



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102084280 A

(43) 申请公布日 2011. 06. 01

(21) 申请号 200980121054. 0

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 04. 24

G02B 26/08 (2006. 01)

(30) 优先权数据

G03F 7/20 (2006. 01)

61/047, 715 2008. 04. 24 US

G02B 5/18 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 12. 06

(86) PCT申请的申请数据

PCT/IB2009/005765 2009. 04. 24

(87) PCT申请的公布数据

W02009/130603 EN 2009. 10. 29

(71) 申请人 麦克罗尼克迈达塔有限责任公司

地址 瑞典泰比

(72) 发明人 托布乔姆·桑德斯特罗姆

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 马高平

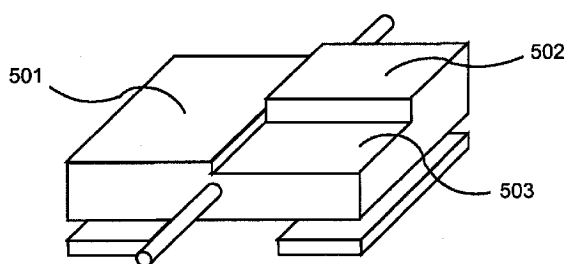
权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 18 页

(54) 发明名称

具有结构化反射镜表面的空间光调制器

(57) 摘要

本发明涉及改进空间光调制器的方法,特别是对于反射式的微机械空间光调制器,用于具有简单的系统结构、高精度度、高功率处理能力、高吞吐量和/或高光学处理能力的应用。应用包括光学数据处理、图像投影、光刻、图像增强、全息摄影、光学计量、相干与波前控制、和自适应光学。本发明的特别方面是衍射式空间光调制器的消色差,因此它们可以顺序地、同时地适用于多个波长或作为在非常短脉冲中光谱增宽的结果来使用。



1. 一种具有多个离轴阶跃表面反射镜的空间光调制器,适合于利用中继照明的预定所得波的特性对相干的或部分相干的照明进行中继,包括:

倾斜反射镜阵列,每个反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴;

倾斜反射镜阵列中至少一些反射镜的基本上平的反射表面之上的表面结构,该表面结构化反射镜具有至少一个阶跃,该阶跃将该反射表面划分为多个反射表面并产生来自多个反射表面的中继照明的部分之间的相位差;

其中,至少一个阶跃相对于倾斜轴是离轴的。

2. 根据权利要求 1 所述的空间光调制器,进一步包括:

具有离轴阶跃的表面结构化反射镜,其用于对照明波长变化进行补偿,照明波长变化导致波特性改变。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的空间光调制器,进一步包括:

具有中心波长的中继照明;和

来自多个反射表面的中继照明的部分之间的相位差关于中心波长大于 270 度。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的空间光调制器,进一步包括:

具有中心波长的中继照明;和

中继照明的部分之间的相位差关于中心波长大约是  $n*360$  度,其中  $n$  为正的、非零。

5. 根据权利要求 1 或 2 所述的空间光调制器,其中:

中继照明相位的所计算的导数在阶跃的不同侧上具有相反符号。

6. 根据权利要求 1 所述的空间光调制器,进一步包括:

具有离轴阶跃的表面结构化反射镜,用于产生中继照明的预定偏振态。

7. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的空间光调制器,进一步包括:

具有至少一个由规则的一维栅格中的微结构形成的部分反射表面的表面结构化反射镜,该微结构具有比半波长更小的横向尺寸。

8. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的空间光调制器,进一步包括:

具有反射两个具有不同相位的不同入射偏振的微结构。

9. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的空间光调制器,进一步包括:

具有反射两个具有不同幅值的不同入射偏振的微结构。

10. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的空间光调制器,进一步包括:

反射具有相位差的两个不同入射偏振,所述相位差在倾斜轴的两侧上是不同的。

11. 根据权利要求 1 所述的空间光调制器,进一步包括:

具有离轴阶跃的表面结构化反射镜,其用于通过反射镜倾斜范围产生中继照明中强度和相位的预定轨迹,该预定轨迹与没有离轴阶跃的反射镜产生的轨迹不同。

12. 一种具有多个相位偏移像素组的空间光调制器,适合于根据来自像素组的中继照明的充分复合的强度和相位调制来对相干的或部分相干的照明进行中继,包括:

倾斜反射镜阵列,该反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴;

倾斜反射镜阵列中的反射镜组,该组中的各个反射镜被布置为具有不同高度,从而在组中各个反射镜间产生相位偏移;

其中,驱动反射镜组中各个反射镜产生来自组的中继照明的充分复合的强度和相位调制。

13. 根据权利要求 12 所述的空间光调制器,进一步包括:

组中至少两个反射镜具有  $(1+2n)*\lambda/4$  的相位阶跃 ( $n$  为非负整数),该两个反射镜关于照明轴具有不同的相位偏移。

14. 根据权利要求 13 所述的空间光调制器,进一步包括:

在单位圆内产生任何的复合的反射常数,同时限制移动至小于或等于反射镜边缘处四分之一波长的值。

15. 一种具有多个深阶跃反射镜的空间光调制器,适合于利用对照明波长的减小的操作灵敏度对相干的或部分相干的照明进行中继,包括:

倾斜反射镜阵列,该反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴;

倾斜反射镜阵列中的深阶跃反射镜,该深阶跃反射镜具有至少一个将该反射表面划分为多个反射表面的阶跃,并且在特定反射镜上的相邻反射表面之间产生关于照明的中心波长大于  $135^\circ$  的高度差;

由此减小由照明波长的反射镜操作而引起的衍射效应的相关性。

16. 一种具有应用于像素组的多个偏振变化微结构的空間光调制器,适合于根据来自像素组的中继照明的充分复合的强度和相位调制来对相干的或部分相干的照明进行中继,包括:

倾斜反射镜阵列,反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴;

倾斜反射镜阵列中的反射镜组,组中各个反射镜被布置成在组中各个反射镜中在各个反射镜的表面上具有不同的偏振产生微结构;

其中,驱动反射镜组中各个反射镜产生来自组的中继照明的可控偏振态。

17. 根据权利要求 16 所述的空间光调制器,进一步包括:

将至少一个基本上平的反射表面划分为部分表面的阶跃,该阶跃具有不同高度,所述高度被选择以减少对于通过入射波长的中继辐射的强度和相位的影响。

18. 一种通过纳米印记制造阶跃和结构的方法。支持存在于说明书中。

19. 一种具有多个反射镜的空间光调制器,适合于改变相干的或部分相干的照明的相位和 / 或偏振和对相干的或部分相干的照明进行中继,包括:

倾斜反射镜的反射镜阵列,该反射镜阵列通过衍射效应控制中继照明的强度,该反射镜具有至少一个基本上平的反射镜表面和倾斜轴;和

各个反射镜或反射镜组,在各个反射镜上的区域之间或者在反射镜组中的反射镜之间具有表面结构上的预定的差异(即高度上和 / 或表面微结构上的差异);

其中,在表面结构上具有预定差异的反射镜适合于被单独驱动或成组驱动以产生强度和(相位和 / 或偏振)的组合,该组合不能通过具有单个平的反射表面的倾斜反射镜阵列或者具有阶跃反射表面、阶跃与倾斜轴重合的倾斜反射镜阵列实现

20. 一种通过在微反射镜阵列中反射镜上进行纳米印记来制造阶跃和结构的方法,该方法包括:

利用来自模板的深度图案将 UV 硬化化合物纳米印记在聚合物膜上;

硬化该 UV 硬化化合物;

在该已硬化的化合物上沉积反射膜;和

处理该反射膜以形成倾斜微反射镜的阵列。

## 具有结构化反射镜表面的空间光调制器

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求美国临时专利 No. 60/047, 715 的优先权。该相关申请在此结合作为参考。

### 背景技术

[0003] 基于微机械光阀 (shutter) 或反射镜, 或者基于反射式液晶或其它的电光单元, SLM 可以是透射式的 (transmissive) 或反射式的 (reflective)。本发明的大部分涉及微机械的反射式 SLM, 即微反射镜阵列。反射式的微机械 SLM 具有的优点在于它们可以是价廉的和稳定的, 并且可以具有高功率处理能力和非常高的数据速率。它们可以被建在数百万反射镜的大阵列中, 并且操作速度更多地由数据加载速度而较少由反射镜本身的操作来限定, 这是因为每个反射镜可以在数百千赫兹或甚至兆赫兹的范围中操作。要不是将数据加载到芯片上的瓶颈, 微反射镜阵列可以很容易地以每秒  $10_{12}$  像素操作地进行操作。另一个优点在于它们适用于非常短波长的光, 例如深远 UV 光或甚至极 UV (软 x 射线) 光。

[0004] 许多不同类型的空间光调制器已经在专利和会议中公开。在微反射镜阵列 SLM 中, 四种不同类型的微反射镜阵列在技术上是重要的并且同时说明了在设计和操作原理方面的变型, 它们是: 主要用于投影的 Texas Instruments 的 DMD 反射镜阵列 (美国专利 US 5, 583, 688); 用于光刻的 Micronics 的倾斜反射镜 (美国专利 US 7, 009, 753), 1 § 0020, 包括具有来自 Ljungblad 等人的相位阶跃的 SLM; Lucent and FhG-IPMS 所示的用于光刻和波前修正的活塞式 SLM; 和 Silicon Light Machines 的用于投影显示和光刻的一维阵列 (美国专利 US 5, 459, 610)。当着眼于反射式微机械 SLM 时, 理解这些阵列类型的特性是有用的。

[0005] 一些通过镜面反射 (specular reflection) 进行工作, 如 TI 的 DMD (美国专利 No. 5, 583, 688), 而其它的通过衍射进行工作, 如大多数的其它类型。在衍射中, 在像素内的或像素之间的相位差用于对光进行调制。在镜面反射中, 像素表面的方向将反射的光束发送到光学系统的接收孔径中或者它的外部。不同的 SLM 之间的另一区别可以是光在相邻反射镜之间是否是相干的。当使用 TI 的 DMD 时, 光在反射镜之间通常是不相干的; 在活塞式 SLM 中, 光必须是相干的; 而在 Silicon Light Machines 的设备中, 依据设备和系统设计, 光在像素之间可以是相干或者不相干的。第三区别是致动的类型, 即, 反射镜是如活塞一样向上和向下移动还是如摆动板一样倾斜。第四区别是当反射镜被致动时, 电场的相位、幅值或两者是否被调制。最后, 操作可以是开关的 (“数字的”) 或具有多个状态 (“模拟的”)。

[0006] 分析上述 SLM, 我们发现 TI 的 DMD 设计单独归于一组: 镜面的、反射镜之间不相干的、倾斜的、仅调制通过光学系统的光量、和开关的。大多数其它的设备通过衍射进行工作, 具有多个状态并且相邻反射镜之间至少一些程度的相干。我们可以将这两组称为不相干的和相干的调制器。在相干的调制器中, 即来自 Micronics、Silicon Light Machines、FhG-IPM and Lucent 的 SLM, 调制的类型和致动的类型有变化。

[0007] 衍射式 SLM 的共同特性在于它们是单色的 (monochromatic)。它们通过相消干扰

(destructive interference) 产生黑暗,相消的相位关系仅在一个波长处是理想的。许多 SLM 可以通过一次使用一个波长和在不同波长之间调整(模拟的)致动而用于不同波长。

[0008] 当衍射式微反射镜阵列被致动时,它们通常改变电场的相位、幅值或两者的组合。这可以描述为复平面中的轨迹,该轨迹是当反射镜从放松状态至完全启动状态被逐渐启动时,反射电场相量在复平面中描绘的。不同的应用需要或者最好被提供不同的轨迹,并且 SLM 的轨迹可以通过公开的方法,特别是通过在反射镜表面上创建高度阶跃和其它表面轮廓,来进行更改。

[0009] 通过仅改变微反射镜的表面轮廓,应用具有各种特性的表面轮廓可以利用相同的驱动电路建立。

[0010] 本发明的又一方面在于倾斜反射镜可以通过高度阶跃被制成充分复合的调制器。充分复合的调制在现有技术中是已知的(Florence, J.M., "FullComplex Spatial Filtering with a Phase Mostly DMD", Proc. SPIE 1558, 487-498 页(1991); 美国专利 US 7,227,687)。

[0011] Texas Instruments 的用于数字投影仪和数字影院的 DLP 微反射镜阵列是反射式微机械 SLM。基于 OEM 的 TI 的设备的近期可用性已经产生了广泛的工业应用。TI 的微反射镜是非相干的开-关型调制器,其实质上在每个反射镜处打开和关闭光。这些调制器已经以相当的独特性而被用于各种应用。一些应用最佳是被提供具有相干照明源的 SLM,因而提供 DMD 则不好。DMD 在 OEM 应用中的成功显示了 SLM 作为光学建构块(optical buildingblock) 的能力,但是仍然存在大量的应用领域等待理想的 SLM 出现。在本申请中公开的 SLM 意图朝向在这些其它应用领域中有用的方向促进 SLM 技术。

[0012] 在反射镜到反射镜之间保持光的相位和相干特性的相干空间光调制器已经被 Micronics Laser 用于光刻。衍射式微反射镜阵列被用作图像调制器,并且用来将深 UV 光投影到光致抗蚀剂(photoresist),从而产生具有小至 0.1 微米的特征的图案。

[0013] 非相干的和相干的调制器之间的一个差异是移动量。相干的或衍射式调制器具有移动波长的一小部分的反射镜,而非相干的调制器具有倾斜以沿不同的方向发送镜面反射的反射镜片(mirror flap)。非相干的调制器在它们的边缘处倾斜(tip)数十波长。相干的调制器可以形成完美的相位面,而该相位在非相干调制器中较少的受到很好的控制或者完全不受控制。好的相位控制在如全息摄影和波前修正的一定应用中是重要的。

[0014] 存在两种主要类型的衍射式微机械调制器:活塞式反射镜(piston mirror)和倾斜反射镜(tilting mirror)。活塞式反射镜向上和向下移动,从而改变从它反射的光的相位,同时保持反射光(reflected light)的幅值恒定。倾斜反射镜具有相反的特性:它改变反射光的幅度而保持其相位不变。这两种类型具有不同的应用。活塞式更好地用于光束转向(beam steering)、波前修正、和全息摄影。另一方面,倾斜型更好地用于高质量光刻。然而,应用可叠加(overlap)。活塞式可以用于具有更复杂点阵化(rasterization)的光刻。并且,在一些应用中,两种类型都不是完美的,因为所需要的实际是可以同时调制幅度和相位的充分复合的设备。例如,全息摄影需要充分复合的调制器,而倾斜型和活塞型调制器都是近似的。充分复合的调制器的重要特性在于它们可以用于形成接近于光轴的衍射图案,而具有对零阶(即非衍射)光以及反射镜(又叫做共轭)和更高阶图像的良好抑制。

## 发明内容

[0015] 本发明涉及改进 SLM 的方法,特别是对于反射式微机械 SLM,用于具有简单系统结构、高精确度、高功率处理能力、高吞吐量和 / 或高光学处理能力的应用。应用包括光学数据处理、图像投影、光刻、图像增强、全息摄影、光学计量、相干与波前控制、和自适应光学。本发明的特别方面是衍射式 SLM 的消色差 (achromatization),因此它们可以顺序地、同时地适用于多个波长或作为在非常短脉冲中光谱增宽的结果来使用。

## 附图说明

[0016] 图 1a 示出了现有技术中已知的活塞式反射镜阵列 (piston mirror array)。

[0017] 图 1b 示出了与图 1a 中所示相同的活塞式反射镜阵列,但具有关于反射镜的最近的一行的光学等效的位置。

[0018] 图 2a 示出了具有单位圆和相量 (矢量) 的复平面,描绘了从图 1a 的阵列中的两个反射镜反射的光的复合振幅 (complex amplitude)。

[0019] 图 2b 示出了具有关于两个反射镜的相量的相同复平面,与图 2a 中相同的相量处于较长波长,和被具有不同位置的反射镜反射的处于较长波长的一个相量,如图 1b 所示。

[0020] 图 2c 示出了对于本文中所描述的特定操作条件被消色差 (achromatized) 的反射镜的顶视图。

[0021] 图 2d 示出了两个反射镜被预偏置 (pre-biased) 以在图 2c 的条件下操作。

[0022] 图 3a 示出了具有扭转铰链的倾斜反射镜和具有可得到的反射复合振幅的轨线 (locus) 的复平面。

[0023] 图 3b 示出了具有允许一些活塞动作的扭转铰链的倾斜反射镜和可得到的复合振幅。

[0024] 图 3c 示出了倾斜反射镜,在附近处的相位阶跃 (phase step) 沿实轴具有正的和负的可得到的振幅。

[0025] 图 3d 示出了倾斜反射镜,其中铰链和旋转轴位于反射镜表面的边缘处,和所得到的振幅的轨迹。

[0026] 图 3e 示出了倾斜反射镜,其中铰链和旋转轴位于反射镜表面的外部,和所得到的振幅的轨迹。

[0027] 图 4a 示出了现有技术中已知的倾斜反射镜阵列。

[0028] 图 4b 示出了具有相位偏差的倾斜反射镜阵列。

[0029] 图 4c 示出了具有三个偏差值的反射镜的六边形阵列。

[0030] 图 4d 示出了其中一些反射镜具有相位偏差的相位阶跃反射镜阵列。

[0031] 图 4e 示出了来自图 4d 中标记为 A 和 B 的反射镜的可得到的复合振幅。

[0032] 图 4f 示出了任意的复合振幅可以如何通过来自类型 A 和类型 B 的反射镜的振幅产生。

[0033] 图 5a 示出了已消色差的相位阶跃反射镜。

[0034] 图 5b 和 5c 示出了两个已消色差的相位阶跃反射镜的顶视图。

[0035] 图 5d 示出了具有已消色差的相位偏差的 8 个反射镜。

[0036] 图 5e 和 5f 示出了具有相位偏差的两个相位阶跃反射镜的可替换实施方式。

- [0037] 图 6a 示出了已消色差的倾斜反射镜。
- [0038] 图 6b 以示意形式示出了图 6a 的区域 A1 和 A2 中反射与波长的对比 (versus)。
- [0039] 图 6c 示出了已消色差的区域如何通过表面图案产生。
- [0040] 图 6d 示出了图 5f 和图 6c 中图案的组合。
- [0041] 图 7a 示出了反射镜阵列,其中反射镜具有改变反射光的偏振的表面。
- [0042] 图 7b 示出了反射镜阵列,其可以用于产生任意的偏振光束。
- [0043] 图 7c 示出了可以产生任意的偏振的具有四个偏振态的庞加莱球 (Poincare-sphere)。
- [0044] 图 7d 示出了反射镜,其在 SLM 中用作可控的偏振元件。
- [0045] 图 7e 示出了反射镜,其在 SLM 中可以用作可控的偏振旋转元件。
- [0046] 图 8a 示出了利用充分复合 SLM 的全息光刻打印机。
- [0047] 图 8b-d 示出了成像系统,其中根据本发明的至少一个 SLM 用于增强物体的图像。
- [0048] 图 9a-d 以示意形式示出了在普通的、偏振测定和干涉测量显微镜中通过根据本发明的 SLM 的图像增强。
- [0049] 图 10a 示出了大屏幕投影仪。
- [0050] 图 10b 示出了图像可以如何通过装置以光束转向 (beam-steering) 模式被拉伸 (drawn)。
- [0051] 图 10c 示出了图像可以如何在 SLM 与屏幕之间没有光学系统的情况下进行投射。

### 具体实施方式

[0052] 以下详细描述参照附图。描述优选实施例是用于说明本发明,而不是限制本发明的范围,本发明的范围由权利要求限定。本领域技术人员将意识到关于以下描述的多种等同变型。

[0053] 图 1 示出了现有技术空间光调制器。它具有像素阵列,像素阵列可以是一维的或二维的,密集的或散布着有源区域 (passive area)。每个像素,其可以是反射镜,可向上或向下移动使得从顶部侵入 (imping) 的光场根据反射镜或像素的高度以不同的相位被反射。如图 1a 中的反射镜阵列用于波前修正 (wavefront correction)、信号处理、光束转向和用于上述讨论的光刻。每个像素的高度被预先计算并且例如以电压形式的高度信息被送至使反射镜向上和向下移动的致动器以产生所希望的图像或波前。

[0054] 图 1 中的反射镜是平坦的。现在将示出这些 SLM 像素和其它的属性,通过表面结构的添加,特别是通过相位阶跃和子波长周期结构 (subwavelength periodic structure),如何被改变并适于特殊的应用需要。

[0055] 给出所希望的图像的反射镜位置的计算可为单波长进行。对于其它波长,则通常是不对的。例如,假定反射离开 (reflect off) 图 1a 中每个第二反射镜的光具有 0 度电子相位 (electric phase)。其它反射镜 (或者确切地,来自它们的光) 在 633nm 标称波长 (nominal wavelength) 具有 180 度相位。结果是电场振幅抵消 (cancel) 因为它们具有相同的幅值 (magnitude) 但相反的相位。在光谱方向上 (零衍射阶),没有反射光。零阶完全地被相消干扰 (destructive interference) 所消除。

[0056] 但是如果不同波长,例如 405nm 的光,被相同的反射镜反射离开,两种类型的反射

镜之间的相位在 405nm 处是 281 度。相消干扰被破坏并且在零衍射阶具有明显的光。如果相位角是  $\delta$  并且波长是  $\lambda$ , 则存在有限导数 (finitederivative)  $d\delta/d\lambda$ , 其决定 (govern) 消光 (extinction) 损失。在此实例中, 上述  $d\delta/d\lambda$  近似为  $(281-180)/(405-633) = -0.44$  度/nm。

[0057] 图 1b 示出了在图 1a 中第一排处于交替位置的每个反射镜, 交替位置恰好在 633nm 标称波长位移一半波长。在 633nm, 不可能在使用交替位置之一的反射场内 (忽略在反射镜之间的边界处的近场效应) 看到, 因为在两个交替位置之间的相位差恰好是一个波长 (半个波长的两倍, 因为光被反射)。任意的交替位置可用于每个反射镜并且不会影响在 633nm 的反射。

[0058] 然而, 在不同波长, 在为 633nm 计算出的交替位置的相位之间存在大的差值, 因为交替位置具有不同的  $d\delta/d\lambda$  值。特别地, 一些交替位置具有正的  $d\delta/d\lambda$  而一些具有负的  $d\delta/d\lambda$ 。通过为一些反射镜或反射镜的某些部分选择交替位置, 能够取消对波长的相关性 (dependence)。如果一半的反射镜具有 0 相位, 并且另一半被分成相位 -180 度和 +180 度的均等区域, 则存在导数的第一阶相消 (cancellation) 并且消光 (extinction) 将对于小的波长转换 (wavelength shift) 是与波长独立的。

[0059] 更详尽的分析将示出还存在第二阶 (second-order) 影响: 具有 50% +180 和 50% -180 度的反射镜具有平均反射率, 其依波长误差的二次函数而降低。下一级修正是使得零度反射镜变为 50% 0 度, 25% +360 度和 25% -360 度。这样, 逐渐更高阶 (higher order) 的消色差能够被添加到阵列中, 消色差在意义上是指为一个波长的良好消光也是为相邻波长的良好消光。

[0060] 消色差的原理是  $\lambda_0$  处的  $\delta_0$  相位差给出了导数  $d\delta/d\lambda = -\delta_0/\lambda_0$  并且等效值 ( $\lambda_0$  处)  $\delta_0-360$  度给出了导数  $d\delta/d\lambda = (360-\delta_0)/\lambda_0$ , 如果具有相位  $\delta_0$  的区域 A 被分成具有相位  $\delta_1 = \delta_0$  的一个部分并且区域  $A1 = A*((360-\delta_0)/360)$  和具有相位  $\delta_2 = \delta_0-360$  的一个部分并且区域  $A2 = A*(\delta_0/360)$ 。

[0061] 这种以及更复杂的情况能够通过检查导数  $d(\text{Re}(E_{\text{total}}))/d\lambda$  和  $d(\text{Im}(E_{\text{total}}))/d\lambda$  并且设定它们等于零而解决, 其中  $E_{\text{total}}$  是区域 A 上的集成复合 E 场 (作为相量) 并且 Re 和 Im 表示区域的真实的和想象的场。如果  $d^n(\text{Re}(E_{\text{total}}))/d\lambda^n$  和  $d^n(\text{Im}(E_{\text{total}}))/d\lambda^n$  在波长跨度上被设定为零或被最小化, 其中 n 为 2, 3 或更大, 那么得到更完整的消色差。

[0062] 图 2a 示出了复平面 201 中任意复值 (complex value) 202 如何由两个相量 203 和 204 表示的两个活塞区域 A 和 B 所产生。每个相量表示复合振幅反射 R, 并且当相位改变时, 相量围绕原点旋转。通过选择两个相量 203 和 204 的角度, 它们能够被添加到所希望的复合反射系数 202 中。这仅对于一个波长是正确的, 并且衍射部件通常被认为是单波长设备。

[0063] 图 2b 示出了当波长改变时发生的事情。因为波长更长, 所以适于一定反射镜高度的相位在度数上变得更小, 虚线相量 205。集成复合振幅随后变为 206, 其在该实例中接近原点。然而, 如果 A 的相位在设计波长处改变 360 度, 相量获得对于波长的相反依赖使得 A 的相位随着更长波长变得更大 (205 的相反的相关性)。通过将区域 A 分成类似 205 的一个部分和类似 208 的一个部分, 组合的相量能够被形成为独立于波长。如果对相量 205 进行相同的处理, 点 202 可被形成为独立于波长。

[0064] 活塞式反射镜具有长冲程, 即, 它可用于产生从 0 至 360 度的相位角或者甚至一个



单周期之外的相位角。适于上述消色差的方法最佳工作在较小的相位角范围内。因此,理想的是输入消色差最可能的或最大临界相位 (critical phase) 范围。通常,这是相消干扰产生消光的角度。消色差随后通过最小化适于该临界范围的相量的变化来实现。

[0065] 图 2c 是活塞式反射镜的消色差的实例,其中能够看到上述临界范围。图 2c 示出了能够向上或向下致动的活塞式反射镜的规则的笛卡尔阵列 (Cartesian array)。它们被分成对应于检测板 (checker board) 上的黑色和白色方块的 A 和 B 反射镜。“黑”反射镜 A 209 优选用于  $-180-0$  度的范围,而“白”反射镜 B 210 优选用在  $0-180$  度的范围。为了形成暗区域,在标称波长处 A 反射镜被致动到  $-90$  度而 B 反射镜被致动到  $90$  度。差值是  $180$  度并且反射镜通过相消干扰消除零阶。在更长的波长处,平的反射镜 (flat mirror) 的相位差将更小并且消光更不完全。通过平的反射镜,零阶将在标称波长处,即在可视范围中心的  $550\text{nm}$  处被消除。更长和更短的波长将漏过 (leak through) 并且零阶将具有紫色,即红色与蓝色之间的混合色。

[0066] 然而,图 2c 中的反射镜实行消色差是通过使一个区域 211 具有  $0$  相位以及区域 212 对 A 反射镜具有  $+360$  度较高相位并对 B 反射镜具有  $360\text{nm}$  较低相位。作为全部活塞式反射镜的一部分的区域 212 的尺寸确定每个反射镜在此的相位具有最佳消色差。为了在  $-90$  和  $+90$  度的标称消光处达到最佳,转换区域 212 将是非转换区域 211 的三分之一。零阶消光于是对于在中心波长附近的延伸的范围内的所有波长都是好的并且零阶是黑色,而不是紫色。对于延伸的范围,是指  $0-60\text{nm}$ , 优选是  $100\text{nm}$  或更大。期望是,披露的技术能够产生跨越可视光谱的零阶扩展;也就是,跨越大约  $400\text{nm}$  至  $750\text{nm}$  的波长范围,或者  $\lambda$  至  $2\lambda$  的范围,或者  $\lambda$  至  $\lambda+350\text{nm}$  的范围。

[0067] 在图 2d 中,偏置被添加到反射镜,使得首先,A 和 B 反射镜都需要相同的力以便到达各自优选范围的中心,并且其次,存在  $45$  度偏置以确保所有的反射镜即使在反射镜之间存在一些变化也能到达  $-180$  和  $0$  度的角度。

[0068] 消光差所需要的阶跃高度 (step height) 典型地在中心波长的  $180$  度相位附近。对于可视波长和在气体或真空中工作,中心波长为近似  $540\text{nm}$  并且物理的阶跃高度是  $270\text{nm}$ 。在 /Ljungblad/ 中的相位阶跃高度是  $90$  度而相位偏置阶跃 (phase bias step) 通常是  $45$  度。这有两个结果:第一,能够增加不同的方案 (scheme),以及第二, $135$  度以上的高度差值会影响装置的波长修正并且可能已被增加用于消色差。

#### [0069] 倾斜反射镜

[0070] Sandstrom、Hornbeck 和 Ljungblad 描述了各种类型的倾斜反射镜。图 3a 示出了具有扭转铰链 (torsion hinge) 302 和静电致动器 303 的反射镜 301。平均复合反射系数能够通过具有相位因子 (phase factor) 的表面上方的反射的集成 (integration) 而建立,所述相位因子来自该位置和倾斜角 304。当反射镜垂直于光时,反射系数是  $1+0j$  (如果排除材料的反射损失和由正规化 (normalization) 引起的在反射镜附近的裂缝 (slit) 中的损失)。当反射镜继续地倾斜至更大角度时,平均反射系数沿如图 3a 中嵌入的复平面中所示的一条直线从  $1+0j$  移至  $0+0j$  (实际至  $-0.2+0j$ )。

[0071] 在图 3b 中,扭转铰链 305 还可弯曲以产生活塞效应。在图 3b 所示的实施例中,具有多个致动器 306、307、308。通过对致动器施加不同的力,可使反射镜倾斜,将反射镜拉向致动器而不倾斜,或执行组合的动作。从致动器发出的组合力引起活塞动作 309,右和左致

动器之间的差值引起倾斜,并且这些运动能够被校准 (calibrate) 并用于控制反射镜以给出任意的复合反射系数。图 3b 中具有两个或更多个致动器的反射镜可被形成为大的阵列以被用作充分复合的空间光调制器 (fully complex spatial light modulator)。在嵌入的复平面中示出了任意的反射系数如何被产生。当反射镜倾斜时,反射系数从单位圆上的高反射改变成原点处的根本无反射。活塞动作引起轨迹 (trajectory) 围绕原点旋转。通过倾斜 (半径) 和活塞 (旋转) 的组合能够到达复平面中的任意点。

[0072] 图 3c 示出了在反射面 313 与 314 之间具有相位阶跃 312 的反射镜,该反射镜产生在标称波长处 180 度延迟或在高度上 90 度延迟。该阶跃在当反射面垂直于入射光时消除零阶 (美国专利 No. 7, 110, 159)。当反射镜倾斜至一侧时,反射镜变亮而相位 0 度,当反射镜倾斜至另一侧时,反射镜变亮而相位 180 度。该相位阶跃反射镜能够与图 3b 中的活塞动作相结合并且给出任意的复合反射系数而仅有图 3b 中反射镜的活塞运动的一半。

[0073] 然而,具有活塞和倾斜动作的反射镜是机械上复合的,并期望借助更简单的机械机构具有充分复合的调制,如以下所示。活塞运动能够被一些反射镜的固定的垂直偏移 (offset) 所取代。图 4a 示出了现有技术中已知的反射镜。每个反射镜能够倾斜至一侧。这种类型的阵列用于光刻 (美国专利 No. 7, 009, 753)。在图 4b 中,阵列有一半的反射镜在相位上位移 90 度。一半的反射镜具有从  $0+0j$  至  $1+0j$  的反射率而其它的反射镜具有从  $0+0j$  至  $0+1j$  的反射率。这两种类型的反射镜被布置成棋盘形图案 (checkerboard pattern)。行式或列式以及其它的密集图案 (dense pattern) 也是可能的。如果此光学系统不能解析 (resolve) 单个的 (individual) 反射镜,那么在两个或更多个反射镜上的具有 0 至 1 的幅值以及 0 至 90 度相位的复合反射系数的平均值可通过这两种类型的叠加 (superposition) 予以产生。这对于全复合的 (fullcomplex) SLM 是不允许的,但对于相位角能够通过驱动 (driving) 进行调整的 (tuned) SLM 是允许的。

[0074] 在图 4c 中,示出了具有三种类型反射镜的六边形图案。类型一具有 0 度相位,类型二和类型三分别具有 120 度和 240 度的相关相位。从 0 至 360 度的任何相位角能够通过三种类型的组合予以合成。事实上,任何复合系数能够在顶点 (corner) 位于  $1+0j$ ,  $0.5+\sqrt{3}/4j$ ,  $-0.5-\sqrt{3}/4j$  等处的六边形内予以合成。

[0075] 图 4d 示出了类似图 4b 中的棋盘形图案,但具有类似图 3c 中的相位阶跃反射镜。每个反射镜能够从  $-1+0j$  至  $+1+0j$  或  $0-1j$  至  $0+1j$  进行调制。两个反射镜一起能在单位圆内合成任何复合反射系数,即图 4d 中的 SLM 是一个充分复合调制器。在图 4e 和 4f 中描述了此调制器是如何工作的。A 反射镜产生沿图 4e 中复平面中的线 A 的反射。B 反射镜遵循线 B。线 A 和 B 可被称作这两种类型反射镜的轨线 (loci) 或轨迹 (trajectory)。图 4f 中由黑点所示的任意点可被合成为两个相量的和 (summation),一个沿 A 轨迹的相量和一个沿 B 轨迹的相量。

[0076] 因此,图 4d 示出了一个充分复合的空间光调制器,其能够用于许多应用:图案生成、光束成形 (beam shaping)、光束转向、信号处理、加密、滤光 (filtering)、实时光刻、以及在仪器和工业处理中的许多其它用途。

[0077] 使倾斜的反射镜消色差

[0078] 图 3c 中的阶跃高度以与关于图 2c 描述的类似方式进行消色差。在现有技术 / Ljungblad/ 中的相位阶跃与倾斜轴一致。通过将倾斜轴 / 相位阶跃的每一侧的反射镜区

域细分成局部的区域并在它们之间添加高度差,从而实现消色差。第一阶结果是在图 5a 和 5b 中示出的反射镜。反射镜的一侧 501 具有 0 度相位角,并且另一侧被分成相同的尺寸并且在标称波长处具有  $-180$  度和  $+180$  度的两个区域 502, 503。这使得两侧之间的相位差在第一阶独立于波长。这对于小的波长改变是适合的。对于较大波长偏移,因为  $+180$  度和  $-180$  度区域之间的相位角将随更大的波长误差增长,所以在两侧之间的集成的 E 场的幅值中存在差值。图 5d 示出了对这种效应也进行修正的反射镜。0 度侧有 25% 区域具有  $-360$  度相位, 25% 区域具有  $-360$  度相位。结果是反射镜相位阶跃在大范围的波长上进行消色差。消色差在此上下文中应被理解为意指零阶反射是黑色的。举例来说,零阶反射在大范围的波长上例如整个可视范围的波长上被消除,或者使得不同波长的激光源例如 355nm 和 405nm 的激光源能够在不改变 SLM 设计的情况下可互换地使用。如上所述,抽取法 (extraction) 有效的波长变化范围可以是 0-60nm, 0-100nm, 0-35nm 或至少 350nm。

[0079] 其它相位差可被消色差并且消色差可被组合。在图 5d 中,具有如图 4b 中 90 度相位差的 SLM 阵列被消色差。该图示出了具有 90 度偏移反射镜的棋盘形图案的八个反射镜。具有 90 度相位的反射镜被分成具有 90 度相位的较大区域和具有 90-360 度的较小区域。与以上类似地,通过添加  $n*360$  度至部分区域,负相位可被消色差,反之亦然,其中  $n$  是大于或等于 1 的自然数。面积的比遵循以上给出的关系,使得分配至每个相位的面积与所述面积和参考面积之间的相位差的倒数 (inverse) 成比例,在该示例性实施例中参考面积的相位为 0 度。对于倾斜的反射镜,区域的分开 (splitting) 可沿着与反射镜所围绕倾斜的轴相垂直的线进行。然而,其它的形状或图案也是可能的,如以下将描述。

[0080] 如图 5e 和 5f 中所示,相位阶跃反射镜的阵列能够被消色差。各图示出了两个反射镜,一个具有 0 度的相位而一个具有 90 度的相位。在图 5b (或 5c) 和在 5d 中的两个消色差被组合。图 5f 示出了与 5e 中相同的消色差,仅以逐点 (point-by-point) 的方式添加相位,但具有重新布置过 (rearranged) 的区域微元 (element) 以避免将反射镜区域分成太小的微元。

[0081] 反射系数的轨迹,作为倾斜反射镜的倾斜角的函数,可按照以下被消色差。图 6a 示出了类似图 2a 或 2b 中的反射镜,该反射镜表面包含如图 6b 中所示的具有不同光谱反射率的区域  $A_1$  和  $A_2$ 。离旋转中心  $A_1$  更远的区域对于长波长具有较高的反射。该表面的垂直运动更大地远离旋转中心并且将更适合于长波长。相反地,较短波长在垂直行进 (travel) 更小所在的旋转中心附近被更强烈地反射。结果是,相同的倾斜角可对短波长和长波长都产生消光。图 6b 中的光谱特性可通过将抗反射涂层选择地施加于反射镜的不同部分而产生。图 6c 示出了借助反射镜上的高度轮廓如何获得相同的效果。该图示出了在反射镜中心处的铰链附近的区域  $A_2$  被分成具有  $+180$  和  $-180$  度相位的较小区域微元用于短波长,例如 440nm。因为  $+180$  和  $-180$  度相位角实际上是相同的相位,反射率对于 440nm 波长是高的,但对于比 440nm 更长或更短的波长则较低。同样地,区域  $A_1$  可具有相同类型的图案但被调整为在较长波长例如 650nm 具有高反射率。波长选择性 (selectivity) 可通过在  $+n*180$  和  $-n*180$  度相位下使用较大的  $n$  值而增大,并且可通过仅对部分的反射镜表面进行图案化而变小。这样,反射镜消色差可被调整至所需。

[0082] 图 6d 示出了倾斜、相位阶跃和反射镜之间的相位差如何通过从图 5f 和 6c 逐点添加相位来同时地被消色差。反射镜表面现在相当复杂。点对点的相位图 (phase map) 可如

以上所示被导出,但也可能导出具有等同功能的其它类似图案。一种这样做的方法是将区域分成小的基本的 (elementary) 区域微元,每一个具有一个高度,高度能够被数字计算出并且被设计来给予所需的特性,尤其是反射镜特性对波长的相关性。所希望的性能被建立,并且优值函数 (merit function) 表示模拟的性能与希望的性能的接近程度。基本区域微元的高度 (可选地,和反射率) 随后被改变直到导出满意的优值函数。有许多数值方法能够用于图案的计算,例如在 MATLAB 中。

#### [0083] 反射镜表面的制造

[0084] 被设计来消色差的反射镜在它们的表面上将具有不同高度的区域。反射镜可以是  $16 \times 16$  微米大并且由金属、硅或其它材料制成。表面上的阶跃可以通过反射镜材料的蚀刻 (etching) 或者通过在反射镜表面上的薄膜的蚀刻或沉积 (deposition) 而产生。表面可以被金属化或涂敷有其它的反射膜。SLM 的优选实施例具有从模板以深度图案纳米印记 (nano-imprinted) 的聚合物膜,即该模板被推向反射镜并且间隙被填满 UV 硬化化合物 (UV-hardening compound)。在化合物已经硬化后,模板被去除并且反射膜被沉积在反射镜的顶部。或者,UV 硬化的化合物膜中的深度轮廓通过蚀刻被转移到反射镜中。

#### [0085] 具有偏振调制的 SLM

[0086] 在许多情况下,可能希望对光束的偏振 (polarization) 进行空间调制 (spatially modulate)。一个例子是,在高功率光束中,希望的和不希望的光可以安全地被分类,并且不希望的光能量被去除 (dumped),如果它被偏振编码的话。另一个例子是用于仪器技术,例如,通过首先以一个 SLM 将照度 (illumination) 进行空间调制,然后以另一个偏振 SLM 和检测器阵列将从样品返回的偏振进行空间分析,从而可能建立一个高分辨率的 Mueller 矩阵显微镜。

[0087] 图 7a 示出了具有偏振改变 (polarization-modifying) 像素的 SLM,它在被偏振光照明时,将从点到点地反射具有不同偏振的偏振光的图案。每个反射镜的表面具有影响反射光的偏振的精细的偏振改变图案或微结构。一种可能是,使用线栅偏振器 (wire grid polarizer),使得一种偏振被反射,互补的偏振被表面吸收。另一种可能是,精细图案在偏振的一个方向和相反的方向之间具有不同的相位延迟 (phase delay),实际上用作延迟器。精细图案可以形成在反射镜的表面中或者形成在沉积于反射镜上的分离膜 (separate film) 例如介电膜中。所述图案,通常具有比意图被调制的光的波长更小的横向特征尺度 (lateral feature dimension),可以为实验通过光束光刻被写入和在批量生产中通过纳米印记 (nanoimprinting) 进行制造。所述图案基于对所述图案的麦克斯韦方程的全电磁解决方案 (full electromagnetic solution) 进行设计。通常,利用商业可获得的编码,图案将是周期的,并且反射特性可以通过严格耦合波分析 (Rigorous Coupled-Wave Analysis, RCWA) 得以解决。

[0088] 不同的像素 701,702,703,704 具有不同的偏振,并且它们可从像素至像素具有相位阶跃和 / 或相位差,并且通过促使像素反射更多或更少的光,光的幅值、相位和偏振可以被调制。着眼于 SLM 的光学系统不解析 (resolve) 每个反射镜,因此可观察的特性是一小组反射镜的叠加,例如在图 7a 中虚线圆以内的反射镜。特殊的情况是仅调制相位,仅调制幅度和仅调制偏振。图 7b 和 7c 示出了任意的偏振如何可以通过利用图 3a 所示的倾斜反射镜控制电场的幅度而产生。对反射镜阵列,存在一个入射偏振态 (incident polarization

state), 例如右手圆偏振光。它们具有四种不同类型的反射镜, 该反射镜具有产生如图 7c 中庞加莱球所示的反射偏振的表面图案。任何的偏振态能够通过庞加莱球中所示的 P1 至 P4 态的叠加而被合成, 并且能够被选择以使得该矢量仅利用正幅度跨越 (span) 庞加莱球。来自部分光束的任意偏振态的合成对于从事偏振工作的人员是很清楚的, 对于为相同的结果来表示和布置的可替代方式也是很清楚的。

[0089] 图 7a 中的阵列倾向于在意义上是泛化的 (generic), 即反射镜可以是倾斜的 (tilting)、活塞式的 (pistonish) 或者翻转开 - 关式的 (flipping on-off)。倾斜的情况是最简单的, 其中反射强度处于模拟控制之下, 该像素的偏振态可以被连续地增加或减少。通过使两个或多个反射镜产生相消干涉, 还可以来控制活塞式反射镜 SLM 中的偏振态, 由此衰减由这些反射镜产生的偏振态。最后, 偏振器可被应用于开 - 关反射镜, 如 TI DMD 反射镜。

[0090] 如多次反复所说, 所描述的表面图案的使用可以被组合, 如图 7d 和 7e 所示。图 7d 示出了一个可变偏振器, 其基于一个平的倾斜反射镜用于一个偏振态  $P_1$  和一个相位阶跃反射镜用于第二态  $P_2$ 。该 SLM 以图 7d 中的非偏振光进行照明。非偏振光可以被认为两个互补态类似  $P_1$  和  $P_2$  的组合。一个态  $P_1$  在两侧  $A_1$  和  $A_2$  之间没有看出相位差, 而另一个看出 180 度相位阶跃。该相位阶跃由  $A_2$  上的延迟器片 (retarder plate) 产生, 例如通过金属的次波长线 (subwavelength line) 或者如上所述的介电膜来实现。因此, 态  $P_1$  在当倾斜角度为零时具有最大强度 (intensity), 并且当倾斜角度增大时增加衰减。 $P_2$  具有正好相反的表现。因此, 该调制器当它是平的时候作用为水平的 ( $P_1$ ) 偏振器, 当它是半 (half-way) 倾斜的时候为非偏振, 以及当它倾斜更多的时候变成垂直的 ( $P_2$ ) 偏振器。设计优化可以给出平的嵌入损耗 (flat insertion loss) 与倾斜角的对比。虽然态  $P_1$  和  $P_2$  被选成是水平的和垂直的, 但是它们可以被任意地选择具有不同的延迟器设计, 例如具有椭圆延迟器。要注意, 对于输出光的庞加莱位置位于通过球体的直线。这是因为入射光是非偏振的并且具有两个独立的、在它们之间具有未知的 (和不相关的) 相位的光波。

[0091] 图 7e 示出了几乎相同的装置, 但是使用偏振入射光。差别在于入射光是完全偏振的, 并且输出光也将是完全偏振的, 即, 它被限制于庞加莱球的表面并且光束成分 (component) 之间的相位是相关的。嵌入表 (inset diagram) 也示出了至两侧的倾斜, 该处相位阶跃改变  $P_2$  的符号。结果是, 当反射镜倾斜到右边时, 反射态从水平旋转至垂直, 逆时针地通过这之间的所有角度。当它倾斜到左边时, 它在相同的点之间旋转但是为顺时针地, 由此当反射镜倾斜通过它的整个范围时覆盖 360 度。在图 7d 与图 7e 之间存在小的差别: 在 7e 中,  $P_1$  与  $P_2$  之间的相位差是围绕倾斜轴对称的, 而在 7d 中不是。(因此, 图 7e 中的反射镜被描绘出在两侧都具有延迟器微结构。) 该选择使得两种情况在教导上更简单, 而在两张附图的任一个中可能已采用两种反射镜中的任一种。图 7e 的反射镜在图 7d 中将得到相同的结果, 但是图 7d 的反射镜用于图 7e 中将给出在庞加莱球的“南极和北极”翻转 (go over) 的输出偏振。

[0092] 作为实际事例, 偏振控制微结构通常具有与光的半波长相当的横向尺度, 而用于消色差、相位偏置等的相位阶跃通常横向地延伸多个波长。

[0093] 上述的充分复合的 SLM 的应用

[0094] 图 8, 9 和 10 示出了上述的充分复合的和 / 或消色差的 SLM 的一些应用。图 8a

示出了光刻直接写入系统,例如用于在晶片、掩模、PCB 等上写入,类似于文献(美国专利 US 7,009,753,通过参考而被包括于此)中描述的系统,但是具有一些重要的差别。来自光源 801 的辐射照明 SLM 802,反射的辐射被聚焦到例如通过光化学或热量对辐射敏感的工件 803 上。发射波长在 5nm 至 2000nm 范围内的光源可以是连续的或脉冲的,光谱上窄的或宽的,并且工作台(stage)可以有停止和运动或者连续的运动来在工件上建立毗连的(contiguous)图像。通过直接或间接驱动 SLM 的像素元件,SLM 从将输入数据转换为电信号的数据通道(data path)被驱动,该输入数据将在工件上作为图案被写入。与现有技术相比,图 8a 中新颖的是,SLM 具有充分复合的调制,并且它被放置在离焦点(out-of-focus)的位置  $\Delta f$  处,以及在 SLM 上的点与工件上的点之间没有一对一(one-to-one)的关系。工件上的点通过小区域  $\Delta S$  进行控制,该小区域实际上是小的全息图。充分复合的 SLM 用作全息图,该处工件上的点通过许多像素的集体的调制(collectivemodulation)来控制。离焦点的距离可以小或大,但是在任何情况下大于瑞利长度(Rayleigh length),并且优选大于四个瑞利长度,提供有助于工件上的点的小的或大的区域。该方案的一个优点在于各个反射镜中的校准误差或缺陷不引起写入图案中的局部大错误,而是在一些区域上质量的细小损耗,这是因为 SLM 上的点促成工件上的区域。SLM 进一步移动离开焦点增大许多元件的平均值并且减小图像中局部错误的风险,但是增加 SLM 中所需的动态范围和在计算对于 SLM 的数据时的困难性。此外,促成工件上一个点的小区域例如 100,1000 或 10000 像素,相比于如果使用例如 100000 或 1000000 像素的较大区域,使得对于透镜的光学校正的需求更容易。

[0095] 图 8a 中写入器的一个新特性在于它没有固定的焦平面(focus plane)。重新聚焦可以通过改变数据进行,多个焦距(foci)可以在相同的图像中并排或横向叠加产生。因此,它可以用于在不平的(non-flat)工件 803 上写入。另一使用是例如在光固化聚合物(photocured polymer)中写入 3D 图案。最适当地通过迭代法计算至 SLM 的数据以在聚合物中提供所希望的光的 3D 分布。写入器可以用于同时写入具有不同图案的多个深度层,例如用于可记录的多层数据盘。在层之间的良好隔离和更自由的 3D 设计更容易以非线性的或阈值辐射敏感的材料例如相位改变抗蚀剂、二元合金抗蚀剂(binary metalresist)或者通过两个或多光子曝光来实现。

[0096] 图 8b 示出了在显微镜或其它投影仪器中的图像如何可以通过使用如上所述的 SLM 得到增强。样品或物体被辐射在 5-2000nm 范围内的光源 806 照明并被成像到图像传感器例如 CCD 或 CMOS 传感器上。在物体 805 与传感器 807 之间的孔径平面(aperture plane)中是可用于图像的增强的充分复合的 SLM 805。可以实现例子是高通和低通滤波、边缘增强、相位对比成像、降斑(despeckling)、模板匹配和相关性(correlation)。微机械 SLM 是稳定的、坚固的和长寿命的,并且利用充分复合调制,它使得图像处理操作紧密跟随理论并且几乎不添加噪音和伪像(artifact)。图像增强的理论在许多关于信号理论和图像处理的教科书中进行了很好地描述,并且通常完全在数字域(digital domain)中进行。与通常通过数字处理进行的不同之处在于,图像处理是在图像已经被捕获在照相机上并且相位信息已经丢失之后被应用。这里,处理由在去往传感器的途中的光子进行,相位是结果的一部分,从而提供更有力的分析和样品中细微变化的可视化(visualization)。此方法和装置已经通过从显微术(microscopy)的例子进行了描述,但是还可以应用于光刻、计量学

(metrology) 和使用投影图像的其他领域。对于图 8b 中的机构 (setup) 的第二使用是像差 (aberration) 控制, 其中光学系统的波前错误包括焦点可以通过 SLM 上的相位进行校正, 从而始终提供完美的图像。如果照明是飞秒脉冲 (femtosecond pulse), 那么存在光谱的相当大的加宽, 上述 SLM 的消色差可以有幫助。

[0097] 图 8c 示出了与图 8b 类似的系统, 具有光源 810、物体 809、图像传感器 811 和如上所述的 SLM 812。与图 8b 的不同之处在于此 SLM 被置于图像平面中, 在该处 SLM 可被用于屏蔽 (masking out) 来自亮区域的光以提高暗区域中的信噪比。

[0098] 图 8b 和 8c 中的两个方案可被组合在相同的仪器中, 如图 8d 所示。物体 813 由光源 814 进行照明, 该光源可以是连续或脉冲的而脉冲时间降至阿秒 (attosecond)。图像被拾取在传感器 817 上, 或者如图 8b 和 8c 中由人眼拾取。图像是例如利用充分复合的 SLM 在图像平面 816 中进行 SLM 滤波, 以及利用第二 SLM 在孔径平面 SLM 815 中进行 SLM 滤波。应用是显微术、光刻、计量学和图案检查。

[0099] 在图 8b-d 中, 操作通过显微术和类似的投影进行例证, 其中物体是物理对象, 但是物体也可以是利用存储在数字存储器中的图像进行驱动的 SLM。SLM 图像可以呈现光学的和非光学的图像, 例如 x 射线图像、雷达图像、声纳回声、天文密度映射图、光谱、衍射图案、人口统计等, 并且它们可以是一维的或二维的。比起仅数字 (digital-only) 处理的优点可以是光学系统的高处理容量, 原则上是瞬时的并且仅由至物体 SLM 的数据供给和从传感器的读出来限制。输入带宽可以是每秒 10 或 100 千兆字节 (Gbyte)。图 9a-d 示出了图 8b-d 中方案的通用化和发展。所有附图具有光源和检测器 (或等同地为眼睛或感光 (photosensitive) 表面)。光穿过多个光学子系统, 光利用在其间的光学系统在近场和远场之间或在不同规定的多个图像平面与孔径平面之间转换。孔径平面是位于顶部在图像 824、825、827 等中。图像平面是位于底部 823、236、828 等。分束器 (beamsplitter) 表示在图中, 读者可以想象未描绘出的其它光学系统。第一图像平面是 823, 它可以是物理样品或呈现数字图像的 SLM, 823 通过光源 821 照明, 照明通过照明孔径 824 (SLM 或固定的孔径) 成形。存在许多阶跃, 其中图像在图像平面与孔径平面之间转换并且可以通过每个阶跃处的 SLM 或固定的滤波器进行滤波。这是对于一定类型的图像处理的通用化结构。在图 9b 中, 可变偏振器 829 被添加在样品之前和之后用于样品的偏振分析。图 9c 中参考路径 830 被添加, 从而提供实现测量干涉仪的或全息摄影的相位参考。最后, 在图 9d 中, 同时存在参考路径和可变偏振器, 从而允许完全偏振化干涉测量术与图像的滤波一起进行。

[0100] 图 10 示出了使用极高数据吞吐量 (throughput) 的大屏幕投影仪, 该通过量可以利用 MEMS 阵列和上述的多色能力实现。SLM 1001 由对于三原色的三个激光器 1002、1003、1004 进行照明。扫描系统 1005 从 SLM 的部分图像 1006 建立大图像 1007, 例如从具有  $2000 \times 4000$  像素的 SLM 建立  $18000 \times 8000$  像素的图像。

[0101] 图 10b 和 10c 示出了充分复合的 SLM 如何可以投影图像而不用光学系统, 因为光至焦点的汇聚 (convergence) 被编码在像素数据的相位上。图 10b 示出了一种绘线图 (line drawing) 应用: 例如在控制室中的高信息 (high-information) 内容显示。SLM 发射出有限数量的亮点 (bright spot), 这些亮点描绘 (trace) 将要被显示的线。仍然仅利用调制激光功率, 所有的激光功率转到被照明的线, 图像可以充满墙 (附图示出了在浅色 (light) 背景上的黑线, 而事实可能是相反的)。图 10c 是无透镜的计算机投影仪, 产生标准的像素化

(pixilated) 半色调 (halftone) 图像。这两种图像之间的区别在于数据,充分复合的 SLM 的全息摄影特性使得将所有光发送至图像的小子集成为可能,从而使得非常大和亮的绘线图成为可能。该不同的数据可以在较小的区域上显示电影。图 10a-c 全部使用可通过消色差的宽波段操作 (三种可见色)。

[0102] 微机械 SLM 具有高速度、高功率处理能力和良好的稳定性。本发明所添加的是利用相同的基本平台即相同的 MEMS 致动器和相同的驱动电路来进行不同类型的光调制的灵活性,所述驱动电路包括芯片下的 CMOS 和开关芯片上的数据通道。通常,平台可以是用于调制器的微机械阵列的快速矩阵寻址的 CMOS 电路,和将数据及其它信号供给 SLM 的支持电子设备。通过仅改变活塞式 SLM 中的 MEMS 层,可以对单色光或对具有较宽光谱的光进行相位调制或充分复合的调制。利用另一基本反射镜结构,倾斜反射镜,幅值或者充分复合的调制可以实现,也用于单色光或具有延伸的光谱范围的光。此外,偏振可以通过在反射镜上具有偏振改变图案或层的 SLM 中进行调制。

[0103] 在此描述的 SLM 作为图像或信息处理设备是非常强大的。因为它们是具有相干 (coherent) 设备,它们的典型应用领域对于 Texas 仪器的 DMD 设备的应用领域是补充的。它们可用于光学图像处理、自适应光学、最优滤波、不相干至相干图像转换、光束转向和成形、波前修正、全息、投影和光刻。具有适于这些应用的特性的 SLM 根据应用可以是不同的。已经披露了具有各种特性的 SLM 如何可通过仅改变反射镜的表面外形 (profile) (以及可选地,表面薄膜) 由相同的 CMOS 电路上相同的反射镜阵列来产生。这被认为是本发明一个非常有价值的优点,因为它使在研发和制造能力中采用适于特定需求的技术和杠杆投资 (leverages investment) 的成本降低。

[0104] 更透彻的分析示出了还存在二阶作用:具有 50% +180 和 50% -180 度的反射镜具有按波长误差的二次函数进行降低的平均反射率。修正的下一级用于使 0 度反射镜形成 50% 的 0 度、25% +360 度和 25% -360 度的反射镜。这样,逐渐地更高阶的消色差能够被添加到阵列中,消色差就对于一个波长的良好消光的意义而言对于相邻波长也是良好消光的。

[0105] 消色差的原理在于,如果具有相位  $\delta_0$  的区域 A 被划分为具有相位  $\delta_1 = \delta_0$  和区域  $A_1 = A * ((360 - \delta_0) / 360)$  的一个部分,和具有相位  $\delta_2 = \delta_0 - 360$  和区域  $A_2 = A * (\delta_0 / 360)$  的一个部分,那么在  $\lambda_0$  处的相位差  $\delta_0$  给出导数  $d\delta / d\lambda = -\delta_0 / \lambda_0$ , 以及 (在  $\lambda_0$  处) 等效值 (equivalent)  $\delta_0 - 360$  度给出导数  $d\delta / d\lambda = (360 - \delta_0) / \lambda_0$ 。

[0106] 这种情况以及更复杂的情况可以通过检查导数  $d(\text{Re}(E_{\text{total}})) / d\lambda$  和  $d(\text{Im}(E_{\text{total}})) / d\lambda$  并且设定它们等于零来解决,其中  $E_{\text{total}}$  是区域 A 上集成复合 E 场 (作为相量), 并且 Re 和 Im 表示区域的真实和想象的场。如果  $d^n(\text{Re}(E_{\text{total}})) / d\lambda^n$  和  $d^n(\text{Im}(E_{\text{total}})) / d\lambda^n$  在波长跨度上被设定为零或最小化,其中 n 为 2、3 或更大,那么得到更完整的消色差。

[0107] 一些特定实施例

[0108] 本发明可以实施为对相干的或部分相干的照明进行调制的设备或实施为对相干的或部分相干的照明进行调制的方法。也可以实施为制造这种设备的方法。一个实施例是具有多个离轴的 (off axis) 阶跃表面反射镜的空间光调制器。SLM 适合于利用相关照明的预定所得波的特性对相干的或部分相干的照明进行中继。该设备包括倾斜反射镜阵列,每个反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和对于反射镜的倾斜轴。它包括倾斜反射镜阵



列中至少一些反射镜的基本上平的反射表面之上的表面结构。不同的表面结构可以存在于不同的反射镜上。不是所有的近反射镜需要具有表面结构。本实施例中反射镜的表面结构具有至少一个阶跃,该阶跃将反射表面划分为多个较小的反射表面。阶跃在多个较小的反射表面所反射的相关照明的部分之间产生相位差。反射镜上至少一个阶跃相对于倾斜轴是离开访问的 (off access)。在一些实施例中,阶跃基本上垂直于倾斜轴。

[0109] 第一设备实施例的一个方面包括表面结构化反射镜,该反射镜具有离开访问的阶跃用以补偿照明波长的变化。照明波长的变化可以导致波的特性的改变。如上所述,该补偿可以允许反射镜阵列在光的波长在变化的情况下工作。

[0110] 第一设备实施例的另一方面应用于具有中心波长的照明。根据本方面,来自多个反射表面的相关照明的部分之间的相位差关于中心波长大于 270 度。即,至少四分之三波长的相位差。相关方面还具有中心波长以及在来自多个反射表面的相关照明的部分之间具有关于中心波长近似为  $n*360$  度的相位差,其中  $n$  为正的非零整数。

[0111] 在前述任一方面中,该设备可以进一步显出特性:中继照明的相位的计算出的导数在阶跃的不同侧具有相反的符号。

[0112] 对于前述任一方面,表面微结构可以被添加至反射镜有效部分以产生相关照明的预定偏振态。表面微结构可以是在规则栅格例如一维栅格中形成的具有半波长更小的横向尺寸的部分反射表面。这些微结构可以反射具有不同相位的不同瞬时偏振。它们还可以反射具有不同幅值的不同瞬时偏振。或者它们可以反射具有相位差的不同瞬时偏振,该相位差在倾斜轴的对立侧上是不同的。

[0113] 前述方面实施例中的表面结构化反射镜可以具有离轴阶跃,用以在穿过反射镜倾斜的范围的相关照明中产生强度与相位的预定轨迹,该预定轨迹不同于没有离轴阶跃的反射镜所产生的轨迹。

[0114] 第二设备实施例是具有多个相位偏移像素组的空间光调制器,适合于利用来自像素组的中继照明的充分复合的强度和相位调制来对相干的或部分相干的照明进行中继。该设备包括倾斜反射镜阵列,反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴。该设备包括倾斜反射镜阵列中的反射镜组。该组中各个反射镜被布置为具有不同高度,从而在组中各个反射镜间产生相位偏移。驱动在组中的各个反射镜产生来自组的中继照明的充分复合的强度和相位调制。

[0115] 本实施例的一个方面是,在一组中至少两个反射镜具有  $(1+2n)*\lambda/4$  的相位阶跃 ( $n$  为非负整数)。并且,该两个反射镜具有关于照明轴的不同相位偏移。本方面将各个反射镜中的一个或多个阶跃与反射镜之间的不同偏移相组合。

[0116] 本设备实施例可以与第一设备实施例的任意方面进行组合。来自不同方面的特征的各种组合可以被组合以产生特征组合的各种变化。

[0117] 实施本实施例及它的方面可以产生关于单位圆具有任何复合反射常数照明区域,所述单位圆表示所得到的照明的真实的和复合的部分。这种充分复合强度和相位的这种充分复合的调制可以利用反射镜的最小倾斜来产生,该最小倾斜的量等于反射镜边缘处的一个四分之一波长或更小。

[0118] 又一设备实施例是具有多个深阶跃 (deep-stepped) 反射镜的空间光调制器,适合于利用对照明波长的减小的操作灵敏度对相干的或部分相干的照明进行中继。该设备包

括倾斜反射镜阵列,该反射镜具有至少一个基本上平的反射表面轴。该阵列包括至少一些深阶跃反射镜,该深阶跃反射镜具有至少一个将反射表面划分为多个反射表面的阶跃。对于深阶跃,我们意指关于照明的中心波长产生大于 135 度的高度差的阶跃。在特定反射镜上的相邻反射表面之间的该高度差减少在照明波长的反射镜操作过程中的衍射效应的相关性 (dependence)。如上所述,深阶跃反射镜可以适应不同的照明源,例如具有 355 纳米或 405 纳米波长的激光源,而不用重新设计或替换空间光调制器。

[0119] 该又一设备实施例可以与第一或第二设备实施例的任何方面进行组合。来自不同方面的特征的各种组合可以被组合以产生特征组合的各种变化。

[0120] 另一设备实施例是具有应用于像素组的多个偏振变化微结构的空間光调制器,适合于对相干的或部分相干的照明进行中继。在一些实施例中,该设备对来自像素组的中继照明提供充分复合的强度和相位调制。该空间调制器包括倾斜反射镜阵列,该反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴。阵列包括多组倾斜反射镜。组中的各个反射镜被布置成在各个反射镜的表面上具有不同的偏振产生微结构。该阵列适合于驱动各个反射镜和组以产生来自组的中继照明的可控偏振态。回顾整个公开内容可以理解,不分解 (resolve) 各个反射镜的光学系统引起中继照明,其平均或表现依赖于—组相邻反射镜的照明特性。

[0121] 该第四实施例的一个方面包括将至少一个基本上平的反射表面划分为具有不同高度的局部表面的步骤。该不同高度被选择为减少照明波长中变化的对于中继照明的强度和相位的影响。

[0122] 本部分中关于特定实施例的四个前述实施例可以由下述设备跨接和共同表征。跨接设备是具有多个反射镜的空间光调制器,适合于改变相位和 / 或偏振以及对相干的或部分相干的照明进行中继。该跨接设备包括倾斜反射镜的反射镜阵列,该倾斜反射镜通过衍射效应控制中继照明的强度。反射镜具有至少一个基本上平的反射表面和倾斜轴。该空间光调制器实施例还包括各个反射镜或反射镜组,该反射镜在各个反射镜上的区域之间或者在反射镜组中的反射镜之间具有表面结构上的差异。对于表面结构上的差异,我们意指在反射镜的区域之间或在反射镜和 / 或表面微结构之间在高度上的差异。表面微结构的一个示例描述在前述内容中偏振微结构的上下文中。在该跨接实施例中,具有表面结构上的差异的反射镜适合于被单独驱动或成组驱动以产生强度 (和相位和 / 或偏振) 的组合,该组合不能通过具有单个平的反射表面的倾斜反射镜阵列或者具有阶跃反射表面、阶跃与倾斜轴重合 (coincident) 的倾斜反射镜阵列来实现。该跨接实施例意图是提供单个独立权利要求,由此要求前四个实施例的权利要求可以被写为从属的形式。

[0123] 每个前述设备实施例可以表达为方法,基本上以这样的形式:利用具有一定结构的微反射镜阵列,来改变相干的或部分相干的照明并且产生具有与各个设备实施例相关的特性的中继照明。这样的方法的作用可以包括:照明微反射镜阵列,从具有一定特征的微反射镜阵列的结构反射照明,和中继已改变的照明来产生一定特性,如上所述。

[0124] 方法实施例可以用来制造上述的一些或所有的设备实施例,利用在微反射镜阵列中反射镜上的纳米印记。该方法包括利用来自模板的深度图案在聚合物膜上 UV 硬化化合物的纳米印记。该方法继续进行硬化 UV 硬化化合物和在已硬化的化合物上沉积反射膜。它还包括处理反射膜以形成倾斜微反射镜的阵列。

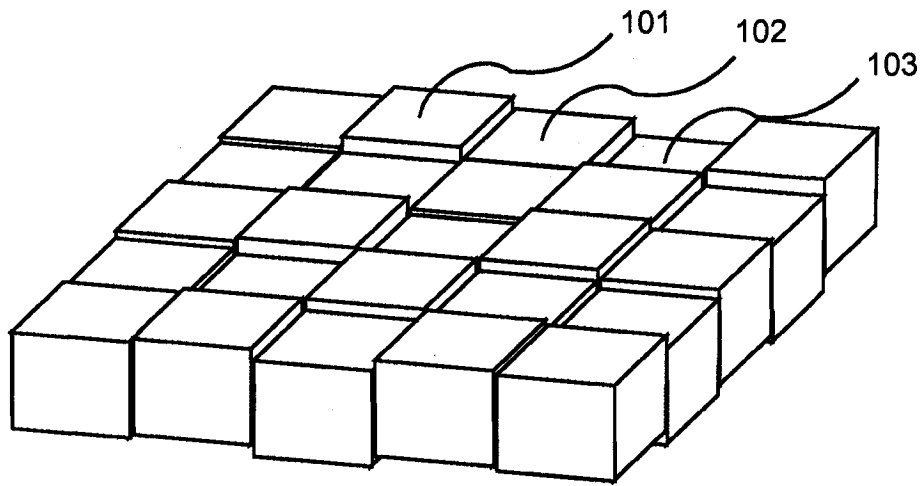


图 1a 现有技术

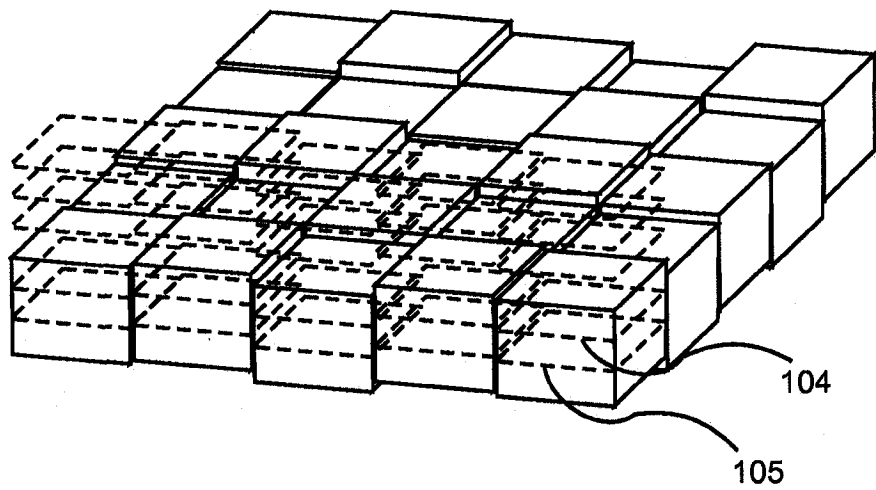


图 1b

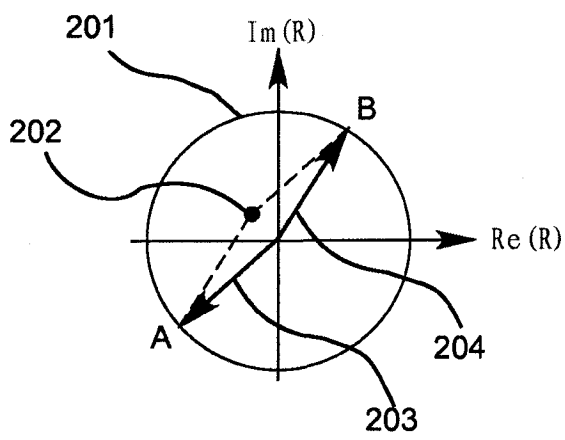


图 2a

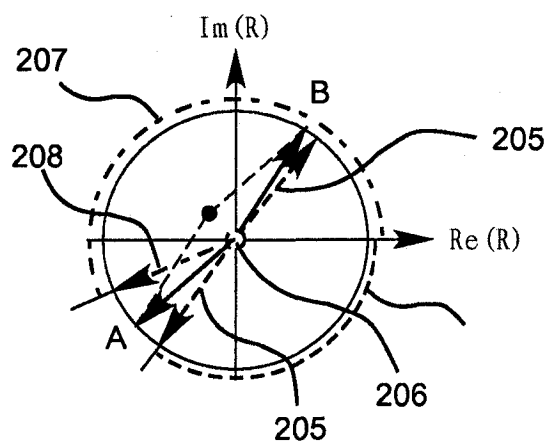


图 2b

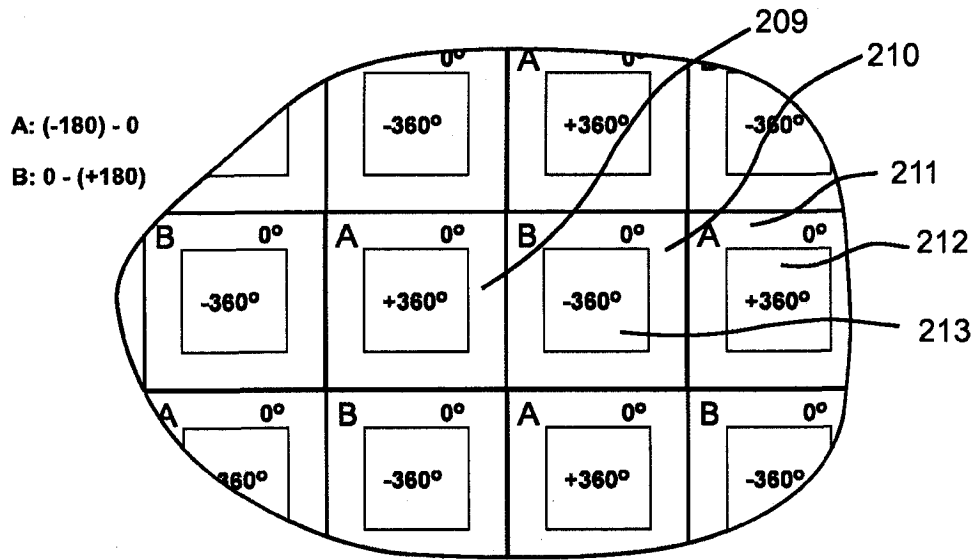


图 2c

A: (-180) - 0  
B: 0 - (+180)

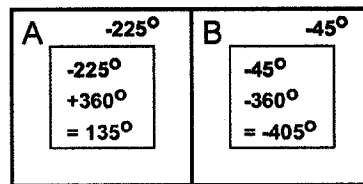


图 2d

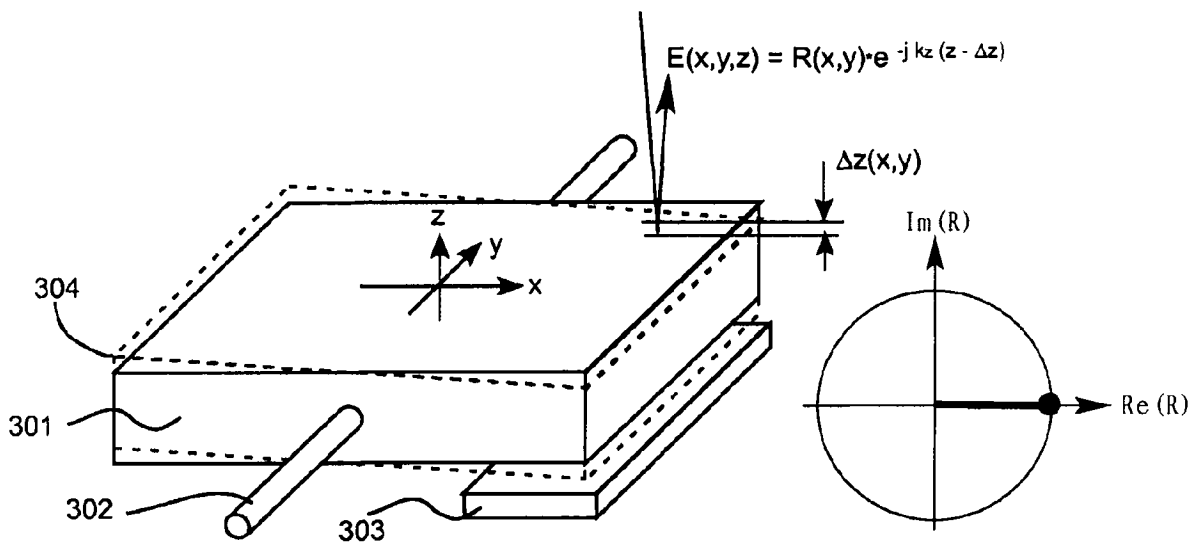


图 3a

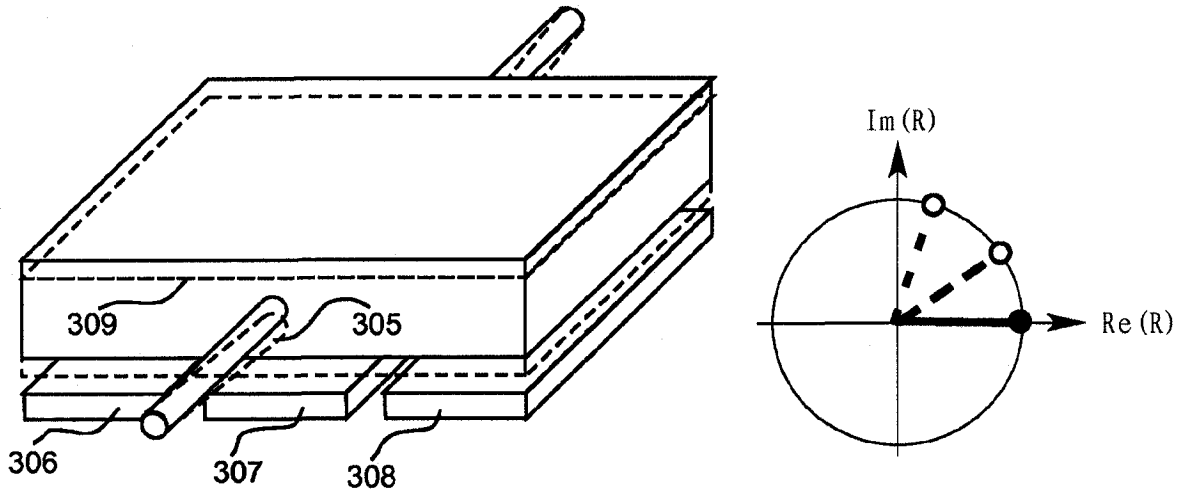


图 3b

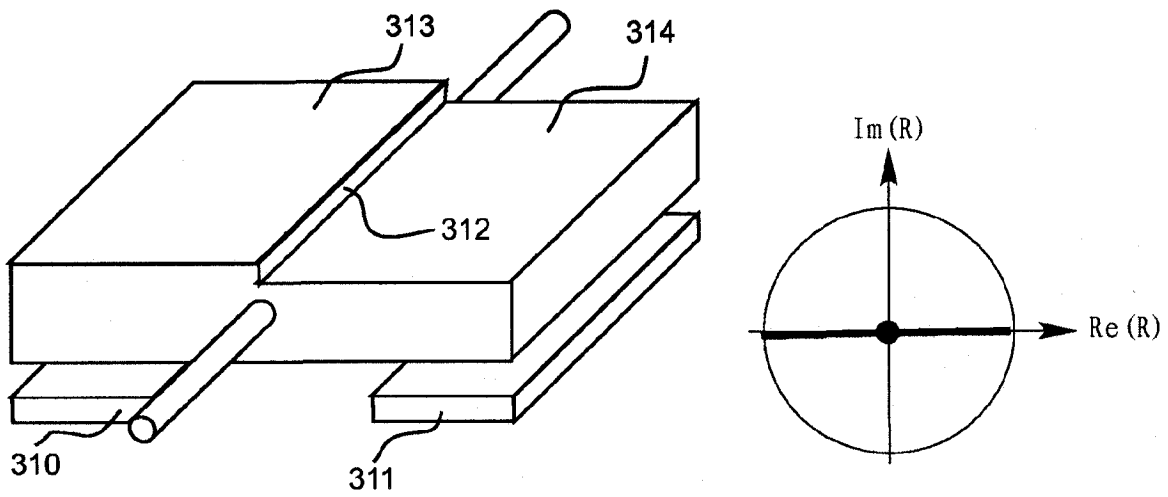


图 3c

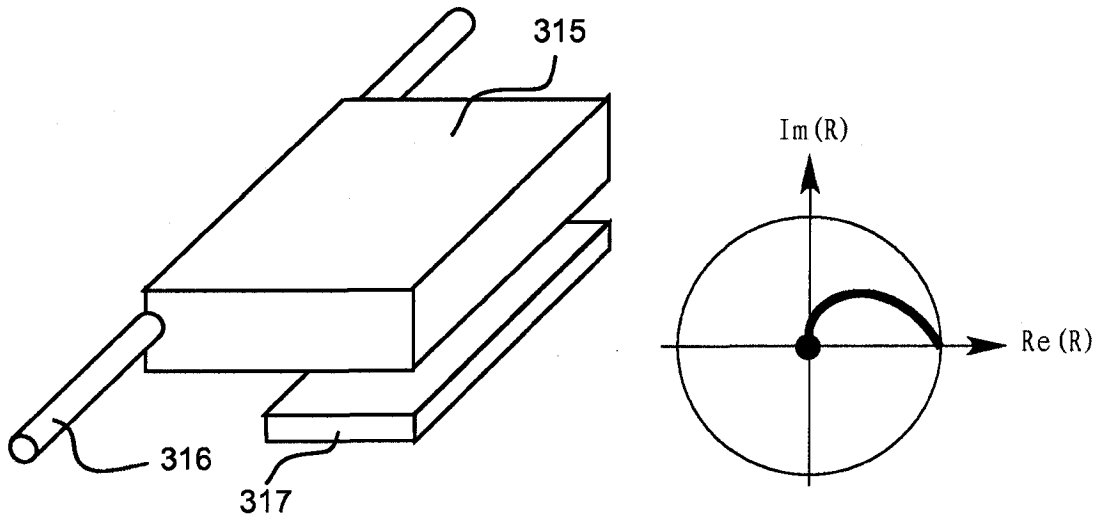


图 3d

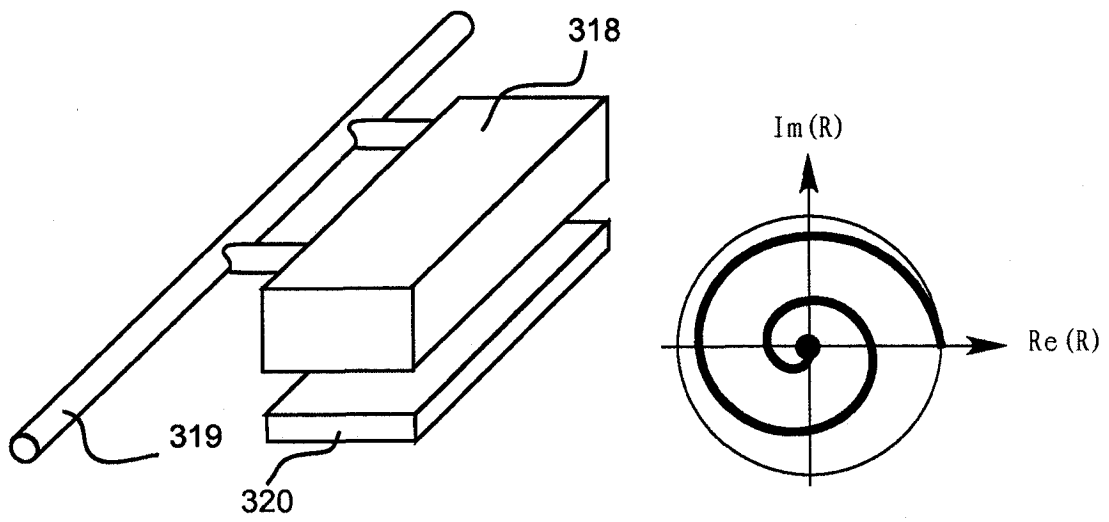


图 3e

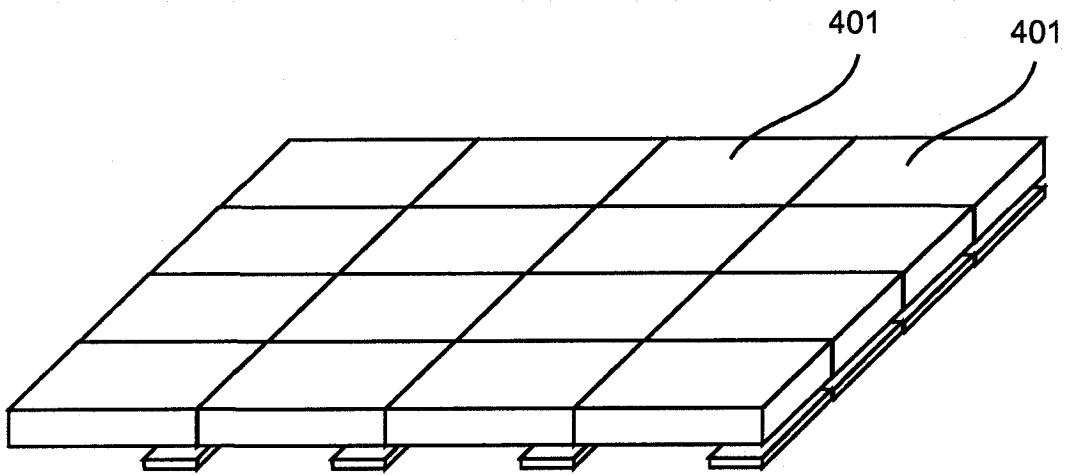


图 4a 现有技术

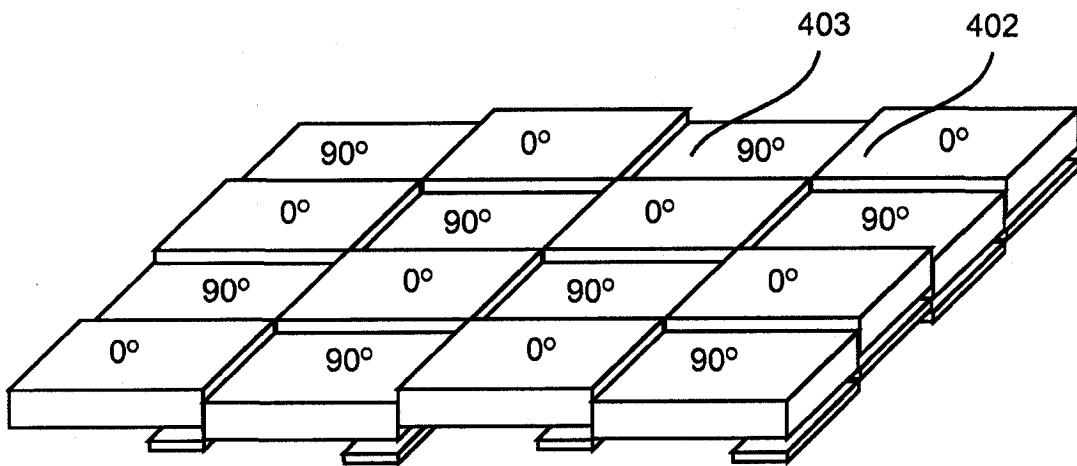


图 4b

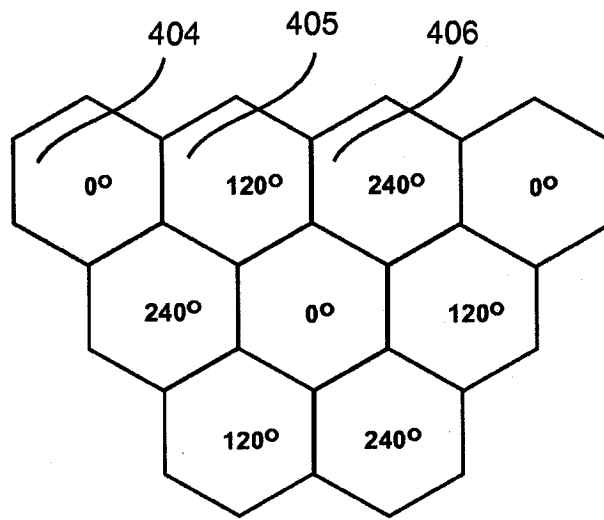


图 4c

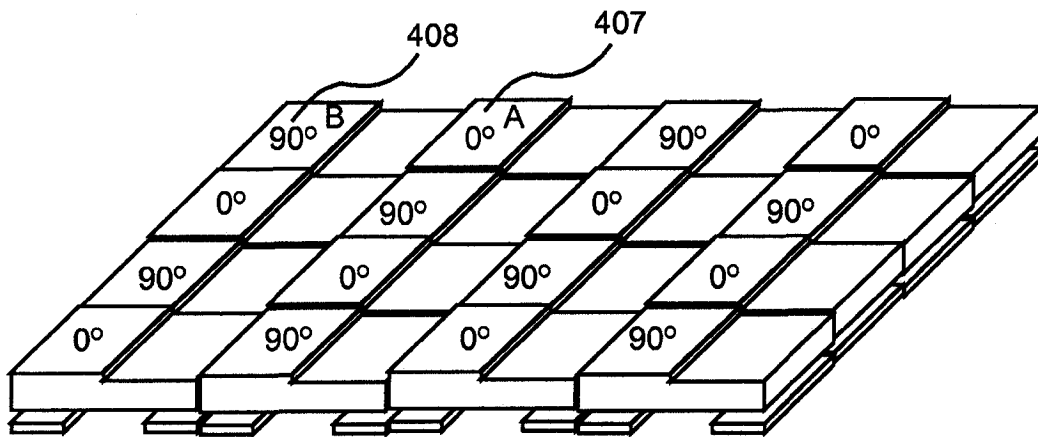


图 4d

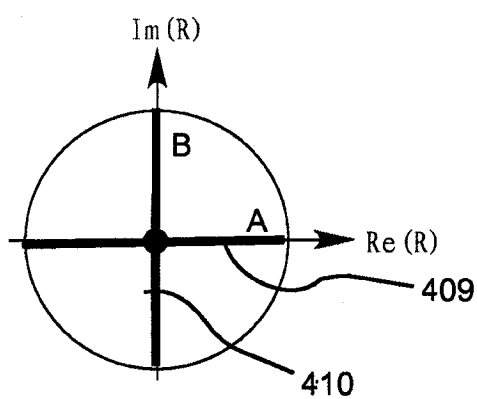


图 4e

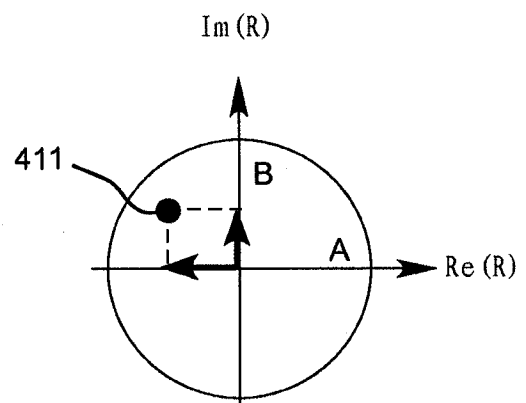


图 4f



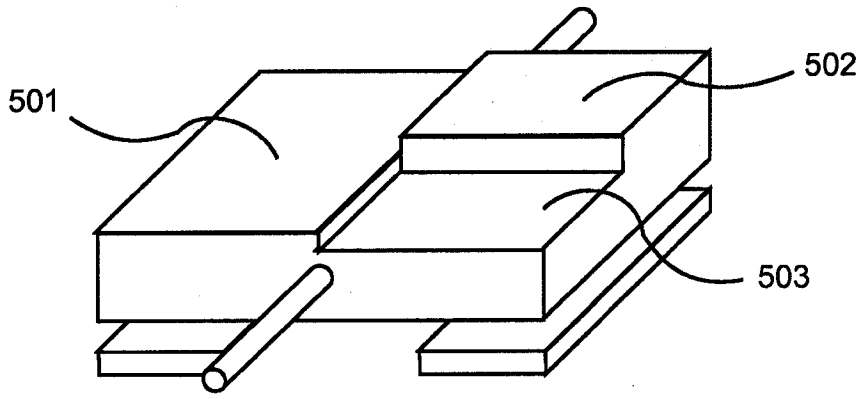


图 5a

$0^\circ$	$+180^\circ$
	$-180^\circ$

图 5b

$+360^\circ$	$+180^\circ$
$0^\circ$	
$-360^\circ$	$-180^\circ$

图 5c

$0^\circ$	$+90^\circ$	$0^\circ$	$+90^\circ$
	$-270^\circ$		$-270^\circ$
	$+90^\circ$		$+90^\circ$
$+90^\circ$	$0^\circ$	$+90^\circ$	$0^\circ$
$-270^\circ$		$-270^\circ$	
$+90^\circ$		$+90^\circ$	

图 5d

$0^\circ$	$+180^\circ$	$+90^\circ$	$+270^\circ$
		$-270^\circ$	$-90^\circ$
	$-180^\circ$	$+90^\circ$	$-90^\circ$
			$-450^\circ$

图 5e

$0^\circ$	$+180^\circ$	$+90^\circ$	$+270^\circ$
		$-270^\circ$	$-90^\circ$
	$-180^\circ$	$+90^\circ$	$-90^\circ$

图 5f

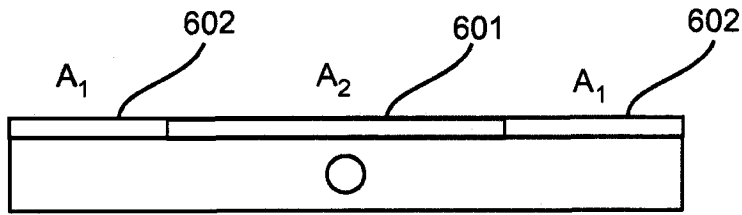


图 6a

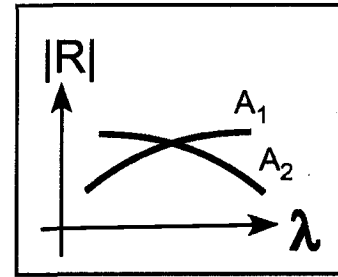


图 6b

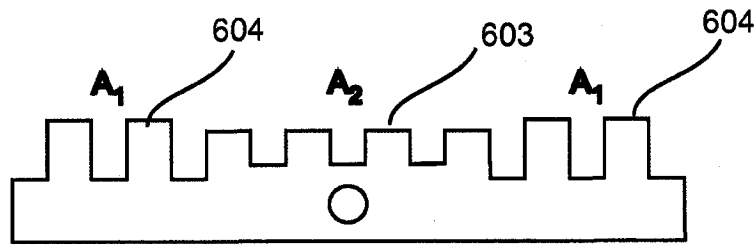


图 6c

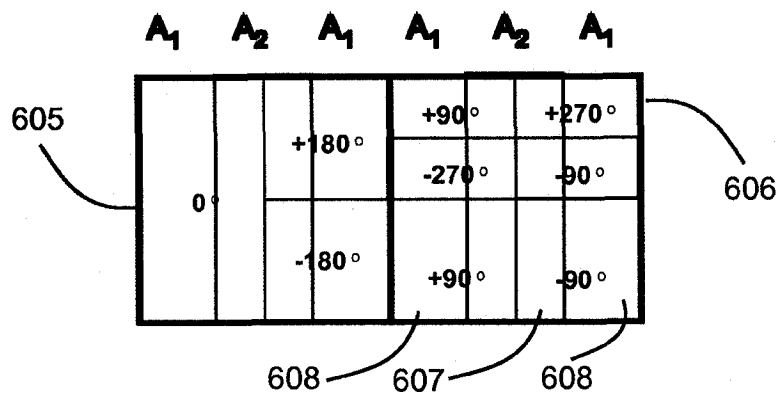


图 6d

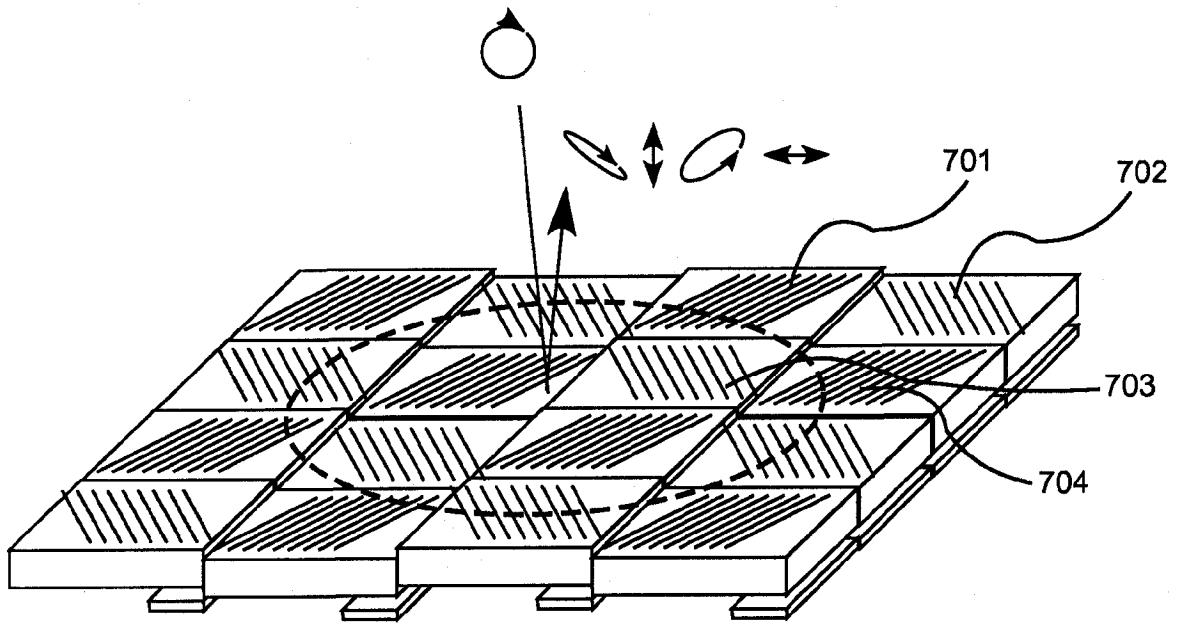


图 7a

P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>

图 7b

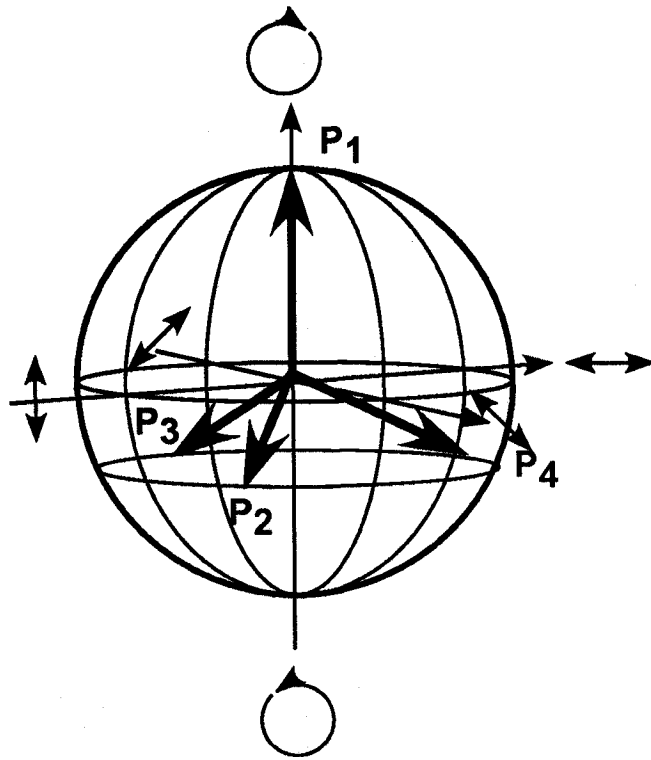


图 7c

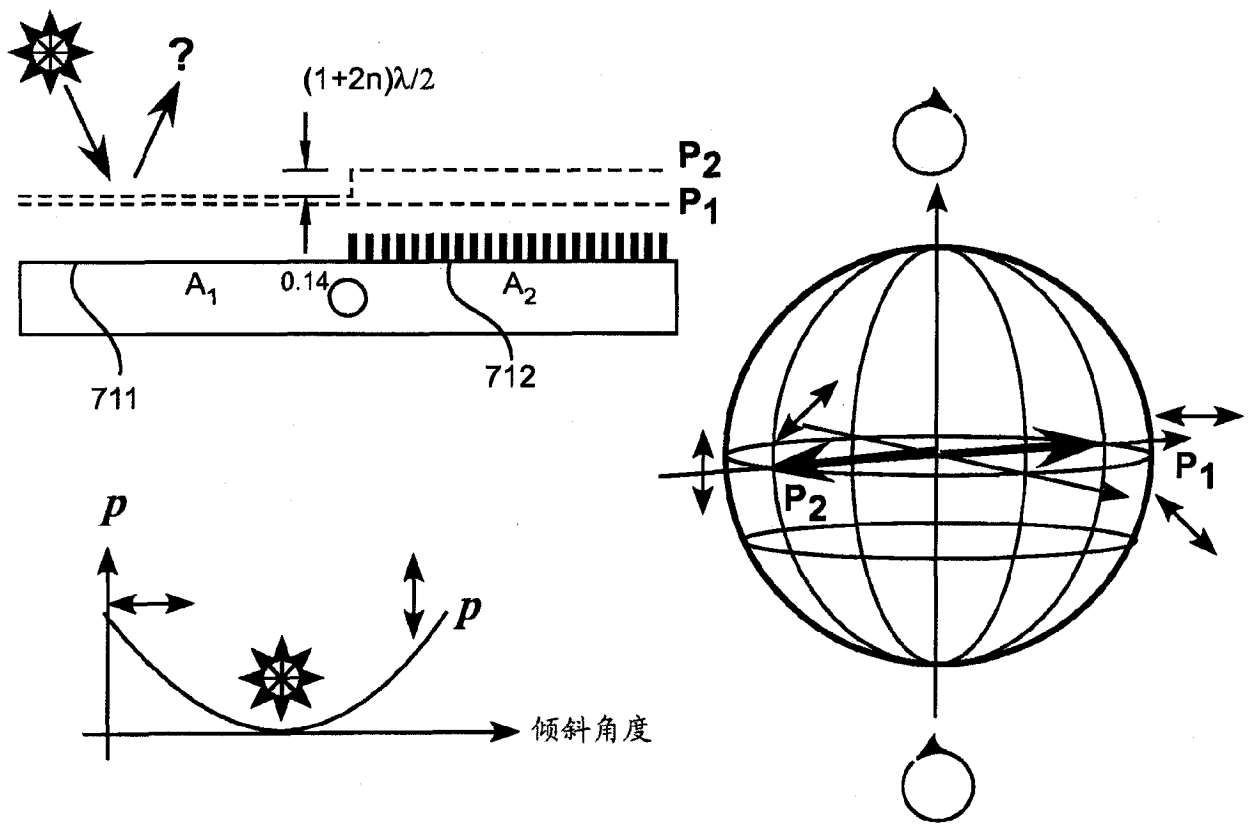


图 7c

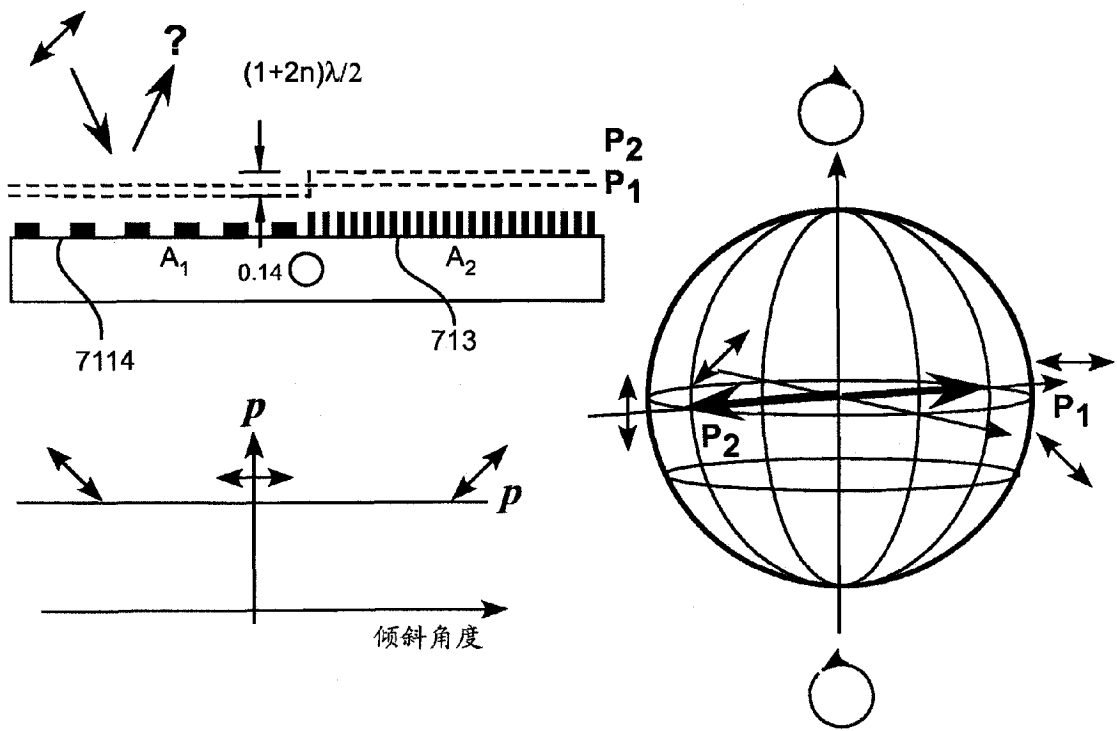


图 7d

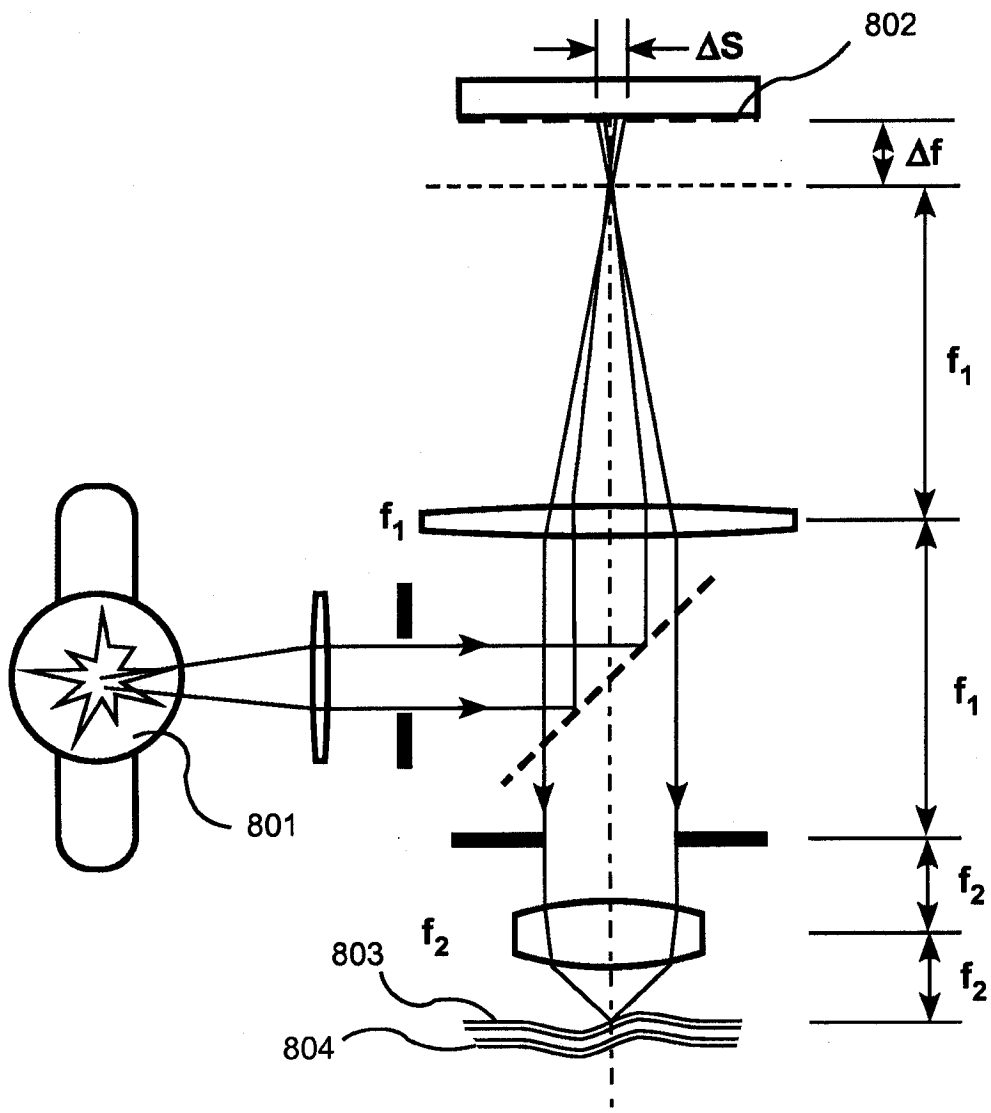


图 8a

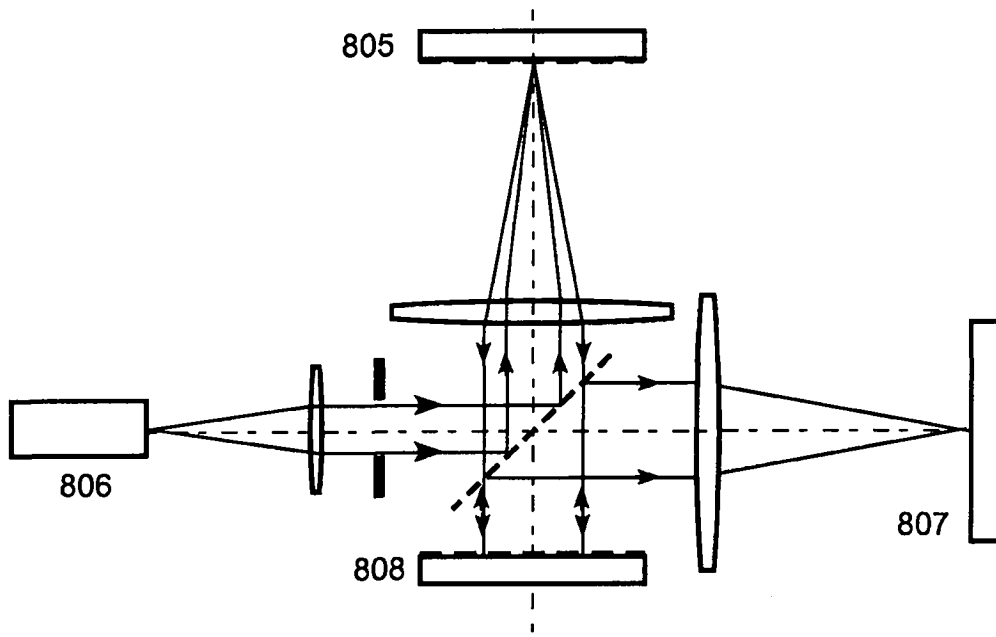


图 8b

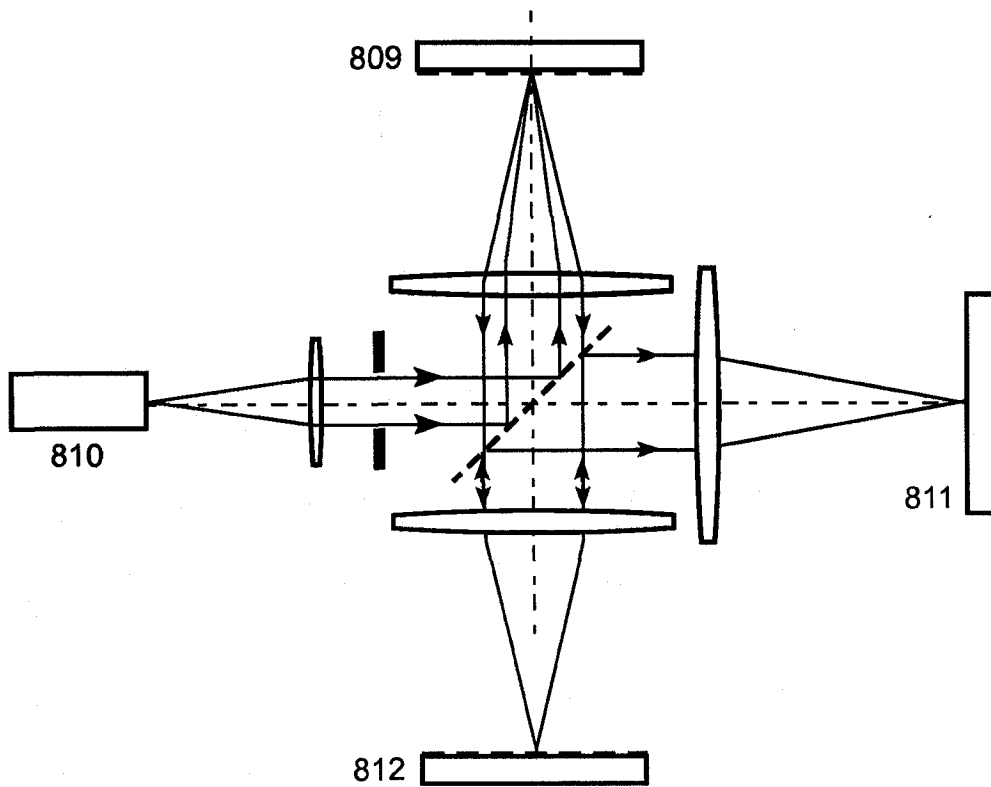


图 8c

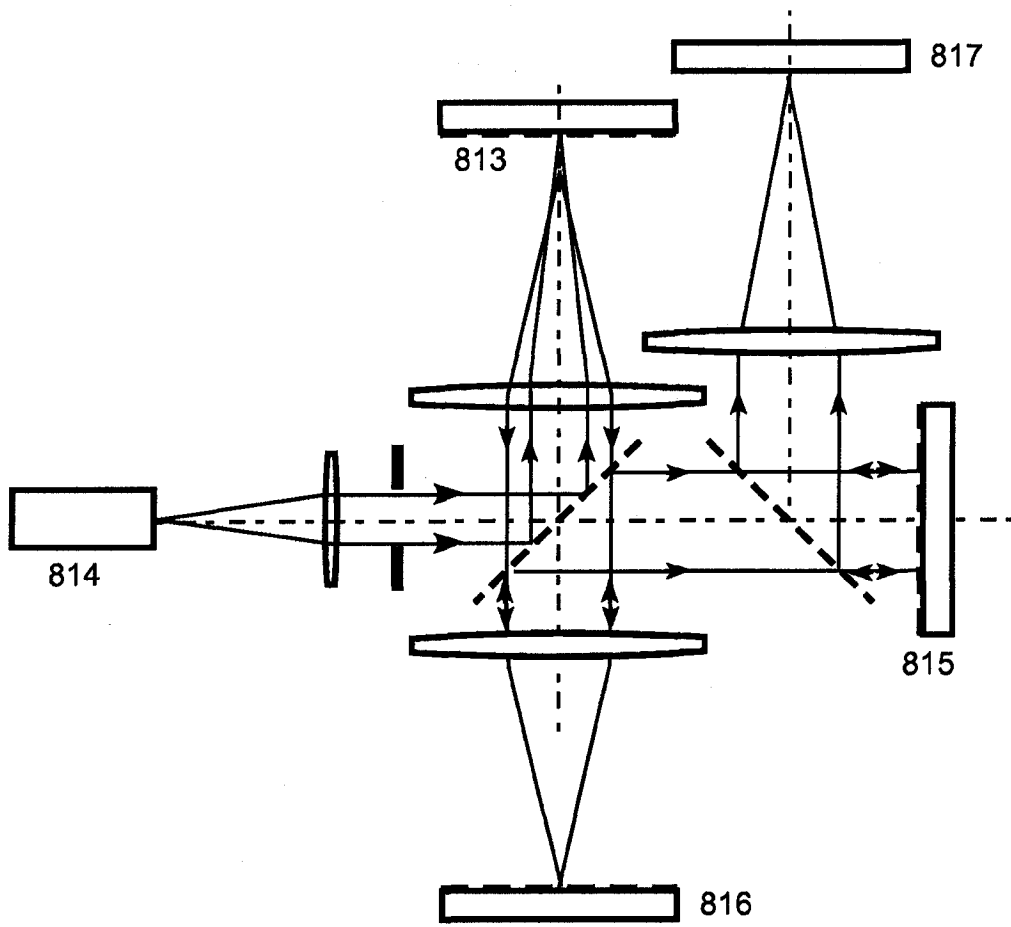


图 8d

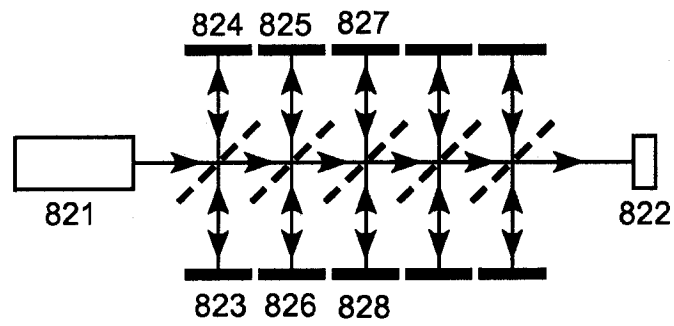


图 9a



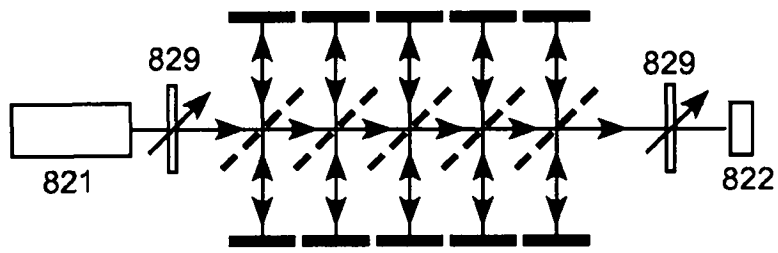


图 9b

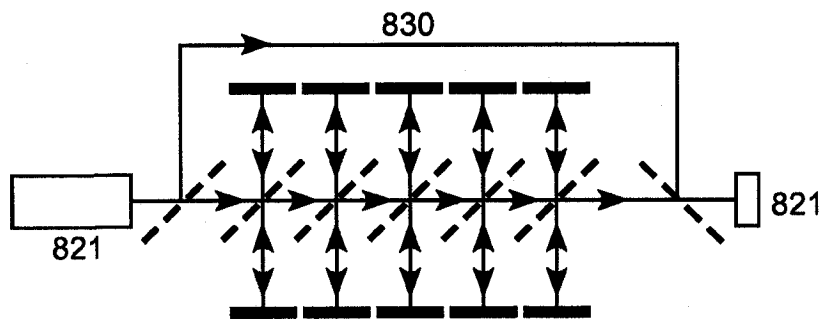


图 9c

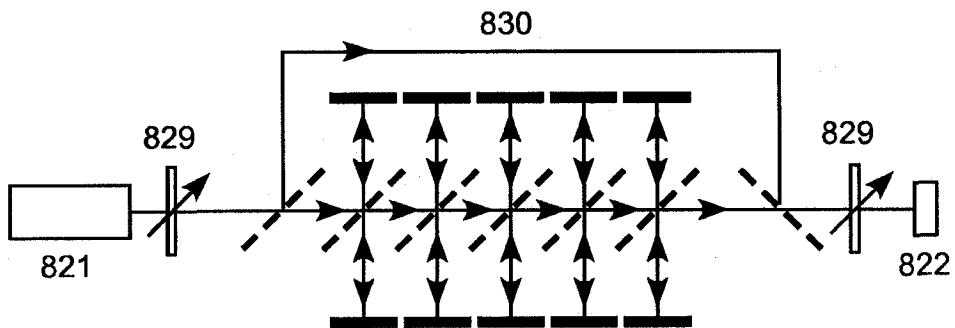


图 9d

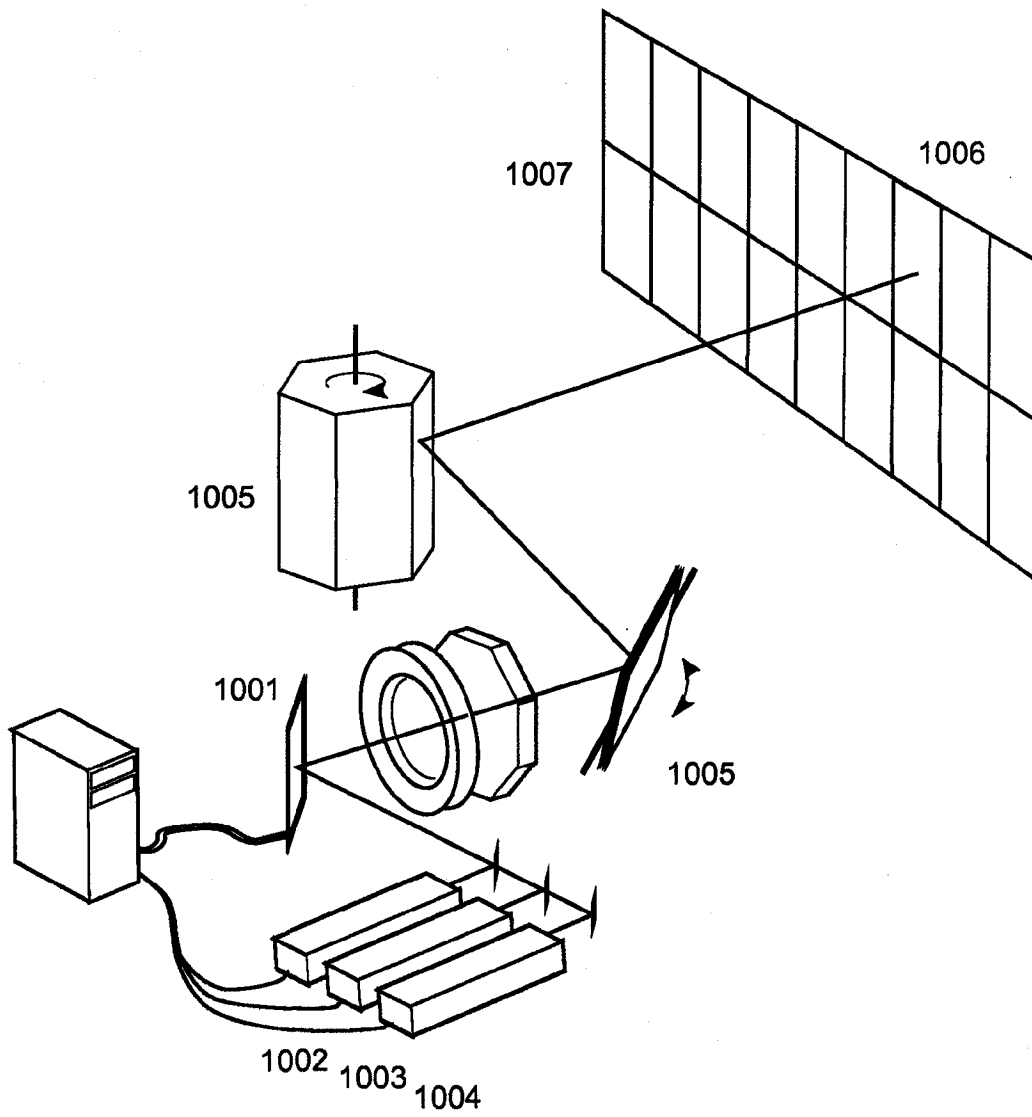


图 10a

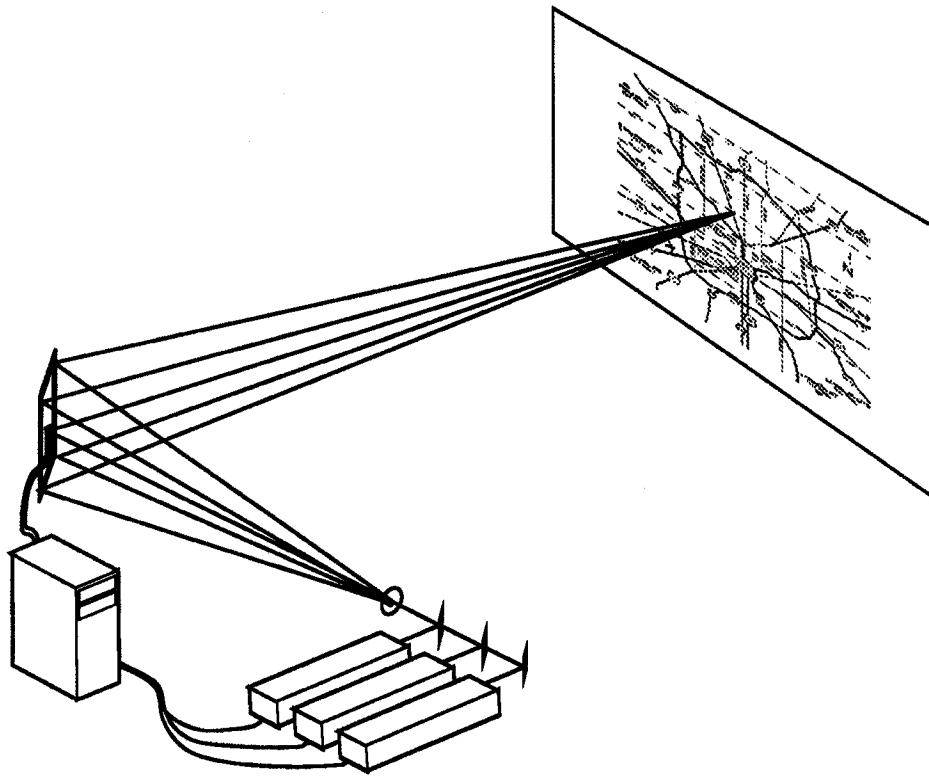


图 10b

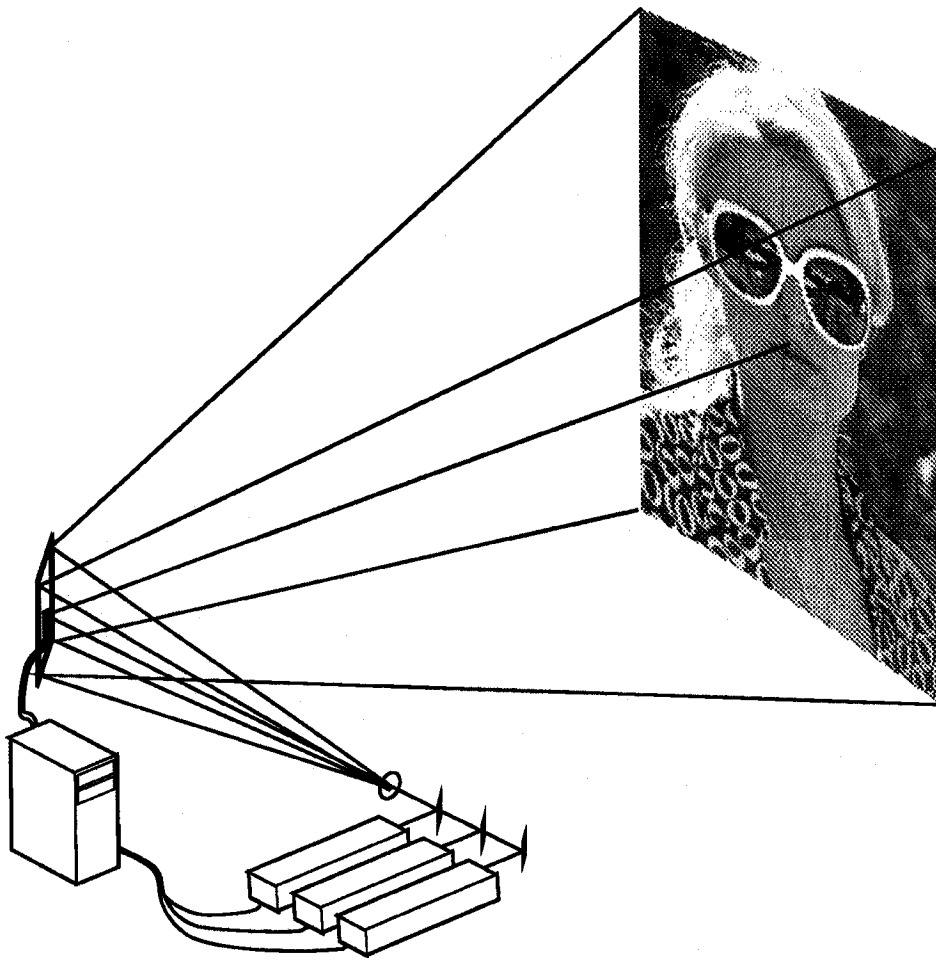


图 10c