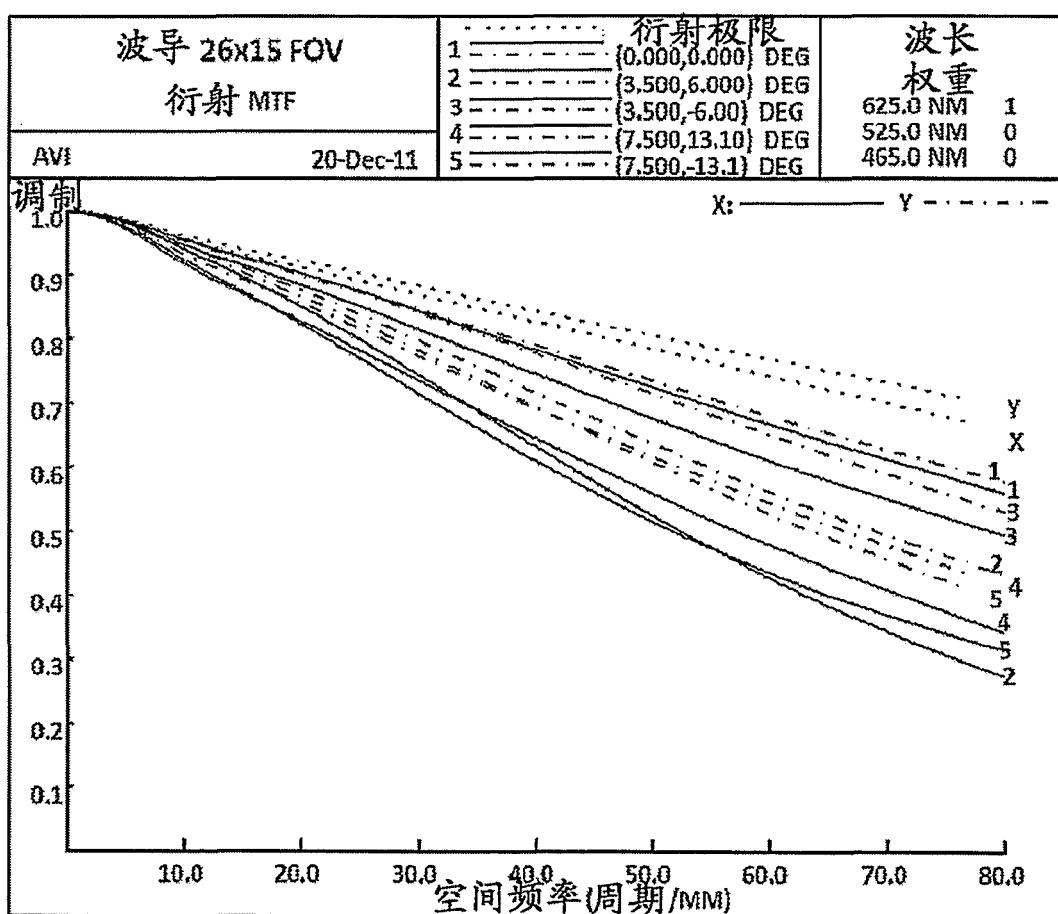


图12

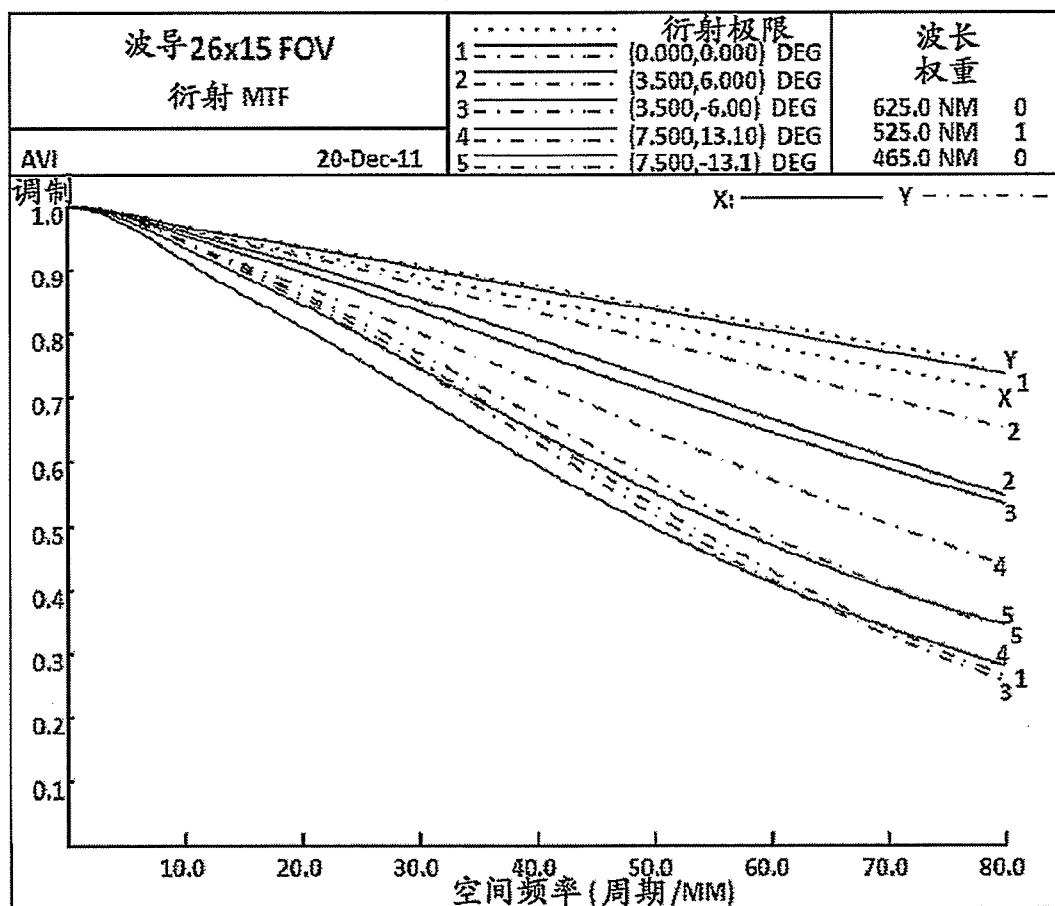


图12a

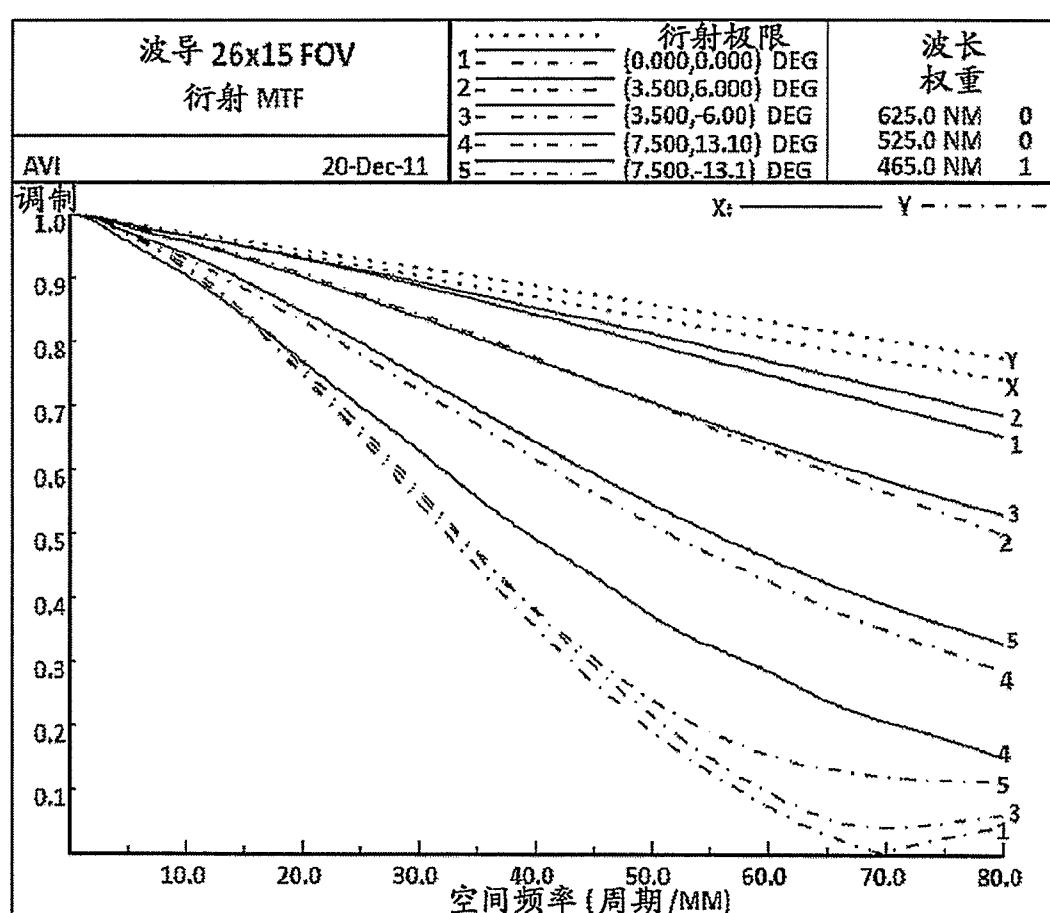


图12b

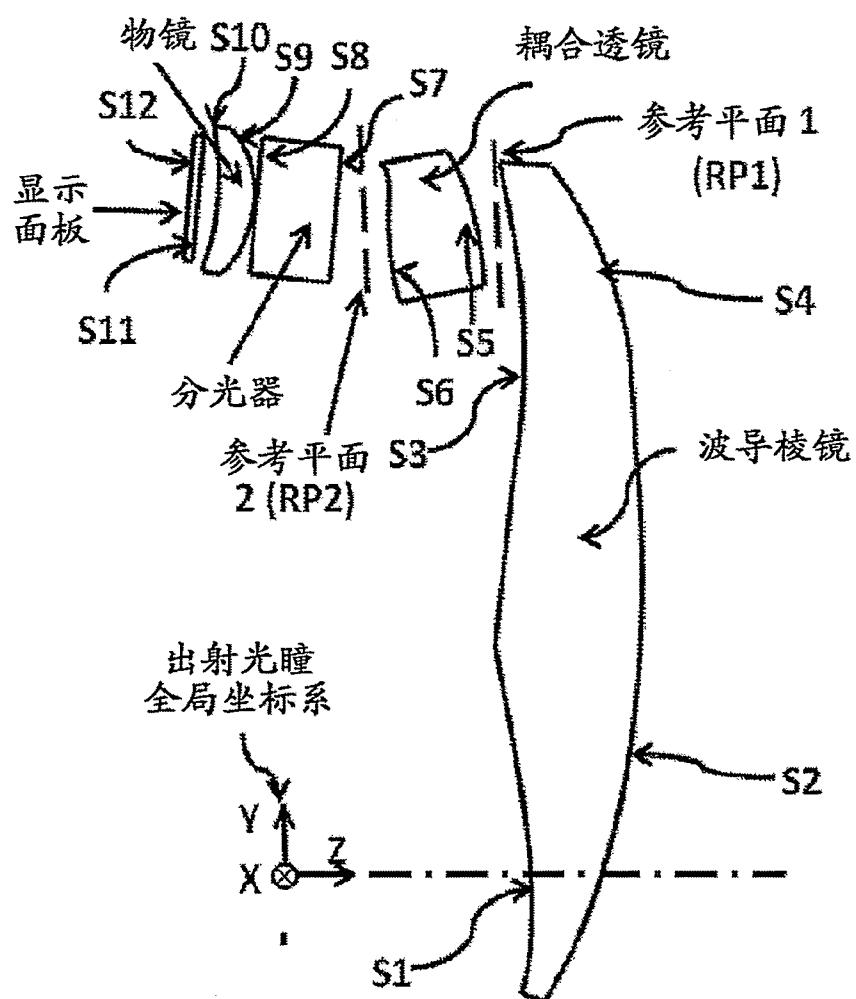


图13

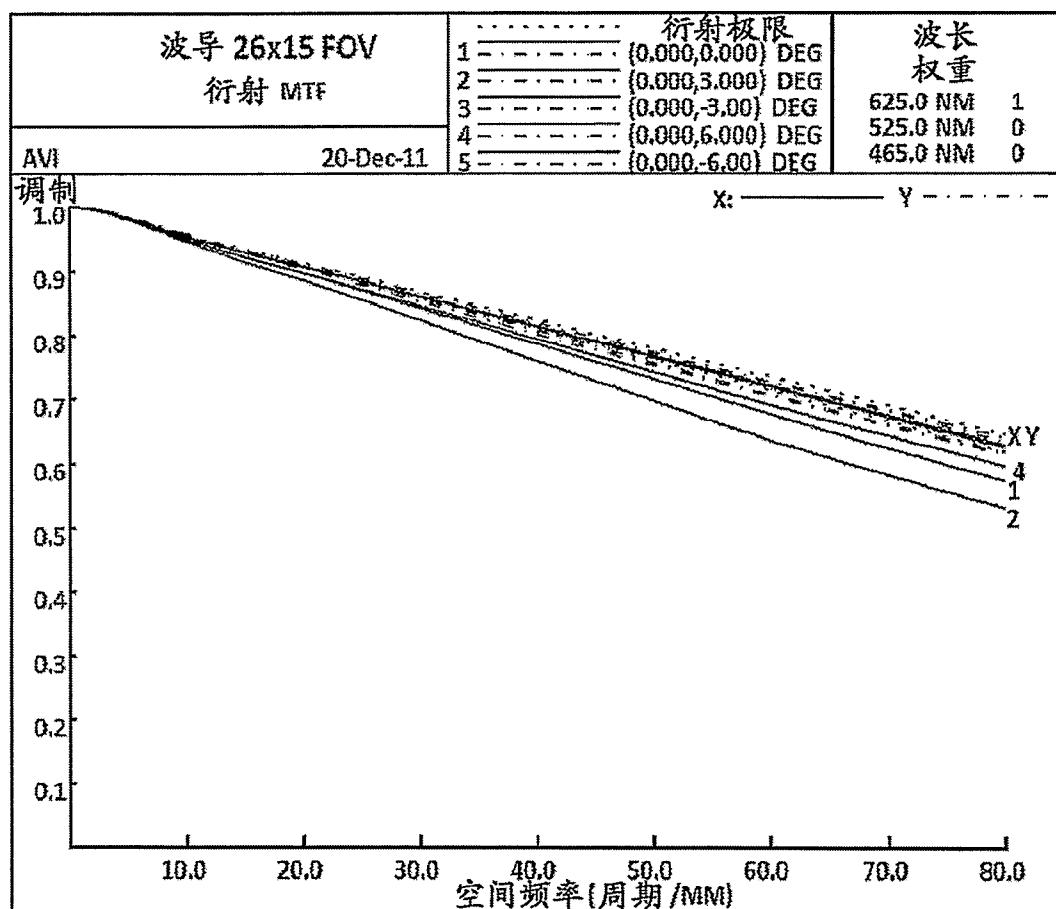


图14

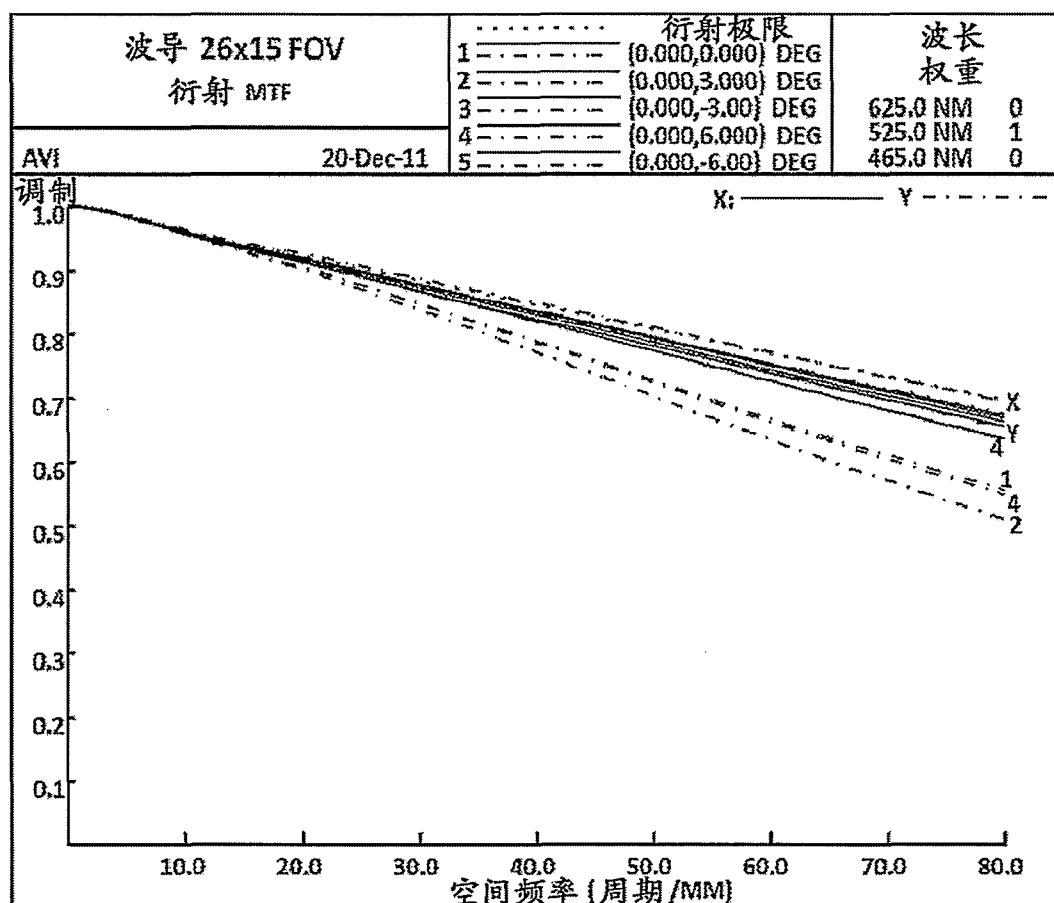
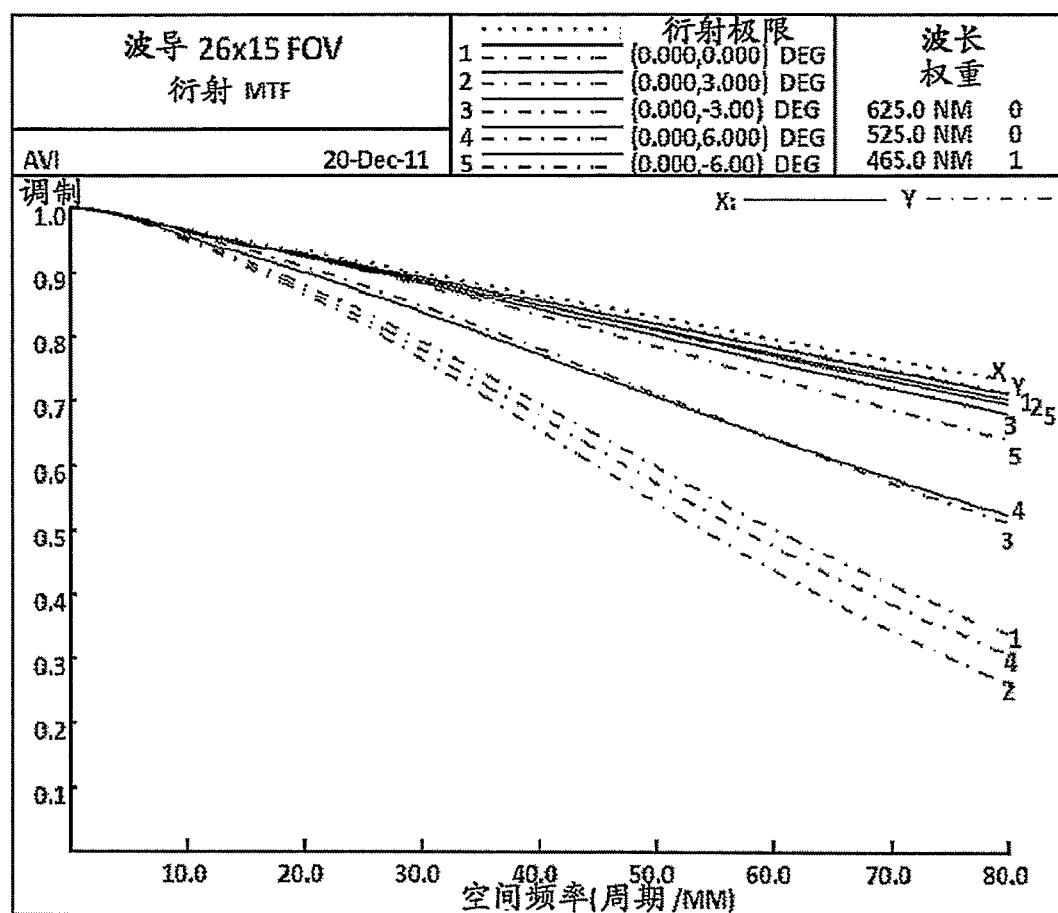


图14a



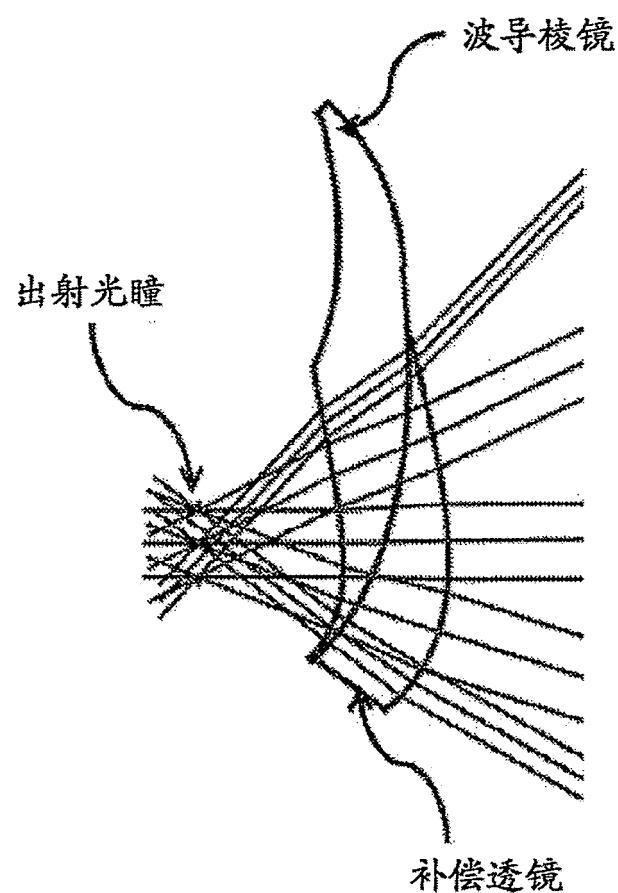


图15

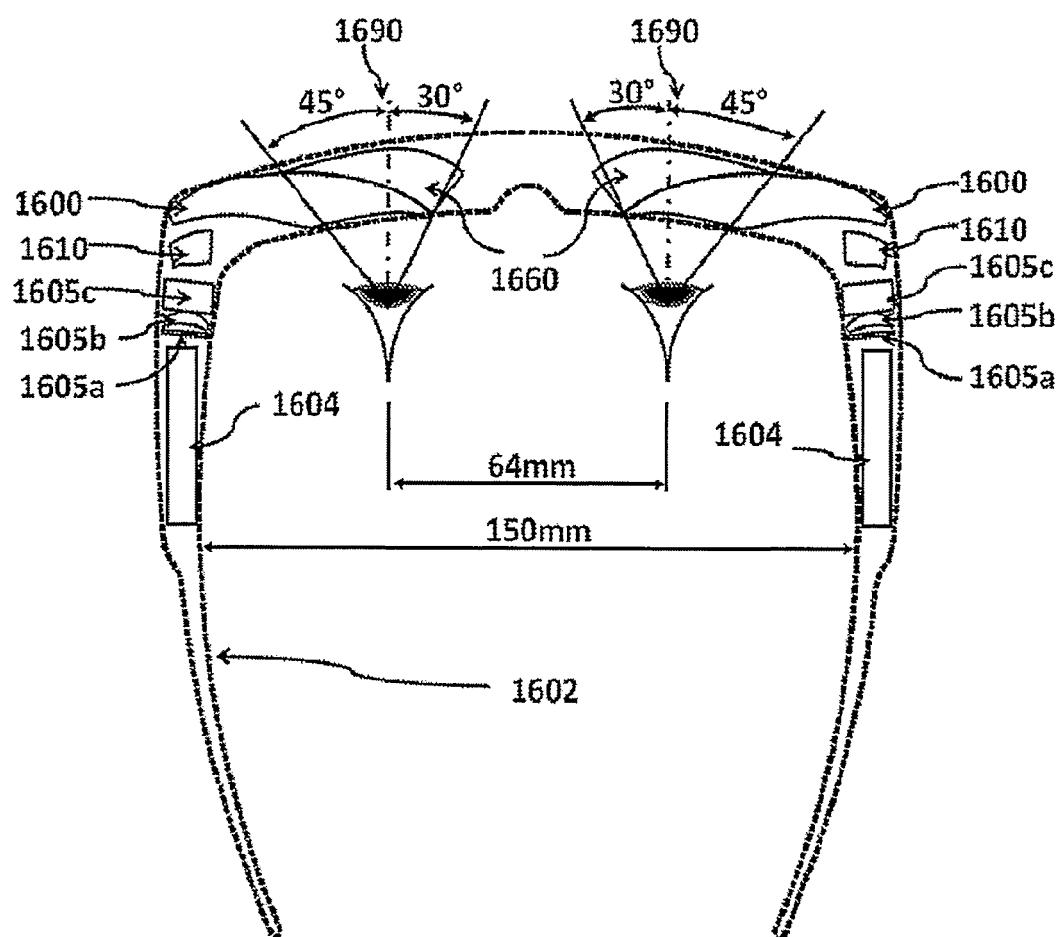


图16

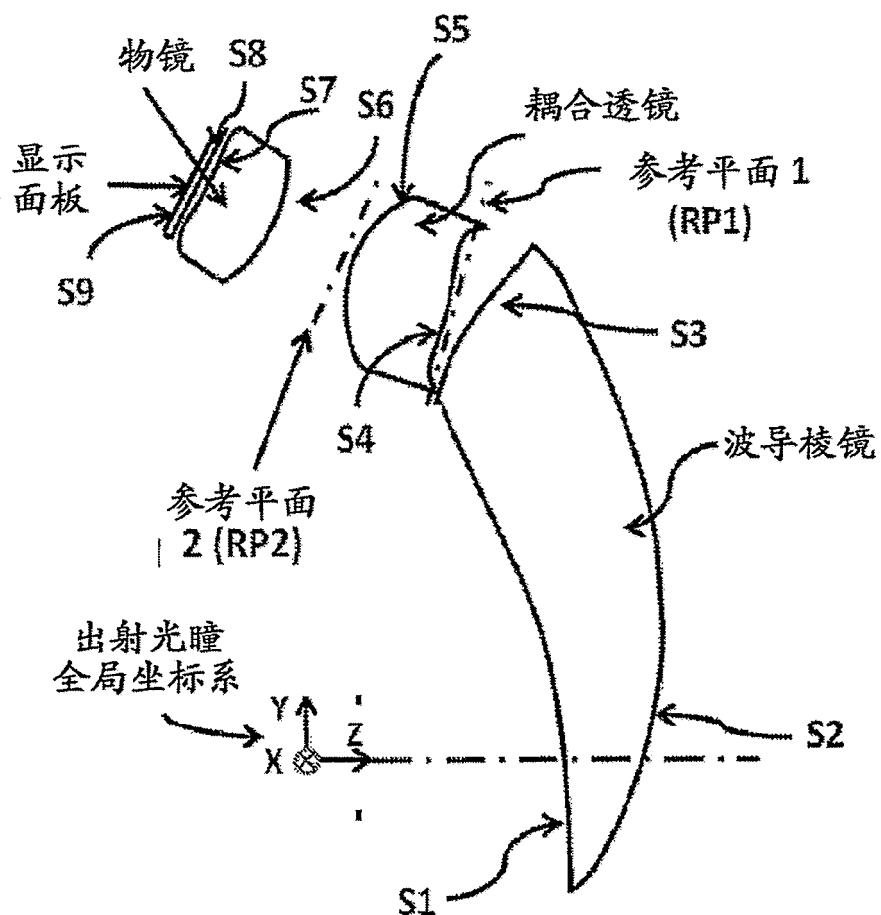


图17

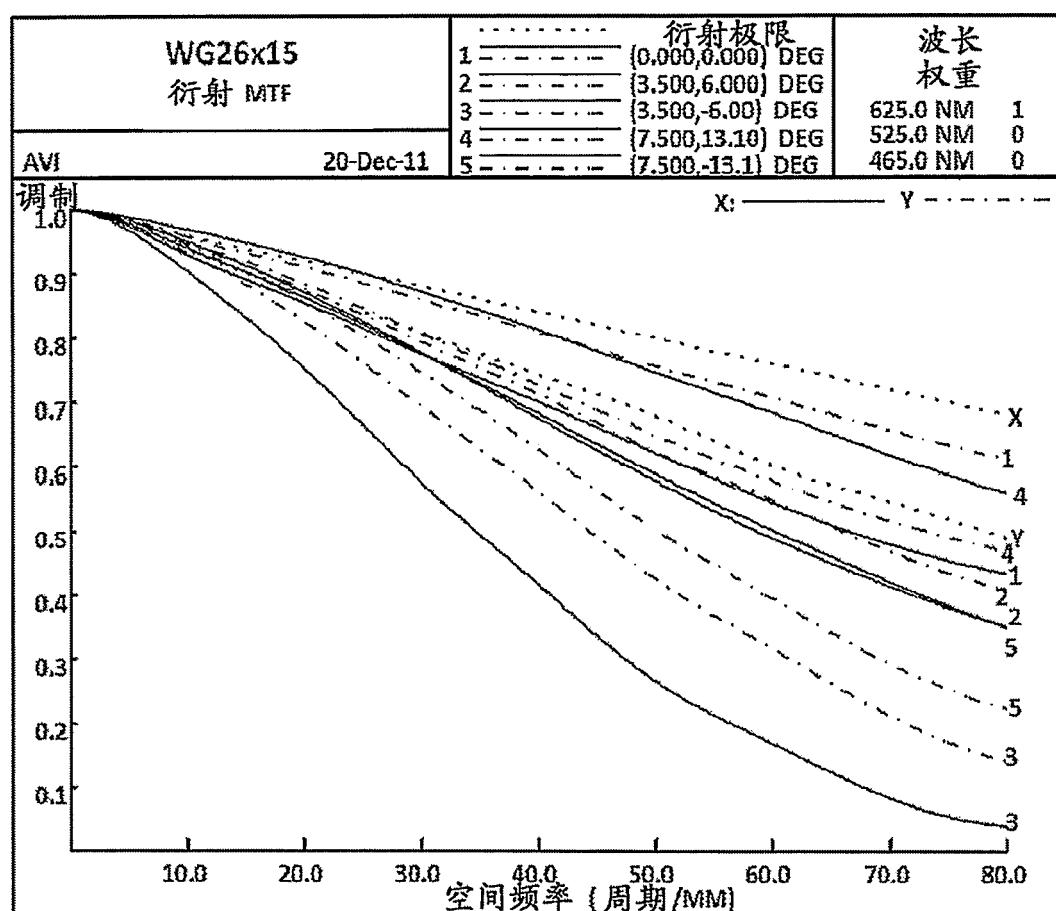


图18

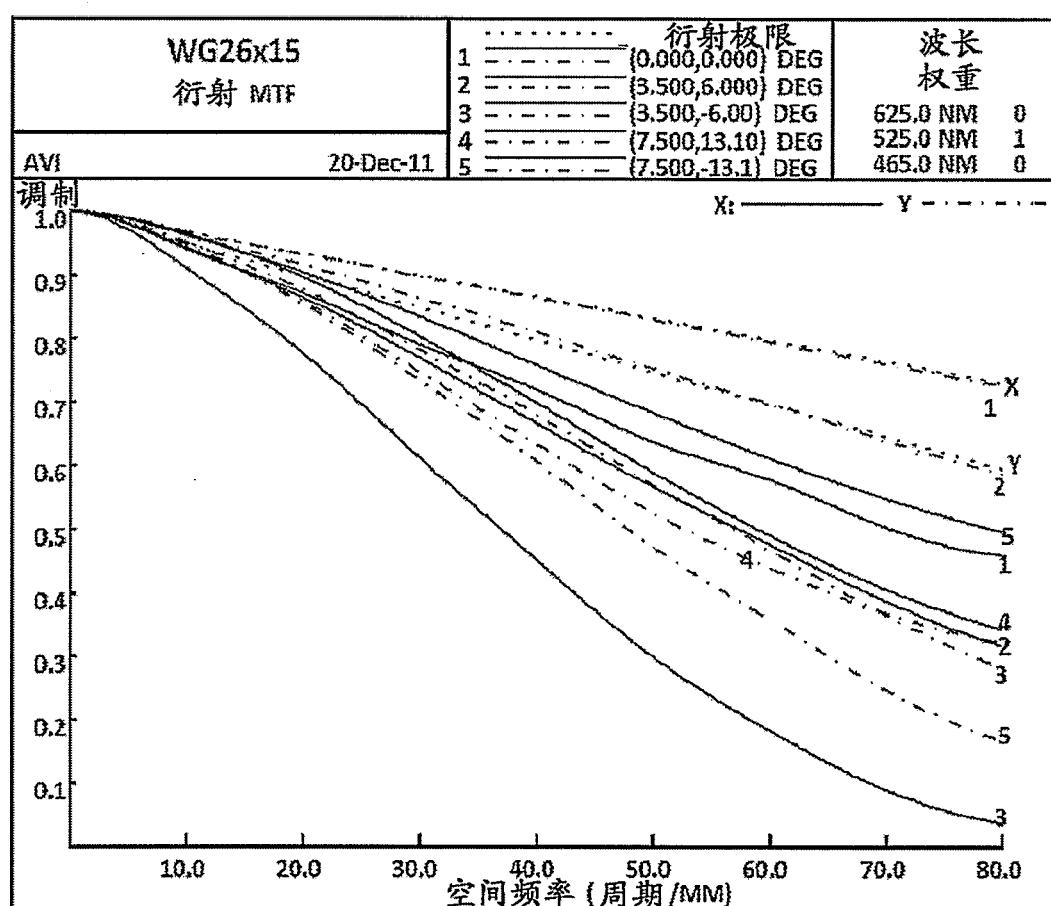


图18a

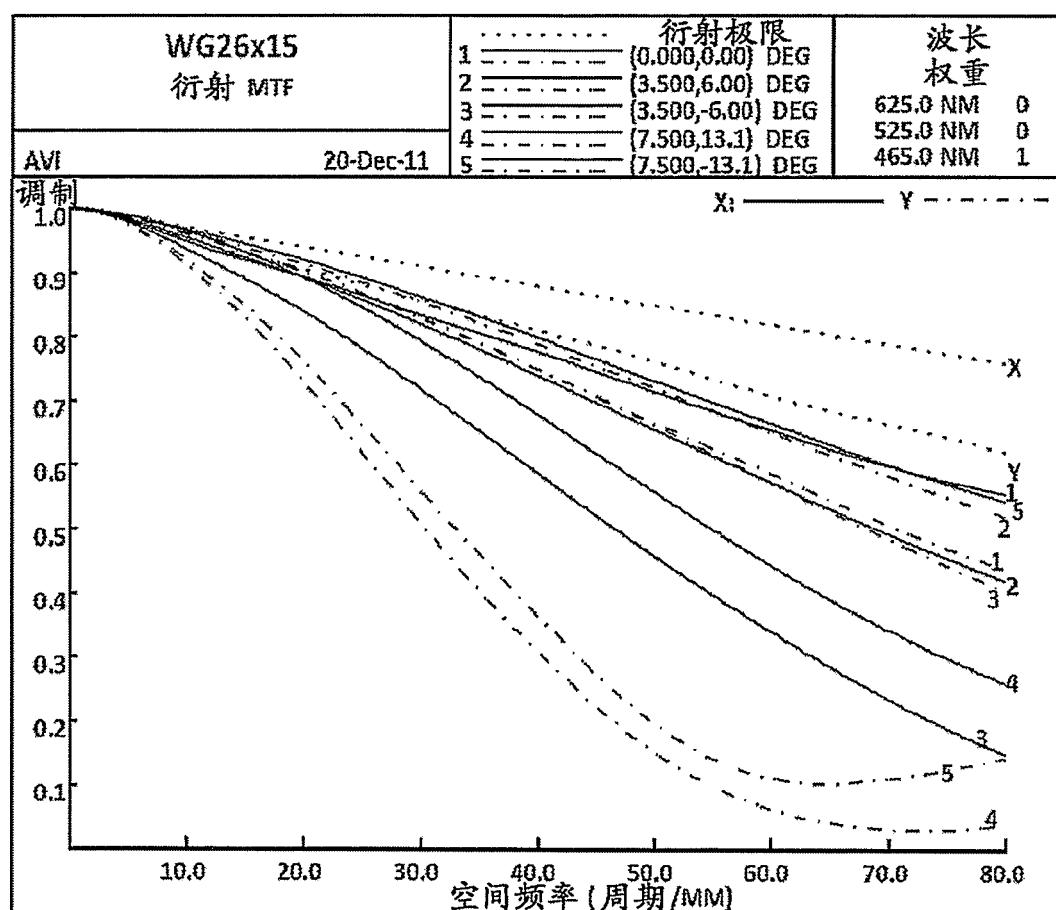


图18b

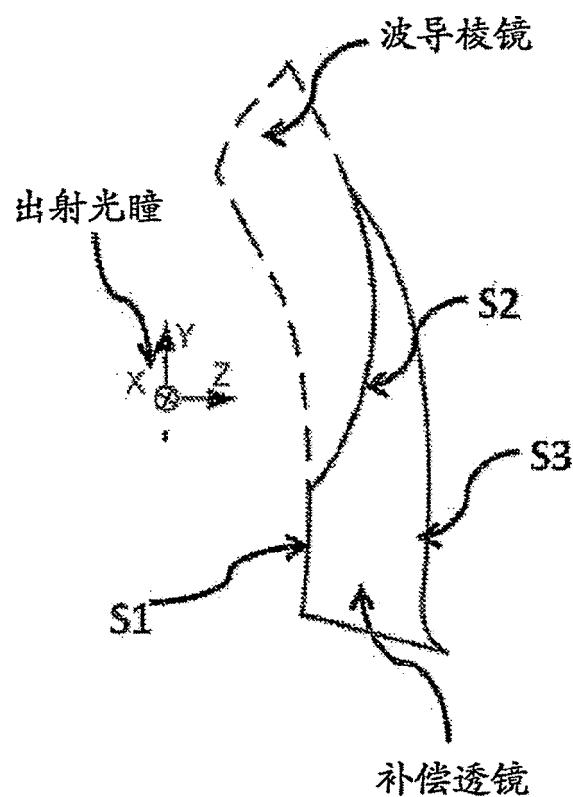


图19

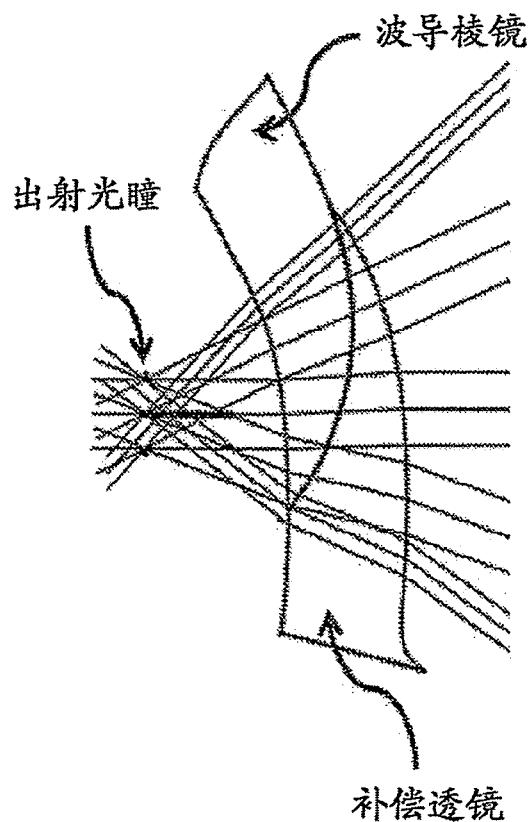


图20

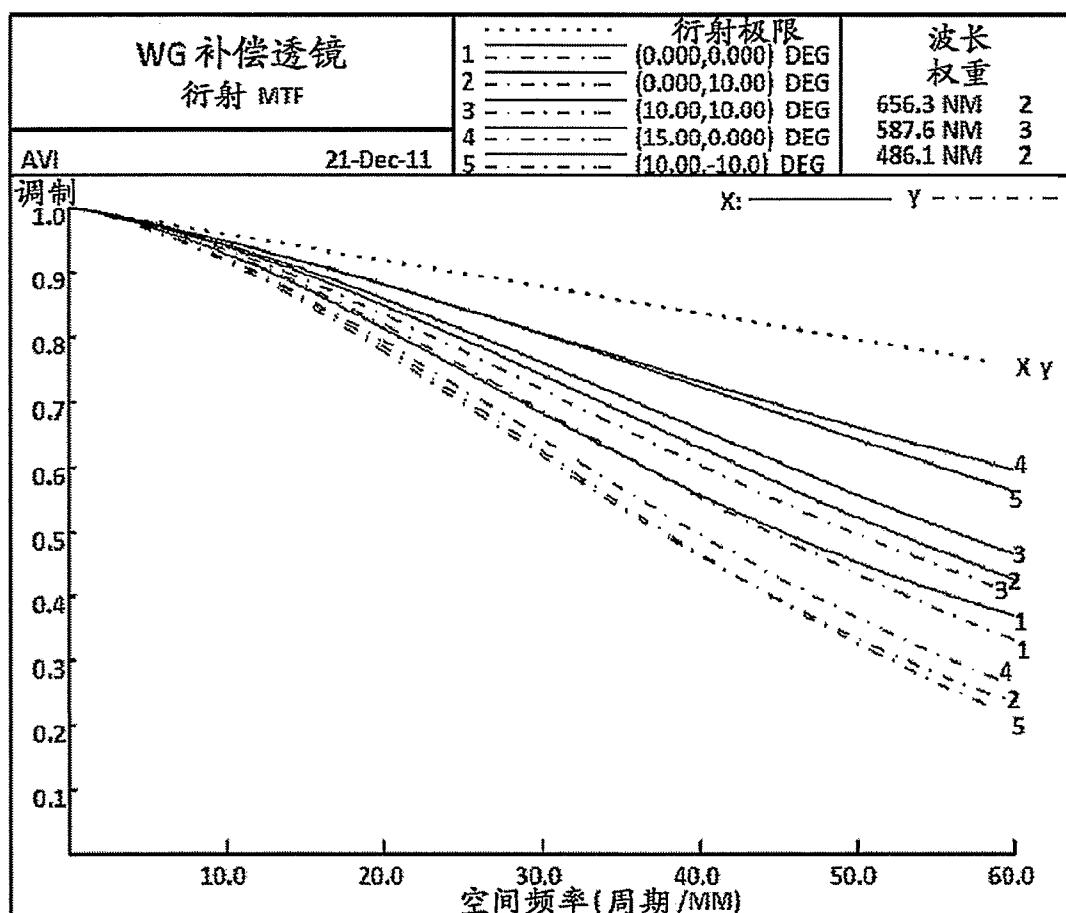


图21

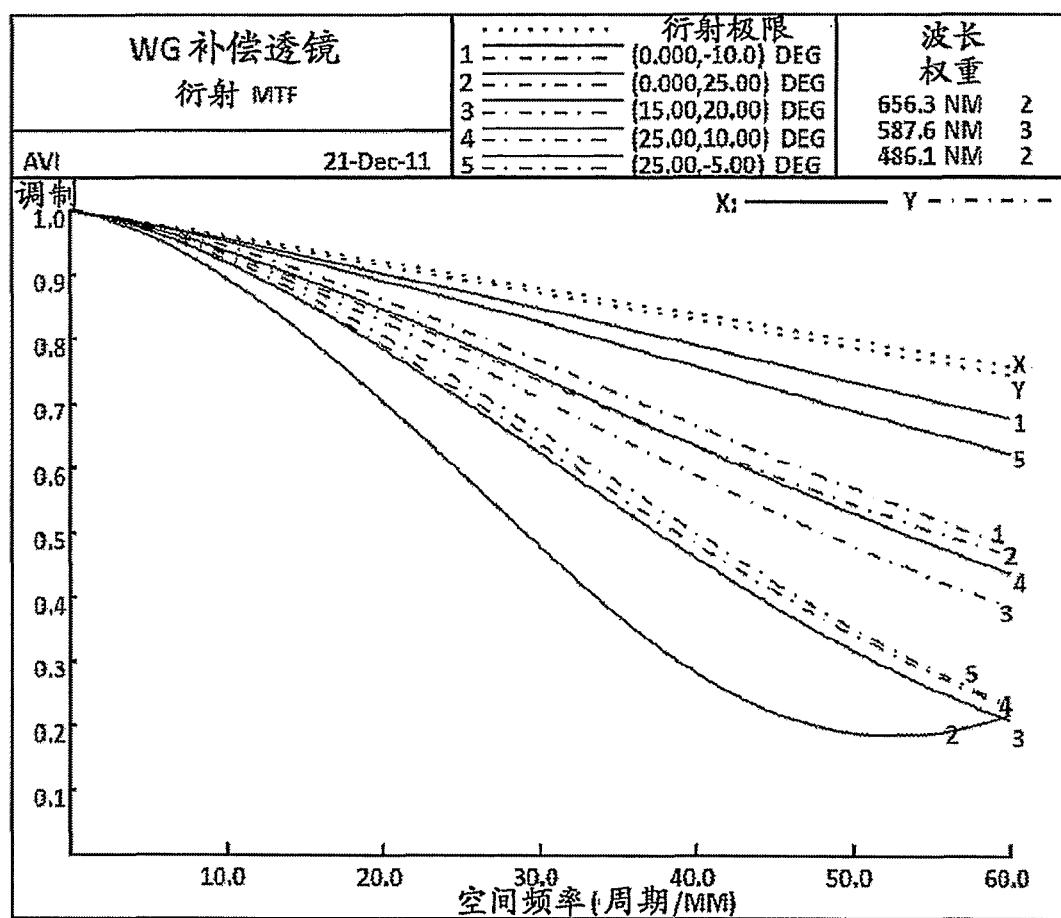


图21a

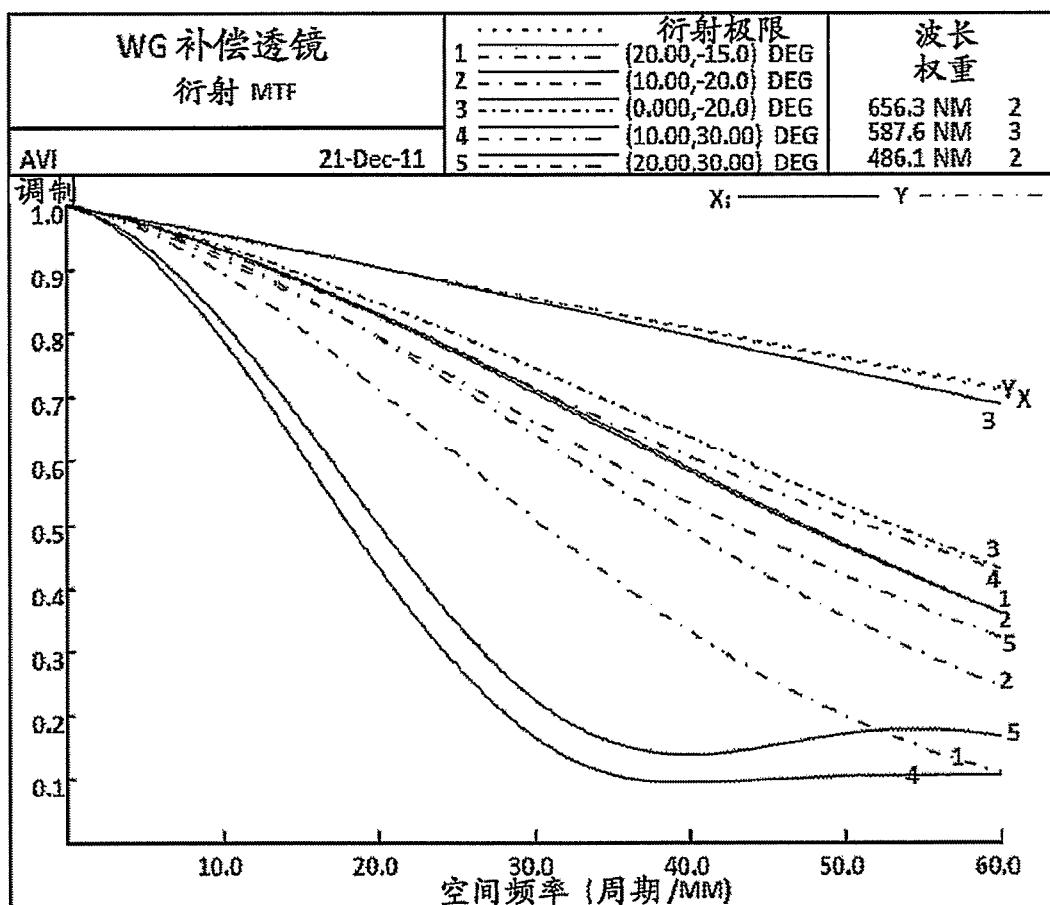


图21b

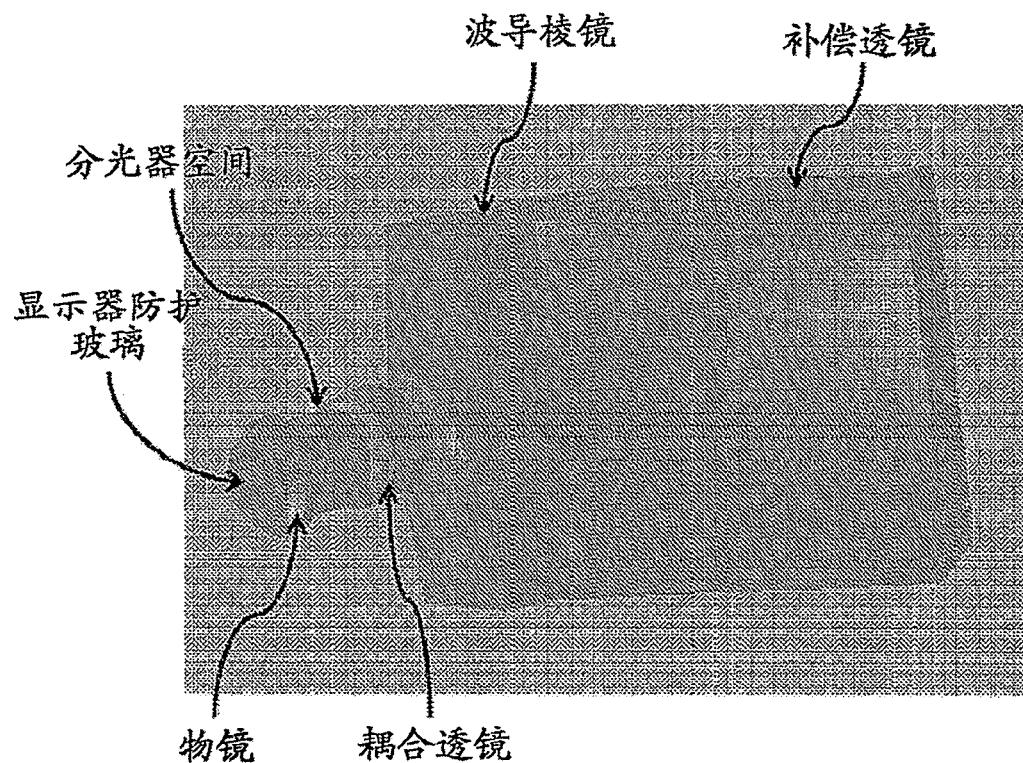


图22

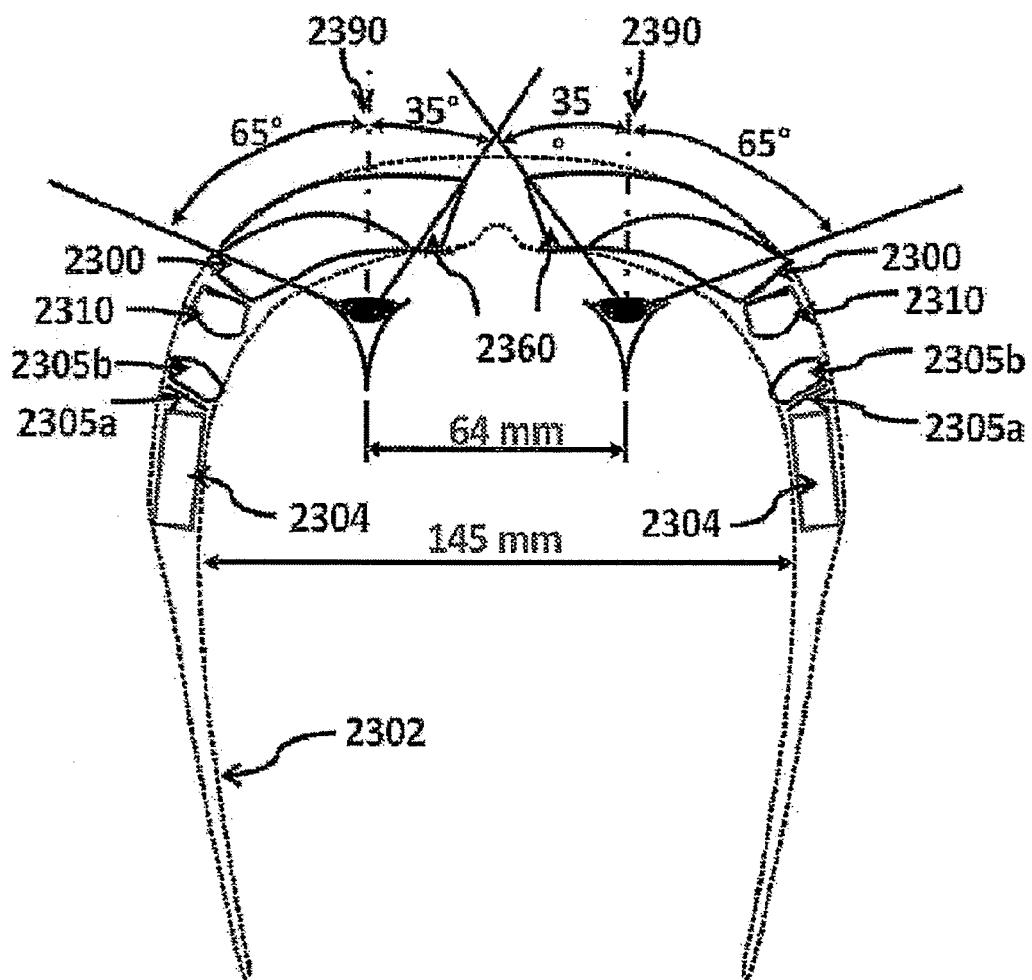


图23

表1：选定的自由形状表面的数学方程式

非球面 (ASP)
$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14} + Gh^{16} + Hh^{18} + Jh^{20}$ <p>其中: $h^2 = x^2 + y^2$ Z: 表面的平行于z轴的垂度 C: 表面的极点处的曲率 (CUY)</p>
变形的非球面 (AAS)
$z = \frac{CUXx^2 + CUYy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+KX)CUX^2x^2 - (1+KY)CUY^2y^2}} + AR\{(1-AP)x^2 + (1+AP)y^2\}^2 + BR\{(1-BP)x^2 + (1+BP)y^2\}^3 + CR\{(1-CP)x^2 + (1+CP)y^2\}^4 + DR\{(1-DP)x^2 + (1+DP)y^2\}^5$ <p>其中: Z: 表面的平行于z轴的垂度 CUX, CUY: 表面的极点处的曲率</p>
XY多项式 (XYP)
$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} C_j x^m y^n, \quad j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$ <p>其中: $r^2 = x^2 + y^2$ Z: 表面的平行于z轴的垂度 C: 表面的极点处的曲率</p>

图24

表2：图8所示的实施例5的波导棱镜的表面参数

表面 1 (S1)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-9.9070E-03	CUY	-1.1676E-02	KX	9.4314E+00	KY	3.1929E+00
AR	-1.8562E-22	BR	1.4920E-09	CR	-7.4501E-16	DR	-9.6512E-15
AP	2.3081E+08	BP	1.2807E+00	CP	-9.1631E+00	DP	8.1010E-02
表面 2 (S2)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-1.7817E-02	CUY	-3.6309E-02	KX	-9.5418E+00	KY	-2.7238E+00
AR	-4.2565E-06	BR	-5.5852E-09	CR	1.9081E-12	DR	-1.4883E-16
AP	-4.6626E-01	BP	5.7739E-01	CP	8.7723E-01	DP	1.2407E+00
表面 3 (S3)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-8.3678E-02	CUY	-6.7211E-02	KX	-9.0166E-01	KY	-8.6436E-01
AR	-8.6010E-12	BR	2.1446E-08	CR	-3.5831E-11	DR	2.1276E-14
AP	-1.4153E+03	BP	4.3066E-01	CP	7.2541E-02	DP	-8.8899E-02
表面 4 (S4)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-4.2336E-02	CUY	-4.6394E-02	KX	-3.0298E-01	KY	-4.5085E-01
AR	-2.5784E-05	BR	1.7678E-08	CR	4.0315E-11	DR	-8.5528E-14
AP	-4.8389E-01	BP	-3.4146E-01	CP	-1.5577E-01	DP	-2.7360E-01

图25

表3：图8所示的实施例5的耦合透镜和物镜的表面参数

耦合透镜： 表面 5 (S5)				表面类型		非球面	
CUY	-1.3459E-01	k	-6.9807E-01	A	-1.3616E-05	B	4.1042E-06
C	-1.2137E-07	D	7.7966E-10	E	0	F~J	0
耦合透镜： 表面 6 (S6)				表面类型		非球面	
CUY	3.1575E-02	k	7.8412E+00	A	-5.5351E-04	B	6.7729E-06
C	-1.7918E-07	D	2.0258E-09	E	0	F~J	0
物镜： 表面 9 (S9)				表面类型		非球面	
CUY	-9.3316E-02	k	3.1134E+00	A	3.6843E-04	B	7.3317E-05
C	-5.4836E-06	D	1.4474E-07	E	1.0195E-09	F~J	0
物镜： 表面 10 (S10)				表面类型		非球面	
CUY	-2.2371E+07	k	-9.9000E+01	A	7.7779E-03	B	-5.9340E-04
C	1.7957E-05	D	-1.2217E-07	E	-1.1803E-09	F~J	0

图26

表4：图8所示的实施例5中的光学表面的位置和方位参数

元件	材料	表面	参考	表面在其参考坐标系中的位置			方位 RX(度)
				X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	
全局坐标 (GC)							
波导棱镜	ZEONEX Z-E48R	S1	GC	0	-11.0363	19.6399	2.6869
		S2	GC	0	-8.2081	21.8522	-32.1373
		S3	GC	0	-12.2730	19.2367	-32.9064
		S4	GC	0	13.1282	21.5151	-19.2902
参考平面 1 (RP1)		GC	RP1	0	38.2880	3.2653	-11.1865
耦合透镜	ZEONEX Z-E48R	S5	RP1	0	0	0	0
		S6	RP1	0	0	-7.5003	0
参考平面 2 (RP2)		RP1	RP2	0	1.5125	-9.2347	14.4064
分光器	NSK5	S7	RP2	0	0	0	0
		S8	RP2	0	0	-6	0
物镜	丙烯酸	S9	RP2	0	0	-6.1001	0
		S10	RP2	0	0	-10.1373	0
显示面板	BK7	S11	RP2	0	0	-10.3079	0
		S12	RP2	0	0	-11.0079	0

注：表面的与Y和Z轴相关的方位为零度。

图27

表5：图9所示的实施例6的波导棱镜的表面参数

表面 1 (S1)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-1.7235E-02	CUY	-8.0522E-02	KX	-6.2043E+00	KY	-1.9292E+00
AR	1.6659E-10	BR	-1.9810E-08	CR	1.2890E-10	DR	-2.9913E-13
AP	4.7650E+01	BP	-3.6862E-01	CP	-4.0211E-01	DP	-4.7752E-01
表面 2 (S2)							
CUX	-2.2830E-02	CUY	-3.3747E-02	KX	1.0157E+00	KY	-9.8663E-01
AR	2.4850E-06	BR	-1.1543E-09	CR	1.2081E-13	DR	-2.7016E-17
AP	3.5728E-01	BP	4.5196E-01	CP	8.3224E-01	DP	5.4078E-01
表面 3 (S3)							
CUX	-4.4254E-02	CUY	-3.4563E-02	KX	-2.3146E-02	KY	2.8158E-01
AR	1.1073E-07	BR	2.5504E-08	CR	-5.9230E-11	DR	1.0021E-13
AP	3.8494E+00	BP	4.8881E-01	CP	4.1804E-01	DP	1.9104E-01
表面 4 (S4)							
CUX	-3.9787E-02	CUY	-2.5414E-02	KX	-4.7026E-01	KY	-3.3724E-01
AR	3.9861E-06	BR	-1.0080E-09	CR	9.5396E-14	DR	1.3866E-18
AP	5.0631E-01	BP	6.2702E-01	CP	7.5860E-01	DP	-2.6712E+00

图28

表6：图9所示的实施例6的耦合透镜和物镜的表面参数

耦合透镜 表面 5 (S5)				表面类型		非球面	
CUY	-5.1588E-02	k	2.3815E+00	A	1.6467E-04	B	-3.8234E-06
C	1.7640E-08	D	-3.8013E-10	E	0	F~J	0
耦合透镜 表面 6 (S6)				表面类型		非球面	
CUY	6.5629E-02	k	-1.7928E+00	A	-8.9627E-05	B	-9.4471E-06
C	3.2467E-07	D	-6.2628E-09	E	0	F~J	0
物镜 表面 9 (S9)				表面类型		非球面	
CUY	-1.3590E-01	k	-1.3642E+00	A	1.9923E-05	B	-8.5073E-05
C	3.8616E-06	D	-7.9752E-08	E	3.9093E-10	F~J	0
物镜 表面 10 (S10)				表面类型		非球面	
CUY	-4.4332E-02	k	5.1270E+00	A	8.0187E-04	B	-2.3761E-04
C	1.0417E-05	D	-3.8831E-08	E	-2.3806E-09	F~J	0

图29

表7：图9所示的实施例6中的光学表面的位置和方位参数

元件	材料	表面	参考	表面在其参考坐标系中的位置			方位
				X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	
全局坐标 (GC)							
波导棱镜	ZEONEX Z-E48R	S1	GC	0	-10.3905	16.8794	-28.3059
		S2	GC	0	-10.7798	17.8538	-40.091
		S3	GC	0	23.4106	15.9395	-21.0988
		S4	GC	0	-1.7474	21.053	-25.1808
参考平面 1 (RP1)				GC	42.9447	14.7784	9.5813
耦合透镜	ZEONEX Z-E48R	S5	RP1	0	0	0	0
		S6	RP1	0	0	-6.7170	0
参考平面 2 (RP2)				RP1	4.2011	-10.2692	-15.2180
分光器	NSK5	S7	RP2	0	0	0	0
		S8	RP2	0	0	-6	0
物镜	丙烯酸	S9	RP2	0	0	-6.1031	0
		S10	RP2	0	0	-8.8281	0
显示面板	BK7	S11	RP2	0	0	-10.3569	0
		S12	RP2	0	0	-11.057	0

注：表面的与Y和Z轴相关的方位为零度。

图30

表8：图10所示的实施例7的波导棱镜的表面参数

表面 1 (S1)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-1.9231E-02	CUY	-8.3075E-03	KX	-8.4219E+00	KY	-7.7451E-01
AR	-6.2368E-07	BR	-2.4549E-10	CR	-1.7581E-14	DR	1.7890E-16
AP	-2.4470E+00	BP	1.0571E+00	CP	-4.3114E+00	DP	6.6528E-01
表面 2 (S2)				表面类型		变形的非球面	
CUX	-2.9836E-02	CUY	-3.7501E-02	KX	-3.0500E+00	KY	-4.0091E+00
AR	-7.3779E-06	BR	-4.5899E-09	CR	1.1266E-11	DR	-3.7653E-15
AP	2.7532E-01	BP	-6.8098E-01	CP	-1.7624E-01	DP	1.8127E-01
表面 3 (S3)				表面类型		变形的非球面	
CUX	9.0273E-02	CUY	6.9550E-02	KX	-2.0357E+00	KY	-8.0971E+00
AR	3.4993E-05	BR	-5.0062E-09	CR	1.0413E-13	DR	-6.0904E-11
AP	-2.2294E-01	BP	2.5605E+00	CP	-9.8314E+00	DP	-3.3273E-01

图31

表9：图10所示的实施例7的耦合透镜和物镜的表面参数

耦合透镜：表面 4 (S4)				表面类型		非球面	
CUY	-4.4599E-02	k	-5.7676E+00	A	2.6802E-04	B	1.1219E-05
C	-3.5542E-07	D	1.3081E-08	E	-1.9737E-12	F~J	0
耦合透镜：表面 5 (S5)				表面类型		非球面	
CUY	1.2479E-01	k	-7.7195E-01	A	-1.7126E-04	B	1.4278E-05
C	-3.3152E-07	D	4.4825E-09	E	-2.0769E-11	F~J	0
耦合透镜：表面 5 (S5)				表面类型		DOE 相位多项式	
阶数	-1	波长	525	C1	1.6365E-03	C2	8.4113E-05
C3	-6.1888E-06	C4	1.9873E-07	C5	-2.8832E-09	C6	1.5415E-11
物镜：表面 6 (S6)				表面类型		非球面	
CUY	-7.4721E-02	k	-5.9647E+00	A	-8.5364E-04	B	9.8825E-06
C	-1.8165E-07	D	2.3531E-09	E	1.0278E-10	F~J	0
物镜：表面 7 (S7)				表面类型		非球面	
CUY	4.7980E-03	k	-1.5000E+01	A	-4.6428E-03	B	3.1397E-04
C	-5.8421E-06	D	2.2878E-08	E	2.3586E-10	F~J	0

注：

- 表中未列出的更高阶衍射系数均为零。
- 耦合透镜的表面5上的DOE是旋转对称的显像形式。
相位分布（以弧度表示）通过 $\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sum C_n r^{2n}$ 给出

图32

表10：图10所示的实施例7中的光学表面的位置和方位参数

元件	材料	表面	参考	表面在其参考坐标系中的位置			方位 RX(度)
				X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	
全局坐标 (GC)							
出射光瞳	ZEONEX Z-E48R	S1	GC	0	-14.1691	18.4553	-1.6149
		S2	GC	0	-13.7000	15.7808	-49.7837
		S3	GC	0	30.6505	8.2168	-28.1851
参考平面 1 (RP1)			GC	0	34.1937	7.7324	-15.7133
耦合透镜	ZEONEX Z-E48R	S4	RP1	0	0	0	0
		S5	RP1	0	0	-8.8871	0
参考平面 2 (RP2)			RP1	0	-0.099	-10.2542	-15
物镜	丙烯酸	S6	RP2	0	0	-6.3901	0
		S7	RP2	0	0	-12.8901	0
显示面板	Eagle2K	S8	RP2	0	0	-13.6564	0
		S9	RP2	0	0	-14.3564	0

注：表面的与Y和Z轴相关的方位为零度。

图33

表11：图10所示的实施例7的补偿透镜的表面参数

表面 1 (S1)			表面类型		变形的非球面	
CUX	-1.9231E-02	CUY	-8.3075E-03	KX	-8.4219E+00	KY -7.7451E-01
AR	-6.2368E-07	BR	-2.4549E-10	CR	-1.7581E-14	DR 1.7890E-16
AP	-2.4470E+00	BP	1.0571E+00	CP	-4.3114E+00	DP 6.6528E-01
表面 2 (S2)						
CUX	-2.9836E-02	CUY	-3.7501E-02	KX	-3.0500E+00	KY -4.0091E+00
AR	-7.3779E-06	BR	-4.5899E-09	CR	1.1266E-11	DR -3.7653E-15
AP	2.7532E-01	BP	-6.8098E-01	CP	-1.7624E-01	DP 1.8127E-01
表面 3 (S3)						
表面类型 XY 多项式						
CUY	0.0000E+00	k	0.0000E+00	C ₃	-1.2817E-02	C ₄ -6.5766E-03
C ₆	-6.6877E-03	C ₈	1.7801E-04	C ₁₀	-1.1495E-04	C ₁₁ -6.6095E-07
C ₁₃	3.2342E-06	C ₁₅	-5.0261E-06	C ₁₇	-7.2570E-08	C ₁₉ 2.5353E-07
C ₂₁	-9.0306E-08	C ₂₂	-7.3099E-09	C ₂₄	-8.6631E-09	C ₂₆ 2.0620E-08
C ₂₈	9.8628E-09	C ₃₀	1.2596E-10	C ₃₂	-5.6559E-10	C ₃₄ -5.2907E-11
C ₃₆	2.5383E-10	C ₃₇	1.7033E-11	C ₃₉	3.6988E-11	C ₄₁ 1.4774E-11
C ₄₃	-4.2625E-11	C ₄₅	-1.6603E-11	C ₄₇	-1.3883E-13	C ₄₉ 9.0662E-14
C ₅₁	4.5540E-13	C ₅₃	2.9772E-13	C ₅₅	-2.2173E-13	C ₅₆ -1.4173E-14
C ₅₈	-3.9507E-14	C ₆₀	-4.1590E-14	C ₆₂	-4.1883E-15	C ₆₄ 5.3842E-14
C ₆₆	1.1332E-14	其它	0.0000E+00			

图34

表12：图10所示的实施例7的补偿透镜的位置和方位参数

元件	材料	表面	参考	表面在其参考坐标系中的位置			方位 RX(度)
				X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	
全局坐标 (GC)							
补偿透镜	Z-E48R	S1	GC	0	-14.1691	18.4553	-1.6149
		S2	GC	0	-13.7000	15.8808	-49.7837
		S3	GC	0	1.7401	32.9890	6.5893

注：表面的与Y和Z轴相关的方位为零度。

图35