

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103207454 A

(43) 申请公布日 2013.07.17

(21) 申请号 201210344356.8

(22) 申请日 2012.09.17

(71) 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街 5  
号

(72) 发明人 王涌天 王庆丰 程德文

(51) Int. Cl.

G02B 27/01(2006.01)

G02B 27/00(2006.01)

G02B 17/08(2006.01)

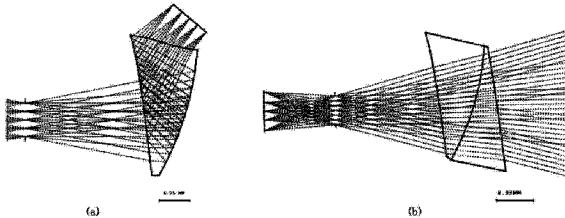
权利要求书1页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

具有扩展边缘的双视场自由曲面棱镜头盔显示器用光学系统

(57) 摘要

利用光学自由曲面，设计了包含自由曲面棱镜和自由曲面透镜的光学系统，结合微型显示器，构成头盔显示器用光学系统。通过自由曲面透镜和微型显示器实现用于虚拟现实的光学头盔显示器，通过自由曲面棱镜和自由曲面透镜实现用于增强现实光学头盔显示器。在设计过程中，采用扩展边缘的新颖结构，使光学元件的实际尺寸大于设计尺寸；同时结合人眼的生理特征，对投影系统和透镜系统分别采用了不同的视场角，并且使投影系统的视场角小于或等于透镜系统的视场角，从而增加了头盔显示器的使用舒适度。最后，根据工程需求，将两光学元件的底部面设计在一个平面内，同时设计了卡槽，两者相互结合，保证镀膜和胶合工艺的高精度要求。



1. 一种自由曲面棱镜式头盔显示器用光学系统,其特征在于其结构由自由曲面棱镜、自由曲面透镜和微显示器组成,微型显示器和自由曲面棱镜组成虚拟现实用投影光学系统,自由曲面棱镜和自由曲面透镜组成增强现实用透视光学系统。
2. 如权利要求 1 所述的头盔显示器用光学系统,其特征在于投影系统和透视系统各自采用不同的视场角设计,且投影光学系统的视场角小于或等于透视光学系统的视场角。
3. 如权利要求 1 所述的头盔显示器用光学系统,其特征在于自由曲面棱镜和自由曲面透镜的实际尺寸大于有效工作区域。
4. 如权利要求 1 所述的头盔显示器用光学系统,其特征在于自由曲面棱镜和自由曲面透镜的底部表面在同一平面内。
5. 如权利要求 1 所述的自由曲面棱镜,其特征在于由三个自由曲面组成,表面 1 为具有负光焦度凸面形透射面,,表面 2 为具有负光焦度凹面形反射面,,表面 3 为具有负光焦度的凹面形透射面。
6. 如权利要求 1 所述的自由曲面棱镜,其特征在于表面 2 可以镀全反射膜层,用于虚拟现实,也可以镀半反半透膜层,用于增强现实。
7. 如权利要求 5 所述的自由曲面棱镜的表面 1,其特征在于其球面 / 圆锥面基底的曲率半径在子午方向和弧矢方向的曲率(弧矢方向 Rx 和子午方向的曲率半径 Ry) 满足  $|Rx/Ry| < 0.8$ 。
8. 如权利要求 5 所述的自由曲面棱镜的所有光学表面,其特征在于局部曲率半径在子午方向和弧矢方向的曲率(弧矢方向的局部曲率半径 LRx 和子午方向的局部曲率半径 LRy) 满足条件  $|LRx/LRy| < 18$ 。

# 具有扩展边缘的双视场自由曲面棱镜头盔显示器用光学系统

## 技术领域

[0001] 本发明为一种应用于虚拟现实(Virtual Reality, 简称 VR) 和增强现实(Augmented Reality, 简称 AR)领域的新型自由曲面棱镜式头盔显示器光学系统, 采用扩展边缘的结构设计和双视场角的设计方法, 可以提高系统加工装调的简便性, 提高头盔显示器用户的使用舒适度和现场沉浸感。

## 背景技术

[0002] 自 1968 年美国犹他大学的 Ivan Sutherlands 教授提出头盔显示器的概念以来, 随着机械、电子, 光学技术的发展, 光学头盔显示器相关技术得到了飞速的发展。光学透过式头盔显示器作为虚拟现实、增强现实的重要组成部分, 在可视化医疗手术、可视化工程处理、军事训练、飞行模拟、单兵作战、三维娱乐和工业培训等方面有广泛的应用前景, 涉及到的领域从民用到军用、从娱乐到工业等社会生活的方方面面。

[0003] 在头盔显示器的设计中, 一个特别关键的技术指标是系统的轻量化和便携性。设计一个大视场、大相对孔径的紧凑型光学投射式光学系统面临诸多的挑战, 许多方法被提出用来达到上面的要求。常规的头盔显示器采用折射、反射, 并结合离轴和偏心等方法, 实现特定形式的头盔显示器。此类头盔显示器目前可以将视场角做到很大, 比如 ORA 公司设计 Zogo 生产的 L-3/Link 头盔显示器, 视场角可以达到 105 度。常规头盔显示器一个普遍的缺点是体积比较笨重, 目前多应用在军事和实验室内。除常规光路以外, 为提高轻便性和缩小体积, 特别是为达到面向大众娱乐的商业价值, 新颖的光学系统被采用。

[0004] 光学自由曲面棱镜是一种非常有前途的便携式头盔显示器用新型光学系统结构。自 1995 年 Morishima 首次提出自由曲面棱镜的设计概念以来, 研究人员对采用自由曲面棱镜的头盔显示器进行了众多的设计研究。自由曲面棱镜对光轴进行折叠, 并利用自由曲面降低由于光路离轴所带来的大像差, 尤其是自由曲面棱镜采用单个元件实现了传统多片透镜才能实现的光学质量, 具有非常紧凑的结构和良好的光学质量, 在入射角度和波长使用上没有太多限制, 对于彩色比较容易实现。综上所述, 自由曲面棱镜在头盔显示器的轻量化、小型化和全彩色方面有较明显的优势。

[0005] 国际上奥林巴斯、Emagin、Daeyang 等都有相应的自由曲面棱镜的产品。1996 年 Hoshi 等设计出一款视场角 34 度, 厚度 15mm 的自由曲面棱镜; 1999 年 Yamazaki 设计了一个  $51^\circ \times 37^\circ$  视场角的自由曲面棱镜。Cheng 设计的自由曲面棱镜视场角可以达到对角线  $60^\circ$ 、出瞳距 20、瞳孔直径 8mm, 且只采用单片自由曲面棱镜。2010 年 Cheng 基于拼接思想提出大视场自由曲面棱镜设计方法, 解决了单片式自由曲面棱镜在扩大视场问题上所遇到的困难。2012 年提出多焦面拼接式自由曲面棱镜设计方法, 可以更真实的模拟人眼观察的真实场景, 提供舒适真实虚拟或增强场景。

[0006] 当前制约自由曲面光学的主要问题是加工、检测和制造工艺上的问题, 随着面型表述方法的研究进展以及金刚石切削和注塑成型加工工艺等方面的进展, 使得自由曲面棱

镜的高精度加工成为可能,其中利用注塑工艺制造自由曲面棱镜,批量生产可以大大降低成本,具有非常高的性价比。

[0007] 自由曲面光学由于增加了更多的自由度,在进行光学设计时可以更好的控制像差并得到更好的像质,同时可以减轻重量缩小体积。自由曲面头盔显示器的目视光学系统在重量、体积方面可以做到很小,达到眼睛式头盔显示的要求。

[0008] 在自由曲面棱镜的设计中,因为人眼本身的复杂性和个体性决定了其设计难度。目前较为困难的限制条件有:双目瞳孔间距、出瞳直径、出瞳距。不同的种群、不同性别、不同年龄的人具有不同的双目瞳孔间距,如何使设计结果满足不同需求,是一个非常具有挑战性的技术难题;尽可能大的出瞳直径和可变化的双目瞳孔间距可以满足不同人群的使用要求。

[0009] 因为头盔显示系统中人眼作为接收系统,所以在进行自由曲面棱镜设计的时候就必须考虑人眼的生理特性。首要考虑的是相对于头部位置的全视场和由生理构造所决定的眼睛的可观测视场,其中包括人眼分辨率最高的 12 度视场角,在这个范围内只需要转动眼球而无需扭动头部。工程心理学研究结果指出,在眼球不动时,认符号的视力范围为 5 度到 30 度;认字视力为 5 度到 10 度,片刻视力范围为 3 度到 18 度,片刻视力指对象呈示时间为 0.2 秒时能正确认识和判读显示对象的视力。

[0010] 基于上述的人眼生理特征,对自由曲面棱镜采用了全新的设计理念。光学透过式头盔显示器在使用过程中,用户观察投影图像时眼睛是处于凝视状态并目视前方,而在观察周围的真实环境则是通过眼球的转动配合头部或身躯的转动来实现。这种情况表明,在系统进行自由曲面棱镜设计的考虑中,对于投影光学系统不需要采用和透射系统相同的视场角,只须满足 20 度到 32 度视场角即可;对透视光学系统,考虑到眼球转动,可以采用较大的视场角,增加人眼在观察外界环境时的舒适性。

## 发明内容

[0011] 本发明的内容是结合人眼的生理特征,考虑工程中的技术要求,提出的一种新颖的自由曲面棱镜式头盔显示器用光学系统结构。该结构由自由曲面棱镜、自由曲面透镜和微显示器组成。其中自由曲面棱镜和微显示器组成投影光学系统,可以应用于虚拟现实技术中;自由曲面棱镜和自由曲面透镜组成透视光学系统,可以应用于增强现实技术中。

[0012] 自由曲面棱镜由三个自由曲面组成,下面结合附图对本发明所给出的自由曲面棱镜头盔显示光学系统对微型显示器 (Image) 成像的内部通道与观察外部世界的外部通道的光路进行详细描述说明。

[0013] 本发明头盔光学系统若用于虚拟现实,则只需要自由曲面棱镜即可,实际光路是微型液晶显示器件 (Image) 发出光线,先经过光学表面 S3 透射进入自由曲面棱镜,然后在表面 S1 上发生全反射,经过表面 S2 反射,最后再次经过表面 S1 透射至入瞳处。但由于本发明采用反向光路设计方式,因此反向描述光路,光线从入瞳处出发,通过自由曲面棱镜光学表面 S1 透射,经由光学表面 S2 反射,在反射到光学表面 S1 上,并在该表面发生全反射,最后经由光学表面 S3 透射出并最终到达微型显示器 5,此光路即为用于虚拟现实的光路。附图 1 中各元件按从左到右的方向标号。

[0014] 若用于增强现实,则需要自由曲面棱镜和自由曲面透镜,实际光路如附图 2 所示。

一路光束由微型显示器 (Image) 发出, 经过自由曲面棱镜的光学表面 S3 透射, 在光学表面 S1 上全反射到凹反射面 S2 上, 经反射面 S2 反射后透过光学表面 S1 进入观察者的瞳孔, 即入瞳处; 一路光束由外部环境提供, 从光学透镜的表面 S4 入射, 光学表面 S2 采用半反半透式结构, 光线入射到光学表面 3 时部分光线会直接损失, 光学能量损失  $1/2$ , 内部通道部分光线经过光学表面 S2 和 S1 透射进入观察者的瞳孔。

[0015] (1) 结合人眼生理特征的双视场设计

[0016] 因为头盔显示系统中人眼作为接收系统, 所以在进行自由曲面棱镜设计的时候就必须考虑人眼的生理特性。首要考虑的是相对于头部位置的全视场和由生理构造所决定的眼睛的可观测视场, 其中包括人眼分辨率最高的 12 度视场角, 在这个范围内只需要转动眼球而无需扭动头部。工程心理学研究结果指出, 在眼球不动时, 认符号的视力范围为 5 度到 30 度; 认字视力为 5 度到 10 度, 片刻视力范围为 3 度到 18 度, 片刻视力指对象呈示时间为 0.2 秒时能正确认识和判读显示对象的视力。

[0017] 基于上述的人眼生理特征, 对自由曲面棱镜采用了全新的设计理念。光学透式头盔显示器在使用过程中, 用户观察投影图像时眼睛是处于凝视状态并目视前方, 而在观察周围的真实环境则是通过眼球的转动配合头部或身躯的转动来实现。这种情况表明, 在系统进行自由曲面棱镜设计的考虑中, 对于投影光学系统不需要采用和透射系统相同的视场角, 只须满足 20 度到 32 度视场角即可; 对透视光学系统, 考虑到眼球转动, 可以采用较大的视场角, 增大人眼在观察外界环境时的舒适性。

[0018] (2) 考虑工程需求的扩展边缘设计

[0019] 模具的设计是注塑加工的一个关键环节, 也是关系到光学元件后续的胶合、镀膜等工艺的一个环节。合适的模具设计可以在保证光学元件的成像质量的同时给后续的光学处理带来方便。注塑加工中另一个重要的环节是尽量减小应力对注塑加工材料均匀性的影响。为达到此目的, 一方面尽可能的减少应力的存在, 另一方面采用合理的结构设计将应力转移到光学元件不使用或很少使用的区域也是一个重要且可行的方法。

[0020] 在进行自由曲面模具的设计中, 为解决上述两个问题, 采取了必要的措施和设计方法。为保证在注塑的过程中可以保证人眼普通区的材料性能一致性, 在进行模具设计时对投影系统进行了边缘扩充设计。通过这样的设计将应力尽可能的放在在扩展的边缘部分, 使常用光路部分可以达到光学材料的一致性, 消除应力引起的材料不均匀等现象。同时方便人眼对外界的观察, 增加观察舒适度。

[0021] 在扩展的边缘部分, 设计了胶合操作时使用的卡合槽, 保证在胶合过程中两片镜片的对位正确; 同时设计了组装时的安装手柄。

[0022] 模具和卡合槽、安装手柄等如附图 3 所示。

[0023] (3) 局部曲率的控制

[0024] 采用扩展边缘的设计后, 扩展边缘的光学表面必须加以控制。因为自由曲面的面形变化非常迅速, 位置的很小差别带来的可能是矢高特别明显的变化。自由曲面头盔显示器中, 光学视场内的自由曲面由于有采样视场的控制, 自由曲面的面形变化一般都是连续的, 但是扩展边缘部分的光学表面则没有相应的控制条件, 很容易会引起表面的剧烈变化。

[0025] 另一方面, 扩展边缘的光学表面和光学视场内光学表面必须是连续平滑的变化形态。否则在使用者佩戴头盔显示器进行外部环境的观察时, 会特别明显的感觉到景物的不

连续变化，导致种种不舒服的感觉产生。

[0026] 最后，整个表面的连续变化会增加光学系统的美观，使大众对头盔显示器的审美要求得到满足。

[0027] 综上所述，在自由曲面棱镜设计优化的过程中，也要将扩展表面的面型控制条件加入到控制条件中，保证自由曲面棱镜的视场内外的光学表面是平滑连续的变化。

[0028] 扩展边缘的面形控制可以采用两种方法，一种是控制局部面形的梯度变化，另一种是控制局部面形的局部曲率。

[0029] 计算中的局部曲率如附图 4 所示。

## 附图说明

[0030] 附图 1 发明中用于 VR 的头盔显示器的投影光学系统光路结构图。

[0031] 附图 2 发明中用于 AR 的头盔显示器的透视光学系统光学结构图。

[0032] 附图 3 发明中的扩展边缘的设计结构图。

[0033] 附图 4 局部曲率计算图。

[0034] 附图 5 设计实例的光学系统的光路结构图。

[0035] 附图 6 发明所给出实施例子中光学系统的 MTF 曲线，中心视场传递函数值在 30lp/mm 处大于 0.3，边缘

[0036] 视场在 30lp/mm 处大于 0.1。

[0037] 附图 7 发明所给出实施例子中光学系统的畸变图。

[0038] 附图 8 加工出的自由曲面棱镜和自由曲面透镜。

[0039] 附图 9 实施实例系统加工原型的成像图。

## 系统实例描述

[0041] 按照本专利所提出的设计方法，设计了一款用于头盔显示器的光学系统，光路结构如附图 5 所示，其中投影系统视场角为 36°，透视系统视场角为 50°。附图 6 给出系统的 MTF 值，投影系统地 MTF 只大部分都保证在 0.2 以上，透视系统地 MTF 在 0.4 以上。光学系统地畸变得到了较好的校正，如附图 7 所示。采用边缘扩展设计，通过局部曲率的控制，保证了扩展部分表面和视场中表面为连续变化。最后利用注塑加工的方法制造出一套光学自由曲面棱镜和光学自由曲面透镜，如附图 8 所示。附图 9 给出成像实现结果，实验证明所设计的光学系统像质良好。

[0042] 表 1 为本发明实例虚拟现实部分头盔显示器光学系统的数据表，该实例的出瞳直径为 8mm，出瞳距离 >18mm，焦距 15mm，全视场角为 36°，像面大小 0.61 英寸，表 2 为本发明实例增强现实部分透射式头盔显示器光学系统的数据表，全视场角 50°，其内部通道图像显示光路与实例 1 一致，其外部通道场景视场与内部通道视场一致，额外叠加了一块自由曲面棱镜，光学表面 3 采用半反半透结构。

[0043] 表 1 投影光学系统数据表

[0044]

表面 序号	曲率半径 表面间隔	折射率 偏心 (mm)	阿贝数 $\alpha$ 倾斜角度 (°)
1	$\infty$ (出瞳)		
2	Ry -195.00	1.492	57.5
AAS	Rx -250.00	Y: -5.69	0: 19.62
	Ky 1.33	Z: 2.30	
	Kx 23.21		
	AR -8.6351E-06		
	BR 2.4938E-08		
	CR -1.4410E-11		
	DR -6.6391E-15		
	AP -6.1250E-01		
	BP -5.0860E-01		
	CP -3.9340E-01		
	DP -4.5770E-01		
3	R -59.5035	1.492	57.5
XYP	K 1.300E+00	Y: 22.79	0: -3.58
	C4 2.4700E-04	Z: 5.77	
	C6 6.9000E-04		
	C8 -3.4076E-06		

[0045]

C10	4.2496E-05		
C11	-4.6244E-06		
C13	1.9899E-07		
C15	8.8925E-07		
C17	3.8619E-07		
C19	-2.5741E-007		
C21	9.4476E-008		
C22	5.0997e-008		
C24	-2.8935E-008		
C26	-3.4536E-008		
C28	1.6264E-008		
C30	-1.5426E-009		
C32	-5.2355E-010		
C34	1.4665E-009		
C36	2.0242E-010		
C37	5.7086E-013		
C39	9.7373E-011		
C41	1.0621E-010		
C43	2.3455E-010		
C45	-1.0179E-010		
C47	3.0396E-012		
C49	5.0459E-012		
C51	1.6271E-012		
C53	8.2685E-012		
C55	-4.6507E-012		
4	R -258.0000	Y:17.53	θ:3.05
XYP	k 0	Z:29.35	
	C4 3.2888E-03		
	C6 4.6446E-03		
	C8 -4.2342E-04		
	C10 -2.8858E-04		
	C11 2.1058E-05		
	C13 11.1448E-04		
	C15 5.0072E-06		
	C17 1.0250E-05		
	C19 6.0491E-06		
	C21 1.0618E-06		
	C22 5.2541E-07		
	C24 11.2107E-06		
	C26 -6.4616E-08		
	C28 -6.7298E-07		
	C30 -2.2303E-08		
	C32 -52.4025E-08		
	C34 -21.6338E-10		
	C36 -1.4715E-07		
	C37 -4.6307E-09		
	C39 -2.7839E-08		
	C41 6.1680E-09		
	C43 -1.3799E-08		
	C45 7.8020E-09		
	C47 -1.8777E-10		
	C49 12.2562E-09		
	C51 -2.0649E-09		
	C53 -21.2821E-09		
	C55 12.8751E-09		
Image	∞	Y:22.26 Z:35.19	θ:56.41

[0046] 表 2 透視光学系统数据表

[0047]

表面 序号	曲率半径 表面间隔	折射率 偏心 (mm)	阿贝数 $\alpha$ 倾斜角度 (°)
1	$\infty$ (出瞳)		
2	Ry -195.00	1.492	57.5
AAS	Rx -250.00	Y: -5.69	0: 19.62
	Ky 1.33	Z: 2.30	
	Kx 23.21		
	AR -8.6351E-06		
	BR 2.4938E-08		
	CR -1.4410E-11		
	DR -6.6391E-15		
	AP -6.1250E-01		
	BP -5.0860E-01		
	CP -3.9340E-01		
	DP -4.5770E-01		
3	R -2.439E+01	1.492	57.5
XYP	K 1.300E+00	Y: 22.79	0: -3.58
	C4 2.4700E-04	Z: 5.77	
	C6 6.9000E-04		
	C8 -3.4076E-06		
	C10 4.2496E-05		
	C11 -4.6244E-06		
	C13 1.9899E-07		
	C15 8.8925E-07		
	C17 3.8619E-07		
	C19 -2.5741E-007		
	C21 9.4476E-008		
	C22 5.0997E-008		
	C24 -2.8935E-008		
	C26 -3.4536E-008		
	C28 1.6264E-008		
	C30 -1.5426E-009		
	C32 -5.2355E-010		
	C34 1.4665E-009		
	C36 2.0242E-010		
	C37 5.7086E-013		
	C39 9.7373E-011		
	C41 1.0621E-010		
	C43 2.3455E-010		
	C45 -1.0179E-010		
	C47 3.0396E-012		
	C49 5.0459E-012		
	C51 1.6271E-012		
	C53 8.2685E-012		
	C55 -4.6507E-012		
4	R -2.5185E+02	1.492	57.5
XYP	K 0.000E+00	Y: 10.00	0: 53.76
	C4 -6.5706E-04	Z: 1.72	
	C6 1.1973E-04		
	C8 -3.8215E-05		
	C10 6.5022E-06		
	C11 -2.3333E-06		
	C13 5.4376E-06		
	C15 -5.1382E-07		
	C17 6.6349E-07		
	C19 -4.6234E-08		

[0048]

---

C21	-1.6178E-08
C22	4.7715E-08
C24	-5.7000E-09
C26	5.9093E-10
C28	2.6626E-09
C30	-2.8465E-11
C32	5.1721E-10
C34	8.4032E-12
C36	-2.8650E-11
C37	-3.3234E-13
C39	3.9240E-13
C41	-2.5819E-12
C43	-5.5772E-12
C45	1.2003E-12
C47	-1.0857E-13
C49	2.7605E-13
C51	1.4333E-12
C53	3.2116E-12
C55	-2.0027E-13
C56	1.0748E-15
C58	-3.2119E-14
C60	3.1927E-14
C62	-4.5094E-14
C64	-5.8733E-14
C66	4.2562E-15

---

[0049] 以上显示和描述了本发明的基本原理和主要的特征以及本发明的优点。本行业的技术人员应该了解，本发明不受上述实施实例的限制，上述实施实例和说明书中描述的只是说明本发明的原理，在不脱离本发明的精神和范围的前提下，本发明还会有各种变化和改进，这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内，本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

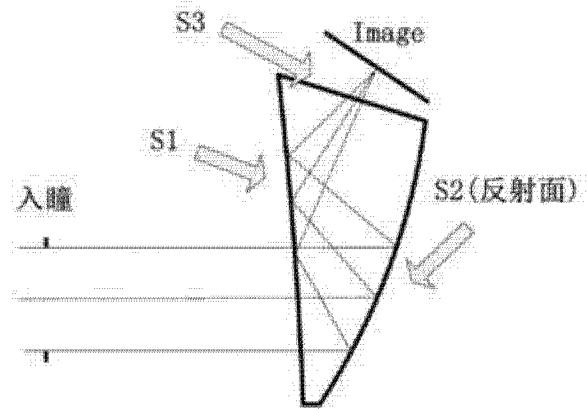


图 1

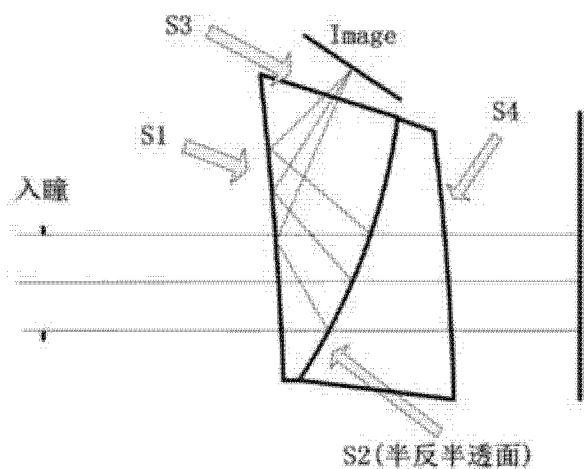


图 2

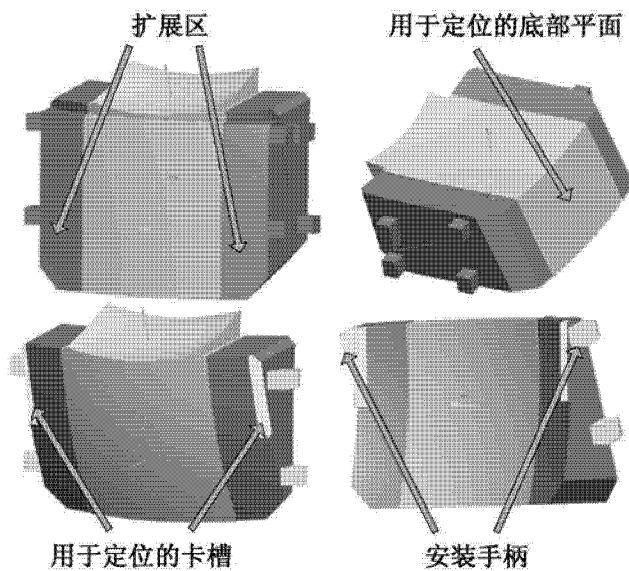


图 3

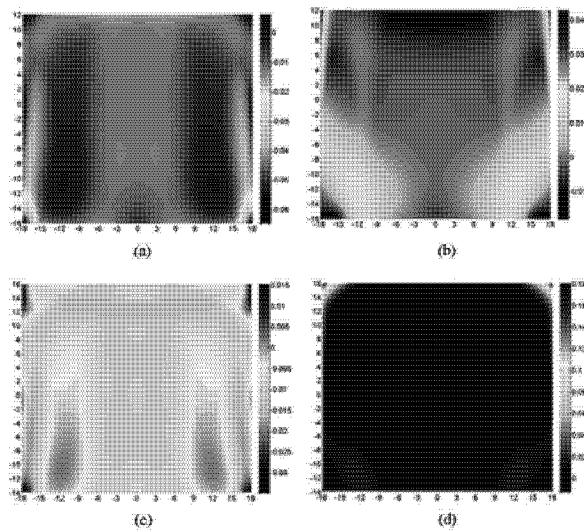


图 4

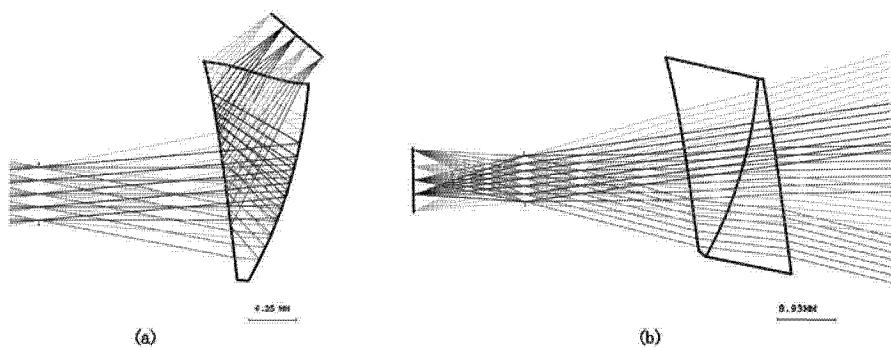


图 5

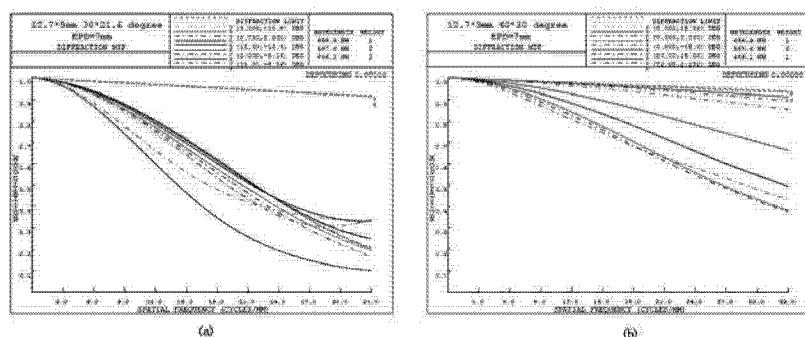


图 6

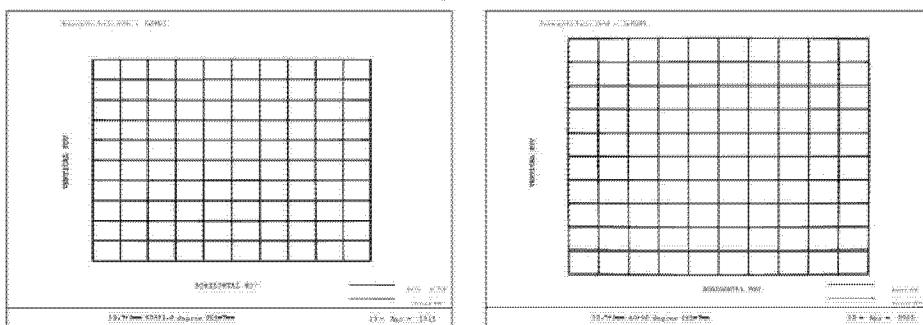


图 7

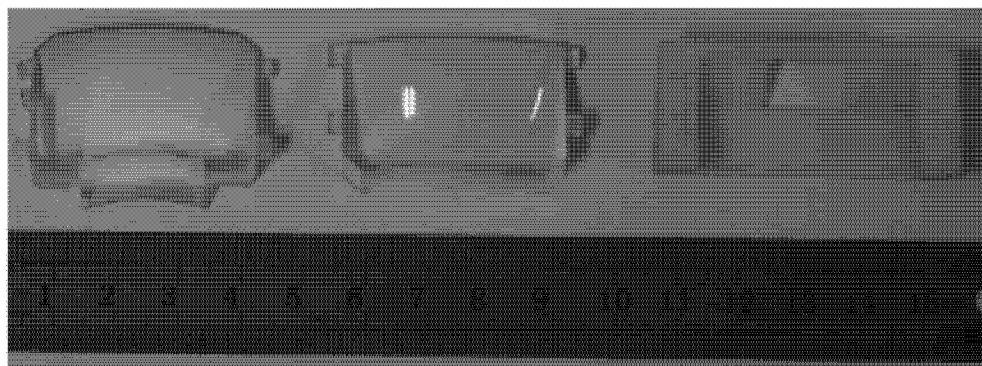


图 8

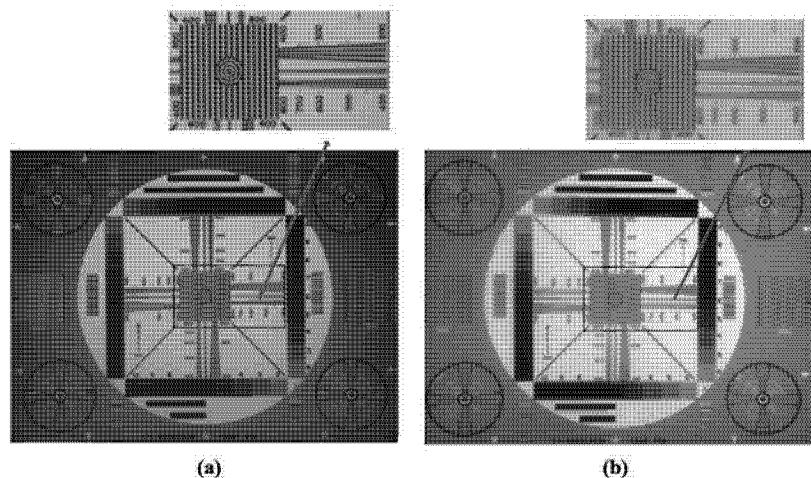


图 9