

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 3/14 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200780004626.8

[43] 公开日 2009年3月4日

[11] 公开号 CN 101379418A

[22] 申请日 2007.2.6

[21] 申请号 200780004626.8

[30] 优先权

[32] 2006.2.7 [33] EP [31] 06002411.4

[32] 2006.8.31 [33] EP [31] 06018194.8

[86] 国际申请 PCT/EP2007/051138 2007.2.6

[87] 国际公布 WO2007/090843 英 2007.8.16

[85] 进入国家阶段日期 2008.8.6

[71] 申请人 苏黎世联邦理工学院 ETH 转让公司

地址 瑞士苏黎世市

[72] 发明人 曼纽尔·阿希旺登

马库斯·丹尼尔·贝克

尤里·贝亚耶夫 安地列斯·斯代莫

[74] 专利代理机构 北京中安信知识产权代理事务所

代理人 张小娟

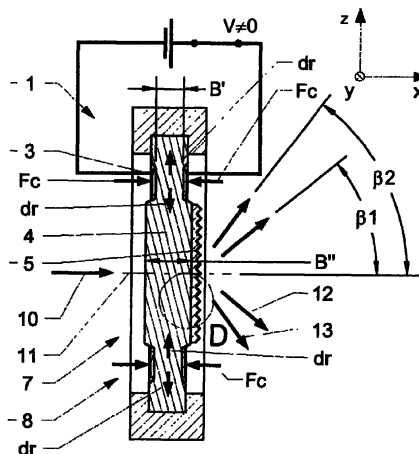
权利要求书5页 说明书31页 附图8页

[54] 发明名称

可调光学活动元件

[57] 摘要

本发明涉及不同的光学活动元件(1, 20, 22), 比如通常具有类似设置的可调衍射光栅和可调移相器。光学活动元件(1, 20, 22)包括由可变形材料制成并且机械地互连至驱动装置的中间层(4)。驱动装置包括第一和第二驱动板(2, 3), 它们通常布置为在中间层(4)的相对侧面上彼此相对并且局部地覆盖中间层(4)以使得中间层(4)由驱动板(2, 3)带来的局部压缩引起厚度(B)在第一方向(x)上的局部降低。在第一方向上的这个降低引起中间层在第二方向(y, z, dr)上的次级变形, 这又引起光学活动元件的光学行为的变化。



1. 光学活动元件 (1, 20, 21), 其包括由可变形材料制成并且机械地互连至第一和第二驱动板 (2, 3) 的中间层 (4), 驱动板 (2, 3) 通常布置为在中间层 (4) 的相对侧面上彼此相对并且局部地覆盖中间层 (4) 以使得中间层 (4) 由驱动板 (2, 3) 带来的局部压缩引起中间层 (4) 的厚度 (B) 在第一方向 (x) 上的局部降低并且其中至少一个由于中间层 (4) 的材料的泊松比而涉及中间层 (4) 在第二方向 (y, z, dr) 上的次级变形, 从而次级变形引起光学活动区域 (5) 的光学行为的变化。

2. 根据权利要求 1 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 第一和第二驱动板 (2, 3) 是第一和第二电极 (2, 3), 它们布置为使得在电压 (V) 施加第一和第二电极 (2, 3) 之间时, 第一和第二电极 (2, 3) 由于库仑力 (Fc) 而互相吸引。

3. 根据权利要求 2 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 电极 (2, 3) 的至少一个由碳黑构成。

4. 根据前述权利要求之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 中间层 (4) 以预伸展的方式附接至保持装置 (6) 以使得中间层 (4) 在操作期间不会在平面 (y, z) 外变形。

5. 根据权利要求 4 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 保持装置 (6) 具有中间层 (4) 布置于其中的圆形或矩形开口。

6. 根据权利要求 2 至 5 之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 电极 (2, 3) 与光学活动区域 (5) 侧向地布置。

7. 根据前述权利要求之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 中间层 (4) 具有 100 nm 至 150  $\mu$ m 范围内的厚度 (B)。

8. 根据前述权利要求之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 中间层 (4) 具有 10  $\mu$ m 至 500  $\mu$ m 范围内的直径。

9. 根据前述权利要求之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 中间层 (4) 没有被驱动板 (2, 3) 覆盖的区域具有可调整的直径, 这涉及中间层 (4) 由材料的泊松比在第一方向 (x) 上的压缩。

10. 根据权利要求 9 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 具有可调整直径的区域包括具有可调整光栅周期 (d) 的衍射光栅 (5)。

11. 根据权利要求 10 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 衍射光栅 (5) 是菲涅耳透镜。

12. 根据权利要求 10 或 11 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 衍射光栅 (5) 由注射模塑或旋压涂覆或冲压的材料构成。

13. 根据前述权利要求之一的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 中间层 (4) 没有被驱动板覆盖的光学活动区域 (5) 是透明的并且具有可调整的厚度 (B), 这涉及中间层 (4) 由材料的泊松比在第一方向上 (x) 的压缩。

14. 根据权利要求 13 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 光学活动区域 (5) 用作移相元件。

15. 根据权利要求 13 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 光学活动区域 (5) 用作具有可变焦点的透镜。

16. 根据权利要求 15 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 透镜包括由两个薄片状区域 (14) 界定的透镜形腔室 (16)。

17. 根据权利要求 16 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 透镜形腔室 (16) 填充有折射率高于周围环境材料。

18. 根据权利要求 16 至 17 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 透镜形腔室 (16) 填充有液体。

19. 根据权利要求 9 的光学活动元件 (1, 20, 21), 其特征在于: 衍射光栅 (5) 在中间层 (4) 的表面中实施, 或者作为分开的元件附接至中间层 (4) 的表面。

20. 一种显微镜, 其包括至少一个根据前述权利要求之一的光学元件 (1, 20, 21)。

21. 根据权利要求 20 的显微镜 (50), 其特征在于: 该显微镜 (50) 包括激光束 (47), 由此激光 (51) 被导向到衍射光栅 (1) 上, 由此激光束 (47) 被分解为几个偏离的衍射最大值 (48, 49) 以提供样品的结构照

明。

22. 根据权利要求 21 的显微镜 (50), 其特征在于: 所述几个分解的激光束 (48, 49) 中的四个布置为绕着光学轴线 (46) 旋转对称。

23. 根据权利要求 20 至 22 之一的显微镜 (50), 其特征在于: 该显微镜 (50) 是焦阑的光束系统。

24. 根据权利要求 20 至 23 之一的显微镜 (50), 其特征在于: 该显微镜 (50) 的光学照明路径包括形成激光束 (47) 的第一透镜 (65)、在第一透镜 (65) 之后将所述成形的激光束分解的衍射光栅 (1)、在衍射光栅 (1) 之后会聚所述分解的激光束 (48, 49) 的第二透镜 (63) 以及将所述分解的激光束 (48, 49) 布置为平行于光学轴线 (46) 的第三透镜 (59)。

25. 根据权利要求 24 的显微镜 (50), 其特征在于: 该显微镜 (50) 的光学照明路径包括半波片 (52) 和移相器 (53)。

26. 一种用于制作根据权利要求 1 至 19 的光学元件 (1, 20, 21) 的方法, 其包括以下步骤:

- a) 将中间层 (4) 伸展 200% 至 300%;
- b) 将预伸展的中间层 (4) 附接至保持装置 (6);
- c) 在中间层 (4) 的每侧上施加至少局部地覆盖中间层 (4) 的电极 (2, 3)。

27. 一种根据权利要求 26 的用于制作光学元件 (1, 20, 21) 的方法, 其特征在于: 光栅 (5) 应用至中间层 (4)。

28. 一种根据权利要求 27 的用于制作光学元件 (1, 20, 21) 的方法, 其特征在于: 光栅 (5) 通过旋压涂覆或注射模塑或热成形来制成。

29. 一种根据权利要求 26 或 27 之一的方法, 其特征在于: 电极 (2, 3) 由冲压和/或喷射和/或涂覆和/或接触压印的碳黑粉末构成。

## 可调光学活动元件

### 技术领域

本发明属于可调光学活动元件领域，比如移相器和透射光栅，举例来说，用于自适应光学以及显微学。

### 背景技术

衍射光栅是由其表面包含等距密纹或划线的反射或透明基片组成的光学元件。在光线入射于衍射光栅上时，出现衍射和相互干扰效应并且光线在按顺序调用的离散方向上反射或透射。由于它们的分散性质，光栅通常用于单色仪和分光仪中。这些设备在1821年首先由德国物理学家 Joseph von Fraunhofer 制出。

衍射光栅成为研究主题已有很多年。开始时，光栅的设计和作用原理是主要的兴趣点。近年来，可调衍射光栅变得流行，其允许改变其物理行为。一个主题是怎样获得较大的调节范围。集中的研究活动和新的微加工技术的组合产生了数种可调衍射光栅。这些可调衍射光栅的例子是基于梳状驱动器的机械式旋转光栅或可调光栅的不同实现（参见 A. Azzam Yasseen et al. "Diffraction Grating Scanners Using Polysilicon Micro-motors", IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 5, No. 1, January/February 1999）。尽管这些光栅中的一些在商业上成功的产品中采用，但是它们的调节范围有限或者需要很多昂贵的生产步骤。

传统的衍射光栅通常基于不可变形的刚性材料。这些材料使得能改变光栅的形状。因此调节这些光栅的唯一可能性是旋转。如同现有技术

的解决方案所示，光栅的旋转涉及在微型系统中难以实施的昂贵的机械系统。近年来，这个问题得到解决并且采取了数种试图解决这个问题的方案。基于梳状驱动器或压电致动器的可调衍射光栅已经开发出来。这种设备需要由于复杂生产过程所带来的高昂投资或者仅获得相对小的调节范围。这主要是由于用于实施光栅的刚性材料的缘故。

可调衍射光栅从现有技术是已知的。这种设备的一个例子是基于聚合物基片（即 PDMS）并且由于热碰撞而改变其形状的衍射光栅（参见 Bartosz A. Grzybowski et al., "Thermally actuated interferometric sensors based on the thermal expansion of transparent elastomeric media", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, No. 4, April 1999）。相同的研究者已经开发了另一种可调衍射光栅，其通过施加外部机械压力来调节（参见 Bartosz A. Grzybowski et al., "Beam redirection and frequency filtering with transparent elastomeric diffractive elements", *Applied Optics*, Vol. 38, No. 14, 10 May 1999）。机械压力由两个平行玻璃板施加至包括衍射光栅的聚合物层。由于其作用原理，这两种解决方案都具有例如不可能微型化的缺点。

Tapani Levola 的 US2004/0109234 (US'234) 公开于 2004 年并且涉及一种利用可电地变形的衍射光栅结构来操纵光波的光学设备。该电地可调的衍射光栅基于在两种具有不同介电常量的材料的界面处在有电场存在时出现力的物理效应。这个效应被建议用来调节光栅的衍射行为。

Curtis Kevin 的 US2002/0186928 (US'928)（相应于 EP147373）公开于 2002 年并且公开了一种可调光学设备，用于在波长分离多路通信系统中增加或减少一个或多个信道。该可调光学设备包括一个或多个滤波器，其中至少一个滤波器包括至少一个弹性体以及一个或多个光栅。弹性体是随着施加至聚合物两侧的电压的变化或者在一定波长的光从聚合物衍射或投射穿过其中时膨胀和收缩的聚合物。这个设备由基于交变折射率



模式的全息光栅过程。这个光栅嵌在其厚度在施加电压时变化的弹性体内。一个缺点是光栅基于交变折射率的固定模式。

Srinivasan 等的 US6930817 (US'817) 公开于 2004 年并且公开了一种可变调制器组件，其包括具有多个电极的活动层。可变形层与活动层的第一表面操作的接触。具有多个电极的电极配置与活动层的第二表面接触。控制器构造来选择性地将可变信号施加至电极配置的选定电极。可变信号的施加使得可变形层重新构造为具有显著峰和谷的可选形状。峰和谷之间的距离由所施加的可变信号的值确定。在一种光学调制方法中，可变调制器组件定位来在可变形层接收来自光源的光。控制器激活电极配置以产生可变信号，引起静电电荷使可变形层扭曲为与激活的电极相应的模式。

Schrader 的 US6903872 (US'872) 公开于 2002 年并且描述了一种可电地重新构造的光学设备，其基于使用与至少第一电极结构相反的介电且透明的粘弹性材料层。根据该发明，各个电极区域在第一电极结构为了使粘弹性层变形的布置与下面可选方案之一相一致。根据第一可选方案，第一电极结构的电极区域分组为由两个或更多相邻电极区域构成的组并且在每个所述组内各个电极区域每个供应有显著不同的电压。根据第二可选方案，第一电极结构的电极区域是基本上环形、椭圆形、矩形或多边形闭环电极。该本发明允许例如用于形成电地可重新构造的炫耀光栅或菲涅耳区域透镜。

Laude 等的 US3942048 (US'048) 公开于 1976 年并且涉及一种包括压电基片的光栅组件。压电基片在两个相对的表面上支撑金属层。基片的表面之一也承载在由该表面支撑的金属层中形成于该表面中或者由该表面承载的树脂层中形成的光栅。可变电压在金属层之间的施加在基片中形成可变强度的电场并且由于基片的压电属性这使得光栅的节距可变。

由于这个光栅依赖于基片的压电效应的事实，仅能实现有限节距的变化并且因此没有得到很大的调节范围。又一存在于这种设备的制造的困难是费用相对昂贵。

Gerritsen 的 US4850682 (US'682) 公开于 1989 年并且描述了一种衍射光栅。该衍射光栅响应于在给定入射角度范围内入射到其上的辐射并且在相对有限的限度内在选定的方向上从该结构重新定向入射的辐射。液晶材料定位为与至少一个衍射结构的衍射表面相接触。在不活动时，液晶材料具有基本上与衍射结构相同的折射率。在激活时，液晶材料的折射率显著不同从而在给定入射角度范围内的进入辐射被透射穿过该结构并且存在于选定的方向上。

Trex Communications Corp 的 WO9948197 (WO'197) 公开于 1999 年并且描述了一种具有附接的或整体地形成的衍射光栅的压电基片。在电场与光栅平行地施加至压电基片时，压电致动器使光栅伸展以使得衍射的周期和角度变化。一个问题在于电极横向于光栅布置。从而不可能使设备微型化。

Siemens Aktiengesellschaft 的 WO2005085930 (WO'930) 公开于 2005 年并且涉及一种能构造为例如双凸透镜的自适应光学元件。该元件具有由电活化的聚合物层和数个横向层状电极构成的聚合物致动器。层状电极暴露于不同的电压，从而在电场的长强度中产生影响聚合物层变形的梯度。据描述，将可能获得几乎任何状态的变形，比如举例来说所述的双凸透镜。然而，透镜似乎不是非常精确。

在 WO'930 中，参考了在 "Smart structures and materials 2001", Vol. 4329 中公开的一篇文章，其描述了一种包括布置于圆形框架的开口内的电活化聚合物的膜片致动器。由于电压施加于布置在膜片的相对侧面上的电极，膜片的表面能改变。由于膜片以松弛的方式附着在框架中，膜

片在其表面由于施加的电压而增大时开始松弛。从而可能对行进穿过膜片的光束有影响。

上述现有技术的设备不仅生产昂贵而且具有在传输模式上不实用的缺点。然而，从 US'928 已知的设备能在某些场合中用作透射光栅，但是仅作为波长滤波器而不是作为光转向设备。

## 发明内容

本发明涉及光学活动元件的方法和设备，比如可调衍射光栅，可调光透射移相器、可调菲涅耳透镜或可调透镜。

光栅的基本性质是衍射角度取决于入射光的波长和光栅周期（如下所示）。因此，光栅在空间上将入射光分离为其单色分量，即其是色散的，在白光照明下产生彩虹颜色。这在视觉上类似于棱镜的操作，尽管机理不同。衍射的原理已经知道 100 多年了并且存在着很多商业上可用的衍射元件（例如 Zeiss, Thorlabs, Edmund Optics）。

传统的衍射光栅大多基于不可变形的材料。因此，在生产期间印刻的周期性结构不能改变。因而，根据光栅公式

$$n \cdot \sin(\Theta_m) - n_i \cdot \sin(\Theta_i) = \frac{m\lambda}{d},$$

这个光栅仅能通过改变入射角度 $\Theta_i$ 来改变。

在光栅公式中， $\Theta_m$ 表示第 m 级衍射的角度， $n_i$ 是入射介质的折射率，n 是衍射在其中传播的介质的折射率， $\lambda$ 表示入射光的波长并且 d 是光栅的周期。与现有技术不同，此处公开的发明提供了一种以简单且成本有效的方式改变光栅周期的方法和设备，如同随后将更详细解释的。

光学中的另一需求是易于允许移动例如光束相位的光学元件。在光行进穿过介质时，其波长与介质的折射率成反比例地降低 $\lambda = \lambda_0 / n$ ，其中 $\lambda$ 表示光在介质中的波长， $\lambda_0$ 是光在真空中的波长并且 n 表示介质的折射

率。在光行进穿过折射率为  $n$  的介质一个距离时，与在真空中行进的光束相比，引入了相位延迟  $\phi = 2\pi(n-1)l/\lambda$ 。如果介质的厚度变化一个值  $\Delta l$ ，两个光束的相位差的变化为  $\Delta\phi = 2\pi(n-1)\Delta l/\lambda$ 。如同从随后的解释中变得明显的，此处所公开的发明提供了一种以简单且成本有效的方式移动光的相位的方法和设备。

可调衍射光栅的第一实施例和可调光透射移相器的随后实施例将在随后更详细地解释。

需要说明的是，可调衍射光栅的总体设置和具有反射型可调衍射光栅的实施例在相同发明人的欧洲专利申请 No. 06002411.1 中描述，此处要求以该欧洲专利申请的优先权。

通常，根据本发明的光学活动元件，举例来说比如可调衍射光栅，通常包括致动器，该致动器包括半透明(translucent)或不透明的可变形中间层，例如由弹性材料构成，其由驱动装置致动以使得在致动器的特定区域中中间层的侧向伸展和/或厚度变得可调整。根据应用领域，弹性中间层能以预伸展的方式布置于周围保持框架中以提高设备的性能。在一个实施例中，驱动装置包括用作第一和第二驱动板的第一和第二电极，它们通常在中间层的相对侧面上布置为彼此相对。电极布置为相对彼此充分地电隔离以避免负面的电流。通过在第一和第二电极之间施加电压，在第一和第二电极之间的区域中中间层能通过施加电压而被压缩，因为库仑力在第一方向上引起局部变形（厚度减小），并且至少一个涉及中间层在第二侧向上的次级变形。通常次级变形由于中间层的材料的泊松比而与第一变形相关。在一个实施例中，可变形光栅直接或间接地互连至可变形的中间层。衍射光栅的变形从而通常与中间层的变形相关，主要与由于通过材料的泊松比而与主要变形相关的次级侧向变形所获得的变形相关。然而，也可以叠加其它变形。在又一实施例中，光栅集成入中

间层的表面，例如通过冲压、热变形或模塑。然而，这些实施例就性能而言具有一定的限制。

比如衍射光栅或菲涅耳透镜之类的光学元件一般特征在于其用槽密度或每毫米的线来表示的周期（槽密度）。槽的尺寸和周期必须处于所述波长和要实现效应的量级。在其中光栅的使用最普遍的光学器件中，这通常相应于 380nm 和 780nm 之间的波长（这是可见光范围，比如举例来说 10nm 至 10  $\mu$ m 的其它范围也是可能的）。槽密度通常在每毫米数十个槽至数千个槽之间变化。周期结构（槽）的形状决定了光栅的效率。举例来说光栅能由具有三角形横截面或由圆球构成的线性槽形成。可选地，光栅能由球形或锥形的规则图案形成。比如举例来说菲涅耳透镜的其它形状也是可能的。

现有技术的衍射光栅存在着数个限制。一个主要问题是，在不采用复杂的宏观旋转机构或昂贵且复杂的微观机械致动器之下，衍射光栅不能连续地可调。一个原因是在标准可调光栅中使用了硬质材料（比如硅）。这些材料的刚性使得不能显著地改变光栅周期。

本发明借助于相对柔软的材料（比如弹性体）克服了这个问题，尽管基于柔软材料制作衍射光栅一般而言不是新思想。存在着数个可行的报告，其中描述了光栅怎样通过使用热或外部压力来调节（例如 Bartosz A. Grzybowski et al., „Thermally actuated interferometric sensors based on the thermal expansion of transparent elastomeric media", Review of Scientific Instruments, Vol. 70, No. 4, April 1999 or Bartosz A. Grzybowski et al., „Beam redirection and frequency filtering with transparent elastomeric diffractive elements", Applied Optics, Vol. 38, No. 14, 10 May 1999）。然而，从现有技术中尚不知道通过使用电活化聚合物致动器来调节光栅，尤其是弹性体致动器。电调节与目前已知的方法相比具有显著的优点。通过

加热或冷却进行的调节非常缓慢并且难以控制；通过外部压力进行调节难以集成在小型设备中。

衍射光栅和压电陶瓷的组合从现有技术中也是已知的，但是实验已经显示这种设备仅具有有限的光学调节范围。这主要是由于用压电陶瓷所能获得的有限应变 (<0.3%)。

穿过透明致动器和光栅区域或者引导到反射或半透明光栅上的入射白光被分离为根据光栅的侧向变形和光栅周期以某一角度发射的不同射线的分量。通过光栅周期的改变，光的分量以不同的角度发射。在电压施加至例如由碳黑制成的电极时，电极之间的可变形弹性材料由于库仑力而被压缩。由于材料例如为 0.499 的泊松比，第一方向上的压缩导致了第二方向上的平面状扩展。电极区域的这个侧向扩展引起机械地互连至预应变聚合物的光栅区域在平面方向上收缩。这个收缩（压缩）导致了光栅周期变化，从而引起第  $m$  级衍射的角度增大。在一个给出的其中可变形材料由弹性材料构成的示例中，对于 532 nm 的波长，衍射角度的变化介于 20 mrad 和超过 100 mrad 之间。

在本发明的一个实施例中，致动器和如果适合的话光栅以至少一种可变形材料实施。这种实施的一个优点是光栅周期方向上较高的线性应变。这使得光栅能获得较大调节范围（比基于压电陶瓷致动器材料的任何已知实施方案高大约 150 倍）的优点。本发明的其他优点在于制造工艺成本非常低、简单且快速。与需要数个复杂微加工工艺的以前系统（即梳状驱动器驱动的可调光栅）不同，本发明的优选实施例的生产需要相对便宜且商业上可用的材料，比如 PDMS（聚二甲基硅氧烷，一种广泛使用的硅基有机聚合物）、碳黑或 3M VHB4910、3M 9460 丙烯酸弹性体、Elastosil 625 以及覆层金属比如 Au（金）、Al（铝）或 ITO（氧化铟锡），而这仅是产品的选择。

在使用相对非柔性的材料时，例如作为覆层材料或用于电极，通过将特殊的形状应用于非柔性材料可获得改进的灵活性，以使得至少在一个方向上获得改进的侧向灵活性。良好的结果可通过波状、波纹管式折叠状发展获得，其允许侧向变形，主要由于弯曲。在一个实施例中，波纹管式折叠状发展是光栅本体的结果。在又一实施例中，波纹管式折叠状层在非变形状态下具有带有直线侧壁的波状横截面，侧壁由尖锐边缘或很多一定的半径或者一系列互连的半圆互连。

根据本发明的光栅和移相器能微型化，这例如对于制造小象素的显示器或用于显微镜中是非常重要的。衍射光栅具有良好的衍射性质（波长分离），往下至每个衍射光栅 10 线。这意味着在理论上，能获得  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  的分辨率（最小光栅尺寸）。又一优点在于机械冲击在平面内（不是在旋转光栅结构中）。

根据本发明的可调衍射光栅的实施例可通过包括以下步骤的过程获得：

1. 将如上所述的聚合物带（用作中间层的弹性材料）伸展一定的量，比如 200% 至 300%；
2. 将预伸展的聚合物膜附接至保持装置，例如包围框架；
3. 在聚合物膜的每侧上施加电极，例如在于通过冲压将碳黑压印到表面上或者通过喷射/涂覆或接触压印。
4. 将由聚合物构成的可变形光栅施加至聚合物膜邻近电极的至少一个表面。

已经显示，在某些应用领域中，有利地是，在用作中间层的聚合物膜预伸展一定量时，在可变形光栅附着到聚合物膜上之前并且然后在聚合物和可变形光栅附着至包围的保持装置并且应用电极之前再次被伸展。可获得改进的光学效率，因为聚合物膜被伸展 200%，然后施加可变

形光栅，并且在应用电极和将聚合物膜附着至保持装置之前聚合物膜和可变形光栅被伸展至总计 300%。

根据本发明的可调衍射光栅的第二实施例可通过包括以下步骤的过程来制造：

1. 在聚合物膜中模塑光栅；
2. 将聚合物膜和光栅伸展至一定程度；
3. 将预伸展的聚合物膜附着至保持装置，例如包围框架；
4. 在聚合物膜的每侧上施加包围光栅的电极，例如通过冲压将碳黑粉末压印到表面上或者通过喷射/涂覆或接触压印。

在一个实施例中，致动器的中间层被伸展例如  $300\% \times 300\%$ ，从而产生  $62.5\ \mu\text{m}$  的膜厚并且安装到外径为 40mm 且具有 30mm 开口的环形保持装置上。两个宽度为 5mm 且直径为 20mm 的圆形的适应性碳黑电极通过使用碳黑覆盖的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 印模来接触压印。碳电极可连接至允许互连至适合电压源的金属电极。

可变形光栅可例如通过模塑获得，或者在于涂覆流体例如聚合物涂覆流体旋涂到包括主栅格的波形转换器 (waver) 的表面上，在于流体施加到包括主栅格的表面上，然后波形转换器以一定的速度旋转直到涂覆流体等地分布。在涂覆流体固化之后，可变形栅格能从包括主栅格的表面 (作为主栅格的准确图像) 移除。然后可变形光栅施加至由可变形材料制成的聚合物膜 (其用作光栅的基片)。如果适合，电极能由半透明材料制成或者以不同的方式施加，例如通过蒸发。

在一个实施例中，衍射光栅结合入或互连至可变形半透明材料 (比如如上所述的弹性体) 层的上表面，所述层用作承载和保持光栅就位的基层。决定光栅的槽之间的距离的次级侧向变形 (平面层变形) 可获得，因为可变形材料在垂直于其层表面的主要方向上至少局部地变形 (压



缩),从而变形率由材料的泊松比决定。根据所使用的层材料和形状以及层的支撑,可获得显著的透射率。由于侧向变形与一定材料的泊松比相关的缘故,使用何种层材料是相关的。良好的结果可由比如PDMS(Wacker Elastosil RT625)或3M VHB带获得。PDMS通常具有0.5的泊松比并且VHB为0.499。

在主要方向上产生变形的优选方式是通过库仑力。可变形材料层至少局部地布置于通常彼此相对地布置且通常相对于光学设备的光学轴线同轴的上和下电极之间。通过在电极之间施加电压,电极由库仑力彼此吸引,其结果是可变形材料层在第一方向上压缩(主要变形)并且在侧向上平面地扩展(次级变形)。变形由可变形材料的泊松比表示。衍射光栅的光学活动元件集成或互连至可变形材料的层以使得变形对衍射光栅的周期性结构(形状的周期性)有影响。为了不妨碍这个变形,衍射光栅(相应地电极)必须本身可变形至一定阶段。这能例如实现,在于其具有允许至少一个方向上侧向变形的波纹管式折叠或锯齿状横截面。可选地或另外地,电极能由导电性粉末材料制成,比如碳黑,其冲压或压印至中间层的表面。如果适合,电极可由半透明材料制成。

可选地或另外地,衍射光栅可包括刚性光学活动元件,其被支撑和链接为使得它们彼此间的距离可调整。例如,衍射光栅由彼此相邻地对准且直接或简介地结合到柔性材料层上的导电性材料(例如金或其他金属)薄带构成。

根据本发明的可调衍射光栅可应用于很多技术领域,比如用于显微镜、显示器、光源、照相机或其中光需要在不同信道中切换的通信系统。本发明具有用于很多商业用途的潜力,因为其生产简单且便宜并且能用所建议的设备获得有效的可调范围。一个可能性是用作光束扩展器,例如用于类似于美国专利2004109234所述应用的虚拟显示设备。其还能用

作单色光源。当白光照射到光栅上时，光被分离为其单色分量。这个单色光能用于显示设备中。这种显示器的一个优点是显示的颜色不限于现有技术的显示设备的颜色范围。

当然，本发明还具有用于其中需要光束切换的通信应用中的潜力。一个应用是用作光学系统的可调衍射光栅。而且，可调衍射光栅可用作实验室设备，用于调查不同系统（生物系统）在暴露于形状改变光栅/结构时的行为。根据本发明的衍射光栅可例如以菲涅耳透镜的形式应用于手持计算机、个人数字助理设备（PDA）、移动电话、数字视频、照相机或使用高度可调衍射光栅的任何设备中。

良好的结果由用作致动器的电活化聚合物获得。电活化聚合物是在电压或电流施加于其上时其形状改变的聚合物。包括压电陶瓷或形状记忆合金的致动器是公知的并且应用于数个设备中。近十年来，基于电活化聚合物（EAP）的新型致动器逐渐在吸引注意力。EAP 是有希望的，因为它们在一定范围内具有类似于自然肌肉的性质。这使得它们对于其中模拟哺乳动物运动的机器人应用非常引人注目。这也是为何 EAP 经常称为人工肌肉的原因。现在已知的 EAP 能产生高达 380% 的应变。EAP 通常可分为两种不同的类型。

第一类 EAP 能概括为介电电活化聚合物（DEAP），其中致动由电极之间的静电力引起。电极通常在可变形聚合物材料的任一侧上布置为彼此相对。当电压施加时，相对的电极彼此吸引并且布置于电极之间的聚合物材料被压缩。由于泊松比，压缩材料在垂直方向（侧向）上伸展。这种电活化聚合物的特征在于相对大的致动电压和可比的低电能消耗。为了减小阻碍应力，有利地是电极制作为可变形和/或仅局部地覆盖可变形材料，例如具有环形设计。在一个实施例中，基层包括具有明显侧向收缩行为的介电弹性体致动器。这种弹性体也已知为人工肌肉。光栅可

互连（例如通过结合）至或集成入这种介电弹性体致动器的可控地变形的表面。光栅可与基层相关地变形。

改变光栅周期而非光栅角度的优点是实施简单并且 $-m$ 和 $+m$ 级等地改变其角度。这在数个其他应用中允许使用可调结构照明显微镜（下述）。另外，这些系统能用于便宜的自然色显示器以及微型化可调分光仪或者作为虚拟显示器中的扩展器。可调透射光栅不仅从技术角度看胜过现有产品而且在商业上非常有吸引力。生产所使用的材料不仅便宜而且聚合物还显示了极好的光学性质。透射率测量显示了例如，在400nm至800nm的波长范围内，小于1%的光被1mm厚的层吸收。另一主要优点是简单的制造工艺。根据该实施例，需要两个或三个生产步骤。

本发明的一个实施例包括具有光学活动元件的可调衍射光栅，所述光学活动元件布置为在第二侧向上相对彼此可移动地间隔开。光学活动元件机械地互连至由可变形材料制成的层，从而该层在通常垂直于第二侧向的第一方向上的变形引起光学活动元件的相对距离和/或周期性结构中的变化。侧向变形通常通过层材料的泊松比与第一变形相关。在一个优选实施例中，由可变形材料制成的层布置于当电压施加于其间时借助于库仑力压缩该层的上和下电极之间。通常，上电极的长度至少在一个侧向上可调整并且上电极机械地互连至该层以使得该层的变形引起上电极在侧向上的侧向变形。根据应用领域，光学活动元件可具有锯齿、s形或v形横截面，然而，其他形状也是可能的，例如光学活动元件由彼此侧向地邻近布置且由可变形材料制成的基层支撑的薄带材料构成以使得它们的相对距离可调整。如果适合，薄带材料可用作电极。光学活动元件可包括锥形或球形元件并且可由可变形材料制成的基层支撑以使得它们的相对距离可调整。又一实施例可包括如此处所述可调衍射光栅的阵列。

此处公开的发明给出了提供一种光学元件的可能性，所述光学元件用作所谓的移相器，通常具有与前述透射光栅类似的设置。在光行进穿过介质时，其波长与介质的折射率成反比例地降低 $\lambda = \lambda_0 / n$ ，其中 $\lambda$ 表示光在介质中的波长， $\lambda_0$ 是光在真空中的波长并且 $n$ 表示介质的折射率。在光行进穿过折射率为 $n$ 的介质一定距离时，与在真空中行进的光束相比，引入相位延迟 $\phi = 2\pi(n-1)l / \lambda$ 。如果介质的厚度改变 $\Delta l$ ，两个光束之间的相位差改变 $\Delta\phi = 2\pi(n-1)\Delta l / \lambda$ 。

根据本发明的移相器的实施例基于弹性体透明材料，举例来说比如3M在市场上销售的折射率为1.79的VHB 3410带。对于波长 $\lambda = 488\text{nm}$ ，相位移动等于 $\Delta\phi[\text{rad}] = 2\pi(1.79-1)\Delta l[\text{nm}] / 488[\text{nm}]$ 。

在根据本发明的移相器的实施例中，弹性材料层布置于至少局部地包围的保持装置的开口中。第一和第二电极在弹性材料层的任一侧上布置为彼此相对并且相对彼此由至少一个绝缘层相对彼此电绝缘。在一个实施例中，弹性材料层由介电丙烯酸弹性体膜构成，比如由3M供应的VHB 4910丙烯酸带，具有一定的折射率 $n$ 。在电压施加于两个电极之间时，电极由于库仑力而彼此吸引，从而电极之间的弹性材料层被压缩以使得其厚度变化。

在电极由半透明材料制成时，电极的区域可用作移相器。

在移相器的一个实施例中，电极在弹性材料层的光学活动区域附近局部地覆盖弹性材料层。在电压施加于两个电极之间时，这两个电极之间的弹性材料由于电极之间吸引的库仑力而被压缩。由于电极之间的弹性材料的泊松比，光学活动区域的材料通常垂直于电极之间的力以受控的方式变形，平面状地压缩光学活动区域的材料。由于这个次级平面变形，光学活动区域由于材料的泊松比经历其厚度的增大。为了获得良好

的结果，弹性材料层在一定张力之下以预伸展的方式布置于保持装置中以使得平面压缩不会例如由于负的力导致平面外的变形。光学活动区域的厚度中的变化由于材料的折射率  $n$  导致了穿过光学活动区域的光束的相位变化。根据应用领域和包围保持装置，电极可具有不同的形状，例如它们沿着保持装置（等距地）布置，具有开口或环形、规则或不规则的设计。而且，电极可布置为邻近弹性材料层的顶面和/或至少局部地嵌在弹性材料层中。

## 附图说明

此处所描述的发明将从下面给出的详细描述和附图中得到更完全的理解，附图不应当认为限制所附权利要求中所描述的本发明，附图示出了：

图 1 是可调光透射衍射光栅的透视图；

图 2 是根据图 1 的衍射光栅的横截面；

图 3 是图 2 的细节 B；

图 4 是根据图 1 处于变形状态的衍射光栅；

图 5 是根据图 4 的衍射光栅的横截面；

图 6 是图 5 的细节 D；

图 7 示意性地示出了移相器的设置；

图 8 是移相器的第一实施例的透视图；

图 9 是通过根据图 8 的移相器的横截面；

图 10 是根据图 8 处于变形状态的移相器；

图 11 是根据图 10 的移相器的横截面；

图 12 是移相器的第二实施例的透视图；

图 13 是根据图 12 的移相器的横截面；

- 图 14 是根据图 13 处于变形状态的移相器；
- 图 15 是根据图 14 的移相器的横截面；
- 图 16 是示出移相器和所施加的电压之间关系的图表；
- 图 17 示意性地示出了包括根据本发明的光学元件的显微镜的光路的第一实施例；
- 图 18 是包括根据图 17 的光路的显微镜；
- 图 19 是根据图 17 的光路的设置的细节图；
- 图 20 是根据图 18 的 TIR 显微镜和常规 TIR 显微镜的性能的比较；
- 图 21 示意性地示出了包括根据本发明的光学元件的显微镜的光路的第二实施例；
- 图 22 是根据附图（图 21a）的显微镜的图像平面中的干涉图案以及这个干涉图案（图 21b）的傅立叶转换；
- 图 23 示意性地示出了根据图 21 的光路的功能性；
- 图 24 是根据图 21 的光路的设置；
- 图 25 是根据本发明的光学元件的又一实施例；
- 图 26 是根据图 25 的光学元件以非变形方式的正视图；
- 图 27 是图 26 的光学元件沿着线 EE 切割的侧视图；
- 图 28 是根据图 25 的光学元件以变形的方式的正视图；
- 图 29 是图 28 的光学元件沿着线 GG 切割的侧视图。

## 具体实施方式

图 1 至 6 示意性地示出根据本发明的光学元件 1 的第一实施例，这里为半透明的可调衍射光栅 1。图 1 示出了处于非变形状态的衍射光栅 1，而图 4 示出了处于变形状态的相同衍射光栅 1。图 2 示出沿着线 AA 穿过根据图 1 的衍射光栅的中心的沿着 xz 平面的横截面。图 5 示出沿着线 CC

穿过根据图 4 的衍射光栅的中心的沿着 xz 平面的横截面。图 3 示出图 2 的细节 B 并且图 6 示出图 5 的细节 D。

衍射光栅 1 包括上部电极和下部电极 2、3，它们包围半透明的中间层 4 和光学活动的光栅区域 5。电极 2、3 作为驱动装置 15 的驱动板以可控的方式局部地压缩中间层 4。在这里所示的实施例中，光栅区域 5 由可变形材料形成为分开的元件，其然后例如通过胶粘或焊接附着于中间层 4 上。如果适合，光栅区域 5 能是中间层 4 的一部分，例如嵌在中间层 4 的侧面中。如能看到的，中间层 4 在此处在非变形状态下具有恒定的厚度 B，并且以预伸展的方式在包围保持装置（保持框架）6 的开口 7 中保持就位。电极 2、3 在此处具有环形设计的中间层 4 上的相对位置上布置为彼此相对。此外，它们布置为与保持装置 6 等距。电极 2、3 以及功能地互连的中间层 4 形成致动器以便以可控的方式变形光栅区域 5。

在如图 4 至 6 中示意性地示出的电压 V 施加于电极 2、3 之间时，电极 2、3 由于库仑力  $F_c$  而互相吸引，这在第一方向上（x 方向）在电极 2、3 之间的区域中引起中间层 4 的局部压缩并且从而引起与非变形状态（B）相比局部地减少的厚度  $B'$ 。

在电压 V 施加于两个适应性的电极 2、3 之间时，电场压力  $P = \epsilon \epsilon_0 (V/t)^2$  由于在弹性体 - 电极界面处形成的电荷而产生。 $\epsilon_0$  视为自由空间的电容率，并且  $\epsilon$  是介电弹性体的介电常数（例如 VHB 的  $\epsilon$  为大约 3.21）。电场压力感应引起材料应变的应力。因此，电压的施加导致厚度的压缩以及弹性体在平面方向上与之相关的局部伸展。这个平面伸展被传送至机械地互连的聚合物衍射光栅，并且导致光栅周期的改变。这引起衍射角度改变。由于中间层的材料的泊松比，被压缩的材料在电极 2、3 之间出现如用箭头  $dr$ （此处在此在径向方向上）所示的侧向扩展（在所示实施例中是旋转对称的）。这导致了中间层 4 由电极 2、3 径向地包围的区域以及与

之互连的光栅区域 5 的径向压缩 (这里旋转对称)。从而光栅周期  $d$  (参见图 3) 改变至图 6 中所示的不同值  $d'$ , 由此衍射光栅 1 的光学行为改变。又一效应在于中间层 4 的局部厚度增大至  $B''$ 。这个效应与如根据图 7 至 14 更详细地解释的移相光学元件相关。很显然, 光栅周期  $d$  ( $V=0$ )、 $d'$  ( $V \neq 0$ ) 是所施加电压  $V$  的函数。

光学设备 1 的衍射光栅 5 能装备有引起不同光学效应的不同光栅图案。由于光栅图案由平行线性纹构成, 该设备作为可调衍射光栅。由于光栅图案由同心纹构成, 该设备作为可调菲涅耳透镜。

能获得优良的结果, 因为中间层 4 由柔软、可变性材料组成, 比如具有对于 400 纳米和 800 纳米之间的波长而言吸收性小于 1% 的 VHB 4910。优选地使用由绝缘的弹性体材料制成的中间层 4, 因为能获得范围高达 380% 的大应变。又一优点是可比的高机电效率和获得中等至高带宽 (高于 1kHz) 的可能性。这些致动器因此能用来在 10% 至 300% 的范围内改变光栅周期。例如, 沿着光学轴线 11 (x 方向) 行进并且穿过致动器 8 和光栅区域 5 的入射白光 10 分离为不同波长 12、13 的分量, 它们根据由光栅 5 的侧向变形所限定的光栅周期  $d$  以确定的第一角度  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  发射。通过改变光栅周期  $d'$ , 光的分量以不同的角度  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  发射。在给出的示例中, 其中可变形材料由弹性体材料组成, 对于 532 纳米的波长而言衍射角度的改变在 20 mrad 和超过 100 mrad 之间。在将电压施加至也就是由碳黑制成的电极时, 电极之间的可变形弹性体材料被压缩。由于材料也就是 0.499 的泊松比, 在第一方向上的压缩导致在第二方向上的平面伸展。电极区域的这个伸展引起机械地互连至相同预应变聚合体的光栅区域在平面方向上压缩。这个压缩转换为光栅周期的减少, 这引起第  $m$  级衍射的角度增大。

图 7 示意性地解释了根据本发明的移相器 20 的功能原理。在入射光



10 行进穿过介质（中间层）4 时，其波长与介质的折射率  $\lambda = \lambda_0/n$  成反比例地减少。这里  $\lambda$  表示光在介质 4 中的波长， $\lambda_0$  是光在真空中的波长并且  $n$  表示介质 4 的折射率。在光行进穿过具有折射率  $n$  的中间层 4（参见图 8 至 15）的介质一个距离  $B$  并且然后离开介质时，与在真空中行进的光束相比，引入  $\phi = 2\pi(n-1)B/\lambda$  的相位延迟。如果介质 4 的厚度改变  $\Delta B$ ，两个光束之间的相位移动  $\Delta\phi$  变化  $\Delta\phi = 2\pi(n-1)\Delta B$ 。

根据本发明的移相器 20 通常具有与如前所述基于弹性体透明材料的可调衍射光栅相同的设置。一种可能的材料是已经提及的 3M 的市售 VHB 3410。这个材料具有 1.79 的折射率。因而使用用于前述移相器的公式，对于波长  $\lambda = 488$  纳米，相移等于  $\Delta\phi[\text{rad}] = 2\pi 0.79 \Delta B / 0.488[\mu\text{m}]$ 。

图 8 至 11 示出了移相器 20 的第一实施例并且图 12 至 15 示出了移相器的第二实施例 21，它们都基于如前所述的绝缘聚合体致动器 8。图 8 示出了在没有电压施加至电极 2、3 ( $V=0$ ) 时处于非变形状态的移相器 20 的第一实施例。图 9 示出了沿着图 8 的线 DD 平行于  $xz$  平面地穿过第一实施例 20 的横截面。图 10 示出了在电压 ( $V \neq 0$ ) 施加至电极 2、3 时处于变形状态的第一实施例。图 11 示出了沿着图 10 的线 EE 平行于  $xz$  平面地穿过第一实施例 20 的横截面。图 12 示出了在没有电压 ( $V=0$ ) 施加至电极 2、3 时处于非变形状态的移相器 21 的第二实施例。图 13 示出了沿着图 12 的线 FF 平行于  $xz$  平面地穿过第二实施例 21 的横截面。图 14 示出了在电压 ( $V \neq 0$ ) 施加至电极 2、3 时处于变形状态的第二实施例 21。图 15 示出了沿着图 14 的线 GG 平行于  $xz$  平面地穿过第二实施例 21 的横截面。根据图 8 至 11 的第一实施例和根据图 12 至 15 的第二实施例之间的差异主要在于第一实施例的电极 2、3 布置于中间层 4 的顶部上而第二实施例的电极 2、3 布置于中间层的内部。两个移相器的功能

性在原理上是相同的。在两个实施例 20、21 中，致动器 8 都包括弹性体薄膜（中间层）4，举例来说比如 VHB 4910 丙烯酸胶带、VHB 4960 或 Elastosil 625，其构成绝缘弹性体致动器 8 的核心。这个示例的中间层 4 由例如 300% × 300% 的系数预应变，产生大约 62.5 μm 的薄膜厚度 t。中间层 4 然后安装于外径为 40 毫米并且内部开口 7 具有 30 毫米直径的环形保持件上。接着，宽度为 2 毫米至 5 毫米且直径为 20 毫米至 28 毫米的这里为圆环形的碳黑电极通过使用碳黑覆盖的聚二甲基硅氧烷（PDMS）印模（stamp）来相对彼此地接触压印（print）。碳电极 2、3 连接至允许连接至高电压设备的金属电极（没有详细示出）。

在通过电源电压 9 将电压施加至电极 2、3 时，电极 2、3 之间的弹性体由于库仑力  $F_c$  而被电极 2、3 压缩。从而中间层 4 的厚度在电极之间的区域从 B 降低至 B'。由于中间层 4 例如是 0.499 的泊松比，压缩引起平行于 yz 平面的侧向 dr（这里在径向上）平面伸展。中间层 4 在电极 2、3 之间的这个伸展导致中间层的透明中心区域 9 的侧向压缩。这个侧向压缩由于材料的泊松比引起透明区域 9 的厚度从 B 增大至 B''。因此，穿过移相器 20、21 的光束的传输路径的长度能通过施加电压而从 B 变化至 B''。

根据本发明的移相器 20、21 的性能在 488 纳米的波长下用两个激光束干涉仪来测量。移相器 20、21 插入一个光束的光路中（光束直径在 1 和 5 毫米之间变化）并且通过在电极 2、3 之间施加电压 V 来调节。首先，检查相移膜 4 的光学质量。为此，将两个激光束带入相互干扰并且然后在具有或不具有移相器之下用显微镜观察所产生的图案（干涉条纹的直线性和形状）。由于干扰图案的结构没有变化，推断出薄膜的厚度变化小于  $\lambda/5$ 。

施加的电压 V 和移相器之间的相关性  $\Delta\phi$  由 CCD 相机来测量，因为

记录了干扰图案的运动。一系列图像的比较产生了在图 16 中示出的电压 - 相移相关性。电压从 0 改变至 4 kV 导致 16 个波长的相位延迟（一个周期的相移相应于一个波长的延迟（ $2\pi$  弧度））。在本示例中，图 16 所示的图形中能近似具有 2.3 次的多项式。

如这里所描述的移相器 20、21 能插入任何光束路径中，这使得其适合于试验性地用于光学平台上，用于显微镜、光学数据传输、光谱测定法以及任何其它需要相移设备的光学应用。另外，其可非常精确地调节、生产便宜并且设计（尺寸、形式、调节范围）能易于适应于给定需求。举例来说，在激光显微镜中，光的相干性引起问题。一直存在于光学系统中的折射产生降低照明场均匀度的干扰带。为了改善照明，能使用所谓的光扰频。光扰频通过在图像采集期间将它们在样品上扫过来破坏局部干扰图案。根据本发明的移相器 20、21 能在其用 AC 电压驱动时解决这个问题。振荡模式下的移相器一直改变激光的输出相位以使得干扰效应在图像采集时间上达到平均。这个移相器能在任何使用激光作为光源的广视野显微镜中实施为光扰频器。

接着给出移相器和可调衍射光栅在显微镜中，尤其在全内反射显微镜（TIR 显微镜）中应用的示例。在过去二十年期间全内反射荧光显微镜（TIRF 显微镜）成为用于细胞生物学的选择方法（Schneckenburger, H., Total internal reflection fluorescence microscopy: technical innovations and novel applications. Current Opinion in Biotechnology, 2005. 16(1): p. 13-18.; Axelrod, D., Total internal reflection fluorescence microscopy in cell biology, in Biophotonics, Pt B. 2003, ACADEMIC PRESS INC: San Diego, p. 1-33）。TIRF 技术允许将定位于几百纳米内的荧光分子选择性地激发至盖片。迄今，这个方法在研究调查膜动力学、胞吞作用、胞吐作用、蛋白质运输研究等中发现很多应用。TIRF 技术的基础是基于全内反射（TIR）效应。

在两个具有不同反射率  $n_1$  和  $n_2$  的致密介质的界面处，在较密介质（具有反射率  $n_1$ ）内行进的光能在界面上经历全内反射。TIR 对于大于所谓临界角度  $\alpha_c = \arcsin(n_2/n_1)$  的角度出现。在致密度较小的介质中光形成所谓的渐逝场。这个渐逝场的强度在与界面垂直的方向上按指数规律地衰减。这个渐逝场的主要特征是穿透深度

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{n_1^2 \sin^2(\alpha) - n_2^2}}$$

其中  $\lambda$  是入射光的波长， $n_1$  和  $n_2$  分别是较密和致密度较小的介质的折射率， $\alpha$  表示入射角度。

在实验性系统中，穿透深度的范围在 70 纳米和 300 纳米之间。因此获得的轴向分辨率比常规荧光显微镜（800 纳米）和共焦显微镜（600 纳米）的轴向分辨率好数倍。由于渐逝场的穿透深度非常依赖于入射角度  $\alpha$ ，通过比较对于数个入射角度获得的荧光图像，轴向分辨率有进一步增大的可能性（参见 Rohrbach, A., Observing secretory granules with a multiangle evanescent wave microscope. *Biophysical Journal*, 2000. 78(5): p. 2641 -2654）。

所开发的 TIR 装置使用物镜 - 发射方案（objective-launched scheme）（参见 Axelrod, D., Total internal reflection fluorescence microscopy in cell biology. *Traffic*, 2001. 2(11): p. 764-774）。激光束聚焦于物镜的后聚焦面上。这确保从物镜出现准直的激光束。这个入射角度和出现光束的方向能通过物镜后聚焦面中转向焦点来改变。为了在油-水界面获得 TIR 模式，必须使用 NA 大于 1.33 的物镜。在实验性装置中，我们使用 Zeiss  $\alpha$ -Plan-Fluar 100x, NA1.45 的油浸入物镜。

图 17 以举例的方式示意性地示出了根据本发明基于 Zeiss Axiovert 200M 倒置显微镜的表面荧光性路径 25 的显微镜 24 的 TIR 装置，其在一

个示例中用于将激光器 27 的激光束 26 发射入一个系统。显微镜物镜 31 的后聚焦面 32 与显微镜孔径停止面 34 共轭。因此对于物镜类型 TIR 方案的实现，激光束 26 必须聚焦到孔径停止面 34 上。准直的激光束 26 用光束扩展器 37 扩展举例来说 5 倍。这个扩展的光束定向到根据此处所述发明的衍射光栅 1 上。在样品平面中限定照明场直径的光束直径，能用可变光圈 38 来调节。在此处所述的实验性装置中，选择直径为  $50\ \mu\text{m}$  的样品照明区域。入射到衍射光栅 1 上的光束分解为传播入不同方向（级）的光。除第一级以外的所有衍射最大值由膜片 36 阻挡。为了简单起见，仅示意性地示出了中心最大值和两个第一衍射最大值。衍射光栅 35 安装于透镜 29 的焦平面中。在该示例中，使用 90 毫米焦距的平凸透镜。透镜将未被阻挡的第一级衍射最大值的光聚焦到显微镜 24 的孔径停止面 34 上。为了便于调整，透镜安装入 XY 转换保持件（没有详细示出）。

在第一校准步骤中，聚焦透镜 29 被轴向地调整以获得从物镜 31 出现的准直光束。为了调查准直的质量，分析光束轮廓并且检查物镜 31 的后聚焦面 32 中的聚焦点，此处显微镜的光路中具有另外的 Bertrand 透镜（没有详细示出）。

代替使用现有技术的平移和旋转台来进行光束转向，根据本发明的电地可调的透射衍射光栅 1 用来将激光焦点定位于孔径停止面 34 中。光转向基于当电压施加至可调衍射光栅时光栅周期改变的事实。这个光栅周期改变被转化为第一级衍射角度的改变。因此电压  $V$  中的变化改变了光束的出现角度。因此能容易地从 TIR 转换至表面荧光性显微镜。物镜后聚焦面 32 中焦点的快速移动允许用物镜孔径所允许的所有可能角度照明样品并且完全地开发了物镜的分辨率。

在所描述的示例中，成像对于典型的  $10\text{mW}$ （在光纤输出处）的激光强度来执行。这相应于第一级此衍射光束中  $0.5\text{mW}$  或 5% 的激光强度。

数据图像利用冷的 CCD 相机 (ORCA ERG, Hamamatsu) 来获得。

此处所描述的 TIR-装置能通过选择适合的光发射孔连接至很多市售显微镜。图 18 示出了安装于显微镜 24 (举例来说 Zeiss Axiovert 200M) 的荧光孔上的前述装置的图片。当然,也能实现在显微镜滑动器孔上的装置 (没有详细示出)。光学装置 39 将参照图 19 更详细地描述。

图 19 示出了如图 18 所示和根据图 17 所描述的光学实施例的细节图。该装置包括具有四个平行杆 41 的保持装置 40, 平行杆可通过接合连接 42 侧向地调整。在保持装置 40 的前端处包括连接器 43, 由此其可附接至显微镜 24 (参见图 18)。在杆 41 上, 激光源支架 27 布置于后端处, 接着是光束扩展器 37、可变光圈 38 以及根据此处所述发明的光透射衍射光栅 1。此外, 在示出实施例中具有 90 毫米焦距的会聚透镜 29 布置于连接器 43 之前。

在图 20 中示出了用根据本发明的 TIR 显微镜 (图 20b) 以及用常规 TIR 显微镜 (图 20d) (这里未示出) 获得的 HeLa 细胞表示的肌动蛋白绿色荧光蛋白质 (GFP) 的图像的比较。还表示了相同细胞的标准表面荧光图像 (图 20a 和 20c)。图 20a 的表面荧光图像包含许多模糊的图像细节。图 20b 的 TIR 图像清楚地示出了如此处所描述的 TIR 显微镜的优点。能看出, 与表面模式相比, TIR 模式中多得多的细节变得可见。这是因为仅接近盖片的区域被激活的事实。

基于可调衍射光栅获得的 TIR 图像 (图 20b) 和用常规 TIR 显微镜获得的 TIR 图像 (图 20d) 之间的比较显示, 本发明产生了与常规 TIR 显微镜 (图 20d) 相比而言质量可比较的图像。具有根据本发明的可调投射衍射光栅的装置的一个优点是能通过简单地将电压 V 施加至设备来调节该设备。能避免机械调整并且因此产生较少的振动。另一个优点在于易于精确地调整光的方向以控制渐逝场的深度。光的方向在宽泛的角度

范围上可调整的事实还使得能使用具有不同折射率的不同类型样品。另一个优点是在没有引起强烈机械振动之下的快速转换。

在后聚焦面中具有单个激光点的表面成像可降低显微镜的分辨率。线性极化的激光束仅在极化面中激活具有偶极距的荧光团。为了激活所有荧光团，激光的线性极化能通过添加四分之一波片来调节成圆极化。圆极化的光的使用最小化了在试样中荧光团用固定偶极距的可能各向异性激活。激活所有荧光团的另一个可能性是焦点在物镜的后聚焦面中的快速运动。这还降低了激活中的各向异性。这两种方法当然能结合。表面模式中的另一个问题是在使用相干的激光时由于反射引起的干扰带。这些带能由破坏激光相干性的光扰频（用压电使光纤摇动）来避免。此外或可选地，能使用根据本发明的移相器 20、21（见图 8 至 15）。

图 21 示意性地示出了根据本发明的 HELM 显微镜 50 的设置。谐波激励光学显微镜（HELM）（也称为驻波或结构照明显微镜）是将常规光学显微镜的分辨率提高至两倍（甚至在与重叠合技术相结合时）的技术。现有技术的市售共焦显微镜获得了与标准显微镜相比 1.4 倍的改进。

在谐波激励光学显微镜中，样品用由四个干扰激光束产生的 2D 余弦图案来照明。这个谐波激励使样品超过传统切断频率的空间频率移动，进入显微镜的通频带。扩展的通频带由一组用移动的照明图案获得的图像计算地重新构造。这个技术获得了 100 纳米的侧向分辨率，其与常规荧光显微镜相比提高了两倍（参见 J. T. Frohn et al. True optical resolution beyond the Rayleigh limit achieved by standing wave illumination, PNAS, Vol.97, No.13, pp. 7232-7236 (2000); M. G. L. Gustafsson, Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy, Journal of Microscopy, Vol. 198, pp. 82-87 (2000)）。

通常所使用的干扰图案能相对于样品在两个方向上移动。用于图案

不同位置的五个图像由照相机记录。从这五个图像，在常规显微镜中不可触及的额外信息能通过代数方法获得。通过改变干扰光束之间的角度，系统还能提供 TIR 模式(参见 E. Chung et al. Extended resolution wide-field optical imaging: objective-launched standing-wave total internal reflection fluorescence microscopy, Optics Letters, Vol. 31 , Issue 7, pp. 945-947 (2006))。

图 21 中示意性地示出了根据此处所描述的发明构造的照明显微镜的设置。这个实施例使用物镜发射照明，导致显微镜 50 的功能性没有限制。

在所示的实施例中，具有例如 1.1 毫米直径的线性极化的激光束 47 由激光器 51 发射并且经由第一透镜 65 导向到根据本发明的衍射光栅 1 上。作为可调光投射衍射光栅 1 的衍射的结果，入射激光束 47 被分解为非偏离的零度最大值（没有详细示出）以及几个偏离的衍射最大值 48、49（在示意性附图中仅示出两个衍射最大值 48、49）。实际上，在该设置中使用四个光束。它们通常相对彼此以  $90^\circ$  的距离围绕光学轴线 46 旋转对称地布置。

为了形成干扰图案，使用与光学轴线 46 成  $100 \text{ mrad}$  的角度的第一衍射最大值的四个光束（在图中仅两个光束 48、49 可看见）。为了得到两对彼此独立的激光束，一对穿过半波片 52，其极性翻转  $90^\circ$ （具有垂直极性的光束不能互相干扰）。衍射光束稍后能用可移动地布置的可移动膜片 54 阻挡。改变其位置允许在 HELM（第一级最大值通过）和表面荧光性模式（零级最大值通过）。光束穿过包括第二和第三透镜 63、59 的焦距透镜系统，并且具有例如  $f_1 = 40 \text{ 毫米}$ （第二透镜 63）， $f_2 = 50 \text{ 毫米}$ （第三透镜 59）的焦距，将它们聚焦于后聚焦面 57 上。将距光学轴线 46 的光束距离（在物镜后孔径面 57 中）选择为接近物镜入射光瞳的直径将产生照明的 TIR 模式。在 TIR 模式中，渐逝场的穿透深度取决于照明的角



度（见第 33 页上的公式）并且能通过改变单个光束和光学轴线 46 之间的距离来调整。为了提高表面照明的质量，能使用如在 TIR 实施例中所描述的不同方法。

高斯光束的发散是由布置于可调衍射光栅 1 前面的第一透镜 65 来控制。通过沿着光学轴线 46 移动第一透镜 65，能在第三透镜 59 之后实现一定范围的发散。这意味着能调整任何输入激光束 47 以适合于不同的显微镜。此外，其能用于与每个样品独立地选择照明场的尺寸，这是重要的，例如降低在没有观察到的区域中荧光团的图像漂白。

图 22 示出了在没有改变光束极性之下得到的初步实验的结果。图 22a 中示出了五个（零级和第一级）平行的极化光束的干扰图案。图 22b 示出了相应的傅立叶光谱。

如图 23a 和 23b 所示，光束和后聚焦面 57 中的光学轴线之间的距离能以传统的方式通过相栅 1 相对于第一透镜 63 的精确平移和第二透镜 59 的适当运动来控制以在显微镜孔处产生平行光束。距离  $d_1$  和  $d_2$ （相应地  $d_3$  和  $d_4$ ）的变化，必须遵照以下的公式

$$d_1 = d_2 \frac{\alpha f_2 (d_{out} f_1 + d_{out} f_2 + \alpha f_1 f_2)}{d_{out} f_1 (d_{out} + \alpha f_2)}$$

来保持系统是焦阑的，这能用计算机控制的线性阶段来进行。这里  $d_{out}$  是光束和后聚焦面 57 中的光学轴线之间的距离。照明图案的移动能用任何常规的定位设备来获得。光栅 1 能例如安装于 xy-压电致动器（没有详细示出）上。与光学轴线 46 垂直的光栅的平移使干扰图案在样品平面中移动。距离  $d_1$  和  $d_2$ （相应地  $d_3$  和  $d_4$ ）确定对于固定偏转角度的照明角度  $\beta$ （ $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ）。根据前述公式移动光栅靠近焦点 11 和增大  $d_2$  产生较小角度的照明  $\beta_2 < \beta_1$ 。

替代使用 xy-压电致动器，根据此处公开发明的移相器 20、21（参

见图 8 至 15) 能用来控制照明图案的位置。移相器能在光路中的任何地方引入并且独立地控制每个光束的相位。

物镜后聚焦面 57 中的光束之间的距离能通过改变根据此处公开发明的可调衍射光栅 (参见图 1 至 6) 的光栅周期来控制。光栅周期  $d$  的降低增大了第一级最大值的衍射角度并且因此增大了样品面中照明的角度。照明图案的位置控制能例如通过用  $xy$ -压电致动器在相对于光学轴线 46 的侧向上移动光栅来提供。

光束距离的变化通过电地改变根据本发明的衍射光栅的衍射角度来进行。为了移动图案, 如前所述的移相器引入该系统中。其控制每个干扰对中一个光束的相位。相位的移动导致图案沿着干扰方向平移。

如前所述包括半透明中间层和一对大致相对的同轴电极的致动器的使用与传统的机械对应物相比而言提供了数个优点。其允许在不将任何机械扰动引入该系统之下偏转角度的快速变化。尤其对于 TIR 彩色成像, 光栅点阵必须适合于照明波长。对于 HELM 彩色模式也如此。为了对于所有色彩获得一致的分辨率, 干扰图案的周期必须保持不变。这要求光束的精确且可复制的调整, 这不能由机械平移阶段提供。因为没有机械扰动作用在光学装置上, 相信基于所述致动器的自适应光学器件的使用将增大系统的稳定性。此外, 快速操作设备将有助于显著地减少图像获取时间。通常, 所述设置能通过选择用于显微镜孔的适合连接器在任何市售的荧光显微镜中实施。具有波片和膜片的光栅能在旋转阶段安装在侧向上提供干扰图案。

图 24 示出了其中光束经由镜子和/或光束分离立方体 72 导向入显微镜 (没有详细示出) 的设置。使用光束分离器 72, 能连接另外的光源, 举例来说比如用于彩色成像的 UV 激光或其它激光。

在又一实施例 (未详细示出) 中, 显微镜的滑动器孔与可自由移动

的滑动器发射和自由竖立的光束控制系统一起使用。这个设置提供了数个优点：(i) 其易于安装，允许快速附接和脱离；(ii) 光束分离器在滑动器中的使用维持了显微镜的全部功能性，因为普通的灯仍然能用于常规的表面照明；(iii) 经由光学工作台结合至显微镜的自由竖立的控制系统提供了高度的机械稳定性并且尤其其紧凑的设计，其不易于遭受低频振动。

本发明的其它应用是在纳米颗粒定位系统领域。然而，TIR 系统的消逝场中纳米颗粒的光学捕获已经有报告(参见 S. Kawata et al. Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam, *Optics Letters*, Vol.17, No.11, p. 772 (1992); M. Gu et al. Laser trapping and manipulation under focused evanescent wave illumination, *Appl. Phys. Lett.* 84, 21 (2004))。通过这里所公开的发明，单个强度峰能用于颗粒的选择性捕获和移动用于定位的峰。

结构照明显微镜领域中最近的发展主要是解决形成一组能带入干涉的可控激光束的问题。E. Chung 等使用光束分离器来形成两个光束。一个光束在安装于压电换能器上的反向反射器上偏离以控制器相位。两个光束然后都结合入容纳在布置于 XYZ 转换器上的镜装置中的光纤终点，由此它们被发射入显微镜。这样做有几个原因。为了高分辨率成像，相位图案必须稳定化。但是这个方法具有一些缺点并且一个是使用高成本的换能器和转换器。另一缺点是仅是一维的图案。为了获得二维的分辨率改进，样品必须旋转 90 度，此时观察区域的中心必须仍然准确地处于其位置上。

形成结构照明的另一个可能性由 M. G. Gustafsson 实现。他使用一维的相光栅并将其投射到样品上。通过移动光栅，他也移动图案。在这个设置中缺乏对光束出现角度的控制使得其不适合于 TIR 显微镜。

在本发明中，基于光栅的结构照明的优点与对于通过使用所述低成本的可调光栅来距离控制光束出现角度的需要相结合。优选地，在 TIR 模式中使用四个光束来同时改进 x、y 和 z 方向上的分辨率。

产生圆形衍射图案的光栅能用于所建议的系统中以实现 TIR 照明。第一级最大值的光环能处理为由双轴光栅所产生的四个光束。如上所述相同的调整和光路是有效的。填满物镜后聚焦面中整个圆圈的 TIR 系统能解决根据如图 17 所示实施例所述的所有问题。通过简单地绕着光轴旋转单个或 n 轴光栅能产生相同的效应。

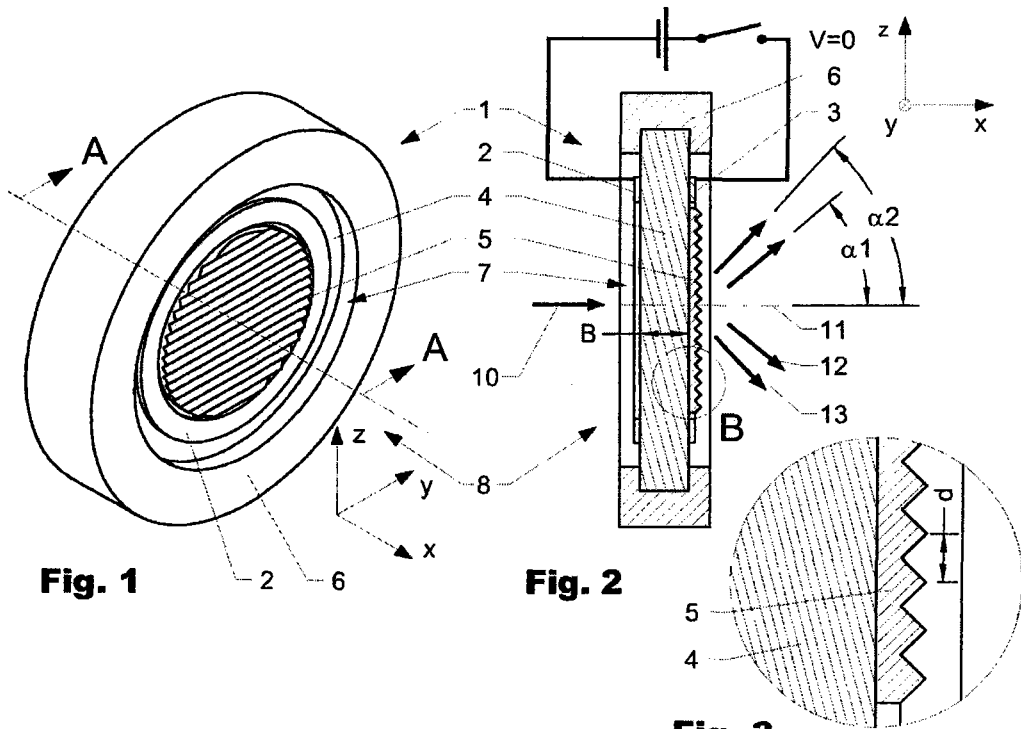
图 25 至 29 示出了根据本发明的光学元件 1 的又一实施例，此处呈可调透镜的形式。图 25 以透视的方式示出了设备 1。图 26 在正视图中以非变形的的方式示出了在没有电压施加 ( $V=0$ ) 时的设备并且图 27 是沿着图 26 的线 EE 切割的侧视图以使得设备 1 的内部在非变形状态下变得明显。与图 26 和 27 相比，图 28 在正视图中以非变形的的方式示出了在施加电压 ( $V \neq 0$ ) 时的设备 1。图 29 示出沿着图 28 的线 GG 切割开的设备 1 的侧视图以使得内部在非变形状态中变得明显。

可调透镜 1 包括上部和下部电极 2、3，它们相对彼此布置并且包围作为光学活动透镜区域 5 的透明中间层 4。电极 2、3 作为驱动装置 15 的驱动板以便以可控的方式在特定圆周区域中局部地压缩中间层 4。在此处所示的实施例中，透镜区域 5 具有特定外部曲率并且由两个圆形薄片状区域 14 构成，薄片状区域 14 由光学地透明的材料制成并且在此处包围透镜形腔室 16。如果适合，薄片状区域 14 可由与中间层 4 相同的材料构成。根据应用领域，透镜形腔室 16 可填充有相同或不同的材料。用液体可获得良好的结果，尤其是具有较高折射率的液体。中间层 4 在电极 2、3 的区域中在非变形状态下具有恒定的厚度 B 并且通常以预伸展的方式保持于包围保持装置（保持框架）6 的开口 7 中的位置。电极 2、3 彼此

相对地布置于具有环形设计的中间层 4 的相对位置上。此外，它们布置为与保持装置 6 等距。中间层 4 并入相对于电极 2、3 和保持框架 6 布置于中间并且同心的光学活动透镜区域 5 中。如果适合，其它形状的透镜和电极的相应布置也是可能的，比如举例来说，具有侧向地布置的电极的圆柱形透镜。当电压  $V$  施加于电极 2、3 之间时（参见图 28 和 29），电极 2、3 由于库仑力  $F_c$  而相互吸引以使得中间层 4 在第一方向上（ $x$  方向）在电极 2、3 之间被压缩并且这导致了局部地减少的厚度  $B'$ 。由于中间层 4 的材料的泊松比，出现如箭头  $dr$  所示（此处是在径向上）的电极 2、3 之间被压缩材料的侧向（在所示出的实施例中旋转对称）扩展。这引起中间层 4 由电极 2、3 径向地包围的区域以及与之互连的透镜区域 5 的径向（这里旋转对称的）压缩以使得透镜区域 5 的曲率/焦点作为所施加电压的函数以可控的方式改变（如箭头  $t$  所示）。光学设备能制作得非常小并且因此能用于宽范围的应用中，比如移动设备（移动电话）的透镜系统、数码相机，照明，比如车辆灯光、投影仪比如卷轴机、眼镜透镜。根据应用领域，能将根据本发明的至少一个光学设备集成入包括例如用于数码相机或移动设备的 CCD 阵列的模块中。

为了用液体填充透镜形腔室 16，薄片状区域 14 的边界能例如由框架支撑并且通过真空变形。变形的薄片 14 能用液体填充并且在连续的步骤中，相对的薄片 14 结合至透镜的第一液体填充的薄片。可选地，液体能在冷冻状态下结合入薄片状区域 14。

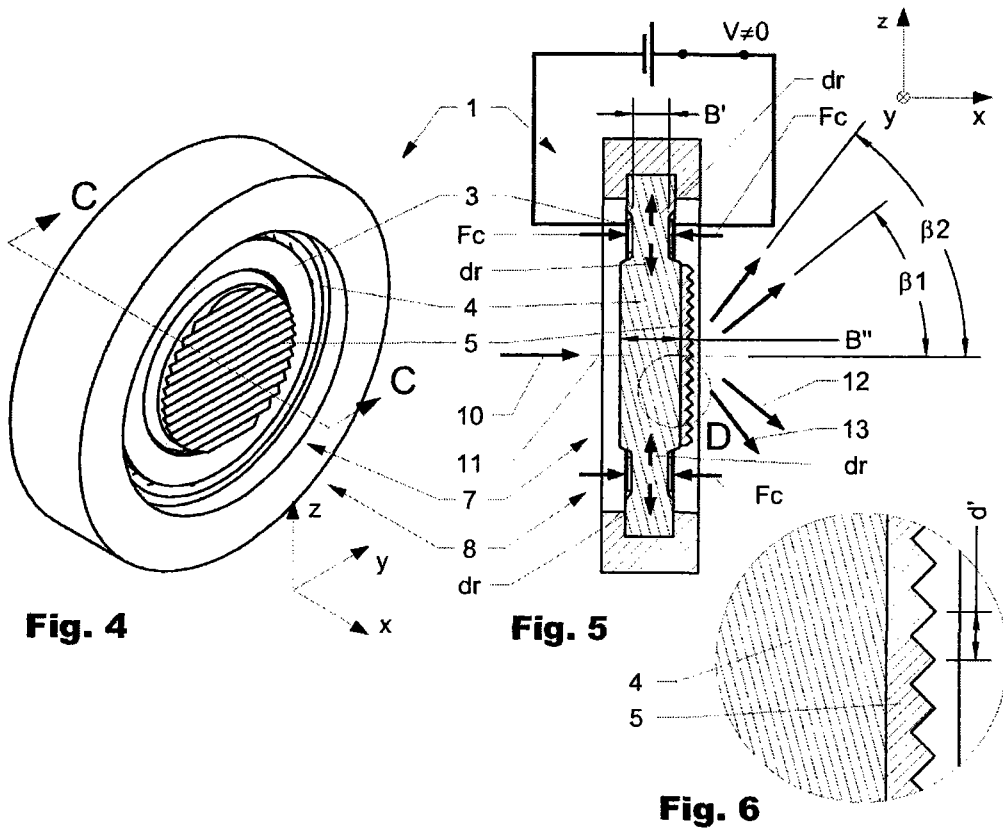
尽管本发明已经就其具体实施例进行了描述，但是很多其它变化和变型以及其它用途对于本领域技术人员而言是很明显的。因此，优选地，本发明并不限于此处的具体公开，而是仅仅受限于所附权利要求。



**Fig. 1**

**Fig. 2**

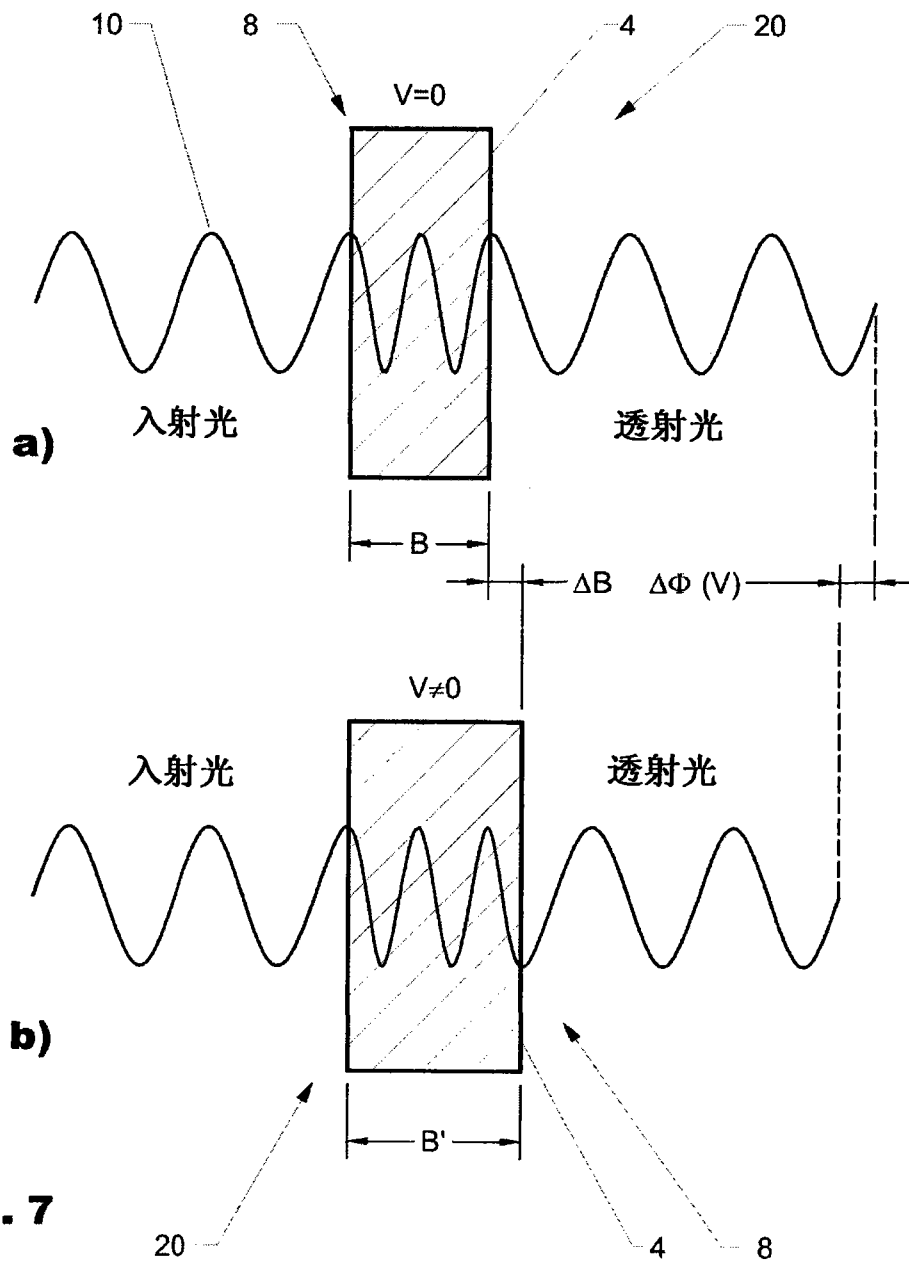
**Fig. 3**



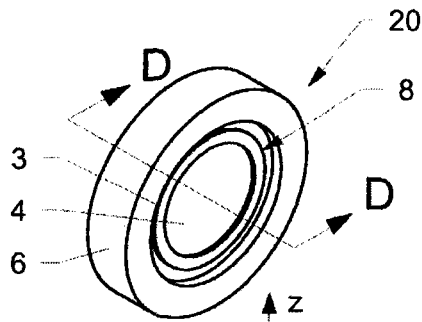
**Fig. 4**

**Fig. 5**

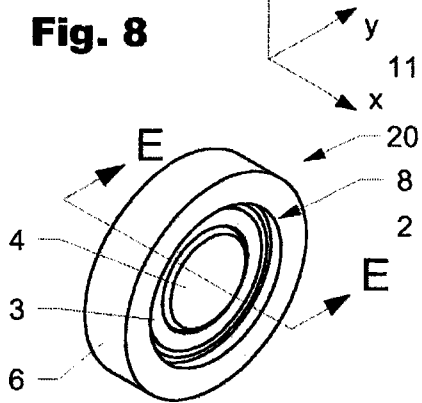
**Fig. 6**



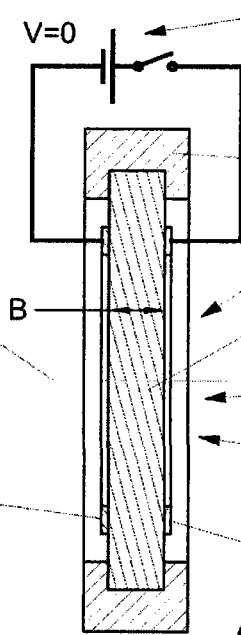
**Fig. 7**



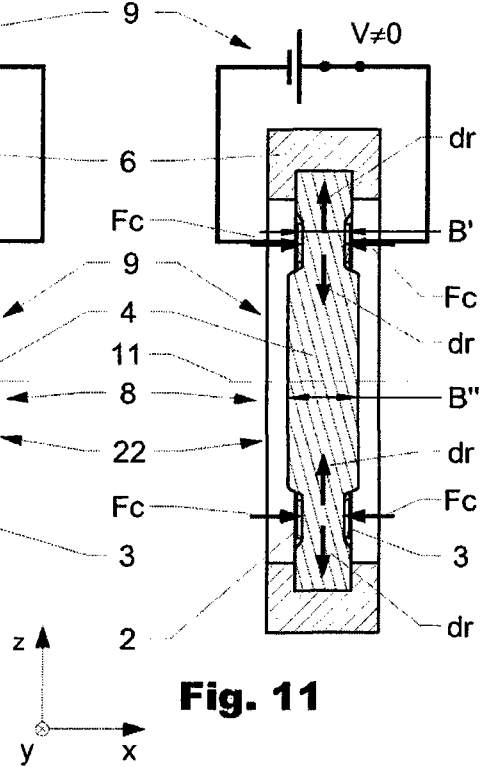
**Fig. 8**



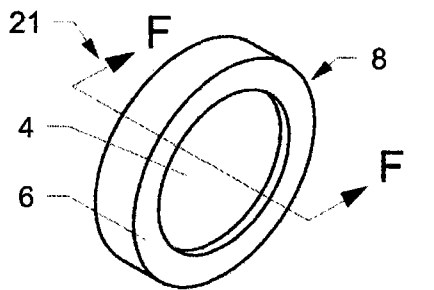
**Fig. 10**



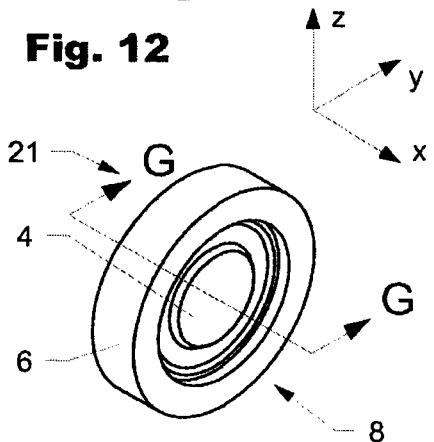
**Fig. 9**



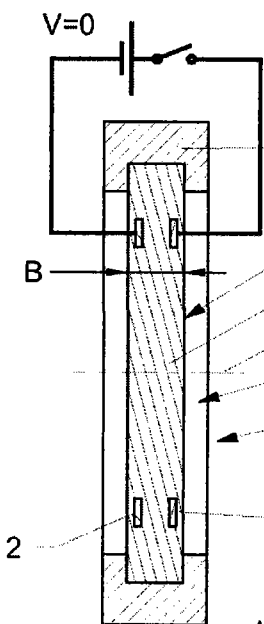
**Fig. 11**



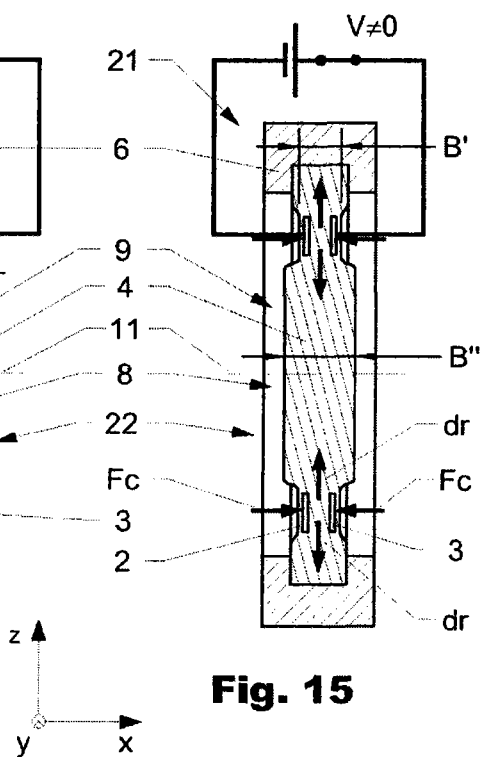
**Fig. 12**



**Fig. 14**

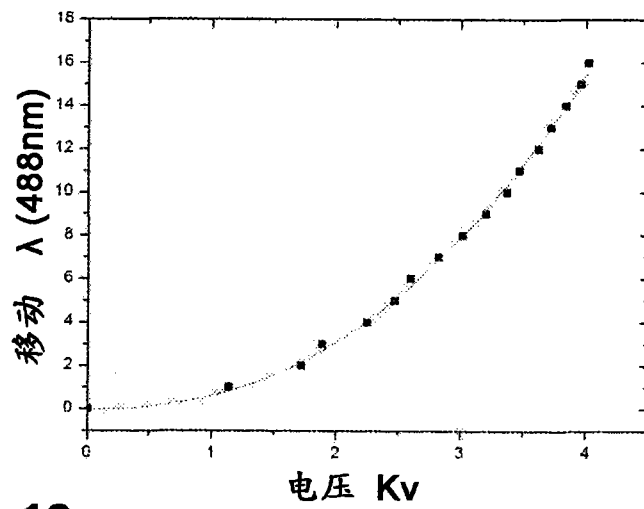


**Fig. 13**

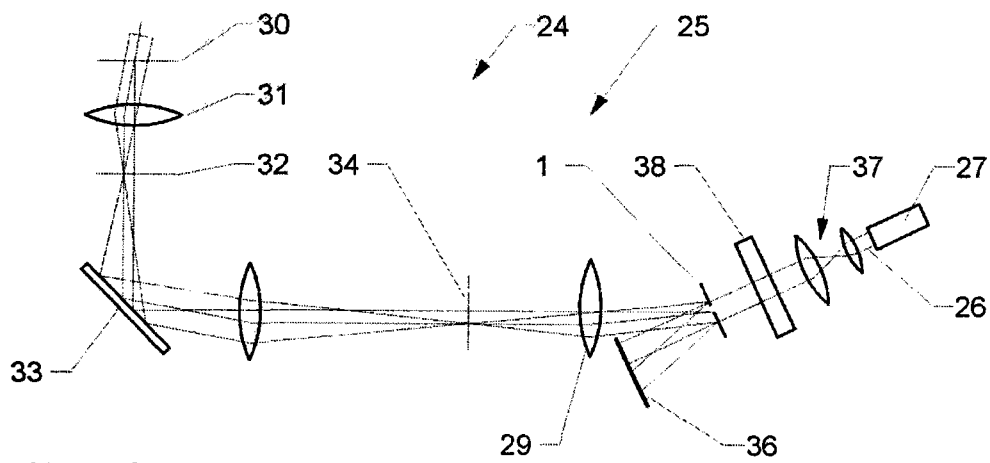


**Fig. 15**

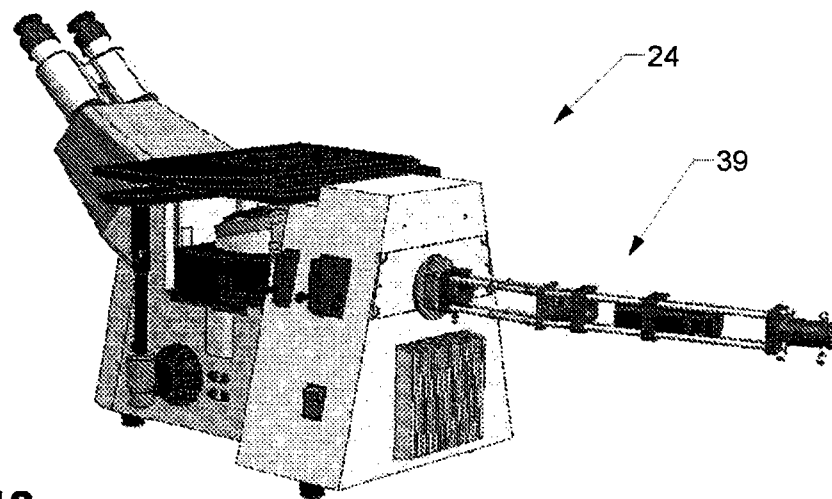




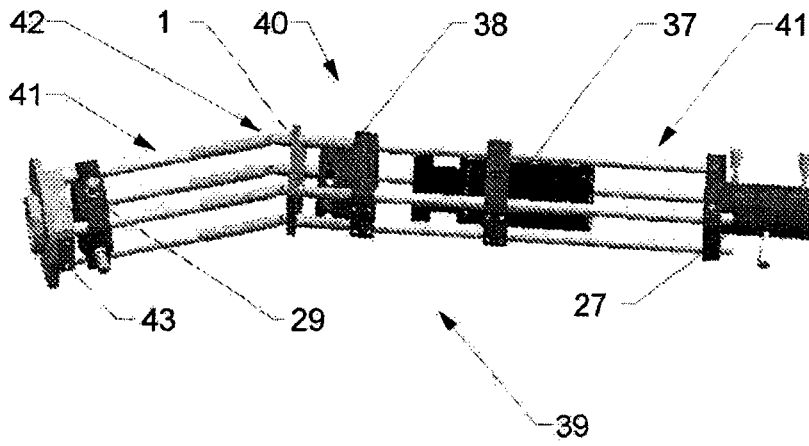
**Fig. 16**



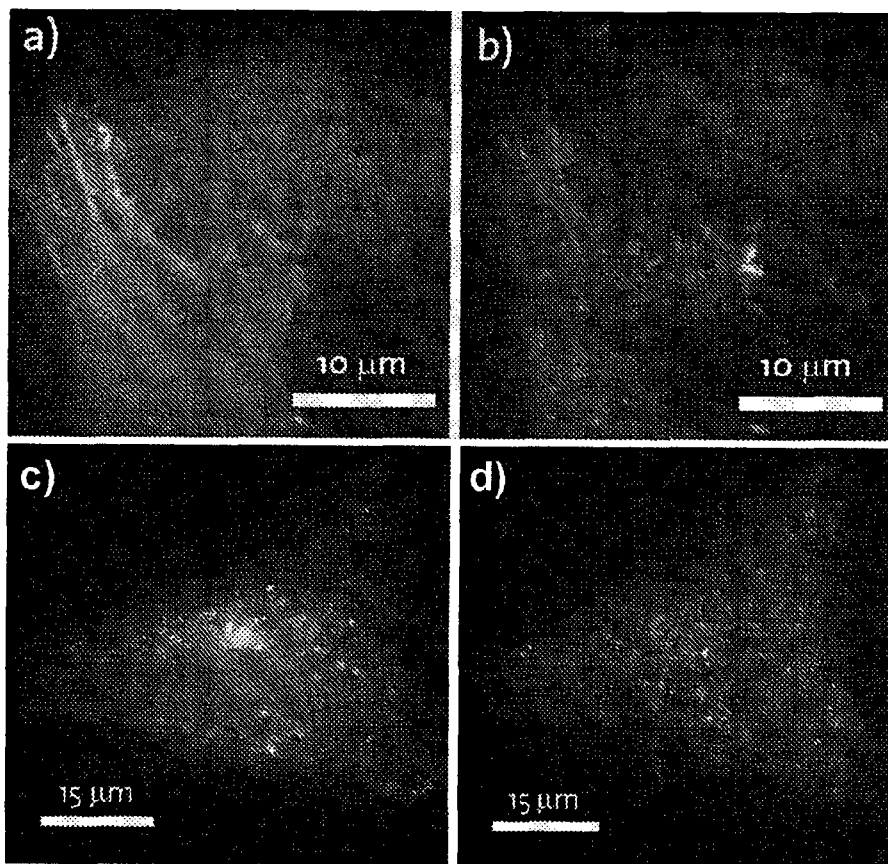
**Fig. 17**



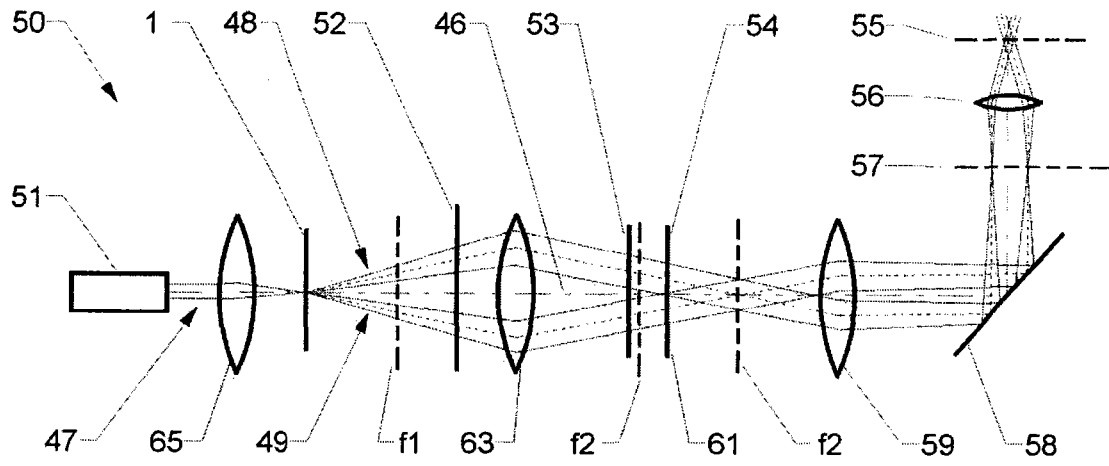
**Fig. 18**



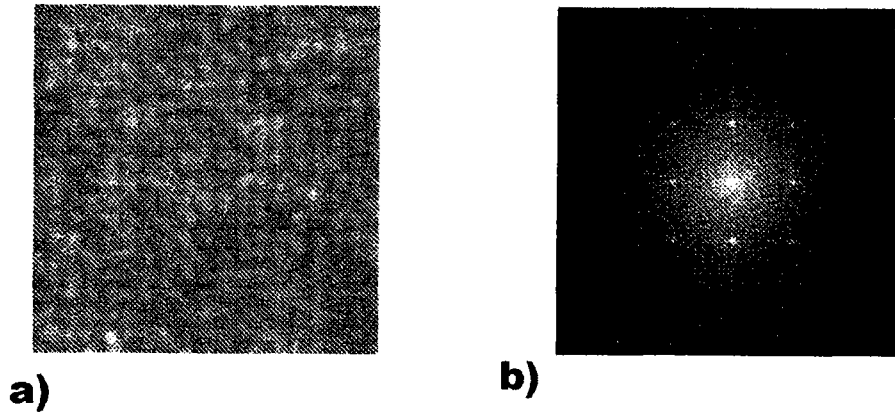
**Fig. 19**



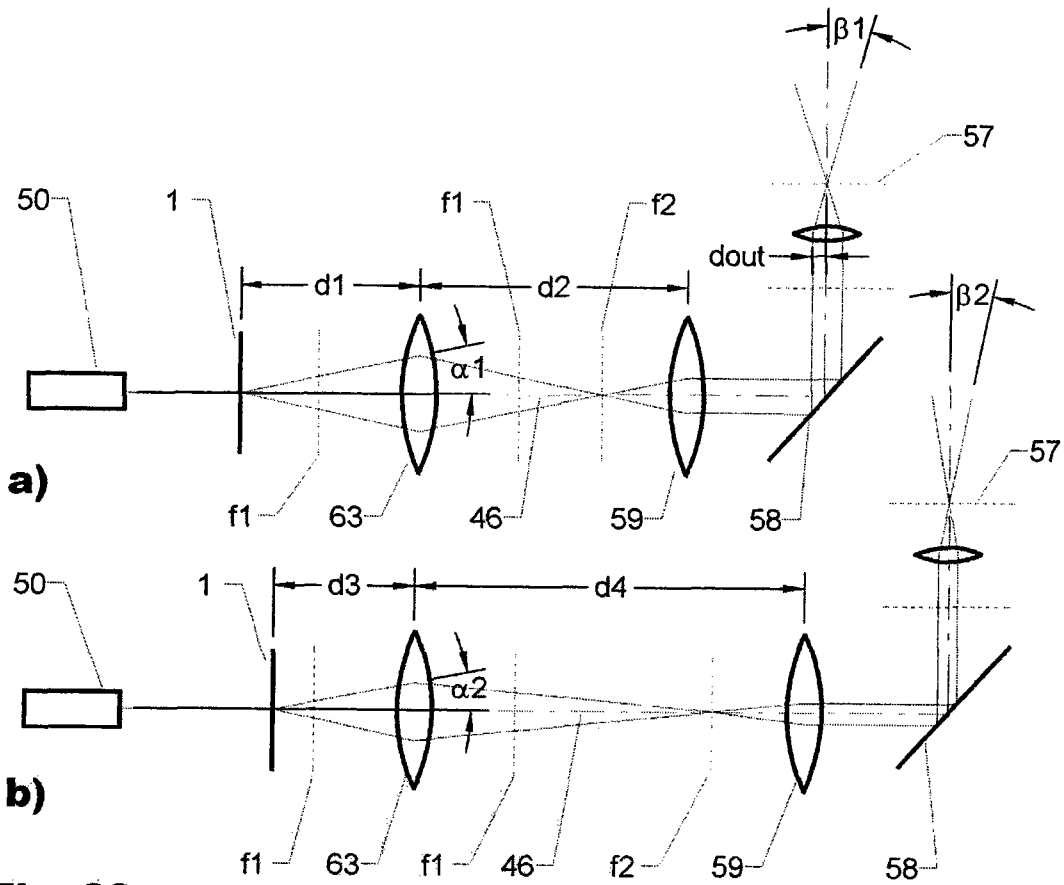
**Fig. 20**



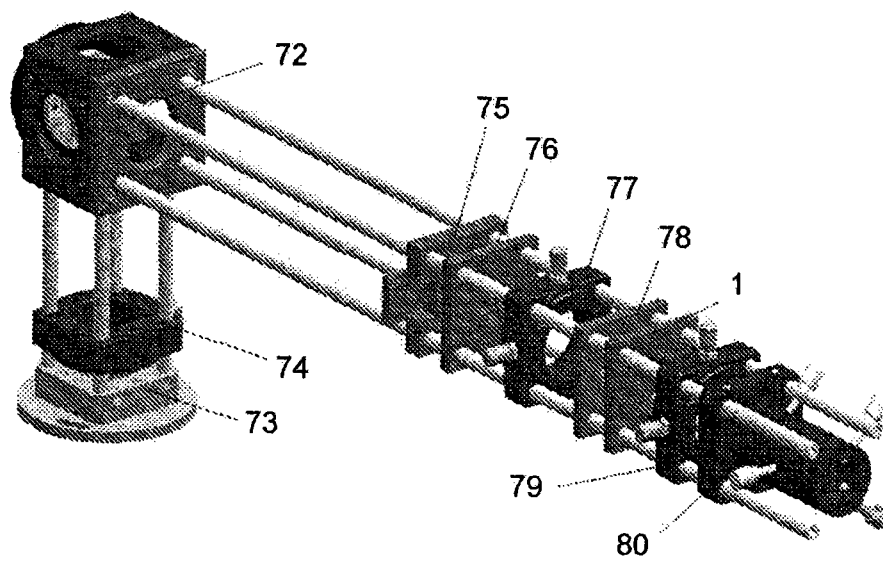
**Fig. 21**



**Fig. 22**



**Fig. 23**



**Fig. 24**

