



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102906616 B

(45) 授权公告日 2015. 03. 04

(21) 申请号 201180025303. 3

(22) 申请日 2011. 05. 09

(30) 优先权数据

12/784, 521 2010. 05. 21 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 11. 21

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2011/035737 2011. 05. 09

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/146273 EN 2011. 11. 24

(73) 专利权人 伊斯曼柯达公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 J·R·比尔特雷 A·F·库尔茨

B·D·西尔弗斯坦 J·马扎雷拉

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

公司 11245

代理人 赵蓉民

(51) Int. Cl.

G02B 13/16(2006. 01)

(56) 对比文件

WO 2004/111690 A1, 2004. 12. 23, 全文.

US 2006/0109560 A1, 2006. 05. 25, 全文.

US 2004/0263989 A1, 2004. 12. 30, 全文.

审查员 冯津京

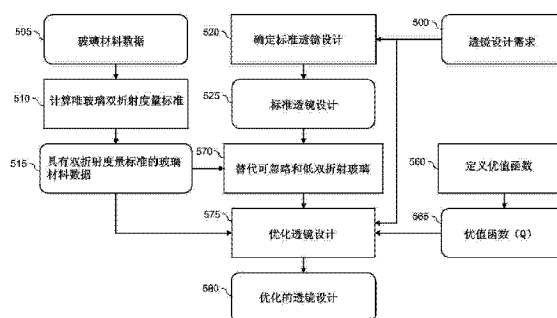
权利要求书4页 说明书31页 附图38页

(54) 发明名称

使用应力双折射性能标准设计透镜

(57) 摘要

本发明涉及一种设计具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜,该成像透镜具有位于孔径光阑两侧的第一组和第二组透镜元件,该方法包括:定义一组透镜设计属性;定义包括热致应力双折射性能标准的一组透镜性能标准;定义具有可忽略的热致应力双折射敏感性的第一组备选玻璃和具有至多中度热致应力双折射敏感性的第二组备选玻璃;从第一组备选玻璃中选择用于邻近孔径光阑定位的透镜元件的玻璃;从第一组或第二组备选玻璃中选择用于其余透镜元件的玻璃;以及使用计算机处理器来确定用于成像透镜的透镜设计。



1. 一种设计将物平面成像到像平面的具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜的方法,所述成像透镜具有位于所述物平面和所述像平面之间的孔径光阑、位于所述孔径光阑的物平面一侧的第一组透镜元件以及位于所述孔径光阑的像平面一侧的第二组透镜元件,所述方法包括:

定义一组透镜设计属性,所述透镜设计属性描述所述透镜的几何特性;

定义第一组备选玻璃,其具有以热应力双折射度量标准表征的可忽略的热应力双折射敏感性;

定义第二组备选玻璃,其具有以所述热应力双折射度量标准表征的高于可忽略的热应力双折射敏感性,但至多具有中度热应力双折射敏感性;

从所述第一组备选玻璃中选择用于紧邻所述孔径光阑定位的所述第一组和第二组透镜元件中的透镜元件的玻璃;

从所述第一组或第二组备选玻璃中选择用于不紧邻所述孔径光阑定位的所述第一组和第二组透镜元件中的透镜元件的玻璃;以及

定义一组透镜性能标准,其包括一个或多个图像质量性能标准和热致应力双折射性能标准,其中所述热致应力双折射性能标准是所述透镜元件的所述热应力双折射度量标准的函数;

使用计算机处理器确定用于所述成像透镜的透镜设计,所述透镜设计实现所述透镜设计属性且同时满足所定义的透镜性能标准,其中所述透镜设计规定所述第一组和第二组透镜元件中的透镜元件的厚度、间距、形状和玻璃;

其中所述热应力双折射度量标准包括因素:

$$M_1 = \rho \kappa \alpha E / (K \cdot (1 - \mu))$$

其中 ρ 是热膨胀系数, κ 是应力光学系数, α 是光吸收系数, E 是弹性模量, K 是导热系数, μ 是泊松比,并且其中具有可忽略的热应力双折射敏感性的所述第一组备选玻璃满足 $M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件,并且具有高于可忽略的热应力双折射敏感性但至多具有中度热应力双折射敏感性的所述第二组备选玻璃满足 $0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.60 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述热应力双折射度量标准进一步包括与所述玻璃中的光学功率密度、所述透镜元件的厚度或者所述透镜元件的光圈尺寸相关的至少一个额外因素。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其中描述所述几何特性的所述透镜设计属性包括透镜焦距、 $F/\#$ 、透镜放大倍率和透镜工作距离。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述图像质量性能标准包括调制传递函数标准或点扩散函数标准。

5. 根据权利要求 1 所述的方法,其中所述热致应力双折射性能标准基于总热应力双折射度量标准,所述总热应力双折射度量标准组合了针对所述成像透镜中的每个透镜元件确定的强度加权的熱应力双折射度量标准。

6. 根据权利要求 5 所述的方法,其中所述强度加权的热应力双折射度量标准由下式给出:

$$M_2 = I_0 L M_1$$

其中 I_0 是所述玻璃的光学功率密度, 并且 L 是所述透镜元件的厚度。

7. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中选择用于所述透镜元件的玻璃的步骤包括:

规定标称透镜设计, 所述标称透镜设计实现所述透镜设计属性, 但包括使用不在所述第一组和第二组备选玻璃中的玻璃的透镜元件;

从所述第一组和第二组备选玻璃中识别最接近地匹配不在所述第一组和第二组备选玻璃中的所述玻璃的折射率和色散特性的玻璃; 和

用所识别的玻璃替换不在所述第一组和第二组备选玻璃中的所述玻璃。

8. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中使用所述计算机处理器确定用于所述成像透镜的透镜设计的步骤包括迭代地使用所述第一组和第二组备选玻璃中的玻璃替换所述透镜元件的玻璃并优化所述透镜设计直到满足所定义的性能标准。

9. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中用于具有最高光学功率密度的透镜元件的玻璃是从所述第一组备选玻璃中选择的。

10. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中用于最薄的透镜元件的玻璃是从所述第二组备选玻璃中选择的。

11. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中使用所述计算机处理器确定用于所述成像透镜的透镜设计的步骤包括确定一个或更多个所述透镜元件的非球形表面轮廓或衍射光学表面轮廓。

12. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述成像透镜包括偏振补偿器。

13. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述成像透镜包括具有多层电介质涂层的镜子, 所述多层电介质涂层有差别地改变不同波长段的路径长度, 从而减小色差。

14. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述成像透镜被用于对偏振光进行成像。

15. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述成像透镜是用于数字投影系统的中继透镜或投影透镜。

16. 一种用于设计具有减小的热致应力双折射敏感度的透镜系统的方法, 该方法包括:

定义一组透镜设计属性, 所述透镜设计属性描述所述透镜的几何特性;

定义第一组备选玻璃, 其具有以热应力双折射度量标准表征的可忽略的热应力双折射敏感性;

定义第二组备选玻璃, 其具有以热应力双折射度量标准表征的高于可忽略的热应力双折射敏感性, 但至多具有中度热应力双折射敏感性;

定义透镜元件相对于孔径光阑的布置, 其中所述透镜元件被布置成至少一组透镜元件;

从所述第一组备选玻璃中为所述至少一组透镜元件中承受来自透射光的最高光学功率密度或位于所述孔径光阑附近的透镜元件选择玻璃;

从所述第一组或第二组备选玻璃中为所述至少一组透镜元件中的其他透镜元件选择玻璃;

定义一组透镜性能标准, 其包括一个或更多个图像质量性能标准和热致应力双折射性能标准, 其中所述热致应力双折射性能标准是所述透镜元件的所述热应力双折射度量标准的函数;

使用计算机处理器确定用于所述透镜系统的透镜设计,所述透镜设计实现所述透镜设计属性且同时满足所定义的透镜性能标准,其中所述透镜设计规定所述至少一组透镜元件中的透镜元件的厚度、间距、形状和玻璃;

其中所述热应力双折射度量标准包括因素:

$$M_1 = \rho \kappa \alpha E / (K \cdot (1 - \mu))$$

其中 ρ 是热膨胀系数, κ 是应力光学系数, α 是光吸收系数, E 是弹性模量, K 是导热系数, μ 是泊松比,并且其中具有可忽略的热应力双折射敏感性的所述第一组备选玻璃满足 $M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件,并且具有高于可忽略的热应力双折射敏感性但至多具有中度热应力双折射敏感性的所述第二组备选玻璃满足 $0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.60 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件。

17. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述热应力双折射度量标准还包括与所述玻璃中的光学功率密度、所述透镜元件的厚度或者所述透镜元件的光圈尺寸相关的至少一个额外因素。

18. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述透镜设计属性和所述透镜性能标准中的至少一些在透镜设计优值函数中表达,所述透镜设计优值函数在透镜设计优化过程中被所述计算机处理器使用。

19. 根据权利要求 16 所述的方法,其中热机械建模被用于评估由于吸收部分透射光而施加到一个或更多个所述透镜元件的热负载,所述热机械建模考虑了热传导、热对流和热辐射的作用。

20. 根据权利要求 19 所述的方法,其中所述热机械建模估算在一个或更多个透镜元件中热致的应力双折射水平。

21. 根据权利要求 19 所述的方法,其中所述玻璃的选择至少部分基于所述透镜元件的热机械建模的结果。

22. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述透镜系统是具有多个透镜组的扫描透镜或变焦透镜。

23. 根据权利要求 16 所述的方法,其中透镜系统包括位于所述孔径光阑一侧的第一组透镜元件以及位于所述孔径光阑另一侧的第二组透镜元件。

24. 根据权利要求 16 所述的方法,其中基于所述透镜元件的厚度为所述透镜系统的至少一个透镜元件选择相对于热致应力双折射而言较不限制的玻璃。

25. 一种设计具有用于将物平面成像到像平面的多个透镜元件的成像透镜的方法,所述成像透镜具有减小的热致应力双折射敏感性,所述方法包括:

定义一组透镜设计属性,所述透镜设计属性描述所述透镜的几何特性;

定义第一组备选玻璃,其具有以热应力双折射度量标准表征的可忽略的热应力双折射敏感性;

定义第二组备选玻璃,其具有以热应力双折射度量标准表征的高于可忽略的热应力双折射敏感性,但至多具有中度热应力双折射敏感性;以及

定义优值函数,其包括一个或更多个图像质量性能项和热致应力双折射性能项,其中所述热致应力双折射性能项是所述透镜元件的所述热应力双折射度量标准的函数;

使用计算机处理器确定用于所述成像透镜的透镜设计,所述透镜设计通过应用响应于

所述优值函数的优化过程来实现所规定的透镜设计属性,其中所述透镜设计规定所述透镜元件的厚度、间距、形状和玻璃,并且其中用于所述透镜元件的玻璃选自所述第一组和第二组备选玻璃,并且其中用于至少一个所述透镜元件的玻璃选自所述第一组备选玻璃;

其中所述热应力双折射度量标准包括因素:

$$M_1 = \rho \kappa \alpha E / (K \cdot (1 - \mu))$$

其中 ρ 是热膨胀系数, κ 是应力光学系数, α 是光吸收系数, E 是弹性模量, K 是导热系数, μ 是泊松比, 并且其中具有可忽略的热应力双折射敏感性的所述第一组备选玻璃满足 $M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件, 并且具有高于可忽略的热应力双折射敏感性但至多具有中度热应力双折射敏感性的所述第二组备选玻璃满足 $0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.60 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的条件。

使用应力双折射性能标准设计透镜

技术领域

[0001] 本发明涉及光学成像系统,而且更具体地涉及具有对由透射光施加的热负载导致的对应力双折射的低灵敏性的成像透镜。

背景技术

[0002] 投影和电子显示系统广泛用于显示图像内容。在投影系统的情况下,不论是传统的基于胶卷的系统,还是新型的电子系统,来自光源(通常是灯泡)的光都被引导至将图像数据传授给透射光的图像调制元件(例如胶卷或一个或更多个空间光调制器)。通常,胶卷或光调制器阵列随后被成像到显示器表面或屏幕上。

[0003] 作为另一方面,对显示出三维(3D)的或感知到的立体内容以便向消费者提供增强的视觉体验的高质量投影系统的兴趣一直在增长。在历史上,剧院使用胶卷媒体来投影立体内容,例如两组胶卷被加载到两个独立的投影设备中,每个投影设备对应于一只眼睛。然后使用偏振光同时投射左眼图像和右眼图像,其中一种偏振被用于呈现给左眼的图像;而正交偏振的光被用于呈现给右眼的图像。观众佩戴相应的正交偏振眼镜,该正交偏振眼镜为每只眼睛阻挡一种偏振光图像,且同时传输正交偏振光图像。

[0004] 最近,提供立体投影的电子或数字影院投影仪已经商品化。特别地,由德克萨斯州达拉斯的德州仪器股份有限公司开发的基于数字光处理器(DLP)或数字微镜装置(DMD)的投影仪以立体和非立体版本用在剧院中。DLP装置在许多专利中都有描述,例如美国专利US 4,441,791,美国专利US 5,535,047和美国专利US 5,600,383(全属Hornbeck所有)。

[0005] 图1A示出使用DLP空间光调制器的投影仪100的简化框图。光源50(通常是氙弧灯)提供多色非偏振光到棱镜组件55,例如Philips棱镜。以Philips棱镜示出的棱镜组件55将该多色光分裂成红、绿和蓝分量波长段并引导每个段到相应的空间光调制器(SLM)170r、170g或170b。然后棱镜组件55重新组合来自空间光调制器170r、170g和170b的调制光并提供这种非偏振光到成像透镜200以便投影到显示屏或其他适合的表面。基于DLP的投影仪已经显示出为从台式计算机到大型影院的大多数投影应用提供必需的光产量、对比度和色域的能力。可替换地,可以使用通过改变透射光的偏振状态来调制光的液晶装置(LCD)而非DLP装置,其带来的比较好处是更高的分辨率和更大的装置尺寸,但在传递投影图像的对比度、对比度均匀性和颜色均匀性方面具有更大的困难。

[0006] 从这些基于SLM的投影仪(DLP或LCD)形成立体图像的常规方法使用两种主要技术中的任一种来区分左眼内容和右眼内容。例如Dolby实验室使用的一种较不常用的技术使用颜色空间分离,例如在Maximus等人的美国专利申请公开2007/0127121中所描述。白光照明系统中使用过滤器来在一部分帧像时间内随时封闭每种原色的一部分。然后与每只眼睛相关的适当颜色调节的立体内容被呈现给针对该眼睛的每个调制器。观赏者佩戴相应的过滤器套件,该套件同样地只传输两个三色(RGB)光谱组中的一组。颜色空间分离避免了在屏幕上并通过观赏者的眼镜处理来自投影仪的偏振光的问题,但是低光效率和眼镜的成本也是个问题。

[0007] 用于形成立体内容的第二种方法使用偏振光。例如 Svardal 等人的美国专利 US 6, 793, 341 描述一种方法, 其中两种正交偏振状态由分离的空间光调制器提供并同时投射到屏幕上, 该屏幕通常具有保持反射光的偏振状态的特性。观赏者佩戴偏振眼镜, 其针对左眼和右眼的偏振穿透轴的方向相互正交。尽管这种布置提供光的有效使用, 但它仍是昂贵的配置。

[0008] 由加利福尼亚州 Beverly Hills 的 Real-D 公司商用化的另一种方法使用常规的投影仪, 其被改进以调制从一个状态快速切换到另一个状态的交变偏振状态。特别地, 如图 1A 所示, DLP 投影仪被改进以具有放置在输出光路中例如图 1A 中虚线所示的位置 90 处的偏光器和偏光器切换装置。由于 DLP 投影仪输出经调制但非偏振的光, 所以需要偏振切换器。该输出是非偏振的, 因为使用了非偏振光源(灯泡), 而且典型的 DLP 装置窗口是消偏振的(由于应力导致的双折射)。消色差的偏振切换器(例如 Robinson 等人的美国专利 US 7, 528, 906 中的那种偏振切换器)可以放置在偏光器后面的位置 90。这种类型的切换器(ZScreen™)在两个正交偏振状态例如线性偏振状态之间交替旋转偏振光, 从而允许呈现两个不同的图像, 每个对应一只眼睛, 同时用户戴着偏振眼镜观赏所投射的图像。

[0009] 因为偏光器的偏振对比度规格是适中的($\sim 50:1$)以折中偏光器效率的提高, 左眼图像和右眼图像之间可能发生图像串扰。这会使得观赏者承受幻影图像, 例如左眼不仅看到一个明亮的左眼图像, 还能看到一个暗淡的右眼图像。Real-D 提供多种方案来解决这一问题, 包括使用图像内容的实时数字预处理来减少图像中的幻影。特别地, 数字处理器应用串扰模型通过比较左眼图像和右眼图像来预测潜在的幻影, 然后它消减所预测的幻影图像。M. Cowan 等人的标题为“Ghost-compensation for improved stereoscopic projection”的美国专利公开 2006/0268104 详细叙述了这种方案。作为另外一个示例, 在 Chen 等人的美国专利 US 7, 518, 662 中, ZScreen 切换器的偏振对比度用倾斜的偏振补偿器来改进。

[0010] 由于多种原因, 包括提高光效率、扩大色域、增加光源寿命以及减少不断的更换费用, 在投影仪中, 不管是 2-D 投影仪或 3-D 投影仪, 一直存在用固态光源(例如激光器或 LED)取代传统灯泡(例如氙弧灯、钨卤灯或 UHP)的持续动力。然而, 至今对基于激光的投影系统的需求仍未满足, 部分是由于紧凑、耐用、中低成本的可见波长激光技术尚未以可商用化的形式出现, 特别是对于蓝光和绿光来说。随着最近出现的蓝光二极管激光器和紧凑的绿光 SHG 激光器, 产自诸如 Microvision 公司的低成本基于激光的微投影仪即将面向市场。

[0011] 同时, 由于诸如 Laser Light Engines (新罕布什尔州 Salem) 和 Necsel (加利福尼亚州 Milpitas) 等公司已经展示了原型机或早期产品激光装置, 针对能够支持数字影院投影的紧凑的高功率可见激光的相似障碍也已经开始消失。例如, Necsel (之前被称为 Novalux) 提供绿光 (532nm) 和蓝光 (465nm) 激光器阵列, 每个激光器可以提供 3-5 瓦的光学输出功率。在这些功率水平下, 并且考虑到系统效率损失, 用于大型会议室或家庭影院的中等尺寸的投影仪(~ 1500 流明输出)能够通过每种颜色使用单个激光装置来实现。然而, 在电影院的情况下, 根据屏幕尺寸和屏幕增益, 屏上亮度需要 10,000-40,000 流明或 40-170 瓦的组合光学功率(通量)入射到屏幕上。进而, 考虑到内部光学效率损失, 这意味着需要从每个颜色通道中的激光源发出 40-120 瓦的光学功率。目前, 只有通过光学上组合每个颜色通道中的多个激光器阵列的输出才能够实现这些功率水平。最终, 激光技术可能进步, 以

使单个紧凑的激光装置能够驱动每种颜色。当然,涉及到简单性、成本以及对激光故障的敏感性之间的平衡,每种途径都有各自的优点和缺点。

[0012] 过分简单化地,可以通过用多个激光装置替换图 1A 中用作光源 50 的常规灯泡来提供数字影院投影仪。此外,因为激光器本身就是偏振光源,当在位置 90 处使用偏振切换器时,无须附随的偏光器即可提供更有效的 3D 投影。然而,对于基于高功率激光的投影应用例如数字影院来说,这种过分简单化的观点是不切实际的。如上所述,在屏幕上提供 40-170 瓦光功率的投影系统在内部承受更高的光水平,其中最高光水平(通量或功率)发生在光源组件上,而最低光水平可能在投影透镜的输出表面上。由于其空间和时间的相干性,即使通量水平相当,较之不相干光源(灯泡)发出的光线,激光会聚到更小的体积中且功率密度更高。最高内部功率密度发生在光聚集的地方,例如在积分棒(integrating bar)、空间光调制器、孔径光阑或者中间图像处。当然,当照明光、成像光或甚至是杂散光照射到内表面或材料时,这些高光水平会带来附随的热问题。

[0013] 基于常规灯泡的系统中的强光已经引起很多问题,其中一些只有在基于激光的系统中才会被放大。例如,在基于灯泡的系统中,接收来自灯泡的高强度聚焦光和周围杂散光的积分棒的入射孔径通常被空气冷却的散热片组件包围。作为另一个示例,在数字影院投影系统中,空间光调制器通常用循环的冷却水冷却。

[0014] 在这种高光水平下,强光(特别是残余的 UV 光)也可能影响材料的性能和可靠性,包括光学粘合剂、接合剂或用在棱镜元件、双合棱镜或液晶装置中的聚合物。因此,必须精心选择这些材料以避免热变化或化学变化引起的退化。类似地,也必须最小化或管理由光学元件或其安装组件的失配热膨胀系数引起的机械应力,以避免应力、变形或破损。

[0015] 作为一个特别微妙的结果,其影响基于偏振的投影系统(包括用于 3-D 投影的投影系统),小部分的高光强度光可能被光学材料吸收,从而导致元件的应力双折射。这反过来可能改变透射光的偏振方向,从而影响图像对比度、图像对比度均匀性、颜色均匀性或降低感知到的屏上图像质量的其他属性。

[0016] 在空间光调制器装置特别是硅基液晶(LCOS)装置的情况下,会出现强光在装置自身内部的对置电极衬底上引起热负荷和应力双折射的问题。为了给出进一步的背景,图 1B 示出了现有技术的投影仪 101,其中入射照明光线 140 被引入针对每种颜色的相应调制光学系统 80 中,调制光学系统 80 是包括偏振分束器 60(也被称为偏振棱镜)、偏振补偿器 360 和空间光调制器 170g、170b 或 170r 的投影仪子系统。使用 X 棱镜 65 组合来自调制光学系统 80 的调制光线,并将其引导至投影透镜 270 以便投影到显示屏(未示出)上。通常,调制光学系统 80 中的这些部件的偏振行为和特性决定了由投影仪 101 提供的屏上偏振对比度。

[0017] 对置电极衬底(未示出)是薄的光学玻璃板,其与 LCD 空间光调制器 170g、170b 和 170r 中的硅衬底平行放置。液晶材料以及像素结构形成在硅内部(或上面),然后填充这些衬底之间的窄缝。对置电极衬底涂覆有图案化透明电极(通常是 ITO),以便使得能够在衬底之间应用电场,从而在逐个像素基础上控制液晶分子的取向。

[0018] 这种结构在低光强的情况下效果很好,使得当光穿过对置电极衬底时可以保持由像素控制的偏振方向,而且所得到的偏振图像光可以在下游遇到偏振光学器件,例如偏振分束器、分析器或切换器,其中偏振图像光具有预期的方向。然而,在高光强下,穿过对置电极衬底且被吸收的一部分光会产生足够的内热而引起应力双折射,这反过来改变偏振方

向。

[0019] 认识到这个问题后, Schmidt 等人的美国专利 US 5, 576, 854 提出一种确认能够用于制造 LCOS 面板的对置电极衬底的最佳玻璃的方法。特别地, 他们提出一个用于确认备选玻璃的品质因数 M , 该品质因数由以下乘积给出:

$$[0020] \quad M = \rho E \kappa \quad (1)$$

[0021] 其中 ρ 是热膨胀系数 (CTE), κ 是应力光学系数, E 是弹性模量 (E)。Schmidt 等人确认了两种特别有价值的备选玻璃: Schott SF-57 (因为其通常具有低应力光学系数) 和熔融石英 (因为其通常具有低热膨胀系数)。根据 Schmidt 等人所述, 在熔融石英的情况下, 热量导致玻璃的最小膨胀, 这进而导致小的热致应力。在 SF-57 的情况下, 热应力系数本身是非常低的, 这意味着很少有热量直接转化成应力双折射。如前面所提到, 目前存在与 DLP 调制器的保护玻璃窗口相关的相似问题; 但是因为期望保持偏振状态, 所以这些装置一般不用来调制强偏振光, 不管是玻璃的选择还是玻璃的安装设计都以最小化应力双折射为目的而进行。

[0022] R. Cline 等人在 “Thermal Stress Birefringence in LCOS Projection Display” 一文中讨论了投影显示器中玻璃选择与热应力双折射之间的关系, 这篇文章发表在 Displays, Vol. 23, pp. 151-159, 2002 中。这篇文章涉及到确认适用于投影显示系统中的偏振分束器 60 (图 1B) 或 Philips 棱镜组件 55 (图 1A) 的玻璃。特别地, 作者引入用于评估备选玻璃的扩展品质因数, 其不仅包括热膨胀系数 (ρ)、应力光学系数 (κ) 和弹性模量 (E), 还包括玻璃导热系数 (K)、光吸收 (α) 和泊松比 (μ):

$$[0023] \quad M = \frac{\alpha \rho E \kappa}{K(1-\mu)} \quad (2)$$

[0024] Cline 等人提出只有 Schott SF-57、Ohara PBH56 和熔融石英可以用于高功率偏振敏感投影仪 (大于 1000 流明) 的棱镜中, 而包括 Schott SK5 或 Schott BK7 的更大范围的玻璃可以用于低功率 (≤ 500 流明) 投影仪的棱镜。

[0025] 与此相反, 在 Aastuen 等人的美国专利 US 7, 357, 511 中, 发明人指出 Cline 等人提出的用于满足低应力双折射的玻璃 (例如 Schott SK5 或 Schott BK7) 实际上是不合适的, 而且这些预备玻璃的对比度退化实际上非常大。然后 Aastuen 等人提出一种可替换的调制光学系统 80, 其中相对于包括棱镜的玻璃中的应力双折射 (包括热致应力双折射), 可以通过在偏振分束器 60 和空间光调制器 170 (参见图 1B) 之间提供偏振补偿器 360 来提高偏振分束器 60 的偏振对比度。他们证明了具有四分之一波长延迟的偏振补偿器 360 可以对应力双折射提供足够的补偿, 以使棱镜玻璃的选择不再受限于低应力光学系数 (κ) 玻璃, 例如 Schott SF-57。

[0026] 还应该注意, 多余的双折射已经在投影空间以外的区域 (包括在显微光刻区域内) 引起图像质量问题。例如, 在 Allan 等人的美国专利 US 6, 785, 051 中描述了针对 200nm UV 显微光刻的折射 / 反射成像系统。在该光谱范围中, 可用光学材料的极小选择主要受限于晶体材料, 例如表现出显著的固有多重折射的氟化钙 (CaF_2)。为了减小光学装置中累积的双折射或偏振状态改变, Allan 等人提供同样由相同类型的固有多重折射材料制成的一个或多个校正光学元件 (光板或分束器)。在这种情况下, 校正的光弹性双应力由外部施加的应力或应变 (来自拉伸应力、压缩应力或剪切应力) 提供, 该外部施加的应力或应变是由机械夹

具、压电致动器、热元件或其他应力诱发器施加给校正元件的。

[0027] 类似地, Brunotte 等人的美国专利 US 6,879,379 也公开了使用包括固有双折射材料如 CaF_2 的透镜元件和校正元件的 UV 显微光刻成像系统。固有双折射带来与位置和角度有关的多余的偏振旋转效应。在这种情况下, 校正元件是靠近孔径光阑定位的光板或透镜, 其也由 CaF_2 制成。然后使用压电致动器以脉冲形式施加机械应力, 从而对补偿由固有双折射引起的依赖角度的偏振效应的元件给予应力双折射。

[0028] 尽管有趣, 但是 Brunotte 等人('379) 和 Allan 等人('051) 的解决方案适用于使用一组有限的固有双折射材料的成像系统。相比之下, Schmidt 等人('854)、Cline 等人 and Aastuen 等人('511) 提供的解决方案是在针对低功率应用但可能扩展到数字影院的基于灯泡的投影系统的情况下开发出来的。然而, 这些解决方案只针对投影仪 101 的调制光学系统 80 中的光学部件(保护玻璃和棱镜)。

[0029] 在激光投影系统中, 由于激光的相干性或聚焦能力, 局部光强度和功率密度可能明显高于白光系统, 并且可能在光学系统的各个部分产生热效应。在极端的情况下, 非线性光学材料中的光学自聚焦效应可以导致光学损伤或崩溃。

[0030] 在基于激光的数字影院投影仪的情况下, 尽管永久损伤机制例如自聚焦可能不是有密切关系的, 但是其他热效应例如热致应力双折射会影响光学元件, 包括除了那些处于调制光学子系统部件的部件, 例如棱镜组件、空间光调制器或保护玻璃或其中的对置电极衬底。特别地, 包括多个复杂的透镜元件且用于对强激光成像而无须承受热致应力双折射和由此带来的偏振效应的成像透镜组件的设计和使用是一个问题, 特别是在比以前管理应力双折射所面对的功率更高的数字影院功率水平上。如透镜设计领域的技术人员所公知, 成像透镜组件使用非平面透镜元件的组合, 其材料、厚度、曲率和相对布局都经过精心设计以提供相对于色差和衍射而言期望的图像质量。然而, 相对于成像透镜系统和透镜组元的设计, 进一步控制热致应力双折射所增加的复杂性是一个现有技术既未教导也未预期的问题。

发明内容

[0031] 本发明提出一种设计将物平面成像到像平面的具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜的方法, 该成像透镜具有位于该物平面和该像平面之间的孔径光阑、位于该孔径光阑的物平面一侧的第一组透镜元件以及位于该孔径光阑的像平面一侧的第二组透镜元件, 所述方法包括:

[0032] 定义一组透镜设计属性, 所述透镜设计属性描述所述透镜的几何特性;

[0033] 定义一组透镜性能标准, 其包括一个或更多个图像质量性能标准和热致应力双折射性能标准;

[0034] 定义第一组备选玻璃, 其具有以热应力双折射度量标准(metric)表征的可忽略的热应力双折射敏感性;

[0035] 定义第二组备选玻璃, 其具有以该热应力双折射度量标准表征的高于可忽略的热应力双折射敏感性, 但至多是中度热应力双折射敏感性;

[0036] 从第一组备选玻璃中选择用于紧邻孔径光阑定位的第一组和第二组透镜元件中的透镜元件的玻璃;

[0037] 从第一组或第二组备选玻璃中选择用于不紧邻孔径光阑定位的第一组和第二组透镜元件中的透镜元件；以及

[0038] 使用计算机处理器确定用于该成像透镜的透镜设计，该透镜设计实现透镜设计属性且同时满足所定义的透镜性能标准，其中该透镜设计规定第一组和第二组透镜元件中的透镜元件的厚度、间距、形状和玻璃。

[0039] 它具有以下优点：当被用于使用偏振光来产生图像时，成像透镜的性能不会受到由成像光吸收导致的热变化的显著影响。

[0040] 它还具有以下优点：这种成像透镜可以用于立体投影系统，而不会因为应力双折射诱发的解偏振而在左眼图像和右眼图像之间产生令人不快的串扰。

[0041] 它具有以下额外的优势：实现减小的双折射敏感性，同时达到可接受的图像质量水平。

附图说明

[0042] 根据下面呈现的示例性实施例的详细说明连同附图，本发明将更容易理解，其中：

[0043] 图 1A 和图 1B 示出现有技术数字投影系统的一些部分；

[0044] 图 2 示出包含本发明的成像透镜的投影仪的整体系统架构；

[0045] 图 3A 和图 3B 示出示例性光源组件，其包括用于本发明的投影系统的多个激光装置和激光结合器；

[0046] 图 4 示出本发明的成像透镜的整体结构，其包括中继透镜和投影透镜；

[0047] 图 5A 示出现有技术的双高斯式成像透镜；

[0048] 图 5B 示出玻璃图表，其绘制出光学玻璃与其折射率和阿贝数的关系；

[0049] 图 6A 描述第一示例性投影透镜的光学设计，其具有中度热应力敏感性和良好的图像质量；

[0050] 图 6B 使用 MTF 图描述图 6A 的投影透镜的光学性能；

[0051] 图 6C 描述第一示例性中继透镜的光学设计，其具有中度热应力敏感性和良好的图像质量；

[0052] 图 6D 使用 MTF 图描述图 6C 的中继透镜的光学性能；

[0053] 图 7A 和图 7B 示出激光结合组件发出的光束的周线和截面射束轮廓；

[0054] 图 7C 和图 7D 示出入射到空间光调制器的周线和截面照明轮廓；

[0055] 图 7E 示出积分棒后面的远心空间中的光强分布；

[0056] 图 7F 示出中继透镜的孔径光阑附近的光强分布；

[0057] 图 7G 示出投影透镜的孔径光阑附近的光强分布；

[0058] 图 8A-8D 是显示光学玻璃属性的表格；

[0059] 图 9A 是总结图 6A 的第一示例性投影透镜的热应力双折射性能的表格；

[0060] 图 9B 是总结图 6C 的第一示例性投影透镜的热应力双折射性能的表格；

[0061] 图 10A 描述第二示例性投影透镜的光学设计，其具有低热应力敏感性和较差的图像质量；

[0062] 图 10B 使用 MTF 图描述图 10A 的第二示例性投影透镜的光学性能；

- [0063] 图 10C 描述第二示例性中继透镜的光学设计,其具有低热应力敏感性和较差的图像质量;
- [0064] 图 10D 使用 MTF 图描述图 10C 的第二示例性中继透镜的光学性能;
- [0065] 图 11A 是总结图 10A 的第二示例性投影透镜的热应力双折射性能的表格;
- [0066] 图 11B 是总结图 10C 的第二示例性中继透镜的热应力双折射性能的表格;
- [0067] 图 12A 描述第三示例性投影透镜的光学设计,其具有低热应力敏感性和良好的图像质量;
- [0068] 图 12B 使用 MTF 图描述图 12A 的第三示例性投影透镜的光学性能;
- [0069] 图 12C 描述第三示例性中继透镜的光学设计,其具有低热应力敏感性和良好的图像质量;
- [0070] 图 12D 使用 MTF 图描述图 12C 的第三示例性中继透镜的光学性能;
- [0071] 图 13A 是总结图 12A 的第三示例性投影透镜的热应力双折射性能的表格;
- [0072] 图 13B 是总结图 12C 的第三示例性中继透镜的热应力双折射性能的表格;
- [0073] 图 14A 是规定图 12A 的第三示例性投影透镜的透镜设计参数的表格;
- [0074] 图 14B 是规定图 12C 的第三示例性中继透镜的透镜设计参数的表格;
- [0075] 图 15 是示出根据本实施例的实施例用于设计具有减小的热应力双折射敏感性的成像透镜的方法的流程图;
- [0076] 图 16 是示出根据本实施例的实施例用于设计具有减小的热应力双折射敏感性的成像透镜的另一种方法的流程图;和
- [0077] 图 17 描述在使用本发明的投影透镜的同时减少轴向颜色的方法。
- [0078] 应当理解,附图仅为图示说明本发明的概念,并且可以不成比例。

具体实施方式

[0079] 本说明具体地涉及形成根据本发明的装置的一部分或更直接与该装置合作的元件。应当理解,未具体示出或描述的元件可以采用本领域技术人员所公知的各种形式。

[0080] 本发明包括在此描述的实施例的组合。提到“一个特别实施例”等指的是出现在本发明的至少一个实施例中的特征。单独提到“一个实施例”或“特殊实施例”等并不一定指的是相同的一个或更多个实施例;然而,此类实施例并不是彼此排斥的,除非这样指明或对本领域技术人员而言很清楚是这样。提及“一种方法”或“多个方法”等时所用的单数或复数并不是限制性的。应当注意,除非特别说明或上下文要求,在本公开中以非排他的意义使用词语“或”。

[0081] 为了更好地理解本发明,描述本发明的装置和方法可在其中操作的整体背景是有益的。图 2 的示意图示出在本发明的若干实施例中所使用的投影仪 102 的基本布置。示出了三个照明组件 110r、110g 和 110b,每个提供来自相应光源组件 115 的红、绿或蓝原色中的一种。光源组件 115 包括一个或更多个光源,特别是激光光源装置。(激光光源装置未在图 2 中示出,但是在图 3A 和图 3B 中以代表性的形式示出。)

[0082] 图 3A 示出用于组合来自多个激光器阵列 102 和 120' 的光以形成激光结合组件 125 的一种途径,其中激光结合组件 125 是光源组件 115(图 2)的子部分。数年前就可轻易在红光或红外线区段获得几瓦或更大光学输出的高功率半导体(或固态)激光器阵列。这些

激光器通常包括单排单模-多模(single mode by multimode)激光发射器 122。然而,高功率紧凑的绿光和蓝光激光器阵列仅现在才变得可用。到目前为止,之前提到的来自 Necsel 的激光器已显示出特别大的前景,其为一种 IR 泵浦的双频 VECSEL(垂直扩展腔表面发射激光器)激光器。主要因为关键部件的发热和封装问题,当前可用的准商品化的装置具有受限制的体系架构,其提供平行的两排激光发射器 122(每排 24 个发射器)。

[0083] 尽管紧密布置来自成分激光器阵列(constituent laser array)的输出光束在光学上是有益的,但是也期望将激光器阵列 120 彼此机械隔离以减少热串扰和集中的热负载。可能也期望光源组件 115(图 2)以及电子发送和连接及相关热量与热敏感的光学投影系统隔开,以允许实现投影引擎的最佳性能。在图 3A 中,一个或更多个分散的镜子 160 可以被用来使附加激光器阵列 120'的光轴与激光器阵列 120 的光轴成直线,从而提供多个光束 140,每个光束包含多个单独光束 140',一起被引导至具有相关孔径 130 的照明透镜 150,照明透镜是各个照明组件 110r、110g 和 110b(图 2)的部件。

[0084] 图 3B 描述了根据可替换实施例的示例性照明组件 110 的一部分。该照明组件 110 包括给定颜色的光源组件 115,其包括两个激光结合组件 125。使用这种布置,可以增加功率输出,从而支持具有更高屏幕流明需求的更大屏幕。在这个示例中,两个激光结合组件 120 中的每一个都使用在每侧都具有窗口棱面和反射棱面(通过全内反射来工作)的多面体棱镜 127,以便沿着公共光路重新定向来自激光器阵列 120 中的激光发射器 122 的光束 140。来自两个激光结合组件 120 的输出光被照明光束结合器 135 沿着公共光路引导到例如由照明透镜 150 和光学积分器 155 所代表的另一个照明光学元件。照明光束结合器 135 可以通过各种途径结合光束 140,包括光谱上结合(针对激光结合组件 125 中的激光器阵列 120 聚集在中心波长的相反侧上的情况)、空间上结合或通过偏振结合。一个路径可以具有可选的半波片 137。

[0085] 图 2B 和图 3B 结合起来考虑,每个照明组件 110r、110g 和 110b 通常包括一个或更多个照明透镜 150、定形并定向透射光束的光学积分器 155(例如复眼积分器或积分棒)以及额外的照明透镜 150 和镜子 160,其一起引导照明光沿着光轴 145 到达相关联的空间光调制器 170。例如,可以使用照明透镜 150 将来自光源组件 115 的入射光引导至光学积分器 155。所产生的均匀光线充满光学积分器 155 的输出孔径。然后该输出孔径被重新成像到与空间光调制器 170 对准的光学平面中的区域。照明透镜 150 和光学积分器 155 可以用熔融石英制造,以便减小这些元件中可能由于诱导应力双折射而发生的任何偏振退化效应。

[0086] 空间光调制器 170 可以是微电子机械系统(MEMS)装置,例如 DLP 或某些其他类型的反射 MEMS 装置,包括任何一种通过反射或衍射调制光的 MEMS 调制器。空间光调制器 170 也可以是 LCD 类装置或其他技术。在 LCD 类装置的情况下,调制提供被引导至显示器表面的“打开”状态光或图像光以及,和被引导至束流捕集器(未示出)的“关闭”状态光。在投影仪 102 切换偏振光源的取向以驱动立体图像投影(3D)的情况下,优选“偏振状态中性的”调制器装置。特别地,空间光调制器 170 优选不通过调制像素的偏振状态来调制每个像素处的光,从而针对任何像素的入射光的偏振状态的任何改变都是可忽略的和小的。这意味着空间光调制器 170 将优选在逐个像素的基础上等地调制入射光,而不管与入射光的偏振状态如何。因此,推测观众佩戴偏振敏感的眼镜来观赏立体图像或 3D 图像。还应当理解,投影仪 102 可以提供感知为二维的常规图像。

[0087] 与使用在外部添加到投影仪上的偏振切换附件来提供 3D 影像的投影仪不同的是,在这种投影仪 102 中,来自照明组件 110 的照明光被确定为是偏振的。特别地,光源被布置为提供公共偏振状态,以本领域的术语称为“s- 偏振”或“p- 偏振”。照明组件 110 可以包括各种光学元件,包括波片或偏光器(未示出),以便排列、保持或突出光源本身的偏振状态。照明组件 110 还可以包括电光致动的或电机械致动的偏振切换器 139,以将照亮空间光调制器 170 的光的偏振状态变成 s- 偏振状态、p- 偏振状态或对 3D 图像投影有益的其他偏振状态(例如左圆偏振或右圆偏振)。因此,优选的是包括照明透镜 150 和光学积分器 155 在内的各种照明部件是保持偏振的。每个照明组件 110r、110g 和 110b 中的光路遵循相同的基本模式,尽管可以存在差异以适应一种颜色通道与其他颜色通道相比其光源(激光器)属性的差异。每个照明组件 110 可以各自具有以相互同步的方式操作的偏振切换器 139,或者公共偏振切换器 139 可以用于多个颜色通道。

[0088] 如图 2 所示,通过用一个或多个镜子 160 重新定向来将照明光引导到空间光调制器 170 上。承载由空间光调制器 170 的寻址像素施加到透射光中的图像信息的经调制的图像光被结合以横贯穿过成像透镜 200 的公共光路并投射到显示器表面 190 (例如投影屏幕)。在图示的实施例中,二向色结合器 165 包括第一结合器 166 和第二结合器 167,二者都是根据光的波长选择性地透射或反射光的具有适当薄膜光学涂层的二向色元件。因为该投影仪 102 被设计用于使用光学偏振状态的内部调制来提供 3D 图像内容,二向色结合器 165 和成像透镜 20 也应该是偏振中性的,从而这些元件在效率、偏振对比度或图像质量上引起很小的差别或无差别。类似地,显示器表面 190 优选是偏振保持屏幕。

[0089] 应当理解,镜子 160 不必位于光学系统的平面内。因此针对绿光通道的光路中的镜子 160 可以在平面外,并且不阻碍传输到投影透镜 207 的光,如图 2 所暗示。另外,虽然二向色结合器 165 被显示为一对倾斜的玻璃板,但是可以使用其他示例性结构,例如 X- 棱镜 65 (图 1B) V- 棱镜或 Philips (或氧化铅光导摄像管(Plumbicon)) 类棱镜(图 1A)。在其他实施例中,镜子 160 也能够以棱镜的形式提供,例如广泛使用的 TIR (全内反射) 棱镜,其经常与 Philips 棱镜和 DLP 装置结合使用。

[0090] 在图 2 中,成像透镜 200 被描述成包括多个透镜元件 205 的多元件组件,其以高放大倍数(通常是 100 倍-400 倍)将其各自物平面处的空间光调制器 170r、170g 和 170b 直接成像到像平面(显示器表面 190)。

[0091] 图 4 详述了成像透镜 200 的设计,其描述了一个实施例,其中成像透镜 200 包括两个部分,即中继透镜 250 和投影透镜 270,二者均包括以有限共轭操作并组装在透镜外壳 240 中的多个透镜元件 205。例如,中继透镜 250 被设计成采集和成像来自空间光调制器 170 的物平面的 F/6 光以在对应的像平面处形成真实的空间中间图像 260。然后该中间图像 260 成为投影透镜 270 的物平面,其提供中间图像的放大图像到允许的焦深范围内的远处的像平面(显示器表面 190),即标准像平面。更确切地说,空间光调制器 170 是与中间图像 260 共轭的图像,而中间图像 260 进而是与显示器表面 190 共轭的图像。

[0092] 中继透镜优选地提供 150-200mm 或更长的长工作距离 245,以便为空间光调制器 170 附近的二向色结合器 165 和镜子 160 (图 2) 提供间隙。示例性中继透镜 250 以 1 倍或稍微更大的横向放大率对空间光调制器 170 进行成像,提供尺寸可以与一帧 35mm 电影胶卷的成像区域相比较的真实的中间图像 260。因此,投影透镜 270 可能是设计成投射 35mm 电

影图像的常规投影透镜,例如目前由德国 Bad Kreuznach 的 Schneider-Kreuznach 生产的投影透镜。

[0093] 尽管图 4 描述的成像透镜 200 看起来比图 2 的成像透镜更复杂,但是实际上图 4 的投影透镜 270 和中继透镜 250 更容易设计和生产,因此成本更低,于是现在等效的统一成像透镜 200 存在于商用 DLP 影院投影仪中。部分是因为以近 1 倍放大率工作比以高放大率工作更容易提供长工作距离 245。另外,这种途径使得能够通过在中间图像 260 处或其附近提供方便插入去斑器 180 例如移动扩散器的位置来实现激光去斑。在此系统中,去斑器 180 优选是包括分散布置的小透镜的小透镜阵列,所述小透镜具有一个或更多个成像像素的尺寸。在使用去斑器 180 时,投影透镜 270 优选是比中继透镜 250 更快的透镜($\sim F/3$)。

[0094] 在此背景下,应当注意,发明者已经组装并测试了具有图 2、图 3A 和图 3B 所描述的一般结构但是使用图 4 的成像透镜 200 以及中继透镜 250、中间图像 260 和投影透镜 270 的基于激光的实验性投影仪 102。在操作中,系统的一种原型机型显示出偏振对比度的损失,从而当投影仪用于低亮度输出(例如 3000 流明)时,蓝光通道偏振对比度是 $\sim 400:1$ 或更大,但是当投影仪在高于 ~ 6000 流明的水平操作时,无去斑器 180 的情况下该偏振对比度退化为 $\sim 100:1$,有去斑器的情况下该偏振对比度退化为 $\sim 150:1$ 。特别地,对于蓝色影像,偏振改变或偏振损失最明显,因为蓝光表现出更高的光吸收水平。对于佩戴偏振识别镜的观众,偏振的改变引起所投影立体图像的可感知的干扰或幻影。尽管使用 Real-D 提供的幻影校正数字后期处理方法可以补救这种干扰,但本发明提供更优选的解决方案,其中可以使用内部透镜设计校正来消除对这种校正的需求。

[0095] 特别地,由于偏振对比度随着光级退化,这与问题起源于热致应力双折射的发现是一致的。将变得明显的是,提供一种涉及在中继透镜 250 和投影透镜 270 的设计中选择地使用光学玻璃的解决方案。如图 4 的实施例所描述,这两种透镜通常是双高斯型透镜。基本高斯透镜追溯到 1800 年代,C. F. Gauss 和后来的 Alvan Clark 发明了原始的形式。首先,C. F. Gauss 通过在单个凸透镜和凹透镜设计上附加新月形透镜改进了 Fraunhofer 望远镜物镜。后来 Alvan Clark 将两个这种透镜背靠背放置,从而获得了双高斯设计。Paul Rudolph 通过使用双胶透镜校正色差而作出进一步改进,如美国专利 US 583,336 中所描述。如 Rudolph 所演示,双高斯透镜由背靠背的两个高斯透镜组成,形成位于孔径光阑 230 附近的两组透镜元件 208,其中这两组的透镜元件可以相同。

[0096] 图 5A 描述了现有技术的双高斯类成像透镜 200,其沿着光轴 145 将物表面 195 成像到远处的像平面(未示出)。在普通的基本形式中,它由位于孔径光阑 230 附近的由火石类玻璃制成的一对内部负透镜元件 206b 和由冕牌玻璃组成的一对外部正透镜元件 206a 组成。在该示例中,孔径光阑 230 (高斯透镜组件)两侧的透镜元件设计是不相同的。

[0097] 图 5B 所示的玻璃表格 210 示出了冕牌玻璃和火石玻璃的重要特征,该表是绘制出由 Schott Class 公司出版的广泛认可的玻璃表格数据的“阿贝(Abbe)表”。冕牌玻璃 215 具有低色散(用高阿贝数 $v_d > 50$ 表示)并且一般具有低折射率(n_d),而火石玻璃 217 具有相对较高的色散(低阿贝数 $v_d < 50$)并且一般具有较高的折射率。在中间阿贝数 $v_d \sim 50$ 附近发现具有中间色散属性的弱火石玻璃或冕牌玻璃。在图 5A 中,透镜元件也被确定为用冕牌玻璃 215 制造的冕牌透镜元件 220 或用火石玻璃 217 制造的火石透镜元件 222。

[0098] 双高斯设计途径的一般对称性和光学功率分散到许多元件中减小了由透镜系统

带来的光学象差。它形成了如今使用中的许多相机透镜的基础,尤其是用于 35mm 和其他小格式相机中的大孔径标准透镜。完全对称的设计不会出现彗形象差、失真和 TCA (横向色差或横向颜色)。存在很多设计的变体,其中添加了额外的透镜元件,或具有关于孔径光阑 230 的不对称设计,其牺牲对称性以实现其他目的。例如, R. Mercado 的美国专利 US 4, 704, 011 描述了双高斯式摄影物镜,而 W. Reineckle 等人的美国专利 US 6, 795, 255 描述了用于从胶卷投影图像的双高斯式电影透镜,并且 D. DeJager 所属且共同授让的美国专利 US 5, 172, 275 描述了应用于电影胶片扫描的复杂的双高斯式透镜。

[0099] 图 6A 图示了具有带有两组透镜元件 208 的双高斯透镜设计的第一示例性投影透镜 270 的设计,其类似于图 4 所示的成像透镜 200 中的投影透镜 270。投影透镜 270 具有位于孔径光阑 230 附近的两个内部负透镜元件 402 和 403,其为火石透镜元件 222,其中负透镜元件 402 使用 Schott SF1 玻璃制造,而负透镜元件 403 使用 SF2 玻璃制造。投影透镜 270 还具有 4 个外部正透镜元件 400、401、404 和 405,其均为冕牌透镜元件 220。最右端的最大的正透镜元件 405 使用 Ohara S-BSM-10 制造,而其他的正透镜元件 400、401 和 404 使用来自 Ohara Glass 公司的 Ohara S-LAM-60 制造。这些玻璃具有近似的 Schott 玻璃等价物,其分别为 N-SK10 和 N-LAF35。沿着穿过投影透镜 270 的光线的路径显示出光学射线 235。

[0100] 图 6B 示出了描述图 6A 中的示例性投影透镜 270 的广谱 MTF 性能的调制传递函数 (MTF)图 300。尽管不受衍射所限,还是可以看出 MTF 在成像区域内 50cy/mm 处平均达到大约 65%。

[0101] 图 6C 描述了第一示例性中继透镜 250 的设计,它是双高斯透镜设计的伸长版本,类似于图 4 所示的中继透镜 250。具有两组透镜元件 208 加上物镜(透镜元件 416)的中继透镜 250 被用来形成空间光调制器 170 (其位于物平面处)的中间图像 260 (在像平面处)。该透镜设计包括位于孔径光阑 230 附近的一对负透镜元件 412 和 413,其为使用 Schott SF4 制造的火石透镜元件 222。该中继透镜 250 还包括一组正透镜元件 410、411、414 和 415,其为冕牌透镜元件 220。正透镜元件 410 和 411 使用 Ohara S-BAL35 制造。正透镜元件 414 使用 Ohara S-LAM54 制造,而正透镜元件 415 使用 Ohara S-NSL3 制造。中继透镜 250 还包括位于中间图像 260 附近的正物镜元件 416,其也使用 Ohara S-LAM54 制造。也示出由非倾斜平面元件表示的二向色结合器 165。

[0102] 图 6D 用 MTF 图 300 描述了图 6C 的中继透镜 250 的光学性能。该光学性能几乎是衍射限制的,其在成像区域内 50cy/mm 处的平均 MTF 大约是 79%。

[0103] 如前所述,已经发现当为了适度高的屏幕亮度水平(6000-11000 流明)而发射激光到显示器表面 190 时,与低屏幕亮度水平下大约 400:1 的偏振对比度相比,包括常规中继透镜 250 (即如图 6C 所示)和常规投影透镜 270 (即如图 6A 所示)的常规成像透镜 200 将承受蓝光偏振图像对比度降至大约 150:1 或更小和蓝光图像幻影。当不存在成像透镜组件时,输出光的偏振对比度的单独测量显示亮度水平几乎未变化,因此确认中继透镜 250 和投影透镜 270 是罪魁祸首。特别地,这些测量显示蓝光通道(465nm)偏振对比度退化至大约 100:1,而绿光和红光对比度水平仍然较高(大约 300:1)。一并考虑,该数据有力地显示出偏振对比度退化是因为热致应力双折射效应,该效应在更高的功率水平下只会恶化。由于大多数光学玻璃(除了最显著的熔融石英)承受较高的蓝光吸收,因此蓝光吸收可能更容

易地引起应力双折射。因此,应力双折射可能不同程度地影响不同颜色通道中的图像质量。

[0104] 热致应力双折射是在玻璃中由温度(T)引起的折射率($\Delta n(\lambda, T)$)的变化,而且它在功能上取决于许多参数,包括波长 λ 、玻璃的吸收(α)、玻璃的光学应力敏感性(κ)和热膨胀系数(ρ)。它还取决于穿过玻璃的光的光强(辐照度)或功率密度(例如,以瓦/平方毫米、流明/平方毫米或勒克斯为单位)的空间-时间分布。

[0105] 图 7A-7F 示出能够透过图 2、图 3A、图 3B 和图 4 所示的投影仪 102 的光学装置的示例性光强分布。如图 3A 和图 3B 所示,激光结合组件 125 可以产生多个输出光束 140,其结合以充满或部分充满孔径 130。由于激光器阵列 120 的结构可以具有一个或更多个分隔的偏移激光发射器阵列 122,因此在所描述的光束 140 中获得多个个体光束 140'。结合来自多个激光器阵列 120 的光束增加了个体光束 140' 的数量,其中许多光束已经横穿不同的光程长度达到孔径 130。随着个体光束 140' 传播,它们融合并相互重叠。根据在光学系统中的位置、各种个体光束 140' 横穿的相对光程长度以及光线均化器、积分器或扩散器的使用,某些光束 140' 或激光器阵列 120 的图像或其结合可能比其他个体光束 140' 或其结合更可辨识。根据在光学系统中的位置,净结果是光强分布的横断面可以显示出不同量的结构。

[0106] 为了详细描述这最后一点,图 7A 示出了光源组件 115 的孔径 130 附近的模拟光强分布 320,其中来自最里面的激光器阵列 120 的个体光束 140' 比来自最外面的激光器阵列的光束更散焦。图 7B 示出了图 7A 的光强分布 320 在切片位置 321 处的两个横断面轮廓 322。这些光强分布 320 是高度结构化而非空间均匀的,因为多个光束 140' 只是部分相互重叠,而且从中心到边缘的重叠量不同。

[0107] 与图 7A 示出的相似的图案遍及光学系统。例如在光积分器 155 (图 3B)的远角视场中,出现了如图 7E 所示的类似图案化的光强分布 326,尽管积分棒内的多重反弹使它更复杂。根据设计意图,如图 7C 所示的轮廓视图,积分棒在其输出面上产生名义上均匀的光强分布 323。图 7D 示出了对应于图 7C 所示的切片位置 324 的相应横断面轮廓。

[0108] 然后积分棒的输出表面上的光强分布 323 被重新成像以照明该颜色通道的空间光调制器 170。中继透镜 250 (图 4)对空间光调制器 170 重新成像以形成结合的白光图像(取决于图像内容)作为真实的空间中间图像 260,随后投影透镜 270 将该真实的空间中间图像投影到显示器表面 190 上。在中继透镜 250 和投影透镜 270 的孔径光阑处或其附近,根据应用在系统上的光散射或角平均,会出现仿效图 7E 的光强分布 326 的高度结构化的光强图案。例如,图 7F 示出了中继透镜 250 的孔径光阑 230 附近的示例性模拟光强分布 327,而图 7G 示出了投影透镜 270 的孔径光阑 230 附近的示例性模拟光强分布 328(没有包括去斑器 180)。

[0109] 应当注意,去斑器 180 的使用可能导致传播光的角度扩大,或导致传播光在投影透镜中被空间-时间上平均,或同时导致两种效果。因此,投影透镜 270 的孔径光阑 230 处或附近的光强分布 320 的微观结构可能难以清晰地定义,也不是时间上静止的。虽然如此,中继透镜 250 和投影透镜 270 中的透镜元件 205 可以承受具有高光学功率密度的透射光,特别是在孔径光阑 320 附近,此处光强分布 326 和 327 可能具有会聚在光强分布的微观结构的多个峰值中的光。这些光能的会聚可能在所有这些透镜组件中引起热致光学应力双折射,但是在孔径光阑 230 附近的透镜元件 205 中尤其如此。

[0110] 为了进一步理解双折射的背景,应当了解,可以用波动方程来描述光的传播,包括描述作为距离 x 和时间 t 的函数的平面偏振波 $\Psi(x, t)$ 的方程(3),其中 $A(x, t)$ 是振幅函数,和 $\varphi(x, t)$ 是扰动的相位:

[0111]

$$\Psi(x, t) = A(x, t)e^{i\varphi(x, t)} \quad (3)$$

[0112] 传播波的相位可以写作:

[0113]

$$\varphi(x, t) = \omega t - kx = \omega(t - x/v) \quad (4)$$

[0114] 其中 ω 是相位随时间的变化率, k 是相位随距离的变化率, v 是波速。值 ω 也被称为角频率,其中 $\omega = 2\pi / v$, 而值 k 也被称为传播数,其中 $k = 2\pi / \lambda_0$ 。光在自由空间中的频率 v 和波长 λ_0 与光速相关, $c = \lambda_0 / v$ 。

[0115] 当光进入并穿过光学材料时,根据入射角、入射光相对于介质的偏振方向、光学材料的折射率 n 和材料的厚度,它将承受可变的反射率和相位变化 $\Delta\varphi$ 。模拟表面反射系数或透射的 Fresnel 方程影响方程(3)的振幅项。材料或介质的折射率基本是光在真空中的速度 c 与在介质中的速度 v 的比($n=c/v$)。代入方程(4)中,得到关于折射率的相位:

[0116]

$$\varphi(x, t) = \omega t - (2\pi n / \lambda_0)x \quad (5)$$

[0117] 即使在折射率恒定的各向同性材料中,在不同的光束传播角下也可能发生不同的相位变化 $\Delta\varphi$,因为材料中光程长度(d/n)根据角度的不同而变化,其中 d 是材料的厚度。然而,在复杂结构例如双折射材料的情况下,在透射光中可能导致不同旋转量和椭圆率。因此,根据入射光的角度和偏振状态可能发生不同的相位变化 $\Delta\varphi$; ($\Delta\varphi = \Delta\varphi_{sp} = \varphi_s - \varphi_p$)。在该命名法中,“s”和“p”代表光的电场矢量是垂直于入射平面振荡(s-偏振)到表面,或 p-偏振光,其中电场矢量在整个入射角范围上平行于入射面振荡。

[0118] 双折射材料相对于偏振而言是非各向同性材料。也就是说,双折射是折射率的方向变化($\Delta n_{sp} = n_s - n_p = n_x - n_y$),而且可以通过固有材料属性、通过形成双折射的亚波长结构或通过诱导的机械应力来提供。延迟是表达为距离的最终相位变化($R = \Delta\varphi\lambda$),其中相位变化 $\Delta\varphi(x, d, \lambda) = 2\pi d(\Delta n / \lambda)$ 。例如通过正确定向具有四分之一波长 $\lambda/4$ 延迟(在 550nm 下约等于 138nm 的延迟)的双应力元件(波片)可以提供 $\pi/2$ (或 90°) 相位变化 $\Delta\varphi$ 。

[0119] 特别地,由于元件和 / 或安装材料之间的热膨胀系数的不匹配,施加均匀温度可能产生光学组件例如胶合元件的机械应力 σ 的变化。可能与之前讨论的光强分布微观结构有关的温度梯度也在单个均匀元件中诱发应力。制造或加工过程中产生的残余应力或来自压力、惯性或振荡负载的应力状态都可能在光学元件中引起双折射。其实,机械诱发的或残余的应力的作用都改变光学材料的折射率。

[0120] 在这种情况下,在投影仪 102 的中继透镜和投影透镜中特别是在局部区域施加足够的温度将引起热致光学应力双折射。所导致的双折射差值正比于两个空间上接近的位置处的主机械应力或应力张量的诱发差异, $\Delta\sigma_{1,2} = (\sigma_1(x, y, z) - \sigma_2(x, y, z))$, 如方程(4)给出:

$$\Delta n = \Delta n_{1,2}(x, y, z) = \kappa \Delta\sigma_{1,2} \quad (6)$$

[0122] 其中 κ 是材料的应力光学系数,单位是 mm^2/N ,而诱发的机械应力 σ 的单位通常是 N/mm^2 (MPa)。可以用热量引起的材料温度变化来书写诱发的应力 σ ,或等效地写出诱发的应力双折射 Δn :

$$[0123] \quad \Delta n \approx \rho E \Delta T \kappa / (1 - \mu) \quad (7)$$

[0124] 其中 ΔT 是诱发的温度变化。在这个方程中, ρ 是热膨胀系数(CTE),其针对室温范围的玻璃,单位通常是 $10^{-6}/^\circ\text{K}$ 。变量 E 是杨氏模量,其为各向同性弹性材料的刚度的度量标准(metric),单位通常是 N/mm^2 。泊松比即无单位变量 μ 是材料对应变(拉伸或收缩)的正交响应的度量标准。

[0125] 诱发的温度变化 ΔT 可能与光吸收有关。振幅函数 $A(x, t)$ 可以被展开以显示其对光吸收 α 的依赖性 :

$$[0126] \quad A(x, t) = A(x) = A_0 e^{-\alpha x/2} \quad (8)$$

[0127] 其中 A_0 是初始振幅。这导致描述光吸收的指数性质的 Beer 定律 :

$$[0128] \quad I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (9)$$

[0129] 其中 $I(x)$ 是单位为 W/m^2 的光强(辐照度),而 I_0 是初始光强。

[0130] 作为光强 $I(x)$ 和内部透射率 t_i 或吸收系数 α 的函数的在厚度为 x 的材料中吸收的光所产生的单位体积热量 $Q(x)$ (单位是 W/m^3) 是 :

$$[0131] \quad Q(x) = I(x) (1 - t_i) / x = I(x) (1 - e^{-\alpha x}) / x \quad (10)$$

[0132] 热传导定律或 Fourier 定律以一维形式给出为 $q_x = -K dT/dx$,其中 q_x 是以 W/m^2 为单位的局部热通量,而 K 是导热系数(单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。应当注意,尽管热传递和平衡(稳态)取决于热传导、热对流和热辐射,对于光学结构来说,热传导经常是确定温度梯度或变化时的最重要因素。另外,包括玻璃在内的大多数材料的导热系数 K 在较宽温度范围内是相当恒定的。可以对 Fourier 定律进行积分以得到由于光吸收而影响一定区域的温度变化 ΔT :

$$[0133] \quad \Delta T \approx I_0 L x \alpha / 4K \quad (11)$$

[0134] 其中 L 是光学元件的轴向厚度。

[0135] 把方程(11)代入方程(7)可以将应力诱发的双折射与入射光强和材料吸收联系起来 :

$$[0136] \quad \Delta n \approx I_0 L x \frac{\rho \kappa \alpha E}{4K(1 - \mu)} \quad (12)$$

[0137] 该方程提出了对本发明有益的几个品质因数或度量标准。第一热应力双折射度量标准 :

$$[0138] \quad M_1 = \frac{\rho \kappa \alpha E}{K(1 - \mu)} \quad (13)$$

[0139] 是唯材料(玻璃)应力双折射度量标准,其在选择备选玻璃时可能是有用的。

[0140] 第二强度加权热应力双折射度量标准 :

$$[0141] \quad M_2 = I_0 L M_1 = I_0 L \frac{\rho \kappa \alpha E}{K(1 - \mu)} \quad (14)$$

[0142] 是非常有价值的,因为它将入射到光学元件的光强(即光功率密度) I_0 和光学元件的轴向厚度 (L) 考虑进来。

[0143] 在方程(12)中,距离 x 是材料内的位置,其与方程(9)给出的强度和方程(11)给出的温度变化导致作为位置的函数的应力双折射局部变化 Δn 的事实有关。将 x 包括在度量标准 M_1 或 M_2 中将增加与不同透镜元件的玻璃选择相关的少许见识。

[0144] 中间热应力双折射度量标准 $M_3=M_1 \cdot L$ 表明较薄的透镜元件(较小的厚度 L)可以承受较高的 M_1 值。然而,将看到, M_1 和 I_0 的变化往往主导选择和设计过程。

[0145] 第二度量标准 M_2 将透镜元件 205 中存在的功率密度考虑进来,其能够贯穿中继透镜 250 和投影透镜 270 的透镜组件变化。如透镜中的光强分布(参见图 7A-7E)可以证明,具有最高光强的微结构出现在孔径光阑 230 附近的区域中。因此,发明者已经发现这些区域中的透镜元件的玻璃选择最为关键。因此,已经发现强度加权热应力双折射度量标准 M_2 是有用的,只要可以合理估测峰值光强(I_0)。

[0146] 发明人使用有限元分析(FEA)来以热力学机械方式模拟由图 6A 的投影透镜 270 中的光吸收产生的温度诱发的应力。该模型表明穿过距投影透镜 270 的孔径光阑 230 最近的负透镜元件 402 和 403 的光通量水平可以比穿过最外面的正透镜元件 400 和 405 的光水平高达 8 倍(或更高),使得局部区域温度改变 ΔT 达大约 5° 。这些局部温度变化进而导致机械应力,因此双折射的折射率改变 Δn 。

[0147] 基于此背景,图 8A-8D 给出的表格依据名称提供了现代玻璃的分类数据以及关键参数,包括其折射率 n_d 、阿贝数 v_d 、内部透射率 t_i 、吸收 α (其中 $\alpha = -\ln(t_i)/x$)、应力光学系数 κ 、导热系数 K 、热膨胀系数(CTE) ρ 、泊松比(μ)、杨氏模量(E)和唯玻璃(glass-only)品质因数 M_1 。使用在 $\lambda = 460\text{nm}$ 时的内部透射率数值来计算吸收系数值(α)。尽管可以使用其他的评估波长,大多数玻璃都在 UV 到蓝光光谱范围内承受内部吸收比的增加,因此与绿光或红光光谱范围相比具有增大的应力双折射可能性。图 8A 示出了一组低应力双折射敏感性玻璃的各种玻璃属性。图 8B 示出了一组中度和高应力双折射敏感性玻璃的相同属性。图 8C 和图 8D 示出了分别针对图 8A 和图 8B 中的玻璃的热应力双折射度量标准 M_1' 、 M_1'' 和 M_1 的计算值。

[0148] 图 8A-8D 的表格显示了可在组合的 Schott 和 Ohara 玻璃种类中获得的玻璃子集($< 15\%$),其主要特征是不成比例地共享具有低热致应力双折射有利属性的玻璃。最常见的玻璃之一即 Schott BK-7 玻璃具有良好的低品质因数 M_1 (约 $0.51 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$),而新型无铅玻璃(例如 N-SF 2 和 N-SF4)往往比它们所取代的原先玻璃(SF-2 和 SF-4)具有更高的 M_1 值。图 8A-8D 的表格只包括 Schott 或 Ohara 光学玻璃,但是可以在设计中适当地分析和使用来自其他制造商的可替换的或等效的玻璃。

[0149] 至于是否被视为冕牌玻璃或火石玻璃,图 8A-8D 的表格中的玻璃也被鉴定。根据该玻璃度量标准,涉及最小化热致应力双折射的最佳可能玻璃依然是熔融石英(以 Schott Lithosil-Q 为代表)和 Schott SF-57(或其等效物,例如 Ohara PBH56),因为它们具有非常低或可忽略的热应力双折射度量标准值($M_1 < 0.1 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$)。这些玻璃与 Schmidt 等人和其他人所建议的玻璃是相同的。在检查几乎覆盖所有可选玻璃范围的该表格时,应当注意,从最佳玻璃(Lithosil; $M_1 \sim 0.001 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$)到最差玻璃(Ohara S-NPH2; $M_1 \sim 28.5 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$),唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 是在 25000:1 的范围内变化。尤其是,从包含熔融石英、SF-57 和 PBH56 的可忽略应力双折射敏感性的玻璃组群($M_1 \approx 0.001 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$)到最优良的低应力双折射敏感性玻璃组群例如 Schott LLF1 或 Ohara S-NSL36 ($M_1 \approx 0.36 \times 10^{-6}\text{W}^{-1}$ 到

$0.46 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$), M_1 值将跳高大约 8 倍或更高。

[0150] 图 8C-8D 的表格还包括两个成分品质因数 M_1' 和 M_1'' 。第一成分品质因数 $M_1' = \rho K \alpha$ 并且仅考虑主要参数: 热膨胀系数 (ρ)、应力光学系数 (κ) 和吸收系数 (α), 它们的值在不同的玻璃中变化范围很广, 分别为约 30 倍、约 200 倍和约 950 倍。关于第一成分品质因数 M_1' , 熔融石英具有最小的值, 因为它的吸收和 CTE 都非常低, 而 SF-57 和 PBH56 表现良好是因为它们的应力光学系数低。类似地, 关于唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 的最差玻璃 Schott N-SF54 和 Ohara S-NPH14 也是关于第一成分品质因数 M_1' 度量标准的最差玻璃, 其值比 Lithosil 熔融石英大 6000-12000。

[0151] 然而, 为了选择用于透镜设计的玻璃的目的, 精确地区分具有低应力双折射敏感性或中等应力双折射敏感性的玻璃是重要的。应当注意, 若干材料属性即泊松比 μ 、杨氏模量 E 和导热系数 α 均各自在约 2 到 2.5 倍的有限范围内变化, 因此对唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 具有次级影响。然而, 在为透镜设计作出玻璃选择决定时, 这些次级因素可能是重要的。因此, 图 8C-8D 的表格也示出了仅针对这些项的第二成分品质因数 M_1'' , 其中 $M_1'' = E / (K(1-\mu))$ 且 $M_1 = M_1' \cdot M_1''$ 。

[0152] 在观察第二成分品质因数 M_1'' 的数据栏时, 应当注意到, 熔融石英 (Lithosil) 再次表现良好, 因为其泊松比 μ 和导热系数 K 具有有利的数值。但是诸如 Ohara S-NSL36、Ohara S-NSL-3、Schott LF-5 和 Schott LLF1 等玻璃与其他玻璃相比也是有优势的, 因为它们的 M_1'' 值比最差的玻璃低 1/2-2/3。因此, 使用 M_1' 替代 M_1 可能给出关于具有低或中等 M_1 值的玻璃的应力敏感性的错误指示, 并且在透镜设计中可能导致拙劣的玻璃选择。

[0153] 图 9A 和图 9B 所示的附表分别提供图 6A 的投影透镜 270 和图 6C 的中继透镜 250 的第一示例性设计的透镜元件的强度加权热应力双折射度量标准 M_2 的估计值。在这些表格中的每一个中, 通过图 6A 的透镜元件部件号来识别透镜元件。在两个表格中, 给出了每个透镜元件的唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 的数值, 其对应于图 8A-8D 给出的数值。也给出了每个透镜组件的总 M_1 值。在估算强度加权热应力双折射度量标准 M_2 时, 使用了透镜元件的轴向厚度值 (L), 但是作为替代也可以替换值, 例如给定透镜元件的横断光圈的平均透镜厚度。这些表格还包括每个元件上的标准化功率负载, 其基于单位为 W/mm^2 或 lux 的模拟估计光学功率负载。然后使用标准化功率负载值估算每个透镜元件的强度加权热应力双折射度量标准 M_2 。也给出了每个透镜组件的总 M_2 值。

[0154] 图 6A-6B 的第一示例性投影透镜元件优先针对图像质量进行设计, 而热致应力双折射并非忽略, 但是作为第二考虑因素。因此, 图 9A 的表格示出了一组玻璃, 其包括始终稳定在唯玻璃热应力双折射度量标准的中等范围 (平均 $M_1 \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 内的玻璃。该设计中使用的玻璃不包括具有可忽略 M_1 值 (例如 PBH56 或熔融石英) 的任何玻璃, 或具有极高 M_1 值 (Schott N-SF2 或 N-SF4) 的任何玻璃。因为各种元件具有可比较的热应力双折射度量标准 M_1 值, 并且因为最高的应用功率密度发生在距离空间光调制器 170 最近的透镜元件 400-402 处, 所以总强度加权热应力双折射度量标准 M_2 由透镜元件 400-402 主导。

[0155] 图 10A 示出了第二示例性投影透镜 270 的设计。与图 6A 的第一示例性投影透镜相似, 该透镜一般具有经典双高斯形式, 其具有两组透镜元件 208, 即在孔径光阑 230 周围的四个内部负透镜元件 422、423、424 和 425 以及四个外部正透镜元件 420、421、426 和 427。该透镜优先针对减小热应力双折射进行设计, 因此所有的透镜元件都是熔融石英透镜元件

428 或 Ohara PBH56 透镜元件 429。特别地,四个内部火石玻璃透镜元件 422、423、424 和 425 是使用极低应力的 Ohara PBH56 玻璃制造的,而四个外部冕牌玻璃透镜元件 420、421、426 和 427 都是使用最低吸收的冕牌玻璃、熔融石英制造的。

[0156] 在考虑图 8A-8D 的表格时,应当注意,Schott SF57 玻璃和 Ohara S-FSL-5 的唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 值是 Ohara PBH56 的大约 1/2。然而,其他考虑因素影响设计选择。特别地,Schott SF57 类玻璃的供应量非常不足,而 PBH56 却很容易大量获得。此外,Ohara S-FSL-5 玻璃非常昂贵(大约是 BK7 的 13 倍),并且对着色的高敏感性不是非常理想。

[0157] 图 11 的表格示出了图 10A 的第二示例性投影透镜的热应力双折射度量标准值。可以看出该配置具有显著减小的 M_1 品质因数,其在数值上是图 6A 的第一示例性投影透镜的大约 1/35(与图 9A 的表格比较)。然而,从图 10B 中的 MTF 图 300 可以看出,即使图 10A 的第二示例性投影透镜具有八个透镜元件而非六个,图像质量也相当受损。特别地,如前面关于图 6B 所述,第一示例性投影透镜在成像区域内 50cy/mm 处提供大约 65%MTF。相比之下,图 10A 的第二示例性投影透镜提供大约 68% 轴上 MTF,但是平均不可接受的 32% 轴外 MTF。轴外 MTF 只是第一示例性投影透镜所实现的一半。

[0158] 类似地,图 10C 示出了第二示例性中继透镜 250,其优先针对减小热致应力双折射敏感性进行设计。特别地,所有透镜元件 430-436 都具有可忽略的 M_1 值,并且都是熔融石英透镜元件 437 或 SF-57 透镜元件 438。该透镜具有与图 6C 的中继透镜 250 相同的整体配置,除了它更弱地与双高斯式透镜相似。然而,与图 10A 的投影透镜类似,位于孔径光阑 230 附近的两个最内部透镜元件 432 和 433 是使用低应力火石玻璃(这种情况下是 SF-57)制造的负透镜。外部透镜元件 430、431、434 和 435 是使用低吸收冕牌玻璃熔融石英制造的。另外,位于中间图像 260 附近的物镜元件 436 是使用 SF-57 制造的。

[0159] 图 11B 示出了给出图 10C 的第二示例性中继透镜的热应力双折射度量标准 M_1 和 M_2 的数值的表格。将之与图 9B 给出的数值作比较,可以看出,其比图 6C 的第一示例性中继透镜低很多(相差大约 90 倍),表明对热致应力双折射的预期敏感性将被极大地降低。然而,如图 10D 的相应 MTF 图 300 所示,图 10C 的第二示例性中继透镜的图像质量与图 6C 的第一示例性中继透镜一样受损。特别地,鉴于图 6D 在第一示例性中继透镜的成像区域内 50cy/mm 处显示出大约 79%MTF,而图 10D 显示出第二示例性中继透镜提供大约 71% 轴上 MTF,和仅大约 56% 轴外的平均值。

[0160] 这些结果表明给予良好的图像质量和低热致应力双折射可比较的优先级的平衡设计途径对投影透镜和中继透镜的设计都是有利的。图 12A 示出了第三示例性投影透镜 270 的设计,其与其前身的不同之处在于对良好的图像质量和低热致应力双折射给予平衡的设计强调。如同图 6A 和图 10A 所示的第一和第二示例性投影透镜,该投影透镜在外观上也具有由两组透镜元件 208 组成的经典双高斯形式,除了在孔径光阑 230 左边的较大的负新月形透镜元件 442 是冕牌熔融石英透镜元件 446 而非火石玻璃(PBH56),这与这种透镜类型的经典形式不同。较小的负新月形透镜元件 443 是火石玻璃 PBH56 透镜元件 447。然而,其他透镜元件即四个外部冕牌透镜元件 440、441、444 和 445 是 Ohara S-LAL 18 透镜元件 448,而非熔融石英或 PBH56 透镜元件。

[0161] 在进行该透镜系统的设计时,高折射率弱冕牌玻璃例如 Ohara S-LAL18 的使用对于这些外部元件提供与图 10A 的第二示例性投影透镜有关的改进的 MTF 性能且同时

提供与图 6A 的第一示例性投影透镜有关的改进的热应力双折射性能是有利的。在备选的高倍率、弱冕牌玻璃中,与其他玻璃例如 Ohara S-LAL8 ($M_1 \approx 1.15 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)、Ohara S-LAL54 ($M_1 \approx 1.31 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 或 Ohara S-LAL61 ($M_1 \approx 1.56 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 或 Ohara S-LAH66 ($M_1 \approx 1.09 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 相比,Ohara S-LAL18 具有可用的最低的唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 值($M_1 \approx 0.726 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。

[0162] 图 12B 描绘了图 12A 的第三示例性投影透镜 270 的 MTF 图 300。在所有场点中,在 50cy/mm 处 MTF 平均为约 59%。尽管图像质量不如第一示例性投影透镜(见图 6B)那么好,它比第二示例性投影透镜(见图 10B)提供的性能好得多。

[0163] 为这些第三示例性投影透镜和中继透镜设计提供附图 13A 和 13B,其给出热应力双折射度量标准 M_1 和 M_2 的计算值。这些表格可以与图 9A-9B 和图 11A-11B 给出的投影透镜 270 和中继透镜 250 的两种替换设计的那些表格比较,以探索关于减小应力双折射与提供增强的图像质量之间的不同权衡。

[0164] 图 13A 中的表格显示出总体的唯玻璃热应力双折射度量标准具有值 $M_1=2.95 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$,该值比图 6A 的第一示例性透镜的值(见图 9A)低大约 1/2。该表格还显示出将透镜元件厚度和入射光强考虑在内的强度加权热应力双折射度量标准 M_2 甚至更大,将近 3 倍改进。虽然最内部的透镜元件 442 和 443 经受最高的热负载,但它们的 M_1 值如此低以至于即使将入射光强考虑在内 M_2 值仍然很低。因此,可以从这些元件预期最小对比度损失。尽管外部透镜元件 440、441、444 和 445 具有较高的 M_1 值,它们的功率负载更中等,而且它们的 M_2 值是很小的。

[0165] 图 13A 的数据与图 9A 的数据的比较表明改进与应力双折射有关的透镜设计的更多机会,特别是关于透镜元件 444 的设计。如果可以使用具有低 M_1 值的玻璃制造该透镜元件,对应力双折射的敏感性可以显著地提高。尽管使用熔融石英或 PBH56 无疑可以帮助改进应力双折射,但它们的色散性能将会对图像质量产生负面影响。可替换地,靠近玻璃表格(图 5B)的中间的玻璃例如弱冕牌玻璃或弱火石玻璃具有中等色散和低应力双折射特性,其可以用于这一元件来帮助平衡色差且同时也减小应力双折射。

[0166] 作为一个示例,可以替代地使用低折射率($n_d=1.517$)弱冕牌玻璃($v_d=52.4$)例如 Ohara S-NSL36,其具有比高折射率($n_d=1.729$)弱冕牌($v_d=54.7$) Ohara S-LAL18 ($M_1=0.726 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 更小的唯玻璃热应力双折射度量标准($M_1=0.463 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。这可能是有用的,因为与当前的第三示例性投影透镜相比,其可能每 M_2 减小 25% 的应力双折射敏感性。类似地,具有相对低的唯玻璃品质因数值($M_1 < 0.53 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 的其他邻近的玻璃如 Ohara S-BAL-11 (低折射率冕牌, $n_d=1.572$, $v_d=57.5$, $M_1=0.529 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)、Schott LLF-1 (低折射率弱火石, $n_d=1.548$, $v_d=45.8$, $M_1=0.375 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 或 Schott LF5 (低折射率火石, $n_d=1.581$, $v_d=40.9$, $M_1=0.453 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 也可以有利地使用。然而,由于这些玻璃具有比 Ohara S-LAL18 更低的折射率,透镜元件 444 或任何一个应用了这种改变的透镜元件的形状将可能变得更严格地发送相同的光学功率,这进而可能引入更多的偏差。可以理解的是,这种替代一定会带来进一步的设计优化,包括用于其他元件的可能的校正性玻璃改变。例如,透镜元件 444 和 445 (图 12A) 之间可能需要另外一个透镜元件。

[0167] 在考虑图 8、图 11A 和图 13A 时,建议为应力双折射敏感性必须为低或可忽略的透镜设计选择玻璃时使用阈值。特别地,应用玻璃选择限制来约束对具有低热应力双折射度

量标准值(例如, $M_1 \leq 0.80 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 的玻璃的选择在许多情况下是有用的。该限制不仅包括可忽略 M_1 玻璃例如熔融石英和 PBH56, 也包括 BK7 (最常用的玻璃) 以及玻璃表格中间部分的低折射率弱火石或冕牌玻璃(如 LLF1、S-NSL36) 和其他类似的玻璃(LF5、S-BAL11)。它还包括玻璃表格中间部分的高折射率玻璃(S-LAL18 和 S-LAL7) ($M_1=0.736 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)、高折射率火石玻璃(SF6)、中等折射率火石玻璃(F2) 和两种具有用于颜色校正的有用的部分色散特性的玻璃(N-PK52A 和 N-FK51A)。当然, 位于玻璃表格中间部分的具有高($n_d > 1.70$) 或低($n_d < 1.60$) 折射率但具有更低应力双折射敏感性的新型光学玻璃的发展将显著解决这类设计问题。

[0168] 对于热致应力双折射为高优先级的透镜设计, 发明人已经发现, 如果使用具有可忽略热应力双折射度量标准 M_1 值($M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 的玻璃制造距离孔径光阑 230 最近的透镜元件(例如图 12A 中的透镜元件 442 和 443), 能够获得有利的结果。其他具有小光圈(半径尺寸)或承受高功率密度的透镜元件(通常是从孔径光阑 230 向外的下一组透镜元件, 例如图 12A 的透镜元件 441 和 444) 或者小物体附近的物镜(例如图 12C 的透镜元件 456) 也可以从这些相同的可忽略 M_1 的玻璃的使用中获益。然而, 对于图像质量优化激励其他玻璃选择的情况, 开放玻璃选择以包括低 M_1 值玻璃(例如, $0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 可以显著帮助。对于承受更小功率密度曝光的透镜元件, 玻璃选择列表可以进一步放松, 例如包括额外的中等 M_1 值玻璃(例如, $0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。因为该阈值将列表扩展到包括几种高折射率火石玻璃(例如, SF1、SF2 或 SF4) 和玻璃表格中间部分的高折射率玻璃(例如, LAH-66、LAM60、LAL54 和 LAL61), 透镜设计范围显著扩大。在某些情况下, 如果发现可以显著改善图像质量, 这些相同的中度 M_1 玻璃($0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 可以用于承受较高功率密度的更内部的透镜元件。然而, 为了使热应力双折射水平保持为低, 这种透镜元件的厚度(L) 通常应当保持为较小(例如几毫米)。使用更严格的低 M_1 阈值($M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 从考虑范围内排除了玻璃表格中超过 85% 的玻璃, 而使用不那么严格的中度 M_1 阈值($M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 排除了大约 60% 的玻璃(涉及当前的 Schott 和 Ohara 光学玻璃种类)。显然, 透镜设计者可以选择 $M_1 > 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的玻璃以满足图像质量需求, 特别是对于承受低功率密度的透镜元件, 然而这将以增加热应力双折射敏感性为代价。

[0169] 图 14A 提供图 12A 所示的第三示例性投影透镜 270 的规定, 包括半径(透镜形状或曲率)、厚度和材料的数据。所有的透镜表面都是球形的, 而不是非球形的、环面形的或圆柱形的轮廓。潜在地在一个或更多个透镜元件上使用旋转对称的非球形表面可以提供更大的设计自由度, 从而可以使用低热应力双折射敏感性玻璃(例如, $M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 而非 $M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 来制造更多的透镜元件, 同时保持图像质量。

[0170] 例如非球面系数的参数通常用来在诸如 Code V 和 Zemax 的透镜设计程序中描述非球面, 而且这些参数通常在光学文献如 R. Kingslake (Academic Press, New York, 1978) 的“Lens Design Fundamental”中描述。非球形表面通常对透镜系统的单色色差做出改良(减小的幅值)。然而, 非球形表面的使用也可以通过重新分布透镜系统中的光学功率间接地改进色差。这种表面也可以产生与前面所述的传统的双高斯透镜不同的解决方案。因此, 非球形表面的使用可以实现成像透镜或透镜系统(包括图 12A 的投影透镜 270) 的替换设计, 其可能提供更好的图像质量和针对低热应力双折射敏感性的更好的玻璃选择。例如, 在第三示例性投影透镜的设计中使用一个或更多个非球形表面可以允许透镜元件 444 (根据

其 M_2 值,其承受高功率负载)从较高应力 Ohara S-LAL18 玻璃转换到低应力 Ohara S-NSL36 玻璃,而不需要前面提出的色差补偿透镜元件。

[0171] 图 12C 示出了第三示例性中继透镜 250,其被设计为具有关于实现低应力双折射敏感性和良好图像质量的平衡的优先级。该第三示例性中继透镜具有与图 6C 和图 10C 的第一和第二示例性中继透镜相同的整体配置,但是其比图 10C 的透镜更类似于经典的双高斯式透镜。在该透镜系统中,位于孔径光阑 230 附近的两个最内部的透镜元件 452 和 453 是使用低应力火石玻璃 PBH56 制造的负 PBH56 透镜元件 457。像平面或中间图像 260 附近的物镜元件 456 也是 PBH56 透镜元件 457。透镜元件 451 是低吸收冕牌玻璃熔融石英透镜元件 459。其他的透镜元件 450、454 和 455 是 Ohara S-LAL18 透镜元件 458,其具有相对低的 M_1 值($M_1=0.726 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。在图 14B 的表格中提供了图 12C 所示的第三示例性中继透镜 250 的规定,包括半径、厚度和材料的数据。

[0172] 图 13B 给出的表格显示了图 12C 的第三示例性中继透镜的热应力双折射度量标准值。在考虑图 9B、图 11B 和图 13B 的数据时,可以看出第二示例性中继透镜(图 11B)的热应力双折射度量标准 M_1 和 M_2 比第一示例性中继透镜(图 9B)低得多(相差大约 90 倍),而第三示例性中继透镜(图 13B)的热应力双折射度量标准 M_1 和 M_2 只比第一示例性中继透镜(图 9B)低 1/2-2/3。然而,在热应力双折射敏感性方面的较小改进被更好的图像质量性能抵消。

[0173] 图 12D 示出了刻画图 12C 的第三示例性中继透镜的成像质量性能的 MTF 图 300。因为根据平衡设计的目的,该第三示例性中继透镜的图像质量相对于第二示例性中继透镜(见图 10D)显著提高,具有在 50cy/mm 处具有约 79%MTF。第三示例性中继透镜对所有场位置提供几乎衍射限制的性能,这与第一示例性中继透镜(见图 6D)非常相似。

[0174] 在检查图 13B 中针对图 12C 的第三示例性中继透镜 250 的热应力双折射敏感性数据时,可以看出透镜元件 454 是强度加权热应力双折射度量标准 M_2 的主要贡献者。这表明将透镜元件 454 从 SLAL-18 ($M_1=0.726 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 改变到更低应力玻璃例如 Ohara S-NSL36 ($M_1=0.462 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$) 将极大地减小热应力双折射敏感性。当然,由于这种玻璃具有较低的折射率,该透镜必须被重新设计以补偿光学功率的损失,同时名义上保持图像质量。可以使用额外的透镜元件、非球形表面或其他校正途径来实现这一目的。

[0175] 在图 14A 和图 14B 中规定并在图 12A 和图 12B 中示出透镜设计被制造、组装并在本发明的投影仪 102 (图 2)中测试。该投影仪使用包括多个激光器阵列 120 的光源组件 115 和组合光学装置,大体上与图 2、图 3A 和图 3B 相关的设计原理一致。该投影仪还使用图 4 的基本成像透镜结构,其中用图 12A 和图 12C 的第三示例性投影透镜和中继透镜替换图 6A 和图 6C 的第一示例性投影透镜和中继透镜。

[0176] 当使用图 12A 和图 12C 的第三示例性投影透镜和中继透镜时,在提供大约 11000 屏幕流明的工作投影仪中观察到偏振对比度水平的显著提高,其中没有去斑器 180 时稳定的偏振对比度为大约 200:1,而有运行的去斑器 180 时偏振对比度为大约 250:1。如前面所讨论,预期可以通过对透镜设计做出额外调整来实现进一步的改进。

[0177] 在考虑前面的讨论时,应当注意透镜设计者通常使用透镜设计程序优值函数来组合表达其设计意图的不同加权项,从而指导他们的工作。例如,多因素透镜设计优值函数可以包括下列项:焦距、色差校正、工作距离、玻璃选择和许多其他参数。然而,目前应力双折射不能作为普通光学设计程序如 Code VTM(Optical Research Associates, Pasadena, CA)

或 ZemaxTM (Zemax Inc., Bellevue, WA) 中透镜设计优值函数可利用的设计控制参数或项使用。而且,许多决定唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 的成分因数(例如泊松比(μ)或应力光学系数(κ))也不可作为透镜设计程序的数据库中的源数据直接利用。因此,为了减小应力双折射且同时优化图像质量,透镜设计者将通常比现在需要更少地由自动计算机处理器计算指导。

[0178] 在某些情况下,透镜设计程序可以具有以下能力,即允许透镜设计者将额外的光学材料数据引入到程序数据库,然后供应 M_1 和 M_2 方程作为透镜设计程序优值函数的计算参数和加权参数,以提供更完全地自动设计具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜的方法。

[0179] 优值函数通常应该包括一个或更多个图像质量性能项和利用热应力双折射度量标准计算的与热致应力双折射性能有关的至少一个项。然后通过优化优值函数来自动优化透镜设计。通过这种方式,将使得程序自动平衡热应力双折射敏感性和图像质量性能以及任何其他相关的透镜属性。

[0180] 可以用来指导透镜优化过程的透镜设计优值函数 Q 的一个示例是:

$$[0181] \quad Q = w_a \sum_n w_A A_n + w_b \sum_m w_B G_m + w_c \sum_i w_C M_{2,i} \quad (15)$$

[0182] 其中 A_n 是色差或图像质量校正项(例如,球形色差、散光、MTF、PSE(点扩散函数)或环绕能量), G_m 是几何限制或属性的项(例如,工作距离、角限制、收集的数值孔径(NA)或 F 数($F/\#$)、视场、放大倍数、焦距、径迹长度、透镜元件厚度限制或焦深),并且 $M_{2,i}$ 是第 i 个透镜元件的强度加权热应力双折射度量标准的项。根据特殊应用的需求,加权因数 w_a 、 w_b 、 w_c 、 W_A 、 W_B 和 W_C 用来调整优值函数中各个项的相对重要性。应当承认,在透镜设计的早期过程,光学功率负载的知识可能受限。因此,在某些实施例,透镜设计优值函数 Q 可以使用表达唯玻璃应力双折射度量标准 M_1 而非强度加权 M_2 度量标准的热应力双折射项。透镜设计优值函数 Q 可以包括多个其他项,包括允许自动化的玻璃优化的项。在此背景下,其他透镜设计参数例如透镜曲率(半径)、厚度、位置(包括胶合与否)、非球面系数的使用、玻璃选择或透镜元件的数目都是在尝试优化与优值函数相关的透镜时被调节的变量。这些变量参数可以在透镜设计优值函数中具有目标值、范围或限值。

[0183] 图 15 显示了用于设计具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜的示例性方法的流程图,其涉及优化包括热致应力双折射性能项的优值函数。透镜设计过程的输入是一组透镜设计需求 500。透镜设计需求将包括透镜设计属性例如各种几何特性(例如,焦距、 $F/\#$ 、工作距离和放大倍数),以及图像质量需求和热应力双折射敏感性需求。

[0184] 透镜设计过程的另一个输入是从具有与透镜设计过程有关的玻璃信息的存储器中可获得的玻璃材料数据 505 的数据库。优选地,玻璃材料数据 505 将包括折射率(n_d)、阿贝数(v_d)、吸收系数(α)、应力光学系数(κ)、导热系数(K)、热膨胀系数(ρ)、泊松比(μ)和杨氏模量(E)。

[0185] 计算唯玻璃双折射度量标准步骤 510 被用来确定玻璃材料数据 505 中的玻璃的唯玻璃热应力双折射度量标准(例如 M_1),以确定具有双折射度量标准 515 的玻璃材料的更新表格。通常,具有可忽略或低热应力双折射敏感性的玻璃应该被用来设计具有减小的热致应力双折射敏感性的成像透镜。因此,它对定义两组备选玻璃是有用的:第一组备选玻璃具

有可忽略热应力双折射敏感性(例如, $M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$), 而第二组备选玻璃具有最多中度热应力双折射敏感性(例如, $0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.60 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。

[0186] 确定标准透镜设计步骤 520 被用来确定根据玻璃材料数据 505 使透镜设计需求 500 无效的标准透镜设计 525。优选地, 使用在个人计算机上可用于影响公知的透镜设计方法的常用透镜设计软件包(例如, Code V™ 或 Zemax™)中的任何一个来执行确定标准透镜设计步骤 520。通常使用透镜设计优值函数 Q 和迭代优化过程来实现这种结果。通常, 这种透镜设计方法包括使用透镜设计软件来确定多个透镜的形状、尺寸、间距和光学玻璃。最终的标准设计可以存储在存储器中, 并且用作进一步优化和比较的基线。

[0187] 定义优值函数步骤 560 被用来定义优值函数 565, 例如方程(15)给出的示例。优值函数 565 通常将包括一个或更多个图像质量性能项和热致应力双折射性能项, 以便选择同时产生高图像质量和低应力双折射敏感性的透镜设计。应当理解, 在设计过程中, 优值函数 565 是易变的, 透镜设计者可以在透镜设计优值函数 Q 中添加或移除项, 或改变权重因数、限值或可接受范围。

[0188] 替代可忽略和低双折射玻璃步骤 570 被用来以具有可忽略或低热应力双折射敏感性的玻璃替代标准透镜设计 525 中的玻璃。该步骤可以使用计算机处理器执行的软件自动完成。可替换地, 它可以由透镜设计者手动完成。在一个实施例中, 透镜设计者用来自第一组备选玻璃的玻璃替代一个或更多个具有最高功率密度的透镜元件。在许多情况下, 它们可能是紧邻孔径光阑定位的透镜元件。剩余透镜元件的玻璃可以从第一或第二组备选玻璃中挑选。通常, 通过从第一和第二组备选玻璃中识别最接近地匹配原始玻璃的折射率和色散性质的玻璃来确定替代标准透镜设计 525 中的原始玻璃的玻璃。

[0189] 然后优化透镜设计步骤 575 被用来根据优值函数 565 确定优化的透镜设计 580。计算机处理器通过使用优化过程调整透镜元件的各种参数(例如, 厚度、间距、外形)来提供最佳性能, 从而完成这一步骤。中间结果和最终结果都可以存储在存储器中。在某些情况下, 优化过程也可以被用来自动选择透镜元件的玻璃。由于优值函数 565 包括图像质量性能项和热致应力双折射性能项, 因此优化的透镜设计 580 将平衡该设计的这两个重要属性。通过调整相应项在优值函数 565 中的权重, 透镜设计者可以选择强调一个属性或另一个属性的重要性。本领域技术人员所共知的许多优化过程可以用于确定优化的透镜设计 580。常用优化过程的示例包括阻尼最小二乘法、标准正交法和模拟退火法。

[0190] 在某些情况下, 透镜设计者可能推断由优化透镜设计步骤 575 所确定的优化的透镜设计 580 不足以满足特殊应用的需求。在这种情况下, 透镜设计者可以选择采取步骤, 诸如替代一个或更多个透镜元件的玻璃、添加额外的透镜元件、允许一个或更多个表面具有非球形表面轮廓或添加衍射光学表面。然后可以再次执行优化透镜设计步骤 575 以确定新的优化的透镜设计 580。

[0191] 即使不具有自动计算包括热应力双折射度量标准的透镜设计程序优值函数的益处, 透镜设计者仍可以按照本发明的原理成功地设计具有减小的热应力双折射敏感性的透镜。通过使用图 8A-8D 的表格(或其扩展版)指导透镜设计者选择光学材料, 然后使用计算机上运行的常规透镜设计程序中的优化工具来确定优化的透镜设计, 可以完成该设计。

[0192] 通常, 该过程将涉及定义一组成像透镜必须满足的透镜性能标准, 包括一个或更多个图像质量性能标准和热致应力双折射性能标准。图像质量性能标准可以是例如所需的

MTF 性能的规范。热致应力双折射性能标准可以是例如结合每个透镜元件的强度加权热应力双折射度量标准的总热应力双折射度量标准的可允许的最大值。

[0193] 在产生表现出最小热应力双折射的透镜设计的过程中(特别是在高光学功率密度条件下)必须考虑的最重要因素是光学玻璃的选择。一些玻璃是显而易见的选项,例如具有近乎零的应力系数的 Schott SF57 和 Ohara PBH56 以及具有极低的吸收和低热膨胀系数的熔融石英。所有其他的玻璃在热应力下产生更大程度的偏振退化。品质因数例如之前讨论的唯玻璃热应力双折射度量标准 M_1 可以用来产生从最优(最低度量标准值)到最差(最高度量标准值)排列玻璃的列表,例如图 8C-8D 给出的列表,或其扩展版。在透镜设计过程中,该玻璃列表中总结的特性对于选择具有理想的光色差控制属性(折射率和色散)的玻璃类型也是有用的。如前面所讨论,必须为每个透镜元件的玻璃选择在色差控制和热应力双折射控制之间做出平衡。

[0194] 为了图示的目的,现在将参照图 16 描述与用于设计图 12A 的第三示例性投影透镜 270 的方法类似的透镜设计过程。同样,在该过程中,透镜设计者受益于透镜设计程序、具有处理器和存储器的计算机以及透镜设计优值函数 Q ,但该透镜设计优值函数 Q 缺少直接优化热致应力双折射的项。相反,透镜设计者可以使用图 8A-8D 的表格或其更完整的等价物(可能包括来自其他玻璃制造商的数据)作为透镜设计者的工作的输入。如图 15 的过程所示,透镜设计过程的输入是一组透镜设计需求 500 和具有与透镜设计过程有关的玻璃信息的玻璃材料数据 505 的数据库。

[0195] 如图 15 的过程所示,计算唯玻璃双折射度量标准步骤 510 被用来确定玻璃材料数据 505 中的玻璃的唯玻璃热应力双折射度量标准(例如 M_1),从而确定具有双折射度量标准 515 的玻璃材料数据的更新表格。类似地,确定标准透镜设计步骤 520 被用来确定使透镜需求 500 无效的标准透镜设计 525,但其可能包括使用具有较差热应力双折射敏感性的玻璃的透镜元件。

[0196] 然后替代可忽略应力双折射玻璃步骤 520 被用来确定中间透镜设计 535。优选地,该步骤包括识别标准透镜设计 525 中具有最接近地匹配具有可忽略应力双折射敏感性的高折射率/高色散玻璃的折射率和色散特性的光学玻璃(例如 Schott SF 57 或 Ohara PBH56)的透镜元件。所识别的透镜元件的光学玻璃被具有可忽略应力双折射敏感性玻璃替代,然后使用透镜设计软件重新优化该透镜设计。

[0197] 如果存在具有与高折射率/高色散的可忽略应力双折射玻璃(例如折射率在 ± 0.1 内且 v 数在 ± 20 内)相似的玻璃的任何其他光学元件,则可以迭代地应用替代可忽略应力双折射玻璃步骤 530,直到所有这些透镜元件的光学玻璃都已被替代。

[0198] 类似地,如果存在具有与低折射率/低色散的可忽略应力双折射玻璃(例如熔融石英)相似的玻璃的任何其他光学元件,则可以迭代地应用替代可忽略应力双折射玻璃步骤 530 以使用低折射率/低色散的可忽略应力双折射玻璃替代所有这些透镜元件的光学玻璃,并使用透镜设计软件重新优化该透镜设计。

[0199] 在另一个实施例中,替代可忽略应力双折射玻璃步骤 530 识别标准透镜设计 525 中具有最高光学功率密度的元件,并用可忽略应力双折射玻璃(例如, $M_1 \leq 0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的玻璃)替代这些透镜元件。通常,与所识别的透镜元件的原始光学玻璃的折射率和 v 数最接近地匹配的可忽略应力双折射玻璃被用来替代该原始光学玻璃。通常,具有最高功率密

度的透镜元件将是最接近孔径光阑 230 的透镜元件。因此,并不总需要计算出光学功率密度。在某些实施例中,使用可忽略应力双折射玻璃自动替代紧邻孔径光阑的透镜元件的光学玻璃。

[0200] 然后,替代低应力双折射玻璃步骤 540 被用来通过用具有低应力双折射敏感性(例如, $M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)的光学材料替代透镜元件之一的光学材料来确定新的中间透镜设计 545。优选地,该步骤包括从具有最接近地匹配所选择的透镜元件的折射率和 v 数的双折射度量标准 515 的玻璃材料数据中识别该低应力双折射敏感性玻璃。所选择的透镜元件的光学玻璃被该低应力双折射敏感性玻璃替代,然后使用透镜设计软件重新优化该透镜设计。可以迭代地应用替代低应力双折射玻璃步骤 540,直到低应力双折射敏感性玻璃替代了所有的透镜元件。

[0201] 然后,估计复合度量标准和更新透镜设计步骤 550 被用来确定最终透镜设计 555。对于这一步骤,中间透镜设计 545 被分析以确定其是否具有可接受的图像质量性能。假设不同透镜元件的光通量负载的估计值是可用的,中间透镜设计 545 还被分析以确定包括透镜元件几何尺寸的透镜元件的热应力双折射度量标准(例如 M_2)。如果中间透镜设计 545 的图像质量性能退化太多,则可以做出可替换的玻璃选择。例如,承受较低光学功率密度的那些透镜元件的光学玻璃可以被更新以从一组扩大的光学玻璃中选择材料,其中阈值热应力双折射度量标准被稍微增加以包括中度应力双折射敏感性玻璃(例如, $M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)。

[0202] 额外的支持步骤是可能的,其中透镜设计是热-机械地模拟的,例如通过有限元分析(FEA)来模拟,从而模拟透镜元件中的光吸收容积分布图、所导致的热负载和温度变化 ΔT 以及进而产生的诱导应力双折射 Δn 。该模拟可以考虑透镜元件和外壳 240 内或周围的热传导、热对流和热辐射效应,包括用来减小光吸收产生的热效应的任何透镜冷却技术。然后结果可以用来测试或验证透镜设计预期,包括使用度量标准 M_2 。产生的信息可以指导透镜设计过程,核实给定透镜元件对可忽略、低或中等热应力双折射的玻璃的需求,或指示选择限制较少的玻璃的机会。

[0203] 在某些情况下,在替代可忽略应力双折射玻璃步骤中放松一个或更多个玻璃选择也是有必要的,以使用低应力双折射玻璃而非原始可忽略应力双折射玻璃。如果这样,由替代低应力双折射玻璃步骤 540 选择的所有玻璃应该被重新评估。

[0204] 如果产生的热应力双折射敏感性太高,或者如果图像质量性能太低,则可以选择性地挑选透镜元件,其中非球形表面的使用可以提供增强的图像质量性能且同时允许使用具有更严厉的阈值热应力双折射度量标准(例如, $M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)的玻璃材料。重点可以针对改变承受最高光学功率密度的透镜元件的玻璃。

[0205] 尽管本发明的说明书中给出的示例性透镜设计基于经典的双高斯透镜设计,对于本领域技术人员来说显而易见的是,相同的基本设计原理可以用于需要减小热致应力双折射敏感性的任何其他类型的成像透镜或成像透镜系统。例如,该设计原理可以用于设计在公知的透镜设计种类例如消像散透镜、Petzval 透镜、远摄透镜、变焦透镜、无焦透镜和 F-theta 透镜/扫描透镜(F-theta lenses)范围内的成像透镜。

[0206] 作为特殊的示例,F-theta 透镜被用于后目标或前目标扫描仪配置中的激光打印,其中扫描仪例如检流计位于孔径光阑平面附近,而 F-theta 物镜的所有透镜元件都位于孔径光阑的一侧(前侧或后侧)。F-theta 透镜通常使其透镜元件在孔径光阑的任一侧聚集成

一组。同样,距孔径光阑最近的透镜元件是最有可能从用于减小热致应力双折射的玻璃的精心选择中受益的元件。作为另一个示例,变焦透镜可以具有多个透镜组(例如 2-4 个),包括移动组。

[0207] 本发明的透镜设计概念并不局限于成像透镜的应用,而是可以用于其他透镜系统例如照明系统,或用在组合的反射-折射光学系统例如基于望远镜类设计配置的光学系统中。同样,最接近孔径光阑的透镜元件或承受高功率密度的其他元件是最有可能从使用减小的应力双折射敏感性玻璃中受益的元件。根据本发明,通过选择可忽略应力双折射敏感性玻璃用于具有最高光学功率密度的透镜元件,然后对其余透镜元件使用具有至多中等应力双折射敏感性的玻璃,可以制作任何类型的透镜系统。

[0208] 应当注意,根据图 6B 和图 9B 的示例性投影透镜 270 的图像质量在 100cy/mm 处显示出有限的 MTF 性能(约 30%)。为了支持高端数字影院关于屏上分辨率的规定,需要投影具有 4K 水平分辨率的可辨别像素的能力。为了更好地实现这一目标,在 100cy/mm 处的 MTF 应该优选被提高至超过 40%。类似地,也优选在 50cy/mm 处提供更好的 MTF 性能(约 75% 或更高,而非 60-65%)以便为 2K 分辨率图像提供改良的图像质量。同时,还优选进一步减小中继透镜 250 和投影透镜 270 对热致应力双折射的敏感性,以提供更多容限以及更好地实现更亮的屏幕(例如,20000-60000 流明)。

[0209] 存在几种可以单独使用或结合使用的可能的途径来实现这些目标。当然,如前所述,选择可替换玻璃例如 LF-5 或 S-NSL36 的策略选择可以极大地帮助某些透镜元件。在一个或更多个透镜元件上使用非球形表面也可能是非常有帮助的。作为另一种途径,可以提高系统的光学速度,例如以 F/2.5 或更快地操作投影透镜 270,从而加强 MTF 性能。尽管投影透镜 270 是色差受限而非衍射受限的,这仍然可以提供某些改进。提高系统速度也可以帮助减小热致应力双折射,因为光将遍布更多的玻璃区域,从而减小峰值功率密度。然而,该途径可能使得个体透镜元件以及透镜组件更加昂贵且更加难以设计和制造。

[0210] 还应当认识到,可以使用散热器、传导胶带、液体冷却、被动或强制风冷、热电冷却装置或其他技术来主动地或被动地冷却透镜外壳 240 或更直接地冷却透镜元件本身,目的是减小透镜元件上的有效热负载,从而减小诱发的应力双折射。如果足够有效和可靠,这种冷却可以改变一种或更多种透镜元件的玻璃选择。还应当认识到,需要明智地在透镜外壳 240 内安装透镜元件,以使透镜元件对内部外壳特性的热膨胀不会由于诱发的机械应力而引起应力双折射。

[0211] 在考虑图像质量问题时,应当注意,投影透镜 270 的 MTF 性能,包括第三示例性投影透镜(图 12A)的 MTF 性能受到被称为主轴向色差或纵向色差的光学色差限制。在设计具有主轴向色差校正的透镜中,绿光的最佳焦平面从蓝光最佳焦平面和红光最佳焦平面偏离。这意味着红色和蓝色通道具有在图像空间中同一位置(在显示器表面 190 上或附近)重叠的最佳焦平面,但是它们都从绿色通道最佳焦平面纵向位移。

[0212] 如果依据正常的透镜设计原理,通过将投影透镜 270 设计成高度消色透镜可以获得改进的颜色校正,这与之前引用的 D. DeJager 的美国专利 US5,172,275 所做的非常相同。通常在透镜设计中,通过用由反常色散玻璃如 Schott PSK 和 NKZFS 类玻璃组成的一个或更多个透镜元件来设计透镜组件可以消除第二轴向色差。不利的是,这些玻璃具有最差的热应力双折射敏感性值(M_t 约为 $3.5 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$),因此尝试用这些玻璃修正轴向色差将会同时

极大地增加应力双折射。Schott PK52 和 Schott FK51 也提供有用的局部色散,其热应力敏感性几乎优良十倍(M_t 约为 $0.36 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$),但是它们在玻璃表格中的位置(低折射率 n_d)和高阿贝数(v_d)带来其他危害。

[0213] 可替换地,如在 M. Harrigan 所属且共同授让的题为“Movie Projection Lens”的美国专利 US 6,317,268 中讨论的,包括衍射光学元件(DOE)对校正包括轴色(轴向色差)在内的色差特别有用。衍射光学元件被梯级结构图案化,该梯级结构形成薄相位元件并通过干涉和衍射来操作以影响光传播。它们可以形成在平面元件或弯曲透镜表面上。在本发明的情况下,可以在投影透镜 270 或中继透镜 250 中提供一个或多个衍射光学元件 350,例如在图 6A 中描述的示例性位置 90 处。衍射光学元件的使用可以改进图像质量,也可以实现可替换的玻璃选择,使透镜设计者在关键位置使用具有低应力双折射敏感性的玻璃(例如弱冕牌玻璃如 Ohara SNSL36 或弱火石玻璃如 Schott LF5)变得更容易。然而,衍射光学玻璃可能引入闪光,从而导致 ANSI 或帧内对比度的退化,所以需要小心谨慎。

[0214] 仅包括非常低应力双折射 PBH56 和熔融石英玻璃的图 10A 的第二示例性投影透镜 270 以及图 11A 的对应表格的进一步考虑表明,如果玻璃选择和设计性能允许,还有相当大的空间可用于进一步减小对热致应力双折射的敏感性。作为另一种途径,在投影透镜 270 中(例如在图 4 的位置 90 处)添加偏振补偿器 360 也是有益的。在前面的讨论中,特别是与 Aastuen 等人的专利和图 1B 相关的讨论中,部分地讨论了偏振补偿器 360 的使用。在投影仪 101 中,偏振补偿器通常位于调制光学系统 80 中,并对空间光调制器 170r、170g 和 170b、偏振分束器 60 或二者的组合提供偏振补偿。例如,在 Mi 等人的美国专利 US 6,909,473 中,可以对垂直对准的 LCD 类调制器和线栅偏振分束器提供偏振补偿。在 Aastuen 等人的情况下,相似的偏振补偿扩大了用于薄膜、玻璃嵌入的偏振分束器的衬底玻璃的备选玻璃列表。

[0215] 被开发用于提高 LCD 的偏振性能的偏振补偿器有许多示例,包括设计用于垂直对齐或向列 LCD 的那些补偿器。这些补偿器通常使用高分子膜来提供角变化的双折射,其以空间变化的方式构建,以影响部分(即在某些空间或角区域内)透射光束的偏振状态,而不影响光束的其他部分的偏振状态。可替换地,如 Tan 等人的美国专利 US 7,170,574 所描述,已经通过创建具有沉积于玻璃衬底上的介电薄膜层的形式双应力光栅结构开发出耐用的偏振补偿器。总的来说,偏振补偿器抵消与正常入射光线相比横穿经过双折射材料的不同光路的斜射光或斜光线的偏振状态承受的不同效应。

[0216] 在本发明的示例中,偏振补偿器 360 不位于调制器光学系统 80 中以调整与空间光调制器 170 和偏振分光器 60 有关的透射光 140 的偏振状态。相反,可以在投影透镜 270 中的位置 90 处提供偏振补偿器,该偏振补偿器可以为投影透镜中的应力双折射效应提供偏振补偿。特别地,它可以为残余热致应力双折射提供补偿。在这种情况下,补偿器依照应力双折射恢复偏离其入射条件的偏振状态或方向,以使其与入射状态更加相似,然后向佩戴偏振敏感眼镜的观赏者提供理想的左眼或右眼偏振状态。例如,入射偏振状态主要由激光装置和偏振切换器 139 在照明组件 110 中定义。应当理解,也可以在中继透镜 250 内或周围提供一个或多个偏振补偿器以补偿该透镜引起的应力双折射效应。

[0217] 如图 4 所示,偏振补偿器 360 可以位于成像透镜 200 内各种示例性位置 90 处,或者在与二向色结合器 165 和中继透镜 250 都靠近的位置 90 处。偏振补偿可以校正包括投影透镜 270、中继透镜 250 和二向色结合器 165 在内的多个组件引起的偏振效应。相应地,

偏振补偿器 360 的使用允许投影透镜 270 或中继透镜 250 被设计为具有更大范围的玻璃, 因为减小了热致应力双折射的作用。这可以提供设计自由度以进一步提高图像质量。

[0218] 回到影响第三示例性投影透镜(图 12A)的残余第二轴向色差的难题上, 红光和蓝光通道具有在图像空间中相同地方重合的最佳焦平面(在显示器表面 190 上或附近), 但是其都从绿光通道的最佳焦平面纵向位移。由于空间光调制器 170 位于图 1 中不同的平面内, 该效应可以通过调整调制器位置来减小, 但是结果将产生小倍率差。色焦误差足够大以至于它可能被严厉的观赏者发现, 并且在更高分辨率下该问题会被放大。作为对使用偏振补偿器 360 或衍射光学元件 350 的另一种可替换方案, 可以使用相对于绿光增加红光和蓝光的光路的附加光学元件。这将有效地使三种色光会聚于像平面的公共焦点处。实现上述目标的一种简单方式是使用第一表面镜 370, 如图 17 所示, 其中绿光在多层涂层 375 的顶层反射且同时穿过红光和蓝光。然后红光和蓝光从多层电介质涂层 375 的更深层上反射, 从而到该更低层的增加的传播距离和投影透镜 270 的第二轴向色差量相同。

[0219] 第一表面镜 370 以夸大的形式示出, 由于投影透镜 270 的第二轴向色差的量在物空间中是大约 50 微米, 因此涂层从顶到底的深度应小于该值, 因为红光和蓝光承受两次穿越涂层的材料指数(减小的 OPD)。绿色和红 / 蓝色图像也在中间图像 260 处彼此横向移动小的图像位移 378, 但是通过适当地重新定位空间光调制器 170 可以调节该位移。

[0220] 应当注意, 该概念也可以扩展到通过使三个反射层形成在衬底 377 上(每个反射层对应一种颜色)来校正主轴色差。这种途径可以用来校正中继透镜 250、投影透镜 270 或二者组合。同样地, 厚度可以被调整补偿颜色的纵向位移。

[0221] 图 16 示出了处于 45° 的第一表面镜 370, 但是该想法对以任何倾斜角校正轴向色差都起作用, 只要光路没有被任何实际物体阻挡。另外, 第一表面镜 370 可以在角度上被调节以改变引入的颜色校正量。如果图像位移是一个问题, 则可以使用双反射布置来抵消位移, 例如通过在五棱镜类型的配置上布置两个反射表面, 每个表面均带有校正涂层。

[0222] 本发明提供了理解热致应力双折射的基础, 包括数字度量标准 M_1 和 M_2 (后者考虑所施加的光学负载)、具有相比较而言可忽略的值、低值、中度值或高值的热应力敏感性(由 M_1 测量)的玻璃的确认以及在透镜设计过程中选择性地将这些玻璃用于透镜组件中的不同透镜元件的支持设计原理和方法。本发明还提供具有不同热应力敏感性水平和成像性能的成像透镜的实际设计示例, 以及它们对改进的投影仪性能的影响的实际证据。特别地, 已经确立了一组热应力敏感性阈值, 其用来指定可忽略应力玻璃($0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1$)、低应力玻璃($0.1 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)和中度应力玻璃($0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1} \leq M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$), 其中每一种包括具有对透镜设计有价值的特性的一组玻璃。应当理解在本发明的精神和范围内, 这些阈值是有点随意的。例如, 具有 $M_1 = 0.12 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 的玻璃(也许尚未开发出来)可能被视为具有可忽略或低热应力双折射敏感性。事实上, 其感知可以取决于应用或涉及的透镜设计。类似地, 其他阈值例如低($M_1 \leq 0.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)和中度($M_1 \leq 1.6 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$)热应力双折射玻璃是有用的和有效果的, 但是也是有点随意的。例如, 低阈值可以设定在 $M_1 \leq 0.9 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 或 $M_1 \leq 1.0 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$, 而中度阈值可以设定在 $M_1 \leq 1.8 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 。

[0223] 已经参考其中某些优选实施例详细描述了本发明, 但是应当理解在本发明的保护范围中变化和修改可以起作用。应当强调的是, 可以使用很多种类型的支持软件或硬件将本文描述的装置或方法包含在许多不同类别的系统中。还应当注意, 附图并不是按比例绘

制,而是这些实施例中使用的关键组件和原理的图示。

[0224] 部件表

[0225]	50	光源
[0226]	55	棱镜组件
[0227]	60	偏振分束器
[0228]	65	X 棱镜
[0229]	80	调制器光学系统
[0230]	90	位置
[0231]	100	投影仪
[0232]	101	投影仪
[0233]	102	投影仪
[0234]	110	照明组件
[0235]	110r	照明组件
[0236]	110g	照明组件
[0237]	110b	照明组件
[0238]	115	光源组件
[0239]	120	激光器阵列
[0240]	120'	激光器阵列
[0241]	122	激光发射器
[0242]	125	激光结合组件
[0243]	127	多面体棱镜
[0244]	130	孔径
[0245]	135	照明光束结合器
[0246]	137	半波片
[0247]	139	偏振切换器
[0248]	140	光束
[0249]	140'	单光束
[0250]	145	光轴
[0251]	150	照明透镜
[0252]	155	光积分器
[0253]	160	镜
[0254]	165	二向色结合器
[0255]	166	第一结合器
[0256]	167	第二结合器
[0257]	170	空间光调制器
[0258]	170r	空间光调制器
[0259]	170g	空间光调制器
[0260]	170b	空间光调制器
[0261]	180	去斑器

[0262]	190	显示器表面
[0263]	195	物表面
[0264]	200	成像透镜
[0265]	205	透镜元件
[0266]	206a	正透镜元件
[0267]	206b	负透镜元件
[0268]	208	透镜元件组
[0269]	210	玻璃表格
[0270]	215	冕牌玻璃
[0271]	217	火石玻璃
[0272]	220	冕牌透镜元件
[0273]	222	火石透镜元件
[0274]	230	孔径光阑
[0275]	235	光学射线
[0276]	240	透镜外壳
[0277]	245	工作距离
[0278]	250	中继透镜
[0279]	260	中间图像
[0280]	270	投影透镜
[0281]	300	调制传递函数(MTF)图
[0282]	320	光强分布
[0283]	321	切片位置
[0284]	322	横断面轮廓
[0285]	323	光强分布
[0286]	324	切片位置
[0287]	325	横断面轮廓
[0288]	326	光强分布
[0289]	327	光强分布
[0290]	328	光强分布
[0291]	350	衍射光学元件
[0292]	360	偏振补偿器
[0293]	370	第一表面镜
[0294]	375	多层涂层
[0295]	377	衬底
[0296]	378	图像位移
[0297]	400	透镜元件
[0298]	401	透镜元件
[0299]	402	透镜元件
[0300]	403	透镜元件

[0301]	404	透镜元件
[0302]	405	透镜元件
[0303]	410	透镜元件
[0304]	411	透镜元件
[0305]	412	透镜元件
[0306]	413	透镜元件
[0307]	414	透镜元件
[0308]	415	透镜元件
[0309]	416	透镜元件
[0310]	420	透镜元件
[0311]	421	透镜元件
[0312]	422	透镜元件
[0313]	423	透镜元件
[0314]	424	透镜元件
[0315]	425	透镜元件
[0316]	426	透镜元件
[0317]	427	透镜元件
[0318]	428	熔融石英透镜元件
[0319]	429	PBH56 透镜元件
[0320]	430	透镜元件
[0321]	431	透镜元件
[0322]	432	透镜元件
[0323]	433	透镜元件
[0324]	434	透镜元件
[0325]	435	透镜元件
[0326]	436	透镜元件
[0327]	437	熔融石英透镜元件
[0328]	438	SF-57 透镜元件
[0329]	440	透镜元件
[0330]	441	透镜元件
[0331]	442	透镜元件
[0332]	443	透镜元件
[0333]	444	透镜元件
[0334]	445	透镜元件
[0335]	446	熔融石英透镜元件
[0336]	447	PBH56 透镜元件
[0337]	448	S-LAL18 透镜元件
[0338]	450	透镜元件
[0339]	451	透镜元件

[0340]	452	透镜元件
[0341]	453	透镜元件
[0342]	454	透镜元件
[0343]	455	透镜元件
[0344]	456	透镜元件
[0345]	457	PBH56 透镜元件
[0346]	458	S-LAL18 透镜元件
[0347]	459	熔融石英透镜元件
[0348]	500	透镜设计需求
[0349]	505	玻璃材料数据
[0350]	510	计算唯玻璃双折射度量标准步骤
[0351]	515	具有双折射度量标准的玻璃材料数据
[0352]	520	确定标准透镜设计步骤
[0353]	525	标准透镜设计
[0354]	530	替代可忽略应力双折射玻璃步骤
[0355]	535	中间透镜设计
[0356]	540	替代低应力双折射玻璃步骤
[0357]	545	中间透镜设计
[0358]	550	估计复合度量标准并更新透镜设计步骤
[0359]	555	最终透镜设计
[0360]	560	定义优值函数步骤
[0361]	565	优值函数
[0362]	570	替代可忽略和低双折射玻璃步骤
[0363]	575	优化透镜设计步骤
[0364]	580	优化的透镜设计

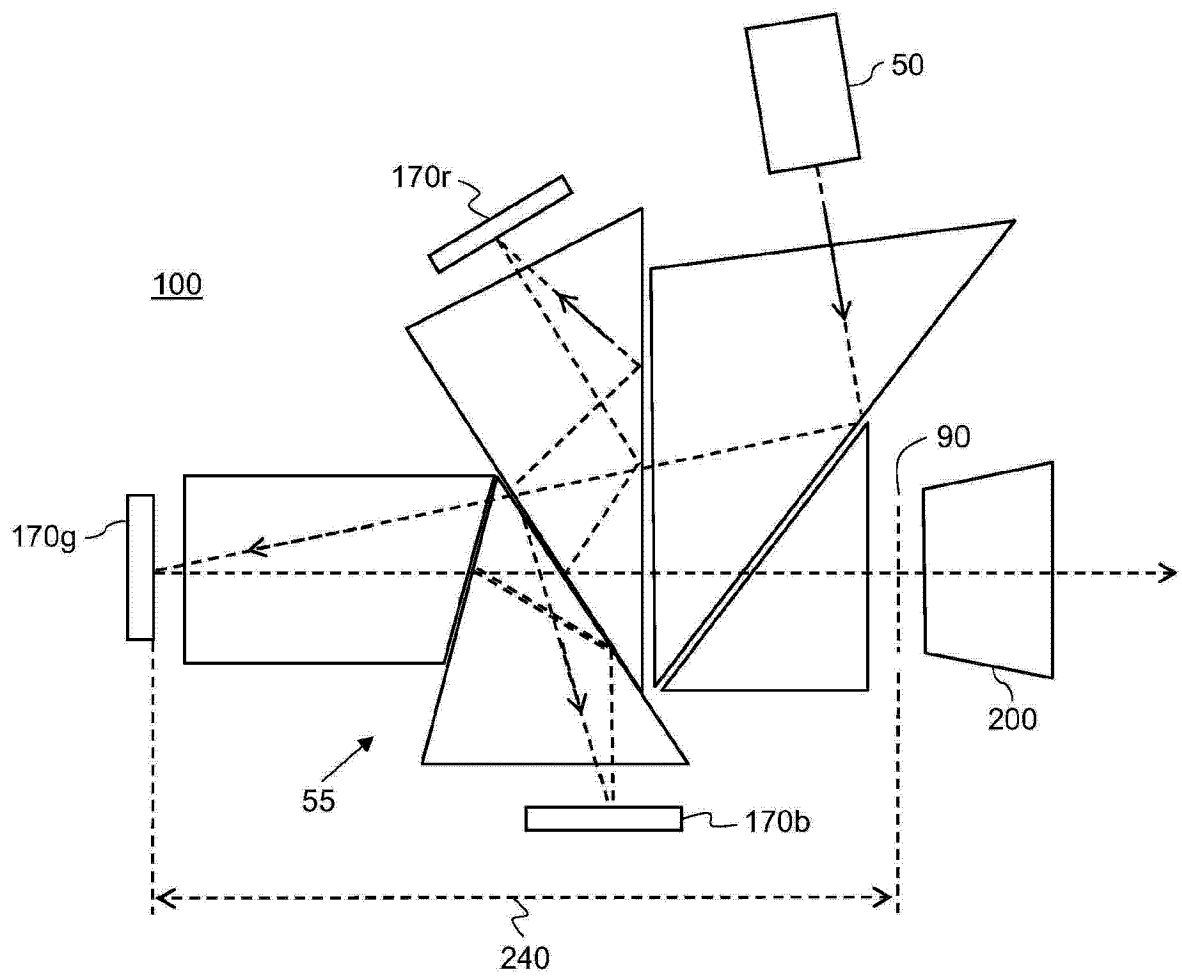


图 1A(现有技术)

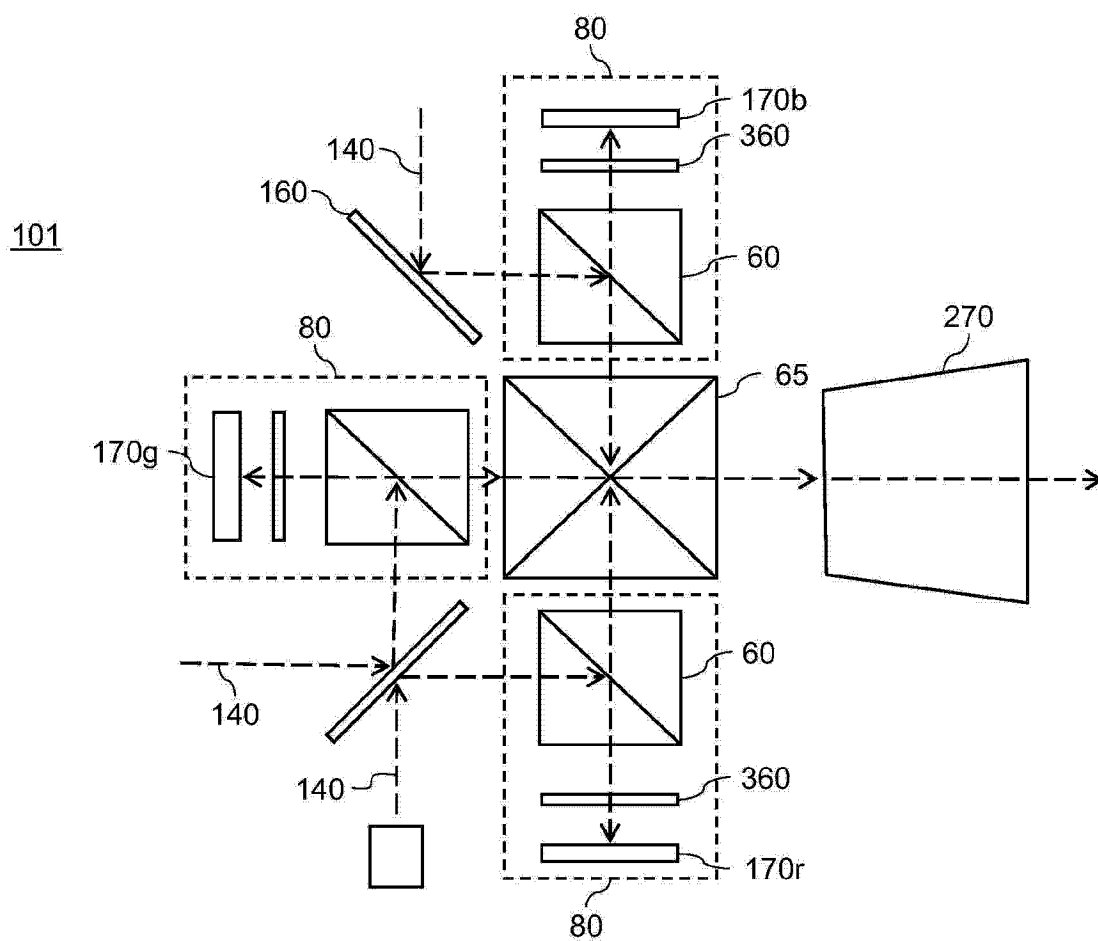


图 1B(现有技术)

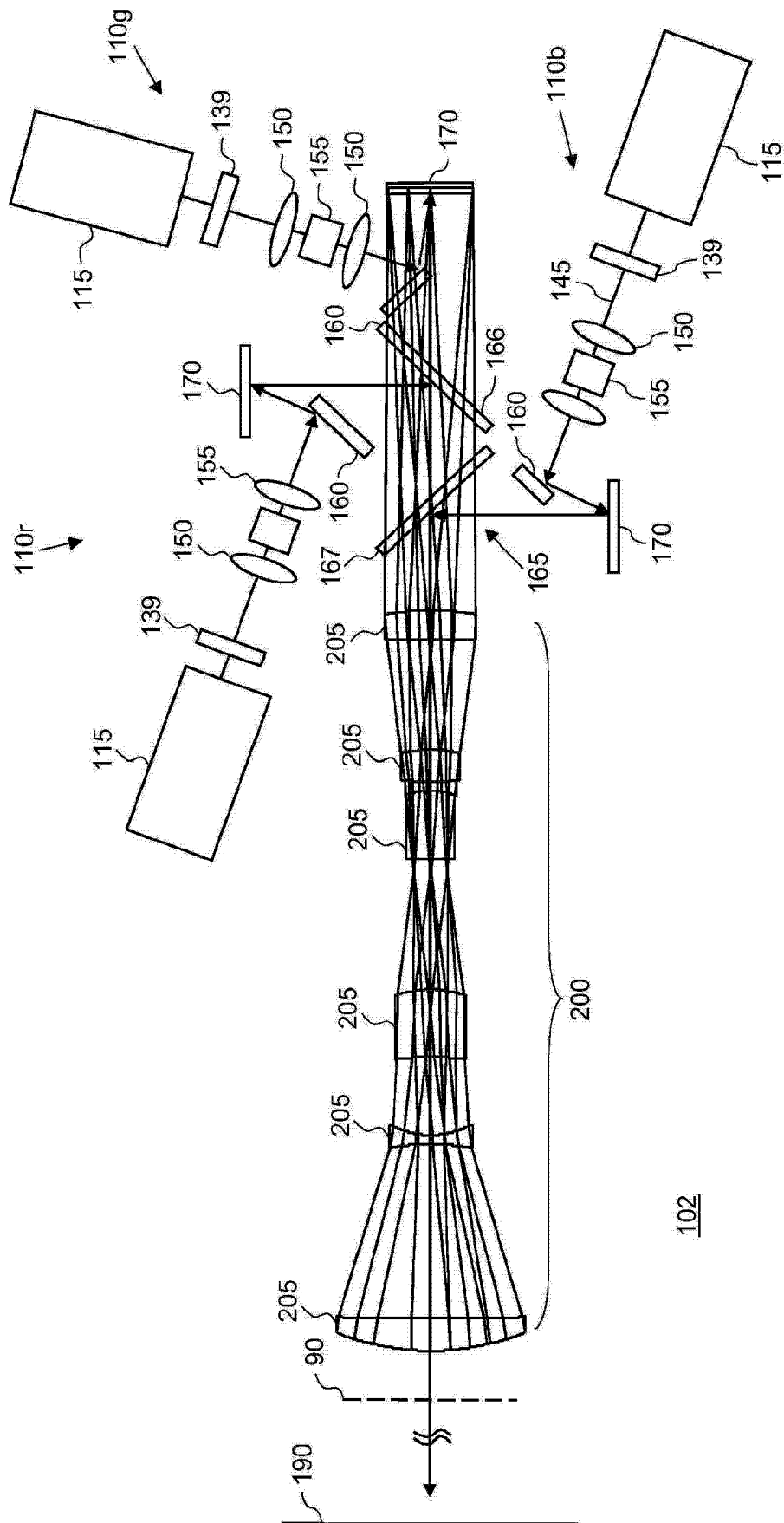


图 2

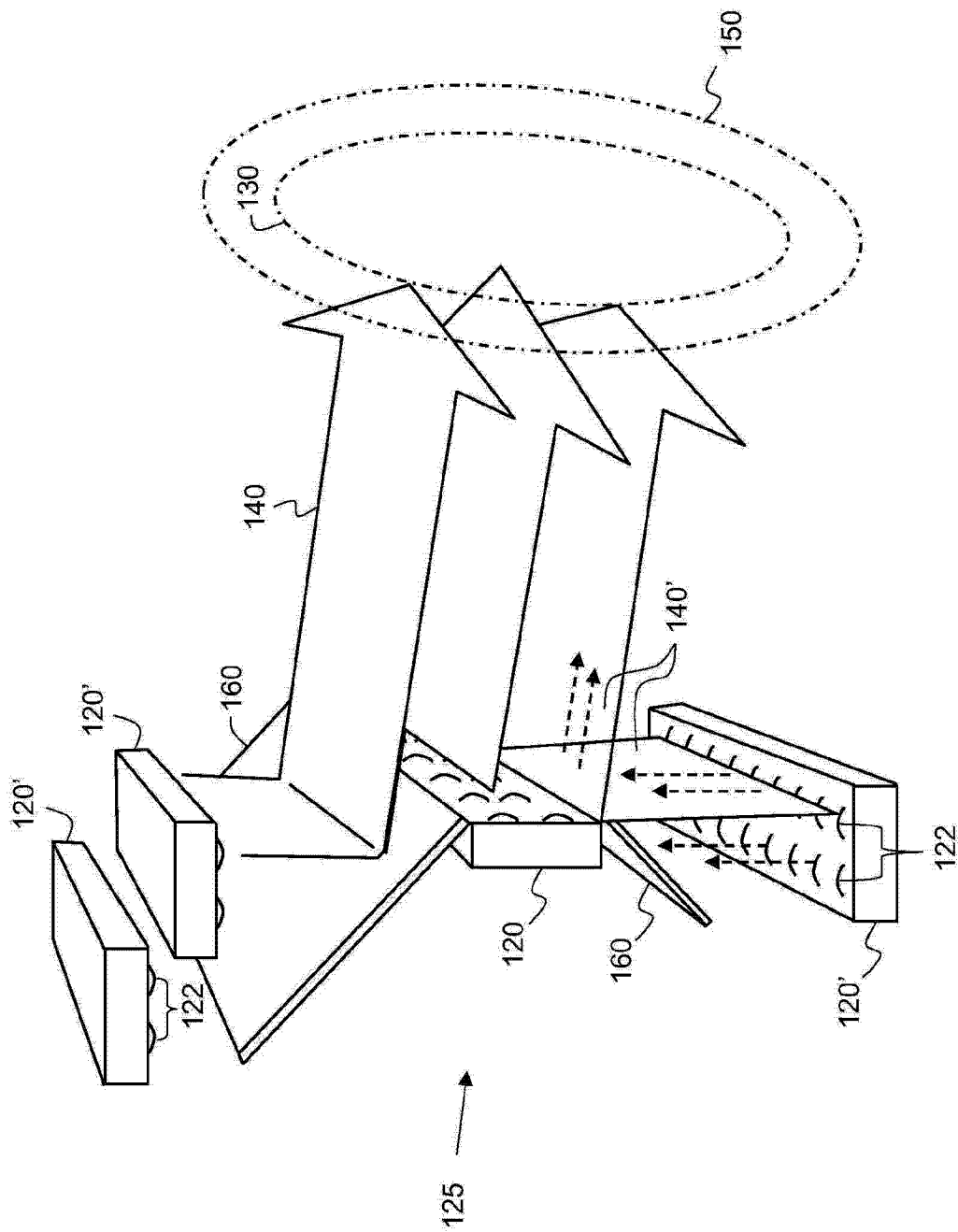


图 3A

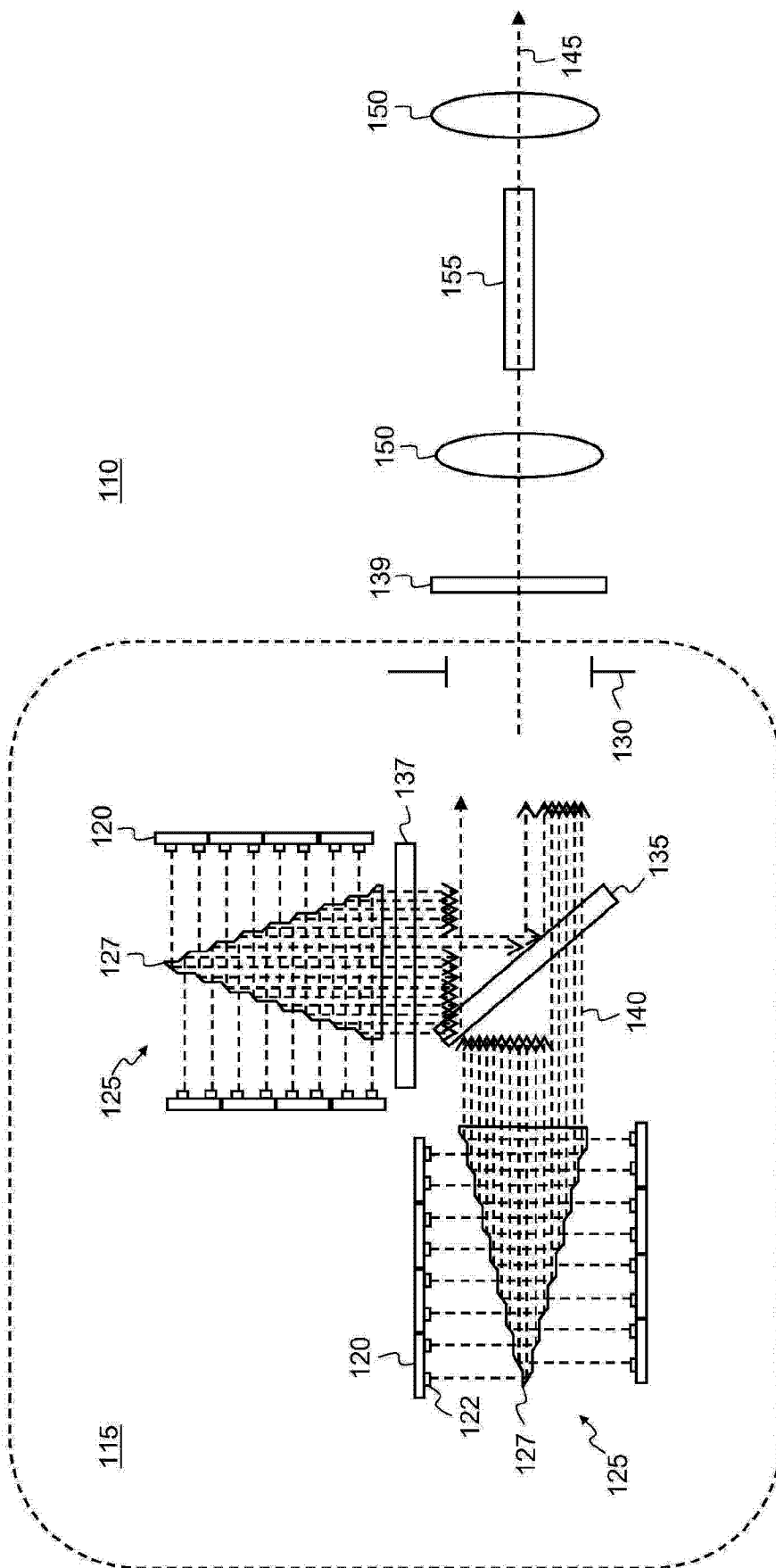


图 3B

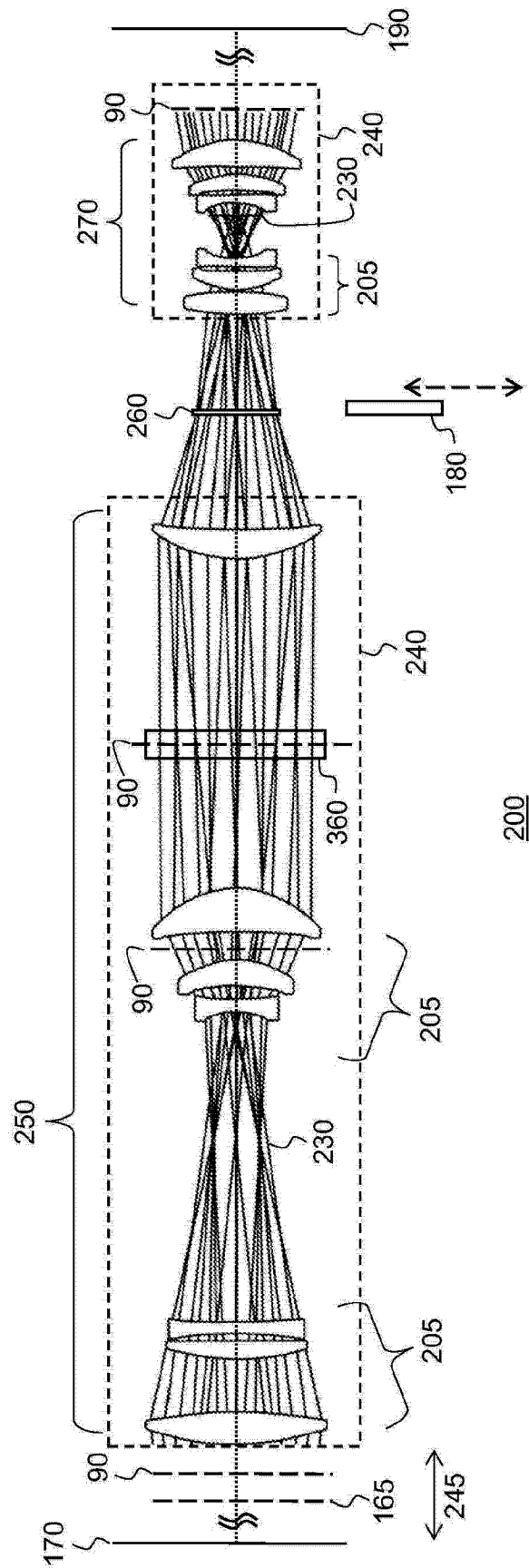


图 4

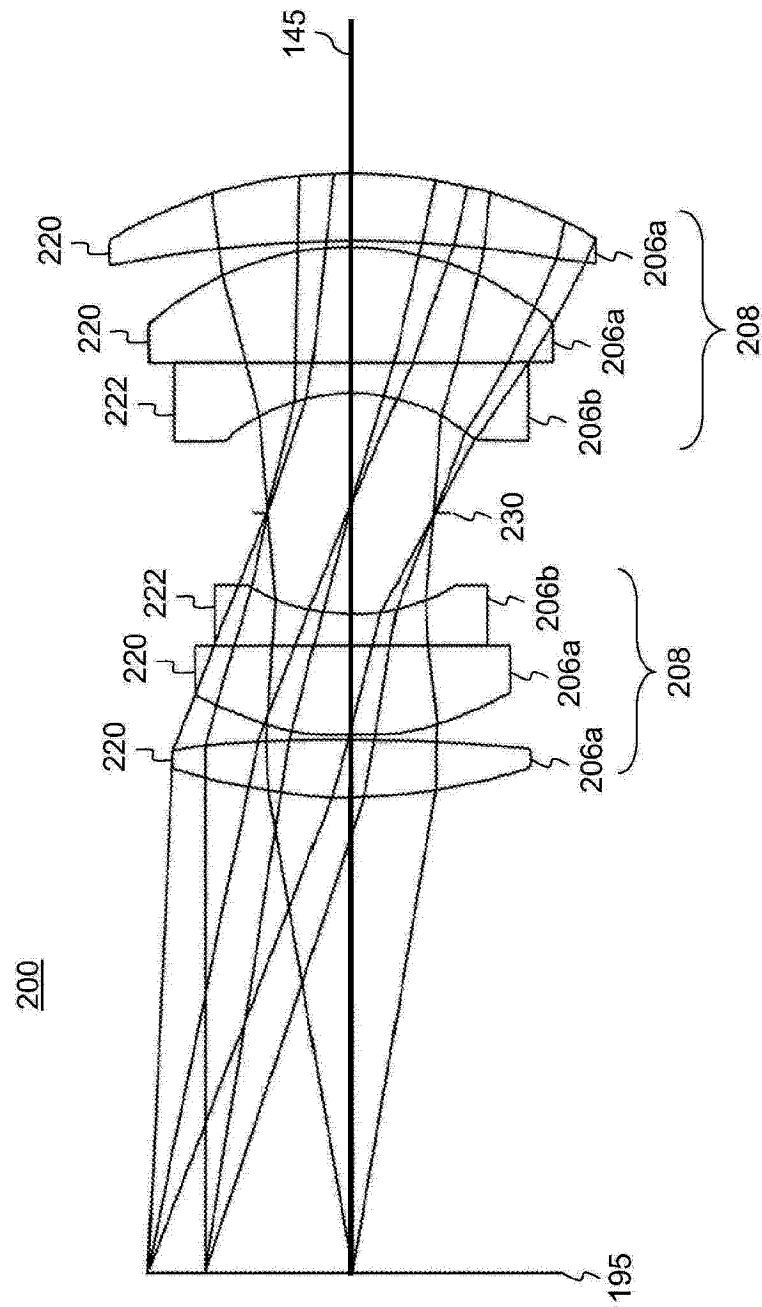


图 5A(现有技术)

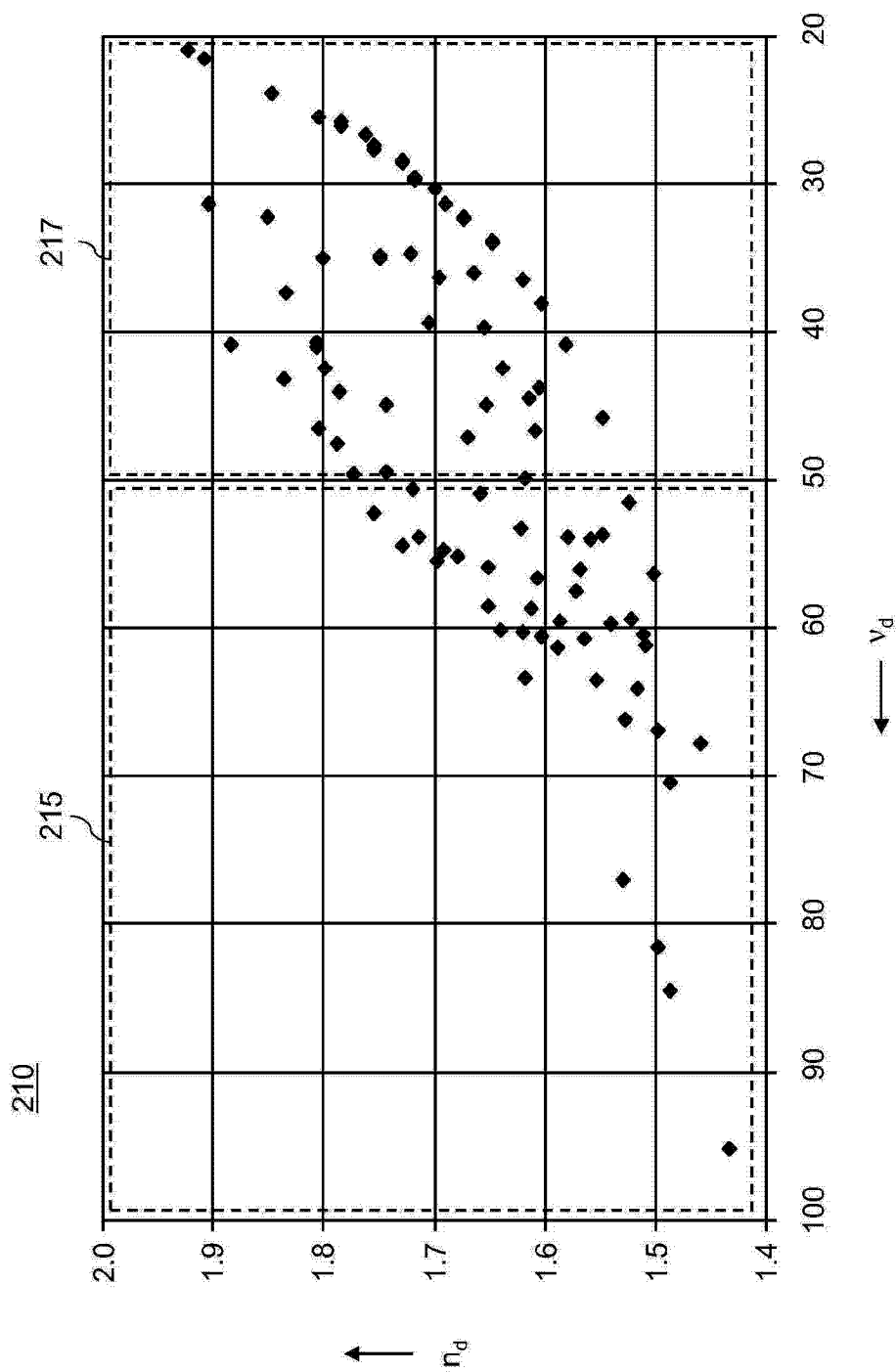


图 5B(现有技术)

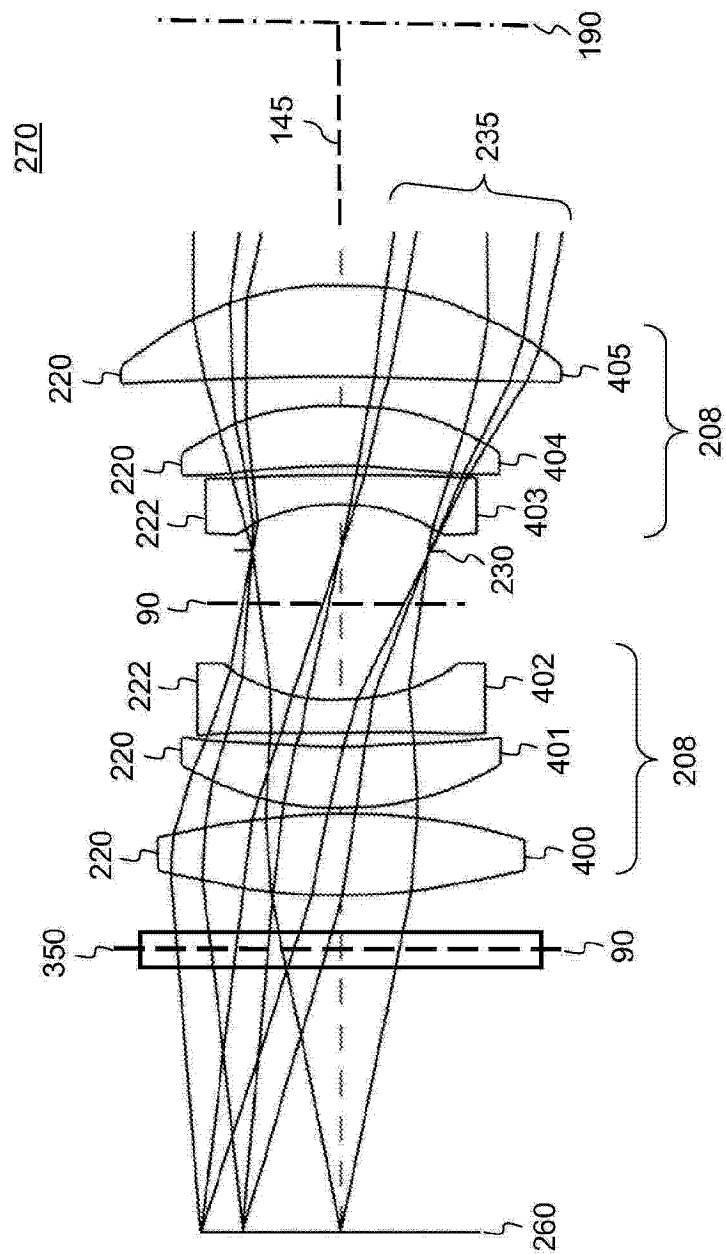


图 6A

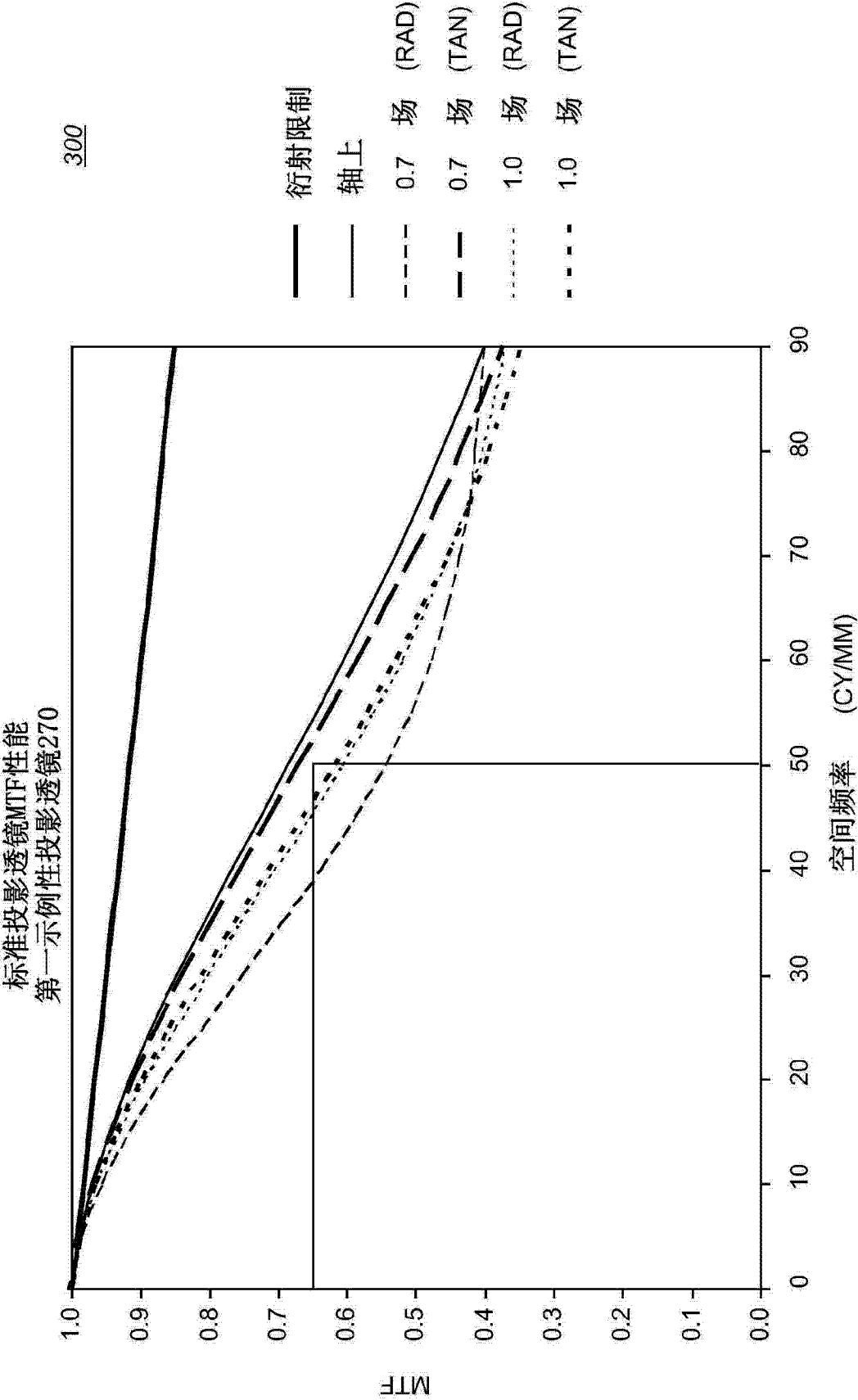


图 6B

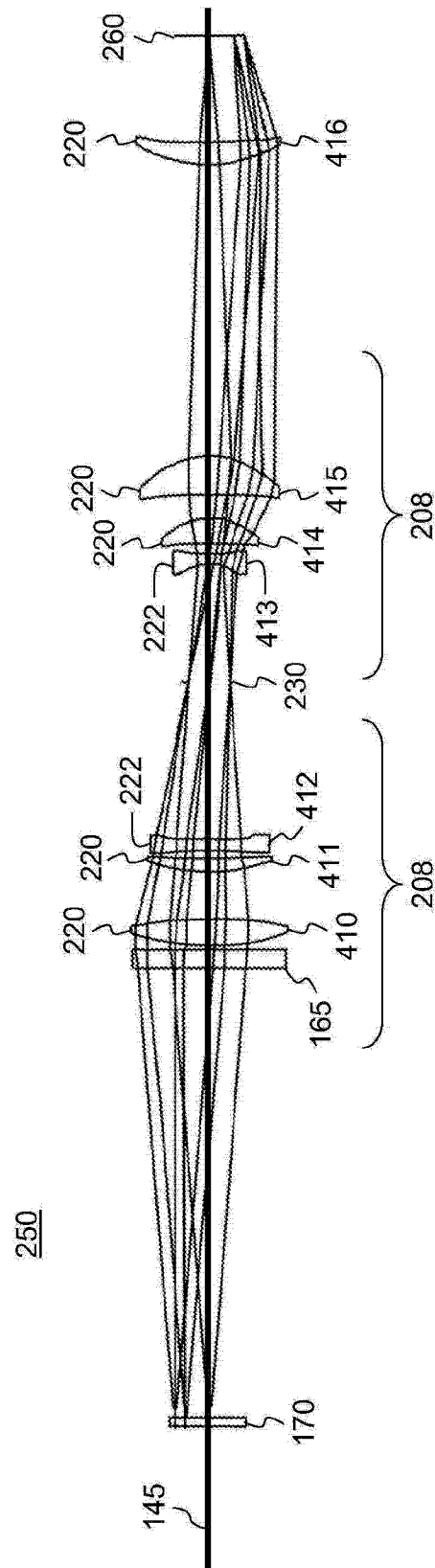


图 6C

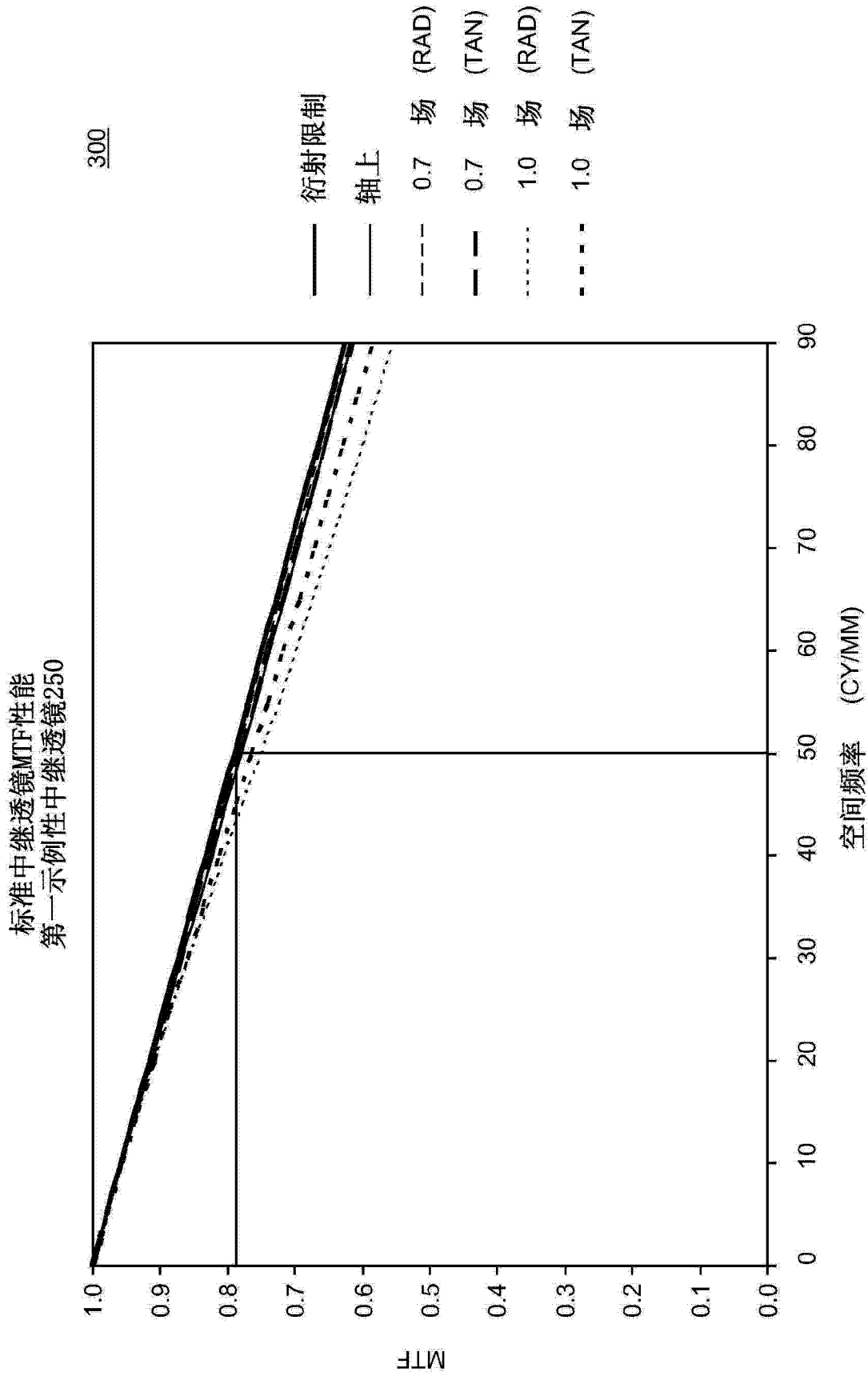


图 6D

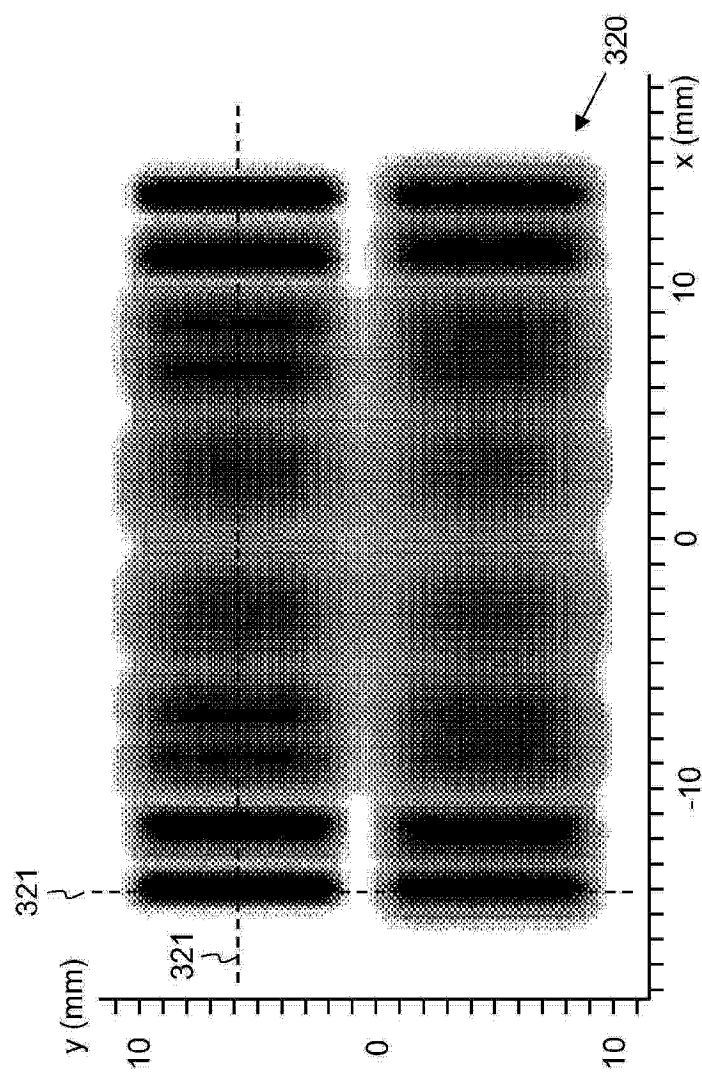


图 7A

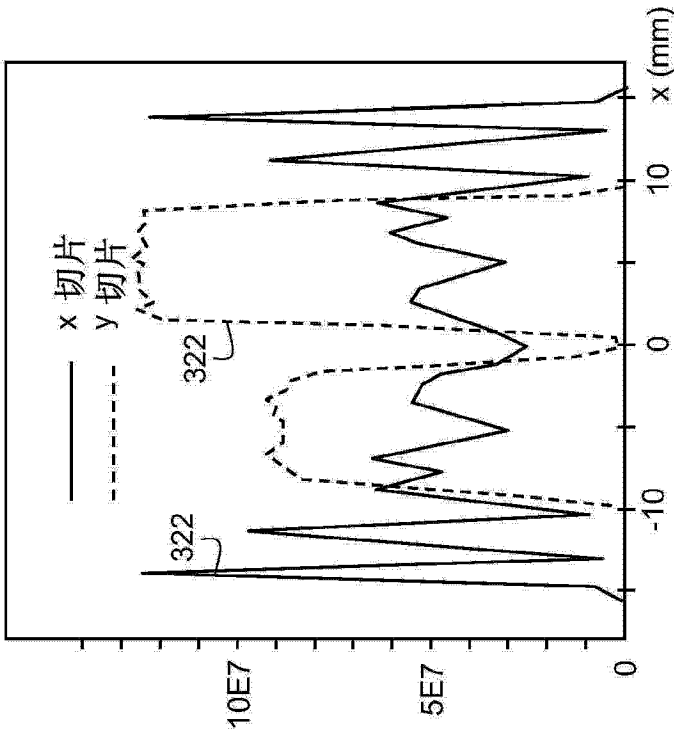


图 7B

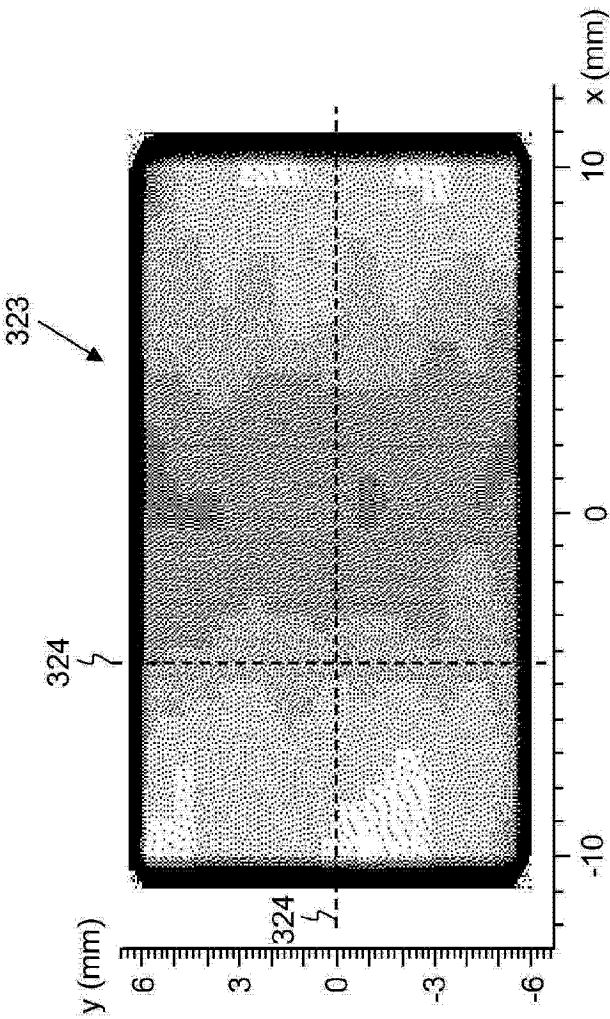


图 7C

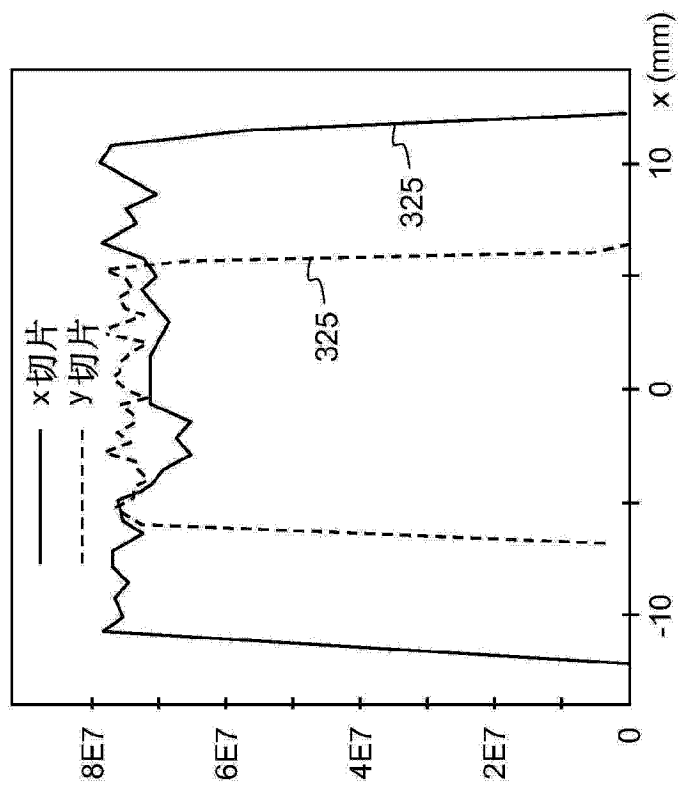


图 7D

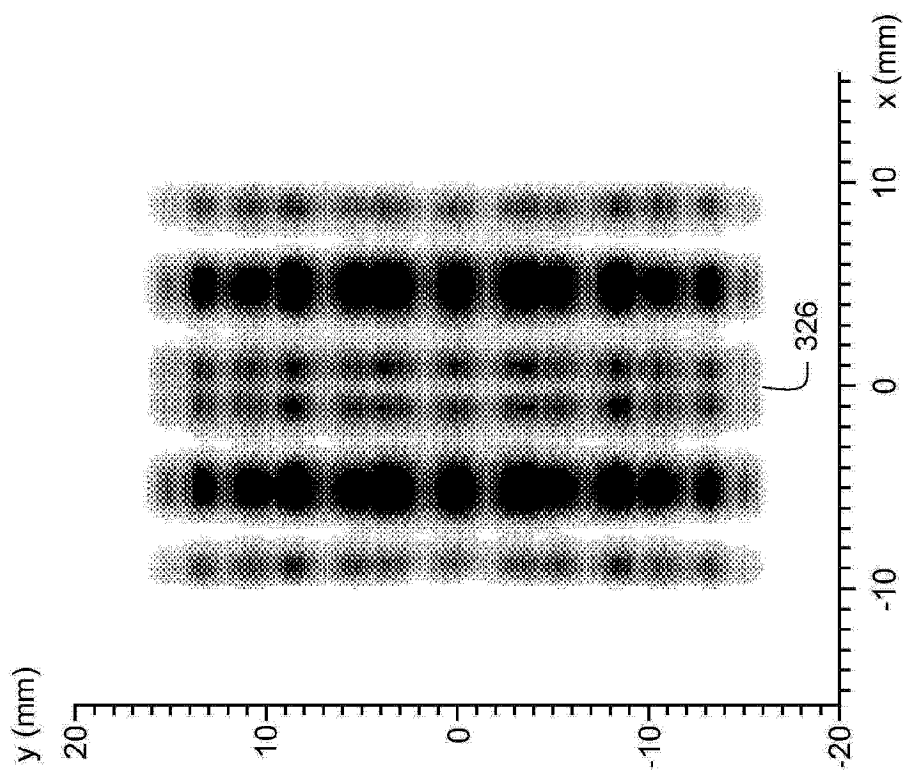


图 7E

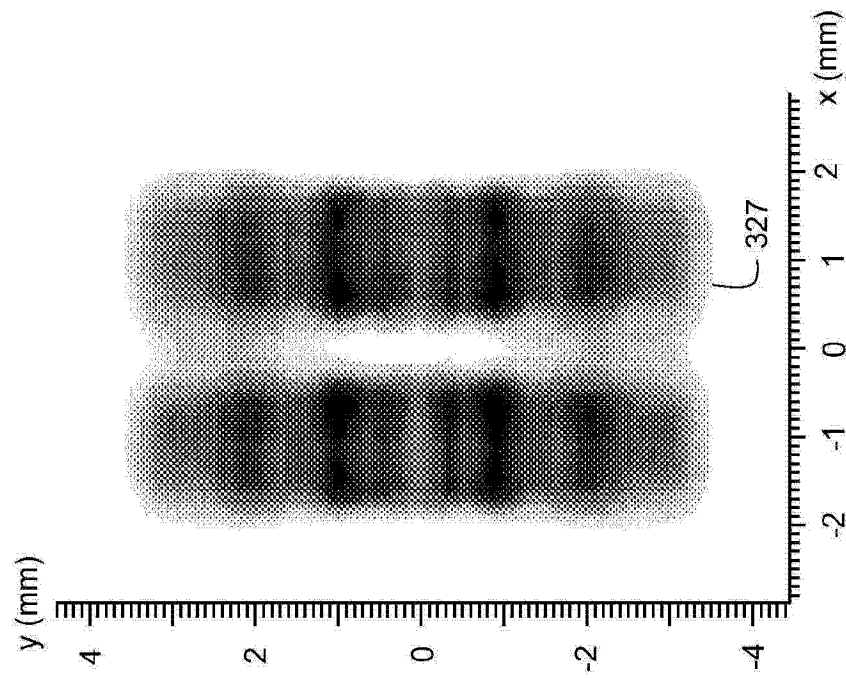


图 7F

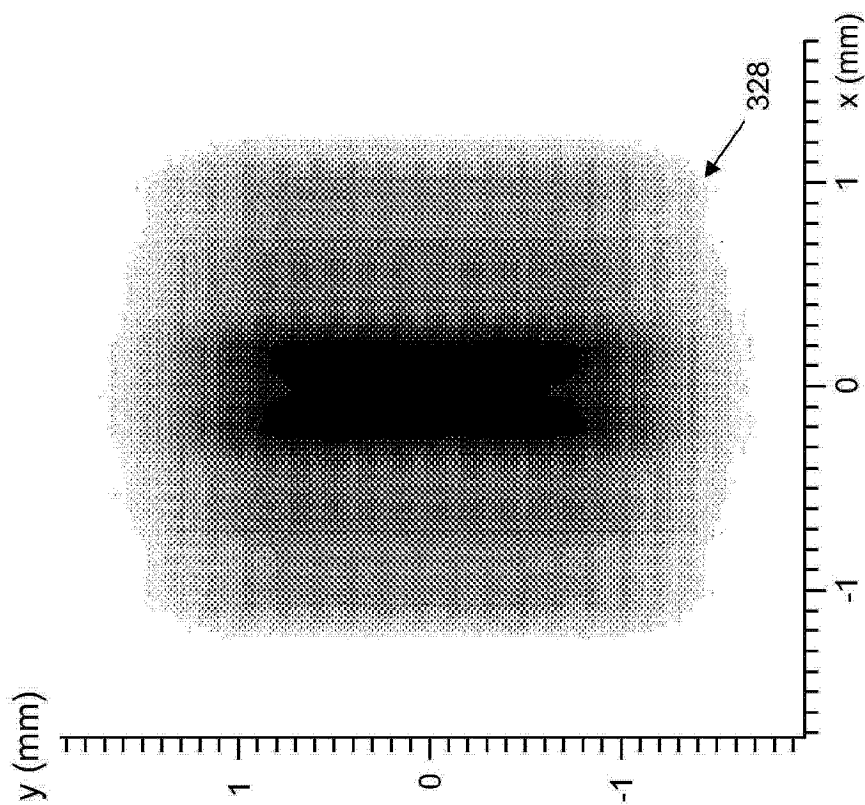


图 7G

玻璃	玻璃类型	折射率 (n_d)	阿贝数 (v_d)	导热系数 (K) (W/m-K)	热膨胀系数 (ρ) ($10^{-6}/K$)	泊松比 (μ)	杨氏模量 (E) $10^3 N/mm^2$	应力光学系数 (k) $10^{-6} mm^2/N$	内部透射率 (t_i) (针对10mm @460nm)	吸收系数 (α) (蓝光)
SCHOTT LITHOSIL-Q	冕牌	1.458	67.83	1.31	0.50	0.170	72	3.40	0.9999	0.000010
SCHOTT SF57HHT	火石	1.847	23.83	0.62	8.30	0.248	54	0.02	0.9911	0.000890
OHARA S-FSL5	冕牌	1.487	70.23	1.01	9.00	0.227	62	2.87	0.9999	0.000010
SCHOTT SF57	火石	1.847	23.83	0.62	8.30	0.248	54	0.02	0.9871	0.001300
OHARA PBH56	火石	1.841	24.56	0.64	8.40	0.250	59	0.09	0.995	0.000501
SCHOTT N-PK52A	冕牌	1.497	81.61	0.73	13.0	0.298	71	0.67	0.997	0.000301
SCHOTT N-FK51A	冕牌	1.487	84.47	0.76	12.7	0.302	73	0.70	0.997	0.000301
SCHOTT LLF1	弱火石	1.548	45.75	0.8	8.10	0.208	60	3.05	0.998	0.000160
OHARA S-FPL53	冕牌	1.439	94.93	0.86	14.5	0.303	69	0.57	0.996	0.000400
SCHOTT F2	火石	1.620	36.37	0.78	8.20	0.220	57	2.81	0.998	0.000200
SCHOTT LF5	火石	1.581	40.85	0.87	9.10	0.223	59	2.83	0.998	0.000201
OHARA S-NSL36	弱冕牌	1.517	52.43	1.09	8.00	0.139	64	2.82	0.997	0.000301
SCHOTT N-BK7	冕牌	1.517	64.17	1.11	7.10	0.206	82	2.77	0.9972	0.000281
SCHOTT SF6	火石	1.805	25.43	0.67	8.10	0.244	55	0.65	0.991	0.000904
OHARA S-BAL11	冕牌	1.573	57.74	0.97	6.60	0.237	82	2.42	0.997	0.000301
OHARA S-BAL35	冕牌	1.589	61.14	0.92	5.70	0.250	83	2.15	0.996	0.000401
OHARA S-NSL3	冕牌	1.518	58.9	1.03	9.00	0.217	70	2.60	0.997	0.000301
OHARA S-BSM10	冕牌	1.623	57.05	0.82	6.50	0.266	84	1.88	0.996	0.000401
OHARA S-LAL18	弱冕牌	1.729	54.68	0.87	5.90	0.289	120	1.58	0.996	0.000401

图 8A

玻璃	玻璃类型	折射率 (n_d)	阿贝数 (v_d)	导热系数 (K) (W/m·K)	热膨胀系数 (ρ) ($10^{-6}/K$)	泊松比 (μ)	杨氏模量 (E) $10^3 N/mm^2$	应力光学系数 (k) $10^{-6} mm^2/N$	内部透射率 (t_i) (针对10mm @460nm)	吸收系数 (α) (蓝光)
										mm^{-1}
SCHOTT SF1	火石	1.717	29.51	0.70	8.10	0.232	56	1.80	0.994	0.000645
SCHOTT SF4	火石	1.755	27.58	0.65	8.00	0.241	56	1.36	0.992	0.000808
SCHOTT SF2	火石	1.648	33.85	0.74	8.40	0.227	55	2.62	0.995	0.000483
OHARA S-LAH66	弱火石	1.772	49.6	0.85	6.20	0.291	122	1.43	0.994	0.000602
OHARA S-LAL54	弱冕牌	1.651	56.16	0.76	7.10	0.277	88	1.66	0.993	0.000703
OHARA S-LAM60	弱火石	1.743	49.34	0.85	5.40	0.294	113	1.9	0.993	0.000703
OHARA S-LAL61	弱冕牌	1.740	52.64	0.86	5.70	0.291	119	1.55	0.991	0.000904
OHARA S-LAM54	火石	1.757	47.82	0.89	5.70	0.292	117	1.70	0.990	0.001005
SCHOTT N-SSK8	弱火石	1.618	49.83	0.84	7.21	0.251	84	2.36	0.988	0.001260
SCHOTT N-SF2	火石	1.648	33.82	1.14	6.68	0.231	86	3.06	0.984	0.001613
SCHOTT N-KZFS4	火石	1.613	44.49	0.84	7.30	0.241	78	3.90	0.990	0.001005
SCHOTT N-SF4	火石	1.755	27.38	0.95	9.45	0.256	90	2.76	0.959	0.004186
OHARA S-NPH2	火石	1.923	18.90	0.969	6.7	0.249	99.1	3.31	0.910	0.009431

图 8B

玻璃	玻璃类型	折射率 (n_d)	阿贝数 (v_d)	$M_1 = p\kappa\alpha$ $10^{-12}\text{mm}/(\text{N-K})$	$M_2 = E/(K(1-\mu))$ $10^{-6}\text{N-K}/(\text{W-mm})$	$M_3 = p\kappa\alpha E/(K(1-\mu))$ $10^{-6}/\text{W}$
SCHOTT LITHOSIL-Q	冕牌	1.458	67.83	0.000017	66.219	0.00113
SCHOTT SF57HHT	火石	1.847	23.83	0.000148	115.820	0.01711
OHARA S-FSL5	冕牌	1.487	70.23	0.000258	80.035	0.02067
SCHOTT SF57	火石	1.847	23.83	0.000216	115.820	0.02501
OHARA PBH56	火石	1.841	24.56	0.000379	124.304	0.04710
SCHOTT N-PK52A	冕牌	1.497	81.61	0.002619	138.547	0.36285
SCHOTT N-FK51A	冕牌	1.487	84.47	0.002679	137.649	0.36882
SCHOTT LLF1	弱火石	1.548	45.75	0.003961	94.697	0.37507
OHARA S-FPL53	冕牌	1.439	94.93	0.003313	115.682	0.38321
SCHOTT F2	火石	1.620	36.37	0.004613	93.688	0.43219
SCHOTT LF5	火石	1.581	40.85	0.005164	87.683	0.45275
OHARA S-NSL36	弱冕牌	1.517	52.43	0.006778	68.257	0.46266
SCHOTT N-BK7	冕牌	1.517	64.17	0.005526	92.706	0.51231
SCHOTT SF6	火石	1.805	25.43	0.00476	108.100	0.51455
OHARA S-BAL11	冕牌	1.573	57.74	0.004799	110.205	0.52885
OHARA S-BAL35	冕牌	1.589	61.14	0.004912	121.239	0.59550
OHARA S-NSL3	冕牌	1.518	58.9	0.007031	87.134	0.61260
OHARA S-BSM10	冕牌	1.623	57.05	0.004898	138.394	0.67783
OHARA S-LAL18	弱冕牌	1.729	54.68	0.003736	194.419	0.72640

图 8C

玻璃	玻璃类型	折射率 (n_d)	阿贝数 (v_d)	$M_1 = p\kappa$ $10^{-12}\text{mm}/(\text{N}\cdot\text{K})$	$M_1' = E/(K(1-\mu))$ $10^{-6}\text{N}\cdot\text{K}/(\text{W}\cdot\text{mm})$	$M_1 = p\kappa E/(K(1-\mu))$ $10^{-6}/\text{W}$
SCHOTT SF1	火石	1.717	29.51	0.009407	103.87	0.97707
SCHOTT SF4	火石	1.755	27.58	0.008792	113.51	0.99800
SCHOTT SF2	火石	1.648	33.85	0.010628	96.805	1.02881
OHARA S-LAH66	弱火石	1.772	49.6	0.005336	203.47	1.08564
OHARA S-LAL54	弱冕牌	1.651	56.16	0.008279	159.396	1.31967
OHARA S-LAM60	弱火石	1.743	49.34	0.007207	189.751	1.36759
OHARA S-LAL61	弱冕牌	1.740	52.64	0.007987	194.938	1.55707
OHARA S-LAM54	火石	1.757	47.82	0.009739	185.788	1.80934
SCHOTT N-SSK8	弱火石	1.618	49.83	0.021433	133.511	2.86159
SCHOTT N-SF2	火石	1.648	33.82	0.03297	98.100	3.23432
SCHOTT N-KZFS4	火石	1.613	44.49	0.028613	122.341	3.50059
SCHOTT N-SF4	火石	1.755	27.38	0.10919	127.334	13.90368
OHARA S-NPH2	火石	1.923	18.90	0.209153	136.179	28.48221

图 8D

第一示例性投影透镜270的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
400	OHARA S-LAM60	7.21	1.3676	0.298	2.942
401	OHARA S-LAM60	5.70	1.3676	0.525	4.094
402	SCHOTT SF2	2.70	1.0288	1.000	2.778
403	SCHOTT SF1	2.70	0.9771	0.382	1.009
404	OHARA S-LAM60	5.35	1.3676	0.246	1.798
405	OHARA S-BSM10	8.28	0.6778	0.126	0.707
总计			6.7865		13.328

图 9A

第一示例性中继透镜250的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
410	OHARA S-BAL35	10.00	0.5955	0.080	0.4764
411	OHARA S-BAL35	5.58	0.5955	0.180	0.5981
412	SCHOTT SF4	4.00	0.998	0.488	1.9481
413	SCHOTT SF4	4.00	0.998	1.000	3.9920
414	OHARA S-LAM54	8.00	1.8093	0.388	5.6162
415	OHARA S-NSL3	14.00	0.6126	0.336	2.8817
416	OHARA S-LAM54	8.00	1.8093	0.252	3.6476
总计			7.4183		19.1601

图 9B

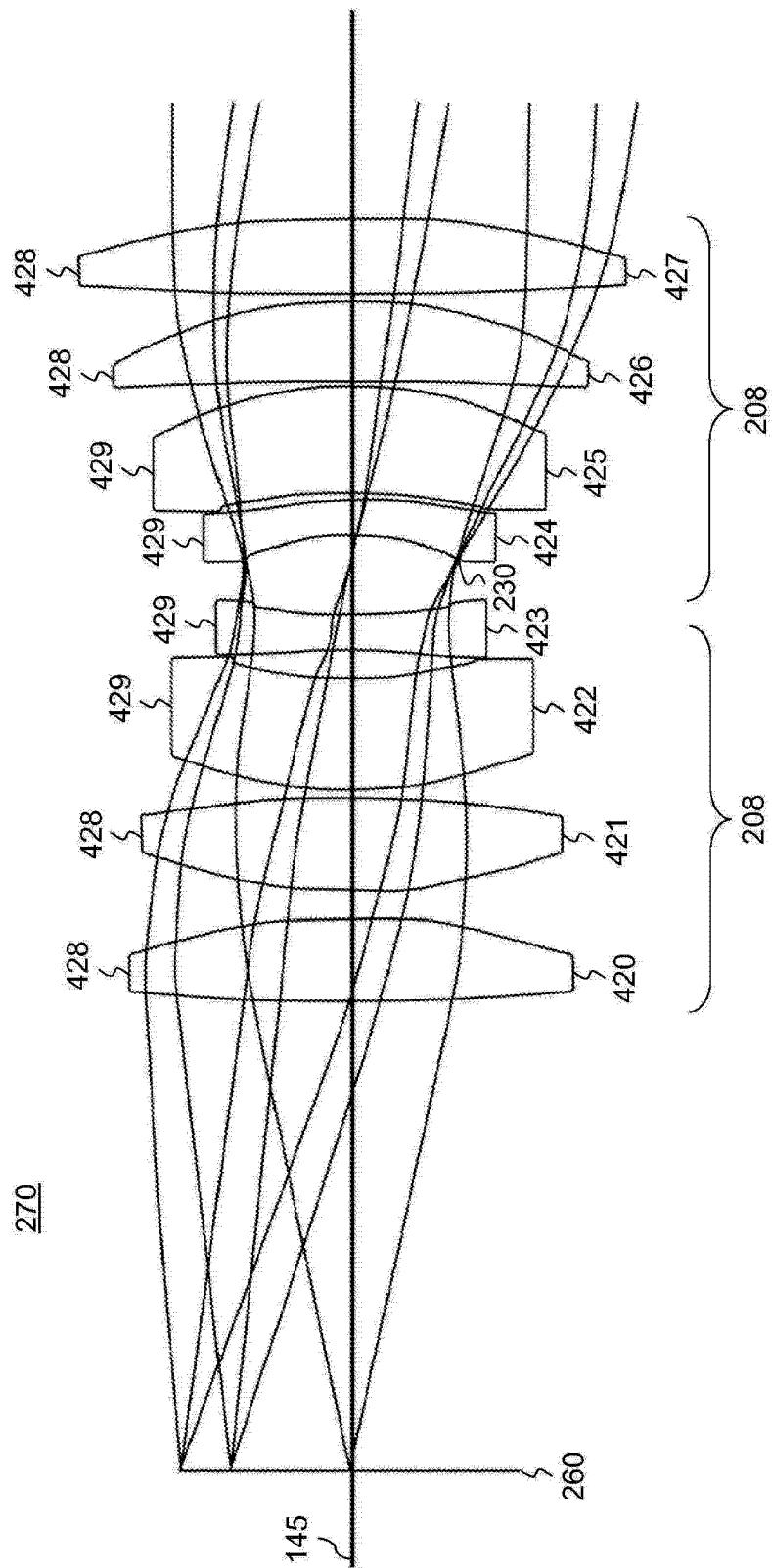


图 10A

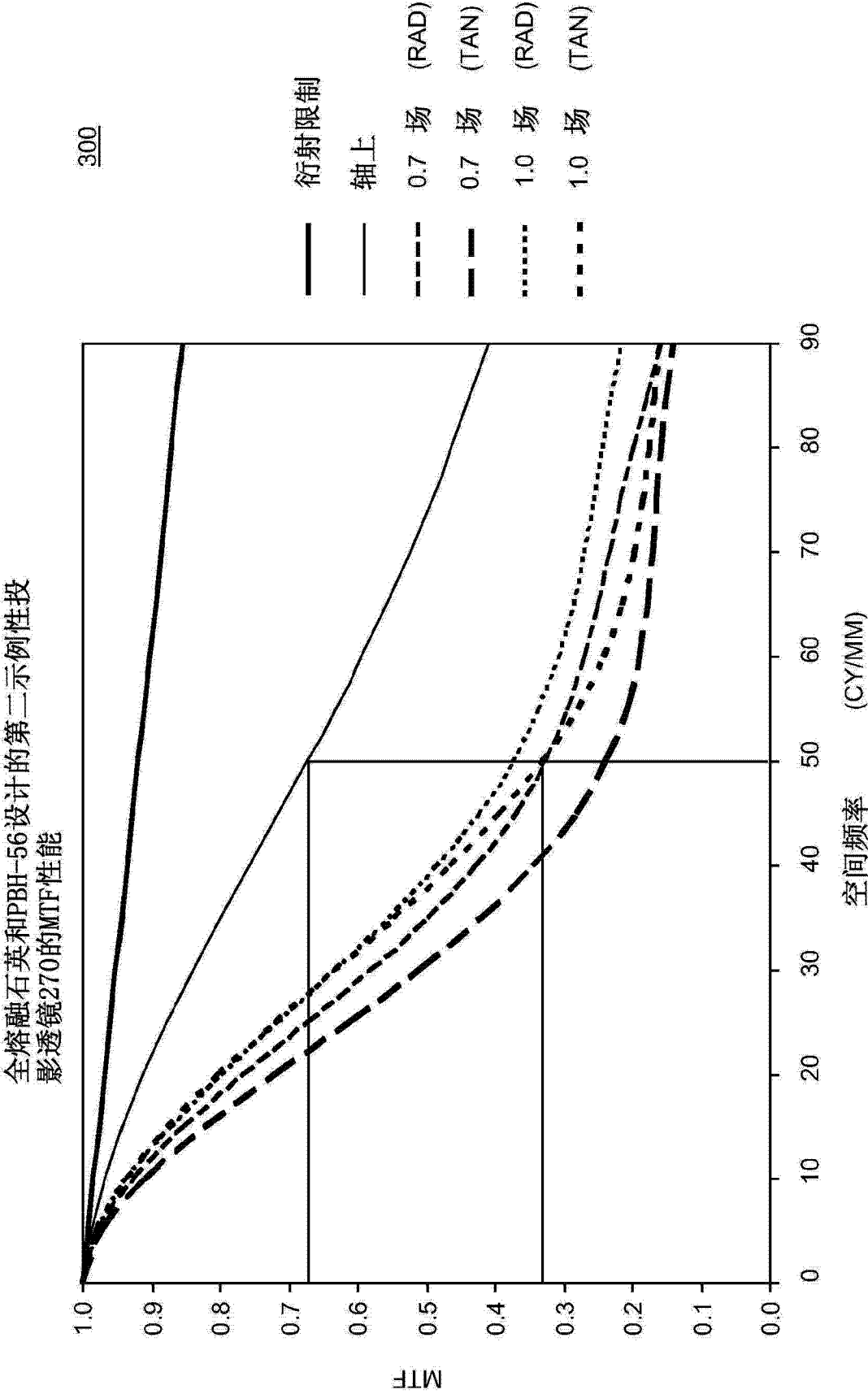


图 10B

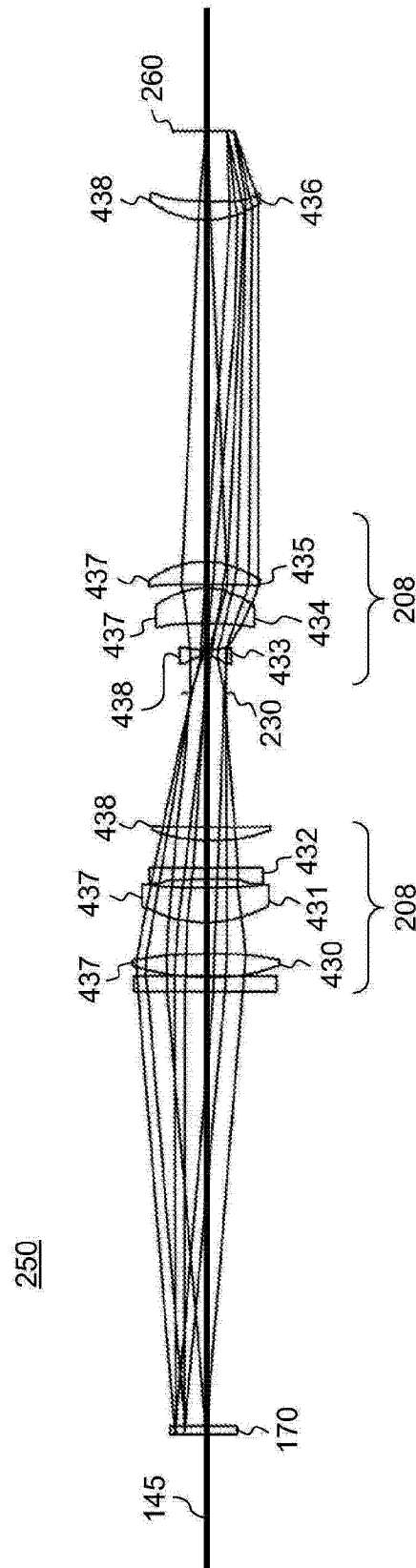


图 10C

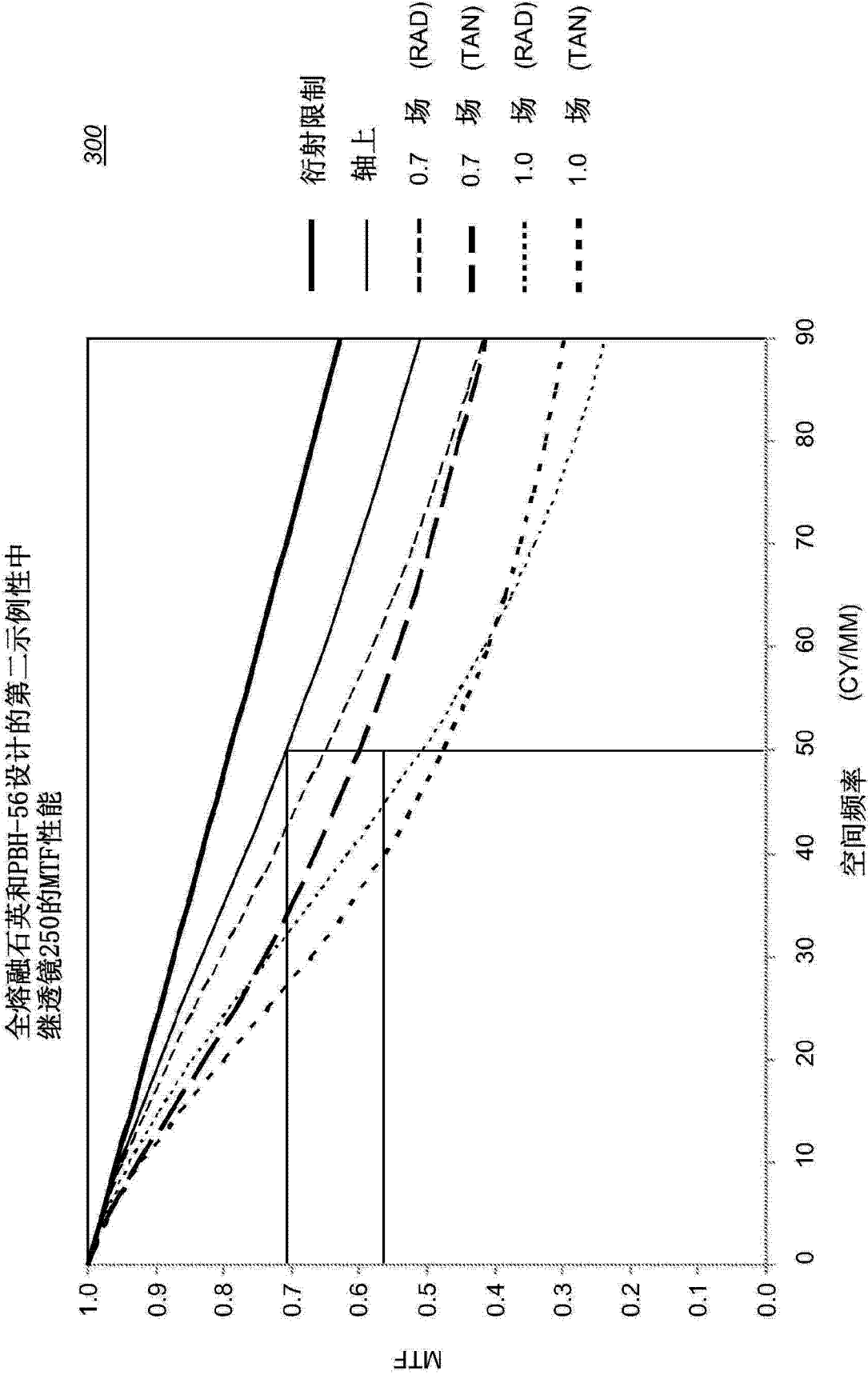


图 10D

第二示例性投影透镜270的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
420	SCHOTT LITHOSIL-Q	6.374	0.00113	0.298	0.002
421	SCHOTT LITHOSIL-Q	7.116	0.00113	0.378	0.003
422	OHARA PBH56	8.458	0.04710	0.525	0.209
423	OHARA PBH56	2.700	0.04710	0.840	0.107
424	OHARA PBH56	2.700	0.04710	1.000	0.127
425	OHARA PBH56	8.149	0.04710	0.382	0.147
426	SCHOTT LITHOSIL-Q	6.024	0.00113	0.246	0.002
427	SCHOTT LITHOSIL-Q	5.778	0.00113	0.126	0.001
总计			0.1929		0.598
改进率			35.17		22.30

图 11A

第二示例性中继透镜250的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
430	SCHOTT LITHOSIL-Q	9.998	0.00113	0.080	0.0009
431	SCHOTT LITHOSIL-Q	15.000	0.00113	0.180	0.0031
432	SCHOTT SF57	5.000	0.025012	0.488	0.0610
433	SCHOTT SF57	4.000	0.025012	1.000	0.1000
434	SCHOTT LITHOSIL-Q	15.000	0.00113	0.388	0.0066
435	SCHOTT LITHOSIL-Q	9.926	0.00113	0.336	0.0038
436	SCHOTT SF57	7.000	0.025012	0.252	0.0441
总计			0.0796		0.2195
改进率			93.25		87.291

图 11B

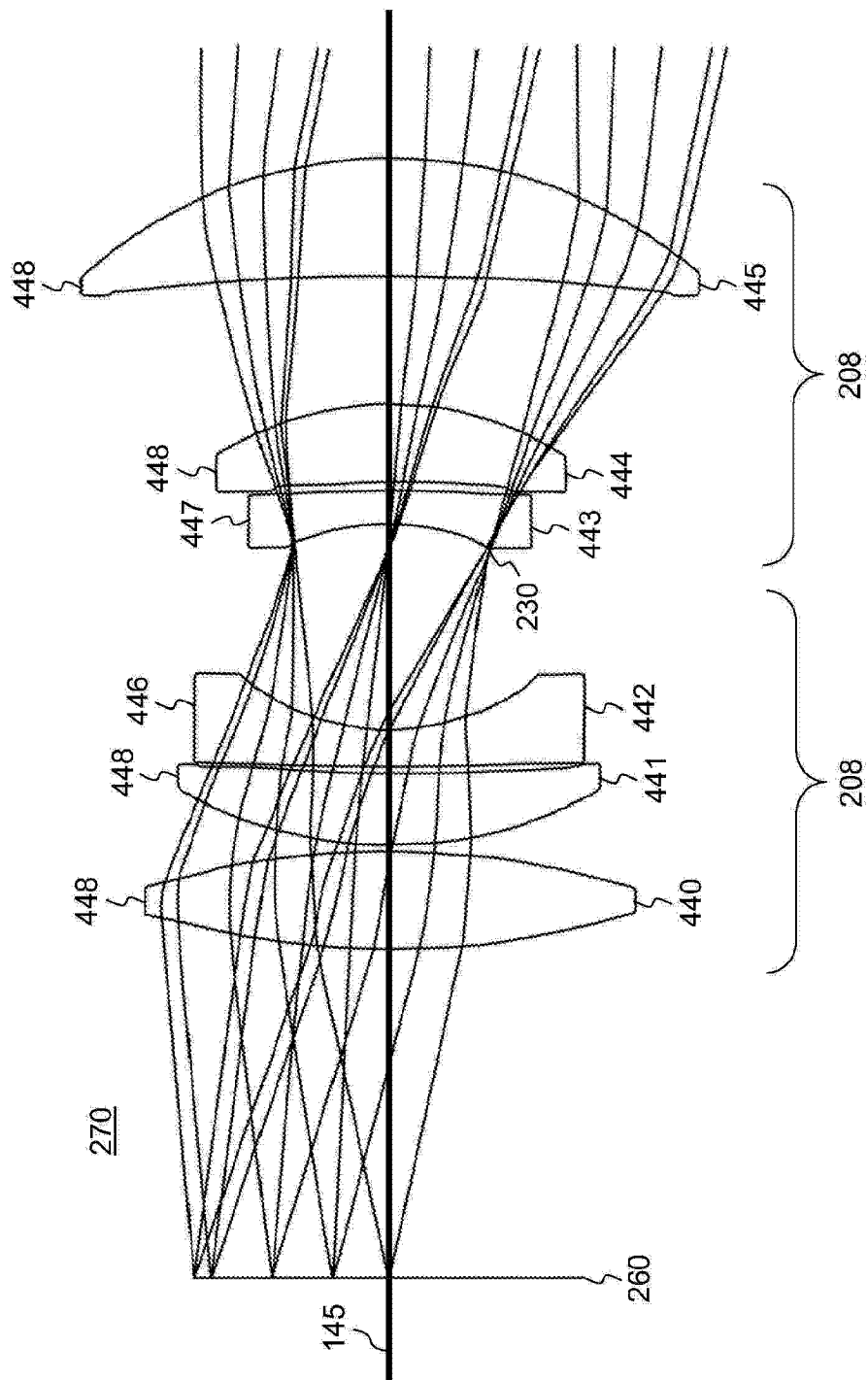


图 12A

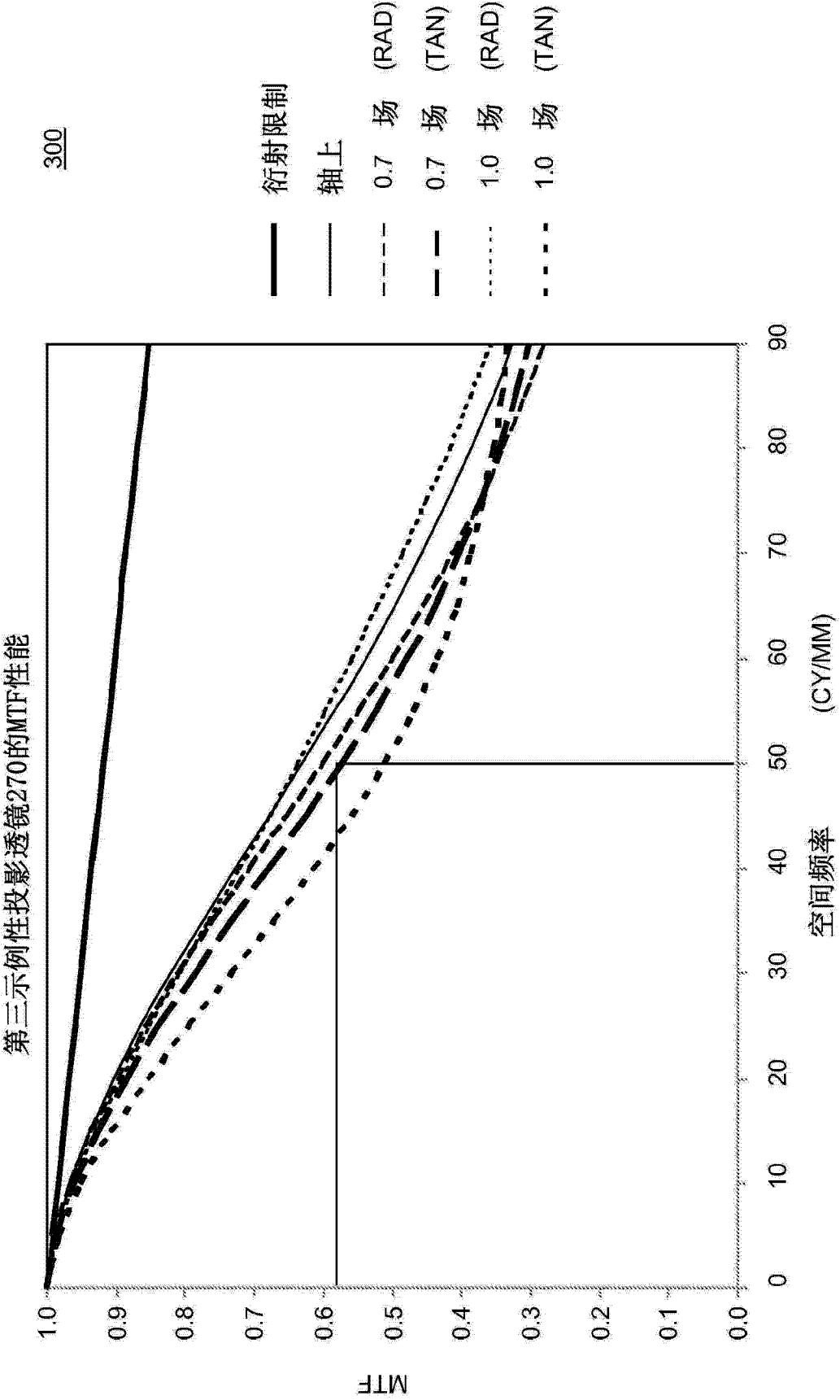


图 12B

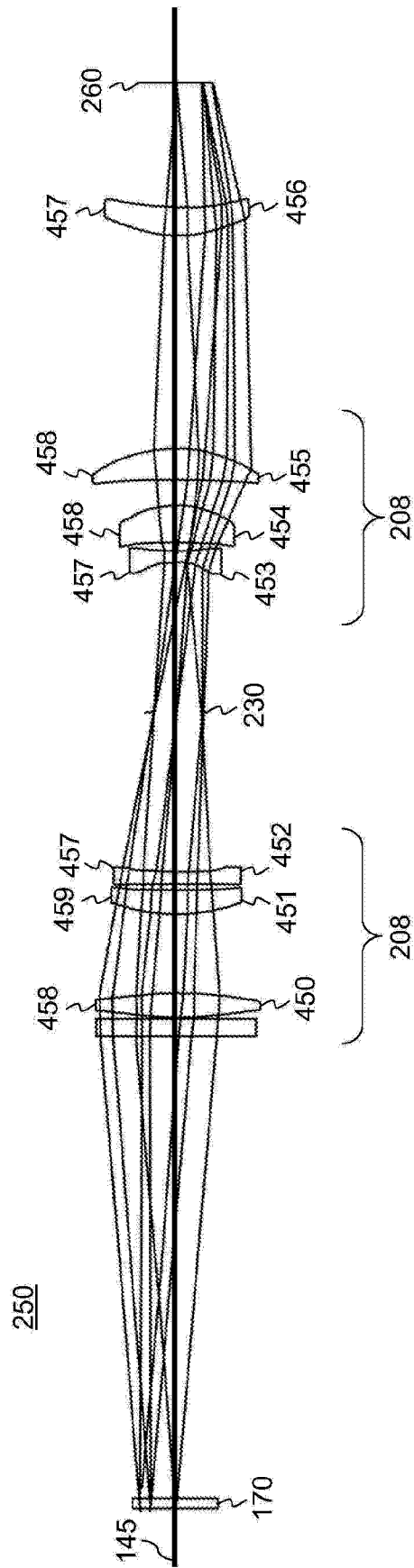


图 12C

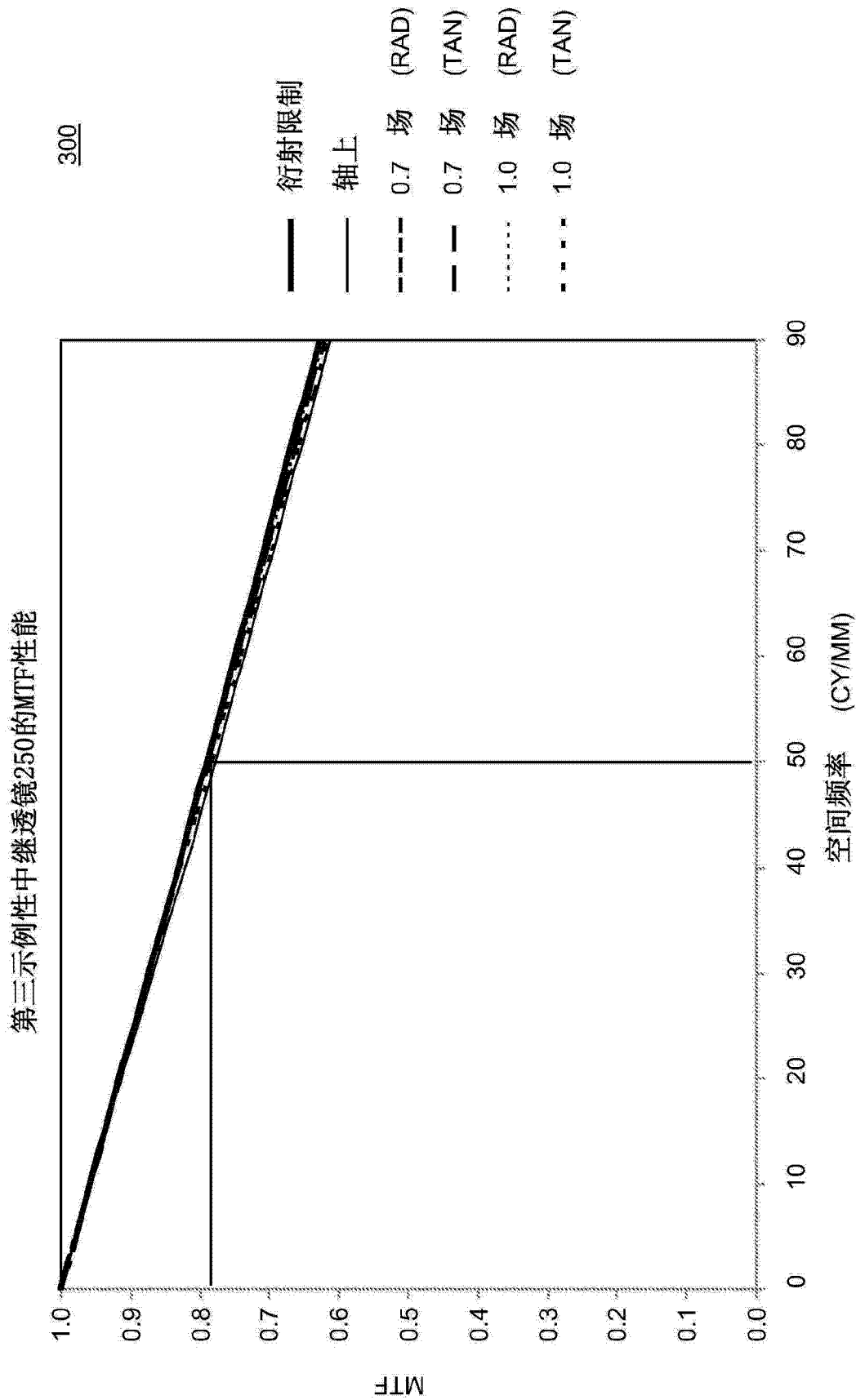


图 12D

第三示例性投影透镜270的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
440	OHARA S-LAL18	6.98	0.7264	0.130	0.658
441	OHARA S-LAL18	5.07	0.7264	0.180	0.664
442	SCHOTT LITHOSIL-Q	2.70	0.0011	0.225	0.001
443	OHARA PBH56	2.50	0.0471	1.000	0.118
444	OHARA S-LAL18	5.50	0.7264	0.641	2.561
445	OHARA S-LAL18	8.52	0.7264	0.124	0.765
总计			2.9538		4.767
改进率			2.30		2.80

图 13A

第三示例性中继透镜250的热应力双折射性能

元件	玻璃	厚度 (mm)	M ₁ (10 ⁻⁶ /W)	峰值功率 (标准化)	M ₂
450	OHARA S-LAL18	7.73	0.72640	0.2752	1.5453
451	SCHOTT LITHOSIL-Q	8.97	0.00113	0.5110	0.0052
452	OHARA PBH56	5.0	0.04710	0.5781	0.1361
453	OHARA PBH56	4.13	0.04710	1.0000	0.1945
454	OHARA S-LAL18	11.88	0.72640	0.5842	5.0415
455	OHARA S-LAL18	11.43	0.72640	0.1988	1.6502
456	OHARA PBH56	9.53	0.04710	0.1484	0.0666
总计			2.3217		8.6395
改进率			3.195		2.218

图 13B

表面	半径 (mm)	厚度 (mm)	孔径 (mm)	玻璃
物体(屏幕)	无穷大			
1	33.628	8.5200	41.599	SLAL18 OHARA
2	162.829	9.2600	39.409	
3	23.032	5.5000	22.890	SLAL18 OHARA
4	55.548	0.6160	18.568	
5	158.100	2.5000	18.287	PBH56 OHARA
6	16.467	1.7600	14.164	
7		13.0340	13.975	(光阑)
8	-16.900	2.7000	20.415	SIO2 SCHOTT
9	-245.900	0.5300	25.704	
10	-109.408	5.0700	25.847	SLAL18 OHARA
11	-30.893	0.5000	27.948	
12	59.970	6.9800	32.320	SLAL18 OHARA
13	-59.970	23.8813	32.662	
图像(原始图像)	无穷大			28.016

图 14A

表面	半径 (mm)	厚度 (mm)	孔径 (mm)	玻璃
物体 (DLP)				
1	158.5630	171.0000	54.6919	SLAL18 OHARA
2	-158.5630	7.7300	54.5364	
3	57.8650	27.3000	42.5011	SIO2 SCHOTT
4	无穷大	8.9700	40.0894	
5	-204.2040	1.3100	39.8404	PBH56 OHARA
6	277.8740	5.0000	37.9682	
7	无穷大	54.4900	15.8749	APERTURE STOP
8	-21.9660	52.5400	22.9547	PBH56 OHARA
9	168.8000	4.1300	27.8491	
10	-70.6670	2.9000	29.1486	SLAL18 OHARA
11	-38.6200	11.8800	37.7977	
12	-328.6680	8.9900	50.1425	SLAL18 OHARA
13	-42.7620	11.4300	52.1954	
14	52.1840	73.3300	48.0193	PBH56 OHARA
15	86.3170	9.5300	44.7866	
原始图像		43.1900	26.9214	

图 14B

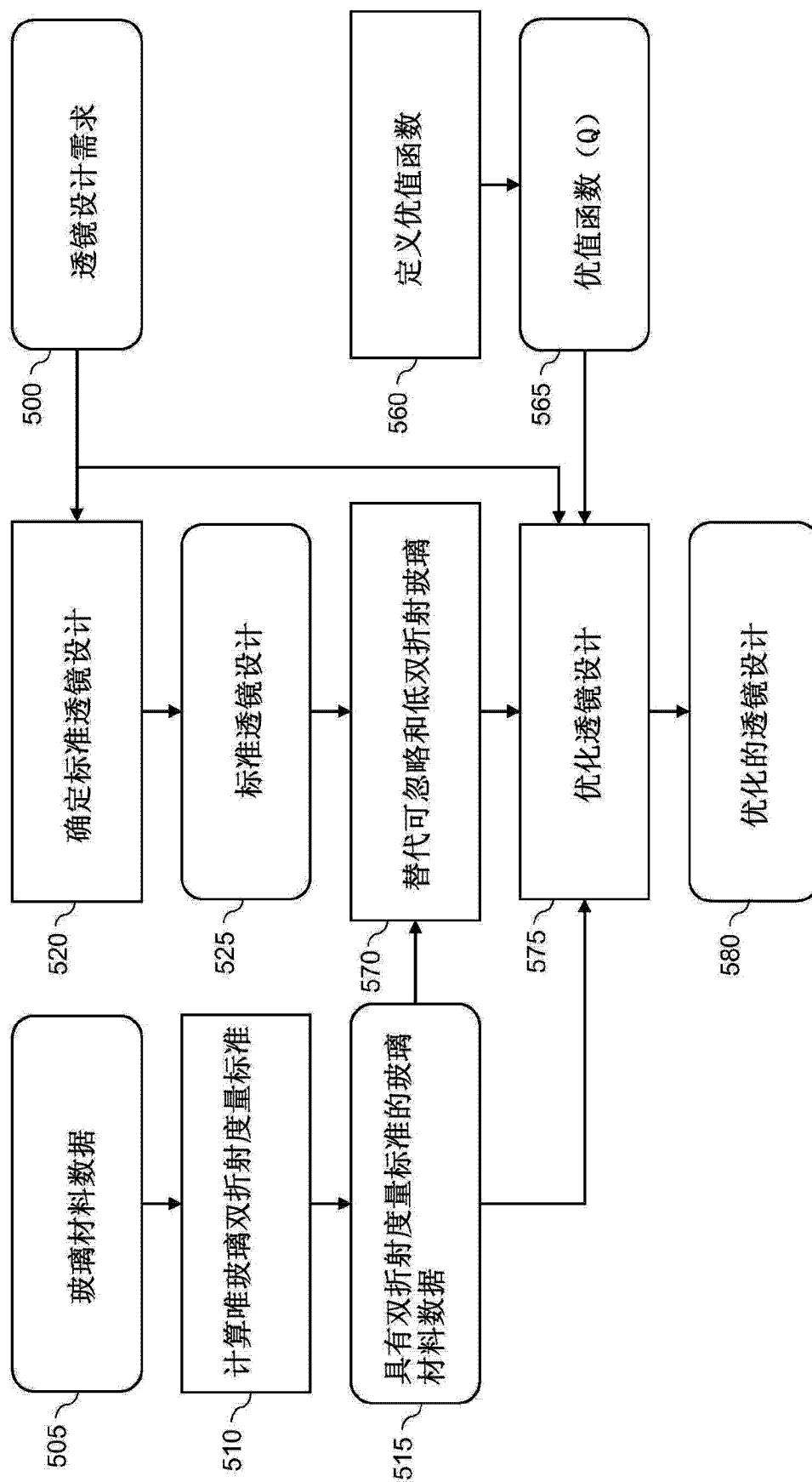


图 15

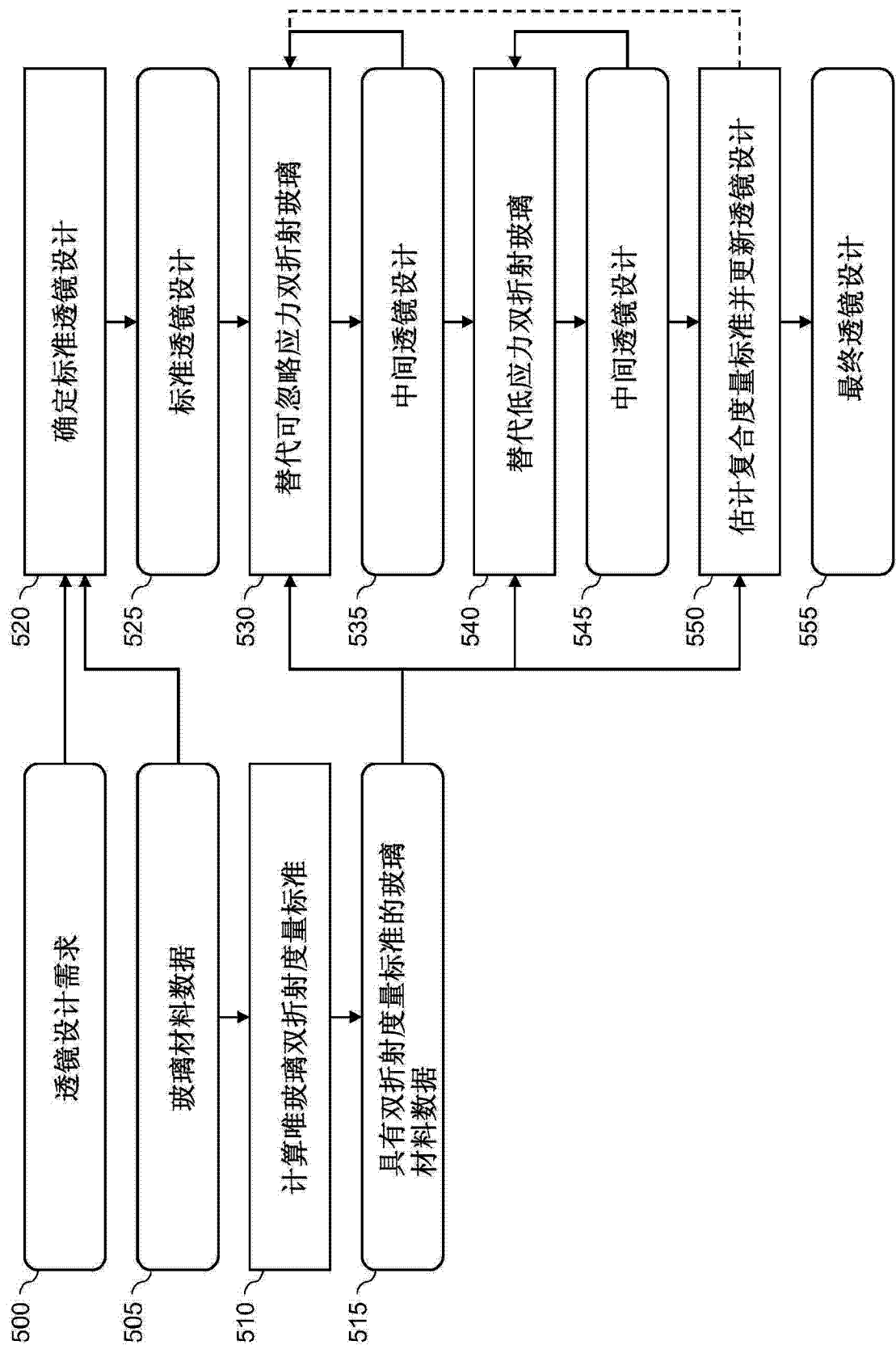


图 16

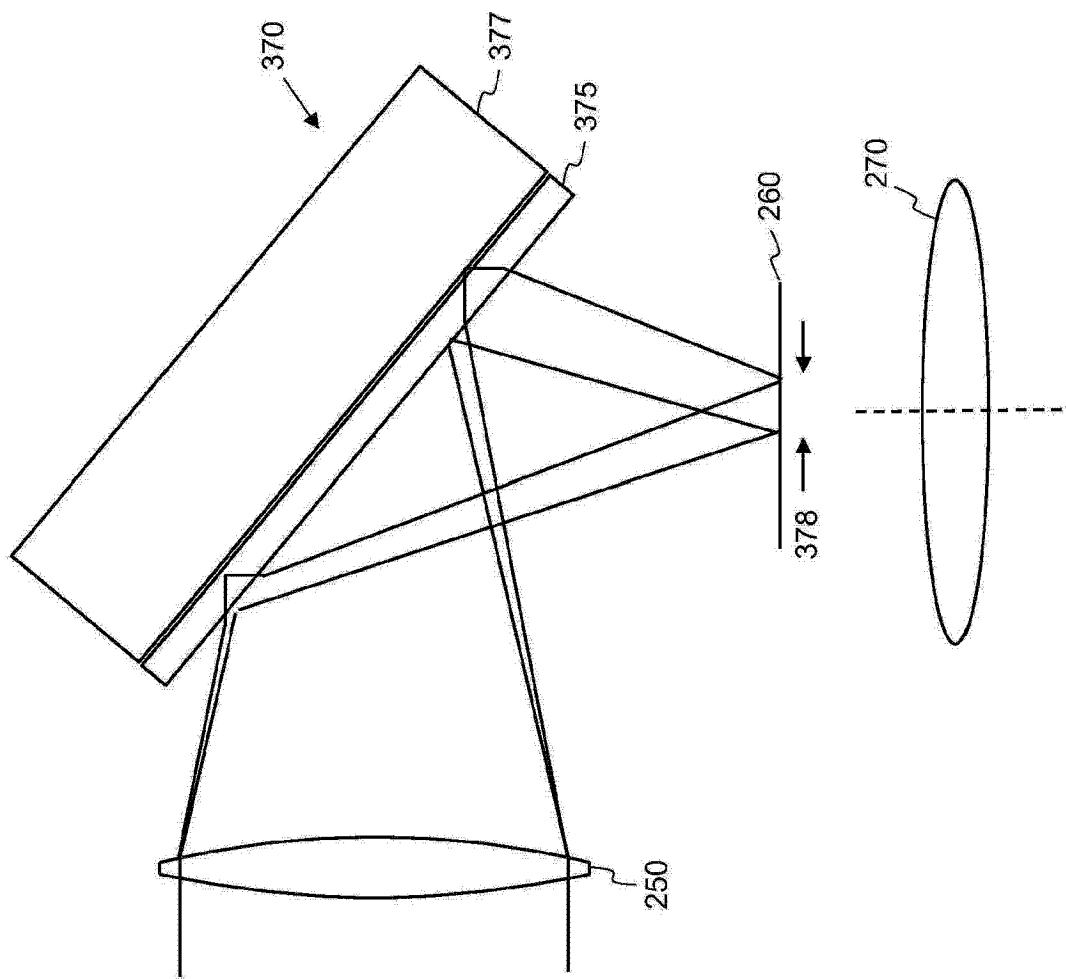


图 17