



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101799587 A

(43) 申请公布日 2010.08.11

(21) 申请号 201010155335.2

(22) 申请日 2005.01.14

(30) 优先权数据

60/537,327 2004.01.16 US

(62) 分案原申请数据

200580002241.9 2005.01.14

(71) 申请人 卡尔蔡司 SMT 股份公司

地址 德国上科亨

(72) 发明人 D·菲奥尔卡 M·德格恩特尔

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 邱军

(51) Int. Cl.

G02B 27/28 (2006.01)

G02B 5/30 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01)

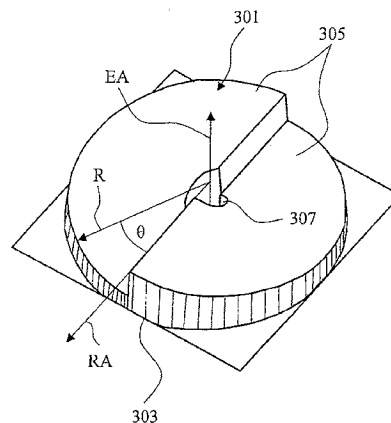
权利要求书 1 页 说明书 17 页 附图 9 页

## (54) 发明名称

光学系统、投影系统及微结构半导体部件的制造方法

## (57) 摘要

光学系统、投影系统及微结构半导体部件的制造方法。该光学系统包含光轴或由传过所述光学系统的光束的方向给定的优选方向，所述光学系统包含由坐标系统的坐标描述的偏振调制光学元件，其中所述坐标系统的一个优选坐标平行于所述光轴或平行于所述优选方向，所述偏振调制光学元件包含旋光材料和有效光学厚度的分布，其中所述有效光学厚度至少作为与所述坐标系统的所述优选坐标不同的一个坐标的函数而变化。



1. 一种光学系统,包含光轴或由传过所述光学系统的光束的方向给定的优选方向,所述光学系统包含由坐标系统的坐标描述的偏振调制光学元件,其中所述坐标系统的一个优选坐标平行于所述光轴或平行于所述优选方向,所述偏振调制光学元件包含旋光材料和有效光学厚度的分布,其中所述有效光学厚度至少作为与所述坐标系统的所述优选坐标不同的一个坐标的函数而变化。

2. 如权利要求 1 所述的光学系统,其中所述有效光学厚度由于所述偏振调制光学元件的旋光率的变化而变化。

3. 如权利要求 1 所述的光学系统,其中所述有效光学厚度由于所述偏振调制光学元件的几何厚度的变化而变化。

4. 如权利要求 1 至 3 的其中一个所述的光学系统,其中所述偏振调制光学元件包含旋光或非旋光液体和 / 或旋光晶体。

5. 如权利要求 1 至 4 的其中一个所述的光学系统,其中所述偏振调制光学元件包含顺时针和逆时针旋光材料。

6. 如权利要求 1 至 5 的其中一个所述的光学系统,其中以不同路径传过所述光学系统并通过所述偏振调制光学元件的第一线性偏振光线和第二线性偏振光线的各自相应的振荡平面依照各自相应的第一和第二旋转角而被旋转,以使所述第一旋转角不同于所述第二旋转角。

7. 如权利要求 1 至 6 的其中一个所述的光学系统,其中所述偏振调制光学元件将输入所述偏振调制光学元件的、具有第一线性偏振分布的光束转换为由所述偏振调制光学元件出射的、具有第二线性偏振分布的光束,其中所述第二线性偏振分布不同于所述第一线性偏振分布。

8. 如权利要求 1 至 7 的其中一个所述的光学系统,包含偏振控制系统,用于控制传过所述光学系统的光束在所述光学系统中的预定位置处的偏振分布,所述偏振控制系统包含至少一个加热或冷却装置以修改所述偏振调制光学元件的温度和 / 或温度分布,从而影响所述光束在所述光学系统中的所述预定位置处的偏振分布。

9. 如权利要求 1 至 8 的其中一个所述的光学系统,其中至少一个偏振调制光学元件包含经历过磁场的旋光或非旋光材料,所述磁场具有与传过所述偏振调制光学元件的光束方向平行的场分量。

10. 一种投影系统,包含辐射源、可操作用来照明结构化的掩模的照明系统、以及将所述掩模结构的图像投射到光敏衬底的投影物镜,并且包含如权利要求 1 至 9 的其中一个所述的光学系统。

11. 如权利要求 10 所述的投影系统,其中在离所述衬底最近的光学元件和所述衬底之间存在有折射率不同于空气的浸没介质。

12. 一种制造微结构半导体部件的方法,包含使用如权利要求 10 或 11 的其中一个所述的投影系统的步骤。

## 光学系统、投影系统及微结构半导体部件的制造方法

[0001] 本申请是申请号为 200580002241.9 (国际申请号 :PCT/EP2005/000320)、发明名称为“偏振调制光学元件”的发明专利申请的分案申请。

### 背景技术

[0002] 本发明涉及影响光线偏振的光学元件。该光学元件具有厚度分布并且由具有光轴的旋光晶体组成或构成。

[0003] 在持续努力取得显微光刻领域中更精细分辨率结构的过程中,存在同时对基本上三个指导性构思的追求。其中第一个是提供非常高的数值孔径的投影物镜。第二个是追求更短波长(如 248nm、193nm、或 157nm)的恒定趋势。最后,存在有通过将高折射率的浸没介质引入到投影物镜的最后一个光学元件和光敏衬底之间的空间而增加可达到的分辨率的构思。后一种技术被称为浸没光刻术。

[0004] 在利用限定偏振的光照明的光学系统中,依照菲涅耳方程,电场矢量的 s- 和 p- 分量在具有不同折射率的两种介质的界面处分别经历不同程度反射和折射。在上下文中,平行于光线入射面振荡的偏振分量被称为 p- 分量,而垂直于光线入射面振荡的偏振分量被称为 s- 分量。与 p- 分量相比,在 s- 分量中发生的不同程度的反射和折射对成像过程有明显的有害影响。

[0005] 利用偏振的特定分布可以避免这个问题,其中在光学系统的光瞳面上,独立的线性偏振光线的电场矢量的振荡平面具有相对于光轴近似径向的取向。这种类型的偏振分布在下文中将被称为径向偏振。如果在物镜的场平面上,依照前述的定义径向偏振的光束遇到具有不同折射率的两种介质之间的界面,则只有电场矢量的 p- 分量呈现,以使前述的对成像质量的有害影响被大大减小。

[0006] 与前述的构思类似,还可选择偏振分布,其中在系统的光瞳面上,独立的线性偏振光线的电场矢量的振荡平面具有垂直于从光轴发出的半径的取向。这种类型的偏振分布在下文中将被称为切向偏振。如果依照这个定义的切向偏振的光束遇到具有不同折射率的两种介质之间的界面,则只有电场矢量的 s- 分量呈现,以使如在前述的例子中那样,发生在场平面上的反射和折射中存在有均匀性。

[0007] 在光瞳面上,提供具有切向或径向偏振的照明是非常重要的,尤其是在实现前述的浸没光刻术的构思时尤其重要,因为其对以折射率的差异以及在从投影物镜的最后一个光学元件到浸没介质和从浸没介质到涂敷光敏层的衬底的相应界面处很强的入射斜角为基础而预计的偏振状态具有相当大的负面影响。

[0008] 美国专利 6,191,880 B1 公开了用于生成近似径向偏振的光学布置。该布置包括其中相应的择优方向被定向的半波片的光栅以使在线性偏振光通过该光栅布置时,振荡平面被旋转到从光轴发出的半径的方向。然而,因为该光栅布置是通过加入大量的独立取向的半波片而制成的,所以其制造昂贵。此外,在每个独立的、直径通常介于 10 和 20mm 之间的半波片面积内,偏振方向的变化是恒定的,以使通过这个构思未能产生连续的径向偏振。

[0009] 在 DE 198 07 120 A1 中提出的具有不规则变化厚度的晶状石英的双折射元件用

于光学系统中偏振的定义状态的局部像差的补偿。然而,这种类型的双折射元件中厚度的变化导致偏振的局部差异状态。尤其是,在这种类型的布置中,通常不会保持偏振的线性状态。

#### [0010] 发明目的

[0011] 因此,本发明的目的是提出一种偏振调制光学元件,该元件通过下述的方式以最小的强度损失影响光线的偏振,即根据具有独立光线振荡平面方向的第一分布的线性偏振光,光学元件生成具有独立光线振荡平面方向的第二分布的线性偏振光。

[0012] 本发明的其他目的是提出具有与振荡平面的第二分布(偏振分布)的热稳定性有关的改进的偏振调制光学元件特性的光学系统,并且在光线已经通过光学系统中附加的光学元件之后使这些元件对偏振分布的影响减至最小。

#### 发明内容

[0013] 为了达到前述的目的,提出了偏振调制光学元件,该光学元件由旋光晶体组成或构成,并且按照本发明将光学元件成形为具有在垂直于光轴的方向上变化的厚度分布。另外,如权利要求 57、64、65、70 和 75 所描述的光学系统达到本发明的目的。在从属权利要求中,给出了按照本发明光学系统的附加的优选实施例。

[0014] 按照本发明的偏振调制光学元件具有使第一线性偏振光线的振荡平面和第二线性偏振光线的振荡平面分别依照第一和第二旋转角被旋转的作用,其中第一旋转角不同于第二旋转角。按照本发明,偏振调制光学元件由旋光材料制成。

[0015] 在下文中,对本发明构思的有利的进一步发展进行描述。

[0016] 为了根据线性偏振光以最小的强度损失生成线性偏振光线的任意选择的分布,具有光轴的旋光晶体被用作偏振调制光学元件的原材料。晶体的光轴(还被称为各向同性的轴)由只有一个与光轴方向相关联的光传播速度的特性来定义。换句话说,在光轴的方向上行进的光线不会经历线性双折射。偏振调制光学元件具有在垂直于晶体光轴的方向上变化的厚度分布。在上下文中,术语“线性偏振分布”与其中独立的光线被线性偏振但独立电场矢量的振荡平面不能取不同方向的偏振分布的意思一起使用。

[0017] 如果线性偏振光沿着晶体的光轴穿过偏振调制光学元件的话,则电场矢量的振荡平面依照与晶体内传播的距离成比例的角度被旋转。旋转的方向(即振荡平面是顺时针旋转还是逆时针旋转)取决于晶体材料,例如右旋石英对左旋石英。偏振平面平行于光线的偏振和传播的各自对应方向。为了产生旋转角度的任意选择的分布,如果厚度分布被设计成以使第一线性偏振光线的振荡平面和第二线性偏振光线的振荡平面分别依照第一和第二旋转角被旋转,这将是有益的,其中第一旋转角不同于第二旋转角。通过将元件成形为在每个位置处具有特定厚度,能够实现振荡平面的任意选择的旋转角。

[0018] 已经发现不同的旋光材料是适合的,这取决于所使用辐射的波长,这些材料具体为石英、 $\text{TeO}_2$  和  $\text{AgGaS}_2$ 。

[0019] 在本发明有利的实施例中,偏振调制光学元件具有与晶体的光轴方向取向相同的元件轴。与元件轴相比,光学元件的厚度分布仅为方位角  $\theta$  的函数,其中相对于以直角与元件轴相交的参考轴来测量方位角  $\theta$ 。利用按照这种设计的厚度分布,光学元件的厚度沿着以直角与元件轴相交并与参考轴形成方位角  $\theta$  的半径是恒定的。

[0020] 在本发明的另一个有利的实施例中,在距元件轴的恒定距离  $r$  处的厚度分布  $d(r, \theta)$  的方位剖面 (azimuthal section)  $d(r = \text{常数}, \theta)$  是方位角  $\theta$  的线性函数。在理想的情形下,这个方位剖面在方位角  $\theta = 0$  处具有不连续。在距离元件轴的恒定距离  $r$  处的线性函数  $d(r = \text{常数}, \theta)$  具有斜度  $|m| = \frac{180^\circ}{\alpha nr}$ , 其中  $\alpha$  代表旋光晶体的旋光率。在  $\theta = 0$  的

不连续位置处,存在有量值为  $360^\circ / \alpha$  的厚度突变步长。在不连续位置处的步长还可以分布在若干度数的方位角范围内。然而,在渐变范围内,这具有非优化偏振分布的结果。

[0021] 在本发明的又一个有利的实施例中,在距元件轴的恒定距离  $r$  处的厚度分布  $d(r, \theta)$  的方位剖面  $d(r = \text{常数}, \theta)$  是具有相同斜度  $m$  的方位角  $\theta$  的线性函数,但是在理想情形下,分别在方位角  $\theta = 0$  和  $\theta = 180^\circ$  处具有两处不连续。在每个不连续位置处,存在有量值为  $180^\circ / \alpha$  的厚度突变步长。在不连续位置处的两个突变步长还可以分布在若干度数的方位角范围内。然而,在渐变范围内,这具有非优化偏振分布的结果。

[0022] 在本发明的另一个有利的实施例中,在距元件轴的恒定距离  $r$  处以及在  $10^\circ < \theta < 170^\circ$  的第一方位角范围内的厚度分布  $d(r, \theta)$  的方位剖面  $d(r = \text{常数}, \theta)$  是具有第一斜度  $m$  的方位角  $\theta$  的线性函数,同时在  $190^\circ < \theta < 350^\circ$  的第二方位角范围内的方位剖面是具有第二斜度  $n$  的方位角  $\theta$  的线性函数。斜度  $m$  和  $n$  具有相同的绝对值但是符号相反。在距元件轴的距离  $r$  处,斜度  $m$  和  $n$  的量值是  $|m| = |n| = \frac{180^\circ}{\alpha nr}$ 。利用这种布置,所有方位

角 (包括  $\theta = 0$  和  $\theta = 180^\circ$ ) 的厚度分布是没有厚度突变的连续函数。

[0023] 在本发明的又一个有利的实施例中,偏振调制光学元件被分成许多具有不同厚度的平面平行部分或包含至少两个平面平行部分。这些部分可以比如配置成若干扇形圆,但是它们还可以具有六边形、正方形、矩形或梯形。

[0024] 在本发明的另一个有利的实施例中,一对第一平面平行部分被布置在所述偏振调制光学元件的中心元件轴的相对侧上,以及一对第二平面平行部分被布置在所述元件轴的相对侧并且相对于所述第一平面平行部分在所述元件轴周围被环向移位,其中每个所述第一部分具有的厚度不同于每个所述第二部分的厚度。

[0025] 在本发明的又一个有利的实施例中,通过偏振调制光学元件的线性偏振光的振荡平面在至少一个所述第一平面平行部分内被旋转第一旋转角  $\beta_1$ , 并且在至少一个所述第二平面平行部分内被旋转第二旋转角  $\beta_2$ , 以使  $\beta_1$  和  $\beta_2$  近似符合或者符合表达式  $|\beta_2 - \beta_1| = (2n+1) \cdot 90^\circ$ , 其中  $n$  表示整数。

[0026] 在有利的实施例中,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  近似符合或者符合表达式  $\beta_1 = 90^\circ + p \cdot 180^\circ$ , 其中  $p$  表示整数, 并且  $\beta_2 = q \cdot 180^\circ$ , 其中  $q$  表示除零以外的整数。正如下面将要详细讨论的,偏振调制光学元件的这样的实施例可便利地用于影响横向偏振光的偏振以使出射光具有偏振分布,取决于入射光,所述偏振分布近似为切向或径向偏振。

[0027] 可特别使一对第二平面平行部分相对于所述一对第一平面平行部分在所述元件轴附近环向移位大约  $90^\circ$ 。

[0028] 在本发明的另一个有利的实施例中,所述一对第一平面平行部分和所述一对第二平面平行部分被布置在所述偏振调制光学元件的中心开口或中心挡光的相对侧上。

[0029] 所述第一和第二对的相邻部分通过对进入所述偏振调制光学元件的线性偏振光

来说不透明的区域而被彼此分离。所述第一和第二组的所述部分通过架座 (mounting) 特别被结合在一起。所述架座对进入所述偏振调制光学元件的线性偏振光来说可以是不透明的。架座可具有基本上为辐条车轮的形状。

[0030] 在本发明的又一个有利的实施例中, 偏振调制光学元件包含第一组基本平面平行部分, 其中横向线性偏振光的振荡平面被旋转第一旋转角  $\beta_1$ ; 偏振调制光学元件包含第二组基本平面平行部分, 其中横向线性偏振光的振荡平面被旋转第二旋转角, 以使  $\beta_1$  和  $\beta_2$  近似符合或者符合表达式  $|\beta_2 - \beta_1| = (2n+1) \cdot 90^\circ$ , 其中  $n$  表示整数。

[0031] 在本发明的另一个有利的实施例中,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  近似符合表达式  $\beta_1 = 90^\circ + p \cdot 180^\circ$ , 其中  $p$  表示整数, 并且  $\beta_2 = q \cdot 180^\circ$ , 其中  $q$  表示除零以外的整数。

[0032] 在本发明的又一个有利的实施例中, 偏振调制光学元件的厚度分布具有无厚度突变的连续表面等高线, 据此可生成任意选择的偏振分布, 其厚度分布用位置的连续函数表示。

[0033] 为了确保光学元件的适当的机械稳定性, 重要的是使偏振调制光学元件的最小厚度  $d_{\min}$  至少等于元件直径  $D$  的 0.002 倍。

[0034] 如果用于光学元件的旋光材料还具有双折射特性, 如在利用晶状石英的情形下, 双折射必须考虑传播方向偏离光学晶体轴方向的光线。晶体内  $90^\circ / \alpha$  的传播距离导致旋转  $90^\circ$  的线性偏振。如果除了旋转作用以外还出现了双折射, 则  $90^\circ$  旋转将等同于相对于光的电场矢量的快轴和慢轴之间的交换。因此, 如果晶体内行进的距离等于的  $180^\circ / \alpha$  整数倍, 利用小的入射角为光线提供双折射的总补偿。为了满足前述的、关于机械稳定性的要求同时使双折射的作用减至最小, 如果偏振调制光学元件被设计成具有  $d_{\min} = N \cdot \frac{90^\circ}{\alpha}$  的最小厚度 (其中  $N$  表示正整数) 则是尤其有利的。

[0035] 从制造的观点来看, 提供具有中心开口或具有中心挡光的光学元件是尤其有利的。

[0036] 对于未精确平行于光学晶体轴传播的光线来说, 将存在旋转角的偏差。另外, 双折射现象将产生影响。因此, 在角相对于光学晶体轴的摆动范围内, 如果包含大量光线的入射光束的最大入射角不大于 100mrad、优选地不大于 70mrad、以及特别优选地不大于 45mrad, 则是尤其有利的。

[0037] 为了提供对偏振状态的更灵活的控制, 光学布置便利地装配了允许至少一个另外的偏振调制光学元件将被放置在光路上的装置。这个另外的偏振调制光学元件可以是具有上述特征的附加元件。然而, 它还可以被配置成旋光材料的平面平行片或两个半波片的布置, 其相应的双折射的快轴和慢轴相对于彼此被旋转了  $45^\circ$ 。

[0038] 可放置于光学布置中的另外的偏振调制光学元件可特别地通过下述方式来设计, 即它使线性偏振光线的振荡平面旋转  $90^\circ$ 。如果光学布置中的第一偏振调制元件产生切向偏振的话, 这是尤其有利的。通过插入  $90^\circ$  - 旋转器, 可将切向偏振转换为径向偏振。

[0039] 在光学布置的另一个有利的实施例中, 将另外的偏振调制光学元件配置成作为与  $180^\circ$  的方位角范围对应的半空间的半波片而工作的平面平行片可能是有利的。如果第一偏振调制光学元件具有只随方位角  $\theta$  变化的厚度分布 ( $r = \text{常数}$ ,  $\theta$ )、以及如果在  $10^\circ < \theta < 170^\circ$  的第一方位角范围内厚度分布 ( $r = \text{常数}$ ,  $\theta$ ) 是具有第一斜度  $m$  的方位角  $\theta$

的线性函数,而在  $190^\circ < \theta < 350^\circ$  的第二方位角范围内厚度分布是具有第二斜度  $n$  的方位角  $\theta$  的线性函数并且斜度  $m$  和  $n$  具有相同的绝对值但是符号相反的话,这种配置尤其令人关注。

[0040] 在最初轴平行光线已经通过偏振调制元件之后,尤其是发生在偏振调制元件的斜面上的折射可导致在最初轴平行光线方向上的偏差。为了补偿由偏振调制元件引起的这种类型的波前偏差,在光学系统的光路中布置非旋光材料的补偿片是有利的,补偿片的厚度分布被设计成以使其基本上补偿了由偏振调制光学元件引起的传输幅射的角偏差。另外,覆盖偏振调制元件的成形表面的浸没流体可用于相同用途。

[0041] 前述的偏振调制元件以及装配了偏振调制元件的光学布置被便利地用于显微光刻应用的投影系统中。尤其是,这种类型的偏振调制元件和装配了偏振调制元件的光学布置非常适合于其中使用了前述的浸没技术(即其中在离衬底最近的光学元件和衬底之间的空间内提供了折射率不同于空气的浸没介质)的投影系统。

#### 附图说明

[0042] 在下文中,将参考附图对本发明进行详细地解释,其中:

[0043] 图 1 说明了具有厚度分布的偏振调制光学元件;

[0044] 图 2 示意性地说明了线性偏振光线在沿着旋光晶体中的光轴传播时振荡平面是如何被旋转的;

[0045] 图 3 说明了偏振调制光学元件的第一示范实施例;

[0046] 图 4a 示意性地说明了偏振调制光学元件的第二示范实施例;

[0047] 图 4b 说明了在图 4a 的偏振调制光学元件的实施例中作为方位角的函数的厚度分布;

[0048] 图 4c 说明了在偏振调制光学元件的另一个实施例中作为方位角的函数的厚度分布;

[0049] 图 4d 说明了在图 3 的偏振调制光学元件的实施例中作为方位角的函数的厚度分布;

[0050] 图 4e 说明了在偏振调制光学元件的又一个实施例中作为方位角的函数的厚度分布;

[0051] 图 4f 示意性地说明了偏振调制光学元件的另一个示范实施例;

[0052] 图 5 示意性地说明了在一束光线通过具有按照图 3 或 4d 的厚度分布的偏振调制光学元件之前和之后该束光线的偏振分布;

[0053] 图 6 示意性地说明了在一束光线通过装配了具有按照图 3 的厚度分布的偏振调制光学元件以及另外的偏振调制光学元件的光学布置之前和之后该束光线的偏振分布;

[0054] 图 7a 示意性地说明了在一束光线通过装配了具有按照图 4e 的厚度分布的偏振调制光学元件以及平面平行片、被配置成半波片的一半的光学布置之前和之后该束光线的偏振分布;

[0055] 图 7b 示出的是平面平行片、被配置成半波片的一半的平面图;

[0056] 图 8 示意性地说明了具有偏振调制光学元件的显微光刻投影系统;以及

[0057] 图 9 示意性地示出了通过调节其温度和/或温度分布用作偏振调制元件的旋光材

料的平行平面片；

[0058] 图 10 示出了旋光材料的平行片与双折射材料制成的片的结合；以及

[0059] 图 11 示意性示出了光学系统中应用的温度补偿的偏振调制光学元件。

### 具体实施方式

[0060] 图 1 说明了旋光材料的偏振调制光学元件 1。特别适合于这种用途的是具有至少一个对所用光的波长来说是透明的光学晶体轴的旋光晶体。例如， $\text{TeO}_2$  在 1000nm 至 300nm 的波长范围内工作， $\text{AgGaS}_2$  在 500nm 至 480nm 的波长范围内工作，以及石英在 800nm 到低至 193nm 的波长范围内工作。偏振调制光学元件 1 被设计成以使元件轴的取向平行于光学晶体轴。为了产生选择的偏振分布，光学元件 1 被设计成具有厚度分布（平行于元件轴 EA 所测得的），所述的厚度分布在垂直于元件轴 EA 的方向上变化，还包含在比如元件轴 EA 的固定距离处方位角方向  $\theta$ （参见图 3）上的光学元件的厚度变化。

[0061] 图 2 将用来详细解释旋光晶体的功能，并且特别要解释由这种晶体制成的偏振调制元件的功能。

[0062] 旋光晶体具有在晶体结构中所固有的至少一个光轴 OA。在线性偏振光沿着这个光轴 OA 行进时，电场矢量 206 的振荡平面按照量值与光在晶体 202 内行进的距离  $d$  成比例的角度  $\beta$  被旋转。距离  $d$  和旋转角度之间的比例因子是旋光率  $\alpha$ 。后者是特定材料的量并且其依赖于通过晶体传播的光线波长。例如在石英中，在 21.6°C 的温度下，波长为 180nm 时的旋光率被测得约为  $\alpha = (325.2 \pm 0.5)^\circ / \text{mm}$ ，波长为 193nm 时的旋光率被测得约为  $\alpha = 323.1^\circ / \text{mm}$ 。

[0063] 对本发明将旋光材料用于照明系统和 / 或比如用于显微光刻的投影设备的投影光学系统的物镜来说，同样重要的是还考虑旋光率的温度相依性。给定波长的旋光率  $\alpha$  的温度相依性是由  $\alpha(T) = \alpha_0(T_0) + \gamma * (T - T_0)$  给定的适当的以及第一线性近似值，其中  $\gamma$  是旋光率  $\alpha$  的线性温度系数。在这种情形下， $\alpha(T)$  是温度  $T$  时的旋光系数或旋光率， $\alpha_0$  是参考温度  $T_0$  时的旋光率。对于旋光石英材料来说，室温时，波长为 193nm 下的  $\gamma$  值为  $\gamma = 2.36 \text{ mrad} / (\text{mm} * \text{K})$ 。

[0064] 再次参见图 2，尤其是，在晶体 202 内沿着光轴 OA 传播的光不会经历线性双折射。因此，当线性偏振光线沿着光轴 OA 横穿旋光晶体 202 时，除了依赖于光线在晶体 202 内行进的距离  $d$  的电场矢量 206 的振荡平面的空间取向的变化之外，其偏振状态保持相同。

[0065] 基于旋光晶体的这个特性，通过设计图 1 的具有根据位置而变化的厚度分布的偏振调制光学元件 1，能够产生任意选择的线性偏振分布。厚度分布被设计成可具有使平行线性偏振光线的偏振方向依照根据光线横穿光学元件的位置而变化的角度被旋转的作用。

[0066] 更一般、可选地或者除偏振调制元件的厚度  $d = d(x, y)$  变化之外，旋光率  $\alpha$  还可能本身依赖于调制元件内的位置以使  $\alpha$  变为  $\alpha(x, y, z)$  或  $\alpha(r, \theta, z)$ ，其中如图 1 所示， $x, y$  或  $r, \theta$  是垂直于偏振调制元件的元件轴 EA（或可选地为光轴 OA）的平面上的笛卡尔坐标或极坐标，其中  $z$  是沿着元件轴 EA 的轴。当然，球面坐标中的描述如  $r, \theta, \phi$  或其他描述也是可能的。考虑到旋光率  $\alpha$  的变化，如果在  $z$ - 方向上不存在  $\alpha$  相关性，偏振调制光学元件通常包含定义为  $D(x, y) = d(x, y) * \alpha(x, y)$  的“光学有效厚度  $D$ ”的变化分布。在  $\alpha$  还可依赖于  $z$ - 方向（沿着光轴或元件轴 EA 或者在光学系统中更一般地沿着优



选方向或平行于光学系统的光轴方向)的情形中, D 必须通过沿着偏振调制光学元件的积分  $D(x, y) = \int \alpha(x, y, z) dz(x, y)$  来计算。通常, 如果偏振调制光学元件用于具有光轴或由光束传过光学系统所定义的优选方向的光学系统, 则通过沿着偏振调制光学元件内光线的光路积分旋光率  $\alpha$  来计算光学有效厚度 D。在这个一般特性下, 本发明涉及光学系统, 该光学系统包含光轴或由传过光学系统的光束的方向给定的优选方向。光学系统还包含由坐标系统的坐标描述的偏振调制光学元件, 其中坐标系统的一个优选坐标平行于光学系统的光轴或平行于优选方向。作为实例, 在上述的情形中, 这个优选方向是 z- 坐标, 其为优选坐标。另外, 偏振调制光学元件包含旋光材料并且还包含如上所定义的有效光学厚度 D 的分布, 其中有效光学厚度 D 至少作为不同于描述偏振调制光学元件的坐标系统的优选坐标的一个坐标的函数来变化。在上面的实例中, 有效光学厚度 D 至少作为不同于 z- 坐标(优选坐标)的 x- 或 y- 坐标的函数来变化。存在有不同的独立方法来改变旋光材料的有效光学厚度。一种方法是通过选择适当的材料、或者通过使旋光材料经历不均匀的温度分布、或者通过改变旋光材料的几何厚度来改变旋光率。同样地, 所提到的独立方法的组合导致旋光材料的有效光学厚度的变化。

[0067] 图 3 说明了特别适合于产生切向偏振的偏振调制光学元件 301 的实施例。在图 4d 和图 5 的上下文中将提供详细的描述。图 3 所说明的实施例用来介绍将在下文中与这里所定义的特定含义一起使用的若干技术术语。

[0068] 偏振调制光学元件 301 为圆柱形, 其具有底面 303 和相对表面 305。底面 303 被设计成平坦的圆形表面。元件轴 EA 垂直于该平坦表面伸展。相对表面 305 具有依照给定的厚度分布相对于元件轴 EA 的等高线形状。旋光晶体的光轴平行于元件轴 EA。在底面伸展的参考轴 RA 以直角与元件轴相交并充当了由此测量方位角  $\theta$  的基准。在图 3 所说明的特定配置中, 偏振调制光学元件 301 的厚度沿着垂直于元件轴 EA 并且相对于参考轴 RA 指向角度  $\theta$  的半径 R 是不变的。因此, 在图 3 说明的实施例中, 厚度分布只取决于方位角  $\theta$  并且由  $d = d(\theta)$  给定。光学元件 301 具有与元件轴 EA 共轴的可选的中心孔 307。在偏振调制光学元件的另外的优选实施例中, 厚度可沿着半径 R 变化以使厚度分布为  $d = d(R, \theta)$ 。在另外的更广义的优选实施例中, 图 3 所示的厚度分布不代表如上所述的偏振光学元件的几何厚度 d, 但是取决于所使用的坐标系统, 该分布代表光学有效厚度  $D = D(R, \theta) = D(x, y)$ 。在这种情形下, 同样地, 在对通过的光束的偏振平面方向的变化有效的偏振调制光学元件的分布中要考虑旋光率的任何分布, 如  $\alpha = \alpha(x, y) = \alpha(R, \theta)$  或  $\alpha = \alpha(x, y, z) = \alpha(R, \theta, z)$ 。

[0069] 另外, 应当提到的是, 偏振调制光学元件 301 未必需要包含平坦的底面 303。这个表面通常还可包含等高线形状的表面, 如相似或等于图 3 所示的用 305 指示的表面。在这样的情形中, 便于相对于与光轴或元件轴垂直的平面来描述等高线表面 303 和 305。

[0070] 图 4a 示意性地描述了偏振调制光学元件 401 的另一个实施例。在这个表述中, 通过偏振调制光学元件 401 中心的元件轴 EA 与图形的平面垂直, 并且晶体的光学晶体轴平行于元件轴。如图 3 的实施例那样, 偏振调制光学元件 401 具有可选的中心孔 407。偏振调制光学元件 401 被分成许多平面平行部分 409, 这些平面平行部分 409 呈扇形圆的形状, 它们各自的厚度不同。可以想象具有与部分 409 不同形状的可选用实施例。它们可以被配置成比如六边形、正方形、矩形或梯形光栅单元。

[0071] 正如结合图 3 所描述的,可修改按照图 4a 的实施例以使扇形的不同厚度应当被理解为不同的有效光学厚度  $D$ 。在这种情形下,旋光率  $\alpha$  可从一个扇形体变化到另一个扇形体。为了制造这样的实施例,偏振调制光学元件比如可具有如图 4a 所示的形状,其中扇形 409 至少部分地被比如任何非旋光材料互换,这是将旋光率变化为零的最简单的例子。同样作为另一个实施例,可用充满旋光或非旋光液体的小池或隔室来代替扇形 409。在这种情形下,偏振调制光学元件可包含旋光或非旋光部分。如果扇形 409 只是部分被小池所代替或者如果至少一个小池被用于偏振调制光学元件 401,则在一个元件 40 中比如旋光晶体与比如旋光或非旋光液体的组合是可能的。按照本发明的这种光学系统可包含偏振调制光学元件,所述的偏振调制光学元件包含旋光或非旋光液体和 / 或旋光晶体。另外,按照本发明的光学系统的偏振调制光学元件能够便利地包含顺时针或逆时针旋光材料。这些材料可以是固态或液态的旋光材料。利用小池中的液体具有下列优点:通过改变液体或者液体中旋光材料的浓度,可以很容易控制偏振变化的大小。同样地,比如通过旋光液体的温度控制,可控制由于旋光率  $\alpha$  的热系数  $\gamma$  造成的旋光率  $\alpha$  的任何热变化,以使小池内的温度是不变的或者使温度具有预定值  $T$  以使旋光率具有值为  $\alpha(T) = \alpha_0(T_0) + \gamma * (T - T_0)$ 。此外,利用由控制单元控制的适当的加热和 / 或冷却单元,在液体中形成某一温度分布也是可能的。

[0072] 依照本发明的光学系统便于修改第一线性偏振光线和第二线性偏振光线各自相应的振荡平面。两种光线传过光学系统并且至少部分光束传过光学系统。光线还以不同路径通过偏振调制光学元件,并且依照各自相应的第一和第二旋转角被旋转以使第一角度不同于第二角度。通常,按照本发明的光学系统的偏振调制光学元件将进入所述偏振调制光学元件的、具有第一线性偏振分布的光束变成从所述偏振调制光学元件出射的光束。出射光束具有第二线性偏振分布,其中第二线性偏振分布不同于第一线性偏振分布。

[0073] 图 4b 示出了如图 4a 所示的被分成扇形的偏振调制光学元件 401 的沿着方位剖面  $d(r = \text{常数}, \theta)$  的厚度分布。如在本文中使用的术语方位剖面指沿着图 4a 中标记的圆 411 穿过厚度分布  $d(\theta, r)$  (即在恒定半径  $r$  处  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  的方位角范围内伸展) 的剖面。通常,分布示出了沿着圆 411 的光学有效厚度  $D = D(\theta)$ 。

[0074] 被分成扇形部分的偏振调制光学元件 401 的方位剖面具有阶梯状的分布,其中每一阶对应于相邻扇形单元之间厚度  $d$  或光学有效厚度  $D$  的差。分布具有比如最大厚度  $d_{\max}$  和最小厚度  $d_{\min}$ 。为了覆盖线性偏振光的振荡平面的旋转角范围  $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ ,在  $d_{\max}$  和  $d_{\min}$  之间必须存在有  $360^\circ / \alpha$  的差。分布的每个独立阶的高度取决于扇形单元的数目  $n$  并具有  $360^\circ / (n \cdot \alpha)$  的大小。在方位角  $\theta = 0^\circ$  处,分布具有不连续,在此处偏振调制光学元件 401 的厚度从  $d_{\min}$  跳至  $d_{\max}$ 。光学元件的不同实施例可具有厚度分布,其中方位剖面具有两个厚度不连续,如在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 180^\circ$  处。

[0075] 在可选项实施例中,分布具有比如最大光学有效厚度  $D_{\max}$  和最小光学有效厚度  $D_{\min}$ ,并且几何厚度  $d$  是比如不变的,导致元件 401 的独立扇形体 409 的旋光率  $\alpha$  的变化。为了覆盖线性偏振光的振荡平面的旋转角范围  $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$ ,在  $\alpha_{\max}$  和  $\alpha_{\min}$  之间必须存在有  $360^\circ / d$  的差。分布的每个独立阶的旋光率的变化取决于扇形单元 409 的数目  $n$  并具有  $360^\circ / (n \cdot d)$  的大小。在方位角  $\theta = 0^\circ$  处,分布具有与光学有效厚度有关的不连续,在此处光学有效厚度从  $D_{\min}$  跳至  $D_{\max}$ 。应当指出,在该实施例中,便利之处在于,在偏振调制光学元件 401 的几何厚度  $d$  中不存在不连续。同样地,其中方位剖面具有两个光学

有效厚度不连续的光学有效厚度的厚度分布可以很容易获得,如在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 180^\circ$  处。为了实现所定义的旋光率大小的变化  $\Delta \alpha = 360^\circ / (n \cdot d)$  (如果有  $n$  个角扇形体 409 形成了元件 401), 则独立扇形单元 409 优选地包含或由填充了具有所需旋光率  $\alpha$  的旋光液体的小池或隔室组成。作为实例, 对于第  $m$  扇形单元, 旋光率是  $\alpha(m) = \alpha_{\min} + m * 360^\circ / (n \cdot d)$  以及  $0 \leq m \leq n$ 。所需的旋光率比如可以通过液体的旋光材料的浓度或者通过改变液体材料本身来调节。

[0076] 在另一个实施例中, 偏振调制光学元件 401 的扇形体 409 可包含固态旋光材料 (如晶状石英) 和填充有旋光材料的隔室或小池部分, 并且将这些部分在光传播方向上一个挨一个的放置。可选地或另外, 小池本身可包含如晶状石英这样的旋光材料。

[0077] 前述的调制偏振光学元件将线性偏振入射光转换为其中线性偏振光线的振荡平面依照取决于每个独立的扇形单元厚度 (或光学有效厚度) 的角被旋转的线性偏振分布。然而, 据此偏振方向被旋转的角在独立的扇形单元上是不变的。因此, 独立的场矢量的振荡平面方向的分布函数只取某些离散值。

[0078] 利用沿着方位剖面具有连续变化的厚度 (光学有效厚度) 分布的光学元件可获得线性偏振的连续分布。

[0079] 图 4c 说明了连续变化厚度分布的实例。在这个实施例中, 方位剖面 411 示出了在  $0 \leq \theta \leq 360^\circ$  的方位角范围内斜度为  $m = -180^\circ / (\alpha \cdot \pi)$  的厚度 (通常为光学有效厚度) 的线性下降。这里, 斜度被定义为螺旋斜度。另外, 斜度可由  $m = -180^\circ / (\alpha * \pi * r)$  来定义, 其中  $r$  是中心在元件轴 EA 的圆的半径。在这种情形下, 比如, 如果偏振调制光学元件 301 具有给定的恒定螺旋斜度 (螺旋导程), 则斜度取决于元件轴的距离。

[0080] 在本文中, 符号  $\alpha$  表示旋光晶体的旋转率。正如在图 4b 的前述实施例中, 图 4c 的厚度分布同样在方位角  $\theta = 0^\circ$  处具有不连续, 偏振调制光学元件 401 的厚度从  $d_{\min}$  跳至  $d_{\max}$  大约有  $360^\circ / \alpha$  的量值变化。

[0081] 在图 4d 中示出的偏振调制光学元件的另一个实施例具有同样适合于产生线性偏振 (尤其是切向定向的偏振) 的连续分布的厚度分布 (通常为光学有效厚度分布)。这个厚度分布对应于图 3 所示的实施例, 其中角度  $\theta$  在逆时针方向上被测量。在这个实施例中, 方位剖面 411 是在  $0 < \theta < 180^\circ$  和  $180^\circ < \theta < 360^\circ$  两个范围的各自范围内斜度为  $m = -180^\circ / (\alpha \cdot \pi)$  的方位角  $\theta$  的线性函数。厚度分布在方位角  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 180^\circ$  处具有不连续, 在此处厚度突然从  $d_{\min}$  升至  $d_{\max}$  大约有  $180^\circ / \alpha$  的量值变化。

[0082] 图 4e 表示偏振调制光学元件 401 的另一个实施例的沿着方位剖面的厚度分布 (通常为光学有效厚度分布)。在这个例子中, 方位剖面是在  $0 < \theta < 180^\circ$  的范围内第一斜度为  $m$  以及在  $180^\circ < \theta < 360^\circ$  的范围内第二斜度为  $n$  的方位角  $\theta$  的线性函数。斜度  $m$  和  $n$  具有相等的绝对值但是具有相反的符号。在距元件轴的距离为  $r$  处,  $m$  和  $n$  各自的量值是  $m = -180^\circ / (\alpha \cdot \pi \cdot r)$  和  $n = 180^\circ / (\alpha \cdot \pi \cdot r)$ 。虽然最小厚度  $d_{\min}$  和最大厚度  $d_{\max}$  之间的差再次近似等于  $180^\circ / \alpha$ , 即与图 4d 的实施例相同, 在两个方位角范围内的斜度使用相反符号的概念避免了不连续的发生。

[0083] 另外, 提到了, 对于某些特定应用, 顺时针和逆时针旋光材料被结合进偏振调制光学元件。

[0084] 当厚度分布的斜度沿着方位剖面随较小的半径大大增加时, 从制造的观点来看,

在圆形偏振调制光学元件的中心轴周围的中心部分提供中心开口 407 或者中心挡光是有利的。

[0085] 此外,为了机械稳定性而将偏振调制光学元件设计成具有不小于元件直径的千分之二的最小厚度  $d_{\min}$  是必要的。利用  $d_{\min} = N \cdot 90^\circ / \alpha$  的最小厚度是尤其有利的,其中  $N$  是正整数。这个设计选择用来使对以相对于光轴的角度穿过偏振调制元件的入射光束的光线的双折射作用减至最小。

[0086] 图 4f 示意性说明了偏振调制光学元件的另一个实施例 421。正如图 4a 所示,通过偏振调制光学元件 421 中心的元件轴 EA 垂直于图形的平面,并且光学晶体轴平行于元件轴。然而,与图 3 和图 4a 的实施例(其中偏振调制光学元件 301、401 优选地由一片如晶体材料例子中的晶状石英制成)相反,偏振调制光学元件 421 包含旋光晶体材料的四个分离的扇形部分 422、423、424、425,这四个分离的扇形部分通过架座(mounting)装置 426 结合起来,架座装置 426 由比如金属制成并且其形状可以被描述成具有四个径向辐条 428 的圆片 427。架座优选地对进入偏振调制光学元件辐射来说是不透明的,因此还充当了使扇形部分 422、423、424、425 彼此分离的隔离物。当然,按照图 4f 的本发明的实施例不打算受限于架座装置 426 的任何特定形状和面积,还可以省略架座装置 426。

[0087] 按照未在图 4f 中说明的可选用实施例,比如借助于衍射结构或其它适当的光学部件,进入偏振调制光学元件的入射光还可选择性地被引导到扇形部分上。

[0088] 扇形部分 422 和 424 具有被选择的第一厚度  $d_1$  以使部分 422 和 424 导致线性偏振轴平行光的振荡平面被旋转了  $90^\circ + p \cdot 180^\circ$ , 其中  $p$  表示整数。扇形部分 423 和 425 具有被选择的第二厚度  $d_2$  以使部分 423 和 425 导致线性偏振轴平行光的振荡平面被旋转了  $q \cdot 180^\circ$ , 其中  $q$  表示除零以外的整数。因此,在  $y$ -方向上被线性偏振的一束轴平行光线进入偏振调制光学元件 421 时,通过扇形部分 423 和 425 的光线在保持其振荡平面不变的情况下从偏振调制光学元件 421 中射出,而通过扇形部分 422 和 424 的光线在保持其振荡平面旋转至  $x$ -方向的情况下从偏振调制光学元件 421 中射出。作为通过偏振调制光学元件 421 的结果,出射光具有偏振分布,该偏振分布在扇形部分 422、423、424、425 的中心线 429 和 430 处是精确切向的并且对于偏振调制光学元件 421 的其余部分接近切向偏振分布。

[0089] 在  $x$ -方向上被线性偏振的一束轴平行光线进入偏振调制光学元件 421 时,通过扇形部分 423 和 425 的光线在保持其振荡平面不变的情况下从偏振调制光学元件 421 中射出,而通过扇形部分 422 和 424 的光线在保持其振荡平面旋转至  $y$ -方向的情况下从偏振调制光学元件 421 中射出。作为通过偏振调制光学元件 421 的结果,出射光具有偏振分布,该偏振分布在扇形部分 422、423、424、425 的中心线 429 和 430 处是精确径向的并且对于偏振调制光学元件 421 的其余部分接近径向偏振分布。

[0090] 当然,按照图 4f 的本发明实施例不打算受限于图 4f 中示范说明的扇形部分的形状和面积以及数目,以使可使用其它适当的形状(具有但不限于比如梯形、矩形、正方形、六边形或圆形几何形状)以及或多或少的扇形部分 422、423、424、425。此外,通常可以选择由扇形部分 422、423、424、425 提供的旋转角  $\beta_1$  和  $\beta_2$ , (即扇形部分 422、423、424、425 的相应厚度)以近似地符合表达式  $|\beta_2 - \beta_1| = (2n+1) \cdot 90^\circ$ , 其中  $n$  表示整数,比如还要考虑使用的入射光的相对布置,其具有不必与  $x$ -或  $y$ -方向对准的偏振平面。利用结合图 4f 所描述的实施例,还能够接近具有切向偏振的偏振分布。

[0091] 为了由波长为 193nm 的线性偏振光以及独立光线的电场矢量振荡平面的均等方向产生切向偏振分布,可使用比如具有按照图 3 和 4d 设计的晶状石英的偏振调制光学元件。石英对波长为 193nm 的光的旋光率  $\alpha$  是在范围  $(325.2 \pm 0.5)^\circ / \text{mm}$ ,其在波长为 180nm 时测得或者更精确地说它在  $21.6^\circ\text{C}$  时为  $321.1^\circ / \text{mm}$ 。在直到  $100\text{mrad}$  的小范围入射角内,旋光的强度和作用近似恒定。比如可以按照下列描述来设计实施例:如果使用晶状石英,则为最小厚度  $d_{\min}$  选择近似等于  $90^\circ / \alpha$  的  $276.75 \mu\text{m}$  量值。另外,最小厚度  $d_{\min}$  还可以是这个量值的整数倍。元件直径是  $110\text{mm}$ ,其中旋光部分的直径稍微小一些,比如是  $105\text{mm}$ 。底面被设计成如图 3 所说明的平坦表面。相对表面具有依照图 4d 的厚度分布  $d(r, \theta)$ 。厚度分布由下面的数学关系来定义:

$$[0092] \quad D(r, \theta) = 276.75 + \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} \cdot 553.51 \mu\text{m}, \text{对于 } 0 \leq \theta \leq 180^\circ \text{ 以及}$$

$$[0093] \quad r > \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

$$[0094] \quad D(r, \theta) = 276.75 + \frac{360^\circ - \theta}{180^\circ} \cdot 553.51 \mu\text{m}, \text{对于 } 180 \leq \theta \leq 360^\circ \text{ 以及}$$

$$[0095] \quad r > \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

$$[0096] \quad D(r, \theta) = 0 \quad \text{对于 } r \leq \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

[0097] 上述数据是示范地基于  $(325.2 \pm 0.5)^\circ / \text{mm}$  的旋光率  $\alpha$  的。如果旋光率  $\alpha$  变化至  $321.1^\circ / \text{mm}$  (即  $21.6^\circ\text{C}$  温度下、193nm 时的值),则厚度分布将发生如下变化:

$$[0098] \quad D(r, \theta) = 278.6 + \frac{180^\circ - \theta}{180^\circ} \cdot 557 \mu\text{m} \text{ 对于 } 0 \leq \theta \leq 180^\circ \text{ 以及 } r > \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

$$[0099] \quad D(r, \theta) = 278.6 + \frac{360^\circ - \theta}{180^\circ} \cdot 557 \mu\text{m} \text{ 对于 } 180 \leq \theta \leq 360^\circ \text{ 以及 } r > \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

$$[0100] \quad D(r, \theta) = 0 \quad \text{对于 } r \leq \frac{10.5}{2} \text{ mm}$$

[0101] 按照这个实施例的偏振调制光学元件具有直径为 10.5 的中心开口 407,即最大孔径的十分之一。对于第一给定实例,在不连续处发现的厚度最大和最小分别是  $830.26 \mu\text{m}$  和  $276.75 \mu\text{m}$ 。

[0102] 利用自动抛光过程可产生前述的实施例。用抛光后被无缝地连在一起的两个楔形或螺旋形半波片制成偏振调制元件尤其便利。如果元件由半波片制成,则很容易并且在某些额外优势的应用中使用一个顺时针和一个逆时针旋光材料,如顺时针晶状石英和逆时针晶状石英 (R-石英和 L-石英)。

[0103] 图 5 示意性地说明了具有按照图 3 和 4d 的厚度分布的偏振调制光学元件 501 如何使具有均匀取向的线性偏振分布 517 的输入光束 513 的偏振分布转换为出射光束 515 的切向偏振 519。从下面可以看到这一点:在最小厚度处(如在  $\theta = 180^\circ$  处)横穿偏振调制光学元件的输入光束 513 的线性偏振光线覆盖了旋光晶体内的  $90^\circ / \alpha$  的距离。这导致了电场矢量的振荡平面被旋转  $90^\circ$ 。另一方面,在  $\theta = 45^\circ$  的位置处横穿偏振调制光学元件 501 的线性偏振光线覆盖了旋光晶体内的  $135^\circ / \alpha$  的距离,因此这个光线的电场矢量的振荡平面被旋转  $135^\circ$ 。对于输入光束 513 的每条光线,可得出类似的结论。

[0104] 图 6 示意性地说明了具有按照图 3 和 4d 的厚度分布的偏振调制光学元件 601 并结合另外的偏振调制光学元件 621 的光学布置如何使具有均匀取向的线性偏振分布 617 的输入光束 613 的偏振分布转换为出射光束 615 的径向偏振 623。正如在图 5 的上下文中解释的,偏振调制光学元件 601 产生切向偏振分布。通过光束的每条独立的线性偏振光线的各自对应的振荡平面的  $90^\circ$  - 旋转,可将切向偏振分布转换为径向偏振分布。利用按照图 6 的光学布置实现这个过程存在有若干不同的可能性。一种可能的构思是将旋光晶体的平面平行片作为另外的偏振调制元件 621 布置在光路上,其中该片的厚度近似为  $90^\circ / \alpha_p$ ,  $\alpha_p$  表示旋光晶体的旋光率。正如在偏振调制元件 601 中那样,平面平行片的光学晶体轴同样平行于元件轴。作为另一种可能的构思,另外的偏振调制元件 621 可被配置成由两个半波片组合成的  $90^\circ$  - 旋转器。 $90^\circ$  - 旋转器由双折射晶体材料的两个半波片组成。每个半波片具有与更高折射率的方向相关联的慢轴,以及垂直于慢轴、与更低折射率的方向相关联的快轴。两个半波片彼此相对地被旋转,因此它们各自的快轴和慢轴被设置成互相呈  $45^\circ$  的角。

[0105] 当然,在本发明的范围内可以预计用于产生径向偏振分布的另外可能的实施例。例如,可将另外的偏振调制光学元件 621 连接至偏振调制光学元件 601。为了允许从切向到径向偏振的快速转变,可提供允许将另外的偏振调制光学元件 621 放置在光路上并再次将其移去或由另一个元件代替的互换装置。

[0106] 还可利用具有依照图 4e 的厚度分布的偏振调制光学元件产生切向偏振分布。在本发明的这个实施例中的厚度分布不具有不连续。正如在图 7a 中看到的,输入光束 713 的均匀取向偏振分布 717 首先被偏振调制光学元件 701 转换为出射光束 715 的线性偏振分布 727。在图 4e 所示的厚度分布的方位角范围  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$  中,通过偏振调制光学元件 701 的输入光束 713 的一半被转换,以使出射光束的相对应的一半具有切向偏振分布。然而,另外的一半具有不同的、非切向的偏振分布 727。在光路中需要另外的偏振调制光学元件,以便于完全将从偏振调制光学元件 701 射出的光束 715 的偏振分布 727 转换为切向偏振分布 719。在这个例子中,另外的偏振调制光学元件被配置成作为具有第一一半 729 和第二一半 731 的平面平行片 725。图 7b 示出了平面平行片 725 的平面图。第一一半 729 由对光线的偏振状态没有影响的全向同性材料制成,而第二一半 731 被设计成半波片。在图 7a 的光学布置中,平面平行片 725 被定向以使偏振调制光学元件 701 的参考轴 RA 在平面平行片上的投影 RA' 基本上沿着第一一半 729 和第二一半 731 之间的分隔线。半波片的双折射的慢轴 LA 垂直于这个分隔线。另外,还可利用具有图 4e 给定的厚度分布的偏振调制光学元件获得切向偏振,如果元件由晶状石英的两个一半的楔形或螺旋形单元组成,其中一个单元的旋光性是顺时针并且另一个单元的旋光性是逆时针。在这种情形下,正如其在图 7a 的实施例中那样,附加的平面平行片 725 是不必要的。在这个实施例中,优选地,每个楔形单元具有不变的螺旋斜度,但是如图 4e 的分布所示的那样,斜度具有不同的方向。另外,几何厚度 d 的斜度具有相同的绝对值是不必要的,如果光学有效厚度 D 的斜度具有相同的绝对值,则其是足够的。在这种情形下,对于形成偏振调制光学元件的两个楔形元件的绝对值,旋光率  $\alpha$  是不同的。

[0107] 图 8 示意性地说明了包括光源单元 835、照明系统 839、掩模 853、投影物镜 855 和衬底 859 的显微光刻投影系统 833,其中掩模 853 携带微结构,衬底 859 被曝光于投影系统。

光源单元 835 包括 DUV- 或 VUV- 激光（例如 192nm 的 ArF 激光、157nm 的 F<sub>2</sub> 激光、126nm 的 Ar<sub>2</sub> 激光或 109nm 的 Ne<sub>2</sub> 激光）和产生平行光束的波束成形光学系统。光束的光线具有线性偏振分布，其中单条光线的电场矢量的振荡平面的取向是均匀方向的。照明系统 839 的主要配置在 DE 195 29 563 (US 6, 258, 433) 中被描述。平行光束指向散度增加光学元件 837。作为散度增加光学元件，可使用例如具有衍射或折射光栅单元布置的光栅片。每个光栅单元产生其角分布由光栅单元的尺寸和焦距确定的光束。光栅片位于物镜 804 的光路下游的物面上或附近。物镜 840 是一个变焦距物镜，其产生具有可变直径的平行光束。方向变化的反射镜 841 使平行光束指向包含了轴锥镜 843（即旋转对称棱镜布置）的光学单元 842。根据轴锥镜元件的变焦距和位置设置，变焦距物镜 840 与轴锥镜 843 合作在光瞳面 845 上产生不同的照明分布。偏振调制光学元件 801（如图 3 所示的类型）被布置在光瞳面 845 上。在光路上，偏振调制光学元件 801 的后面是补偿片 847，其具有被设计成可补偿偏振调制光学元件在通过它的光线中造成的角偏差的厚度分布。光学单元 842 的后面是分划板掩蔽系统 (REMA) 849。REMA 物镜 851 将分划板掩蔽系统 849 的图像投射到结构携带掩模（分划板）853 上，据此分划板 853 的照明面积被界定。投影物镜 855 将结构携带掩模 853 的图像投射到光敏衬底 859 上。投影物镜的最后一个光学元件 857 和光敏衬底 859 之间的空间包含了具有折射率不同于空气的浸没液体 861。

[0108] 如图 8 所述，本发明额外的好处是按照本发明的偏振调制光学元件或光学系统可用于显微光刻投影系统中的调节偏振分布以及偏振分布的温度补偿。在某些应用中，先进的显微光刻投影系统要求在分划板 853 处具有大约 5° 或更好、在某些情形下甚至比 1° 更好的精度的预定的偏振分布。

[0109] 因为分划板处的偏振分布受各种光学元件的影响（例如张力导致的双折射、或独立光学元件的温度的不明确或不受控制的变化），偏振分布可随时间发生不可预测的或者无法控制的变化。为了更正这样的变化，偏振调制光学元件的旋光率  $\alpha$  的温度相关可用来控制偏振角度的大小。依照本发明实施例的光学系统优选地包含偏振控制系统，用于控制传过光学系统的光束的偏振分布。令人关注的偏振分布位于光学系统中的预定位置处。偏振控制系统包含至少一个加热或冷却装置以此修改偏振调制光学元件的温度和 / 或温度分布从而影响预定位置处光束的偏振分布。在这里，偏振调制光学元件可具有变化的或不变化的有效光学厚度。

[0110] 在不变的有效光学厚度的情形中，光学系统包含光轴或由传过光学系统的光束方向给定的优选方向。光学系统另外包含由坐标系统的坐标描述的偏振调制光学元件，其中坐标系统的一个优选坐标平行于光轴或平行于所述优选方向。偏振调制光学元件包含固态和 / 或液态旋光材料，其中有效光学厚度作为与坐标系统的优选坐标不同的至少一个坐标的函数是不变的。光学系统还包含偏振控制系统，用于控制光束（传过光学系统的）在光学系统中的预定位置处的偏振分布，并且偏振控制系统包含至少一个加热或冷却装置以此修改偏振调制光学元件的温度和 / 或温度分布从而影响预定位置处光束的偏振分布。

[0111] 作为实例，如果偏振调制光学元件（如在按照本发明的光学系统中使用的）由包含平行片或形成为平行片的合成（晶状）石英制成的，这种片的 10mm 厚度将由于旋光率  $\alpha$  的线性温度系数  $\gamma$  ( $\gamma = 2.36\text{mrad}/(\text{mm}\cdot\text{K})$ ) 而导致  $23.6\text{mrad}/^\circ\text{C}$  或  $23.6\text{mrad}/\text{K}$ （等效于  $1.35^\circ/\text{K}$ ）的偏振变化。这些数据对应于 193nm 的波长。在如图 9 示意性示出的这样的实

施例中,平行片 901 的光轴 OA 被定向成平行或近似平行光学系统中光的传播(由附图标记 950 表示)。近似平行指平行片 901 的光轴 OA 和传过光学系统的光的方向之间的角度小于 200mrad,优选地小于 100mrad 乃至小于 50mrad。控制片 901 的温度将导致偏振的受控的变化。例如,如果片的温度将被控制在 20°C 至 40°C 的范围内,对于石英制成的这样的片 901 来说,可使偏振角在大约  $\pm 13.5^\circ$  的范围内可控制地变化。这个高度敏感性允许通过温度控制来控制偏振分布。在这样的情形下,甚至具有大约 0.1mm 直到 20mm 的厚度 d 的平面片将变成偏振调制光学元件 901,能够通过控制片 901 的温度可控制地调节偏振分布。优选地对于合成(晶状)石英,片 901 的厚度是  $n \times 278.5 \mu\text{m}$  (n 为任何整数),对于大约 21.6°C、波长为 193nm 的情形,  $n = 1$  时该厚度导致偏振平面至少  $90^\circ$  的旋转,  $n = 2$  时该厚度导致偏振平面  $180^\circ$  的旋转并且通常为  $n \times 90^\circ$  的旋转。对于偏振平面  $90^\circ$  的旋转,合成石英应当至少是  $278.5 \mu\text{m}$  厚;对于偏振平面  $180^\circ$  的旋转,合成石英应当至少是  $557.1 \mu\text{m}$  厚;对于偏振平面  $270^\circ$  的旋转,合成石英应当是  $835.5 \mu\text{m}$  厚;对于偏振平面  $360^\circ$  的旋转,合成石英是 1.114mm 厚。关于厚度的制造容限是大约  $\pm 2 \mu\text{m}$ 。因此制造容限导致在大约 21.6°C 和 193nm 时通过片的光的偏振平面的  $\pm 0.64^\circ$  的角误差。对于这个误差,不得不考虑由片(或偏振调制光学元件)的温度波动导致的额外误差,这个误差通过旋光率  $\alpha$  的线性温度系数  $\gamma = 2.36\text{mrad}/(\text{mm} \times \text{K}) = 0.15^\circ / (\text{mm} \times \text{K})$  给出。

[0112] 使用具有至少一个温度传感器 902、903 的感温装置、至少一个加热器 904、905 以及控制电路 910,通过闭环或开环控制可进行片 901 的温度控制,具有至少一个温度传感器 902、903 的感温装置用于确定片 901 的温度(或提供代表或等于偏振调制光学元件的温度和/或温度分布的温度传感器值),至少一个加热器 904、905 优选地包含红外加热器,用于通过红外辐射 906 加热所述的片,控制电路 910 用于控制至少一个加热器 904、905。作为感温装置的实例,可使用具有投影光学的红外敏感 CCD 元件,其中投影光学使片 901 的至少一部分在 CCD 元件上成像以使片 901 的可视部分的温度分布可通过 CCD 元件信号分析来确定。控制电路 910 可包含计算机系统 915 或者可被连接至显微光刻投影系统 833(参见图 8)的计算机或控制系统 915。在温度受控的片 901 的优选实施例中,厚度被选择成以使  $n \times 90^\circ$  的偏振旋转(n 为任何整数)在温度  $T = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})/2 + T_{\text{min}}$  时取得,而  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$  为片 901(或通常为偏振调制光学元件)的最高和最低温度。优选地,加热器或加热系统(并且还有像珀耳帖元件这样的冷却装置)被布置成以使其不在显微光刻投影系统 833 的光路上、或者其不在传过按照本发明实施例的光学系统的光束的光路上。优选地,具有按照本发明偏振控制系统的光学系统被用于具有被布置于偏振调制光学元件和光学系统中预定位置之间的至少一个附加光学元件的系统,以使光束在从偏振调制光学元件传播至预定位置时接触至少一个附加的光学元件。附加的光学元件优选地包括透镜、棱镜、反射镜、折射和衍射光学元件或含有线性双折射材料的光学元件。因此,按照本发明的光学系统可形成显微光刻投影系统 833 的部分。

[0113] 在另一个优选实施例中,偏振调制光学元件 901(如图 9 所示的片)的温度对应于预定温度分布。作为实例,这样的温度分布通过下列方式获得:使用多个红外加热器 904、905 在光学元件 901 上产生辐射分布,该辐射分布利用已经描述过的控制电路以受控的方式加热光学元件 901。在这样实施例中,同样多个温度传感器 902、903 可用于控制电路 910。利用这个实施例,可局部调节显微光刻投影系统 833 的场平面或光瞳面上的偏振状



态。

[0114] 另外,可用一个或多个珀耳帖元件 907、908 来替代或补充加热器或加热元件 904、905。一个或多个珀耳帖元件优选地被连接至控制电路 910 以使利用开环和 / 或闭环控制的控制是可能的。珀耳帖元件的优点是,可取得偏振调制光学元件 901 的受控冷却。同时加热或冷却光学元件 901 导致偏振调制光学元件 901 中复杂的温度分布,在通过元件 901 之后,其导致传过比如显微光刻投影系统 833 的光 950 的复杂的偏振分布。当然,除上述之外的其他加热或冷却机构可用来取得偏振调制光学元件 901 的所需的温度分布或所需的温度。

[0115] 如偏振调制光学元件 801 的平面片 901 在显微光刻投影设备 833(参见图 8) 的照明系统中的应用,优选地位于光瞳面 845 和 / 或光源单元 835 和所述光瞳面 845 之间的位置处。在这些位置上使用平面片 901 具有下列优点:通过片 901 并通过显微光刻投影设备的光的入射角小于大约  $6^\circ$  (100mrad)。如果光在进入片 901 之前是线性偏振的,在这些小的角度下,由片 901 导致的线性双折射的影响非常小以使通过片 901 的光的偏振几乎同忽略的椭圆部分呈线性关系。

[0116] 在本发明的另一个优选实施例中,测量通过按照本发明的偏振调制光学元件 901 或光学系统的光的偏振状态。为此,偏振控制系统包含偏振测量装置,其提供代表或等于光学系统中预定位置处的光束的偏振或偏振分布的偏振值。另外,控制电路根据温度传感器的值和 / 或偏振值通过开环或闭环控制来控制至少一个加热或冷却装置。测定的偏振状态与需要的状态相比较,并且在测定的状态偏离容限值更多的情况下,如平面片 901 这样的偏振调制元件的温度和 / 或温度分布被改变以使测得的和需要的偏振状态之间的差异变得更小,并且如果可能则小到使差异在容限值内。在图 9 中,取决于偏振测量装置 960,偏振状态的测量在原处或利用单独的特定测量方法来测量。偏振测量装置可与控制电路 910 相连,以使取决于测定的偏振状态值,加热机构 904、905 和 / 或 907、908 被控制加热和 / 或冷却以使测得的和需要的偏振状态之间的差异变得更小。在开环或闭环形式中可实施控制。

[0117] 用作偏振调制光学元件或作为这样的元件一部分的平面片 901 尤其适合用来校正通过的光束的偏振状态的取向。

[0118] 在本发明的另一个实施例中,用作偏振调制光学元件的平面片 901(包含或由旋光材料组成)与包含或由线性双折射材料组成的片 971 结合(参见图 10)。利用本发明的这个实施例中,通过的光束 950 的取向和相位可被支配以使比如平面偏振光束在通过平面片 901 和 971 之后变为椭圆偏振,或反之亦然。在这个实施例中,如同结合图 9 所描述的,至少一个片 901 或 971 在其温度和 / 或温度分布方面被控制。另外,可改变片 901 和 971 的顺序以使通过的光束先通过包含或由线性双折射材料组成的片 971,然后再通过包含或由旋光材料组成的片 901,或反之亦然。优选地,这两种片沿着系统的光轴 OA 被连续布置。同样,包含或由线性双折射材料组成的不止一个片、和 / 或包含或由旋光材料组成的不止一个片可用来操纵通过的光束的偏振状态。另外,平面片 971 或 901 可通过包含旋光材料的液体隔室或小池进行互换。同样地,包含或由线性双折射材料组成的平面片 971 以及包含或由旋光材料组成的平面片 901 可被布置成以使至少一个另外的光学元件 981 被放置于这些平面片之间。这个元件 981 可以是比如透镜、衍射或折射光学元件、反射镜或附加的平面片。

[0119] 在本发明附加的实施例中,偏振调制元件或通常为偏振光学元件是温度补偿的,

以此减少由于偏振调制元件的温度波动而由所述元件产生的偏振分布的任何误差,对于合成石英材料来说,这些误差由石英的旋光率  $\alpha$  的线性温度系数给出(上面已经提到该系数为  $\gamma = 2.36\text{mrad}/(\text{mm}\cdot\text{K}) = 0.15^\circ /(\text{mm}\cdot\text{K})$ )。温度补偿利用存在有一种具有顺时针旋光性的石英材料和一种具有逆时针旋光性的石英材料(R-石英和L-石英)的合成石英来实现。顺时针和逆时针旋光性的各自对应的旋光率  $\alpha$  的大小几乎相等。旋光率的差异小于0.3%。合成石英具有顺时针旋光性(R-石英)还是具有逆时针旋光性(L-石英),这取决于用于合成石英制造过程的籽晶。

[0120] 如图 11 所示,R-石英和L-石英可结合用来制成热量或温度补偿的偏振调制光学元件 911。关于偏振状态的变化,这样的温度补偿的偏振调制光学元件 911 等同于厚度为  $d$  的合成石英的平面片。例如,两个平面片 921 和 931 在传过包含有温度补偿的偏振调制光学元件 911 的光学系统的光线方向 950 上被布置成彼此相邻。如此布置所述片以使一个片 931 由厚度为  $d_r$  的R-石英制成,而另外的片 921 由厚度为  $d_l$  的L-石英制成,并且  $|d_r - d_l| = d$ 。如果  $d_r$  和  $d_l$  中的较小厚度 ( $\min(d_r, d_l)$ ) 大于  $d$  或  $\min(d_r, d_l) > d$  (在大多数情形下,由于光学元件的机械稳定性,这是必需的),则偏振状态的温度相关性变为部分补偿,这意味着R-石英和L-石英片的系统的温度相关性小于  $\gamma = 2.36\text{mrad}/(\text{mm}\cdot\text{K}) = 0.15^\circ /(\text{mm}\cdot\text{K})$ ,其中  $d$  是两个片的厚度差的绝对值  $d = |d_r - d_l|$ 。下面的实例证实了这种结果。具有厚度比如  $d_r = 557.1\ \mu\text{m}$  (与入射偏振平面相比,导致现有偏振平面的  $180^\circ$  的顺时针变化) 的R-石英片 931 与具有厚度  $d_l = 557.1\ \mu\text{m} + 287.5\ \mu\text{m}$  (与入射偏振平面相比,导致现有偏振平面的  $270^\circ$  的逆时针变化) 的L-石英片 921 相结合。在光通过平面片 921、931 之后,这导致偏振平面的  $90^\circ$  的逆时针变化,对应于如果仅使用R-石英片,偏振平面的  $270^\circ$  的顺时针变化。在这种情形下,未完全获得温度补偿,但是与只使用  $d_r = 557.1\ \mu\text{m} + 287.5\ \mu\text{m}$  的R-石英片使其减至约为  $0.13^\circ /\text{K}$  相比,如果两种片同时使用的话可使其减至约为  $0.04^\circ /\text{K}$ 。这有一个温度相关的明显下降,因为即使温度将改变  $10^\circ\text{C}$ ,偏振平面的变化仍然小于  $1^\circ$ 。

[0121] 通常,由R-或L-石英制成的任何结构化的偏振调制光学元件(如结合图 3 和 4a 所描述的元件)可以和各自对应的其他石英类型(L-或R-石英)的平面片结合,以使结合的系统 911 将具有与偏振变化有关的减少的温度相关性。替代平面片,可使用同样由各自对应的其他石英类型制成的结构化光学元件,以使图 11 中所示的片 921 和 931 可以是如本说明所述的、具有相反符号的旋光率、顺时针和逆时针改变偏振状态的结构化偏振调制光学元件。

[0122] 为了概括上述温度补偿的偏振调制光学元件 911 的实例,本发明还涉及光学系统,所述的光学系统包含光轴 OA 或由传过光学系统的光束的方向给出的优选方向 950。光学系统包含由坐标系统的坐标描述的温度补偿的偏振调制光学元件 911,其中坐标系统的一个优选坐标平行于光轴 OA 或平行于所述优选方向 950。温度补偿的偏振调制光学元件 911 包含第一 921 和第二 931 偏振调制光学元件。第一和/或第二偏振调制光学元件包含固态和/或液态旋光材料以及有效光学厚度的分布,其中有效光学厚度至少作为与坐标系统的优选坐标不同的一个坐标的函数来变化。另外或可选地,第一 921 和/或第二 931 偏振调制光学元件包含固态和/或液态旋光材料,其中有效光学厚度作为与坐标系统的优选坐标不同的至少一个坐标的函数是不变的。作为附加的特征,第一和第二偏振调制光学元件 921、931 包含具有符号相反的旋光率的旋光材料,或者与第二偏振调制光学元件的旋光

材料相比,第一偏振调制光学元件包含具有相反符号的旋光率的旋光材料。在平面片的情形中,优选地第一和第二片的第一和第二厚度差异的绝对值小于较小的片的厚度。

[0123] 在本发明的附加实施例中,偏振调制元件包含经历过磁场的旋光和 / 或非旋光材料成分,以使沿着光束通过偏振调制元件的传播方向存在着磁场的场分量。可如上所述分析旋光材料分量。然而,同样可使用具有如结合旋光材料所描述的相同的或相似的结构而非旋光材料。由于法拉第效应,磁场的应用也将改变通过旋光和 / 或非旋光材料的光的偏振状态,并且可通过磁场控制偏振状态。

[0124] 在本说明中对按照本发明的偏振调制光学元件或光学系统的各种实施例进行了描述。另外,通过互换和 / 或结合个别特征和 / 或在本应用中描述的个别实施例的特征,还可获得按照本发明的偏振调制光学元件或光学系统的附加实施例。

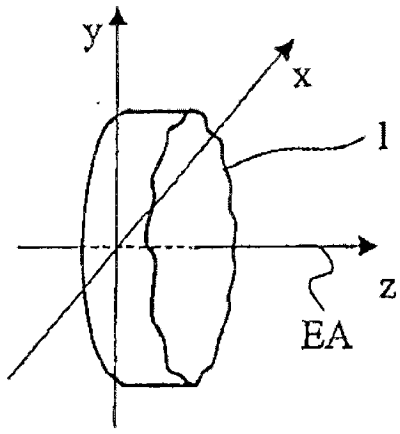


图 1

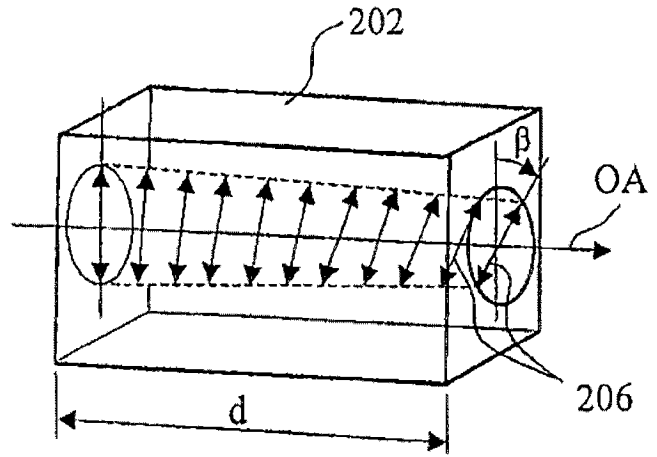


图 2

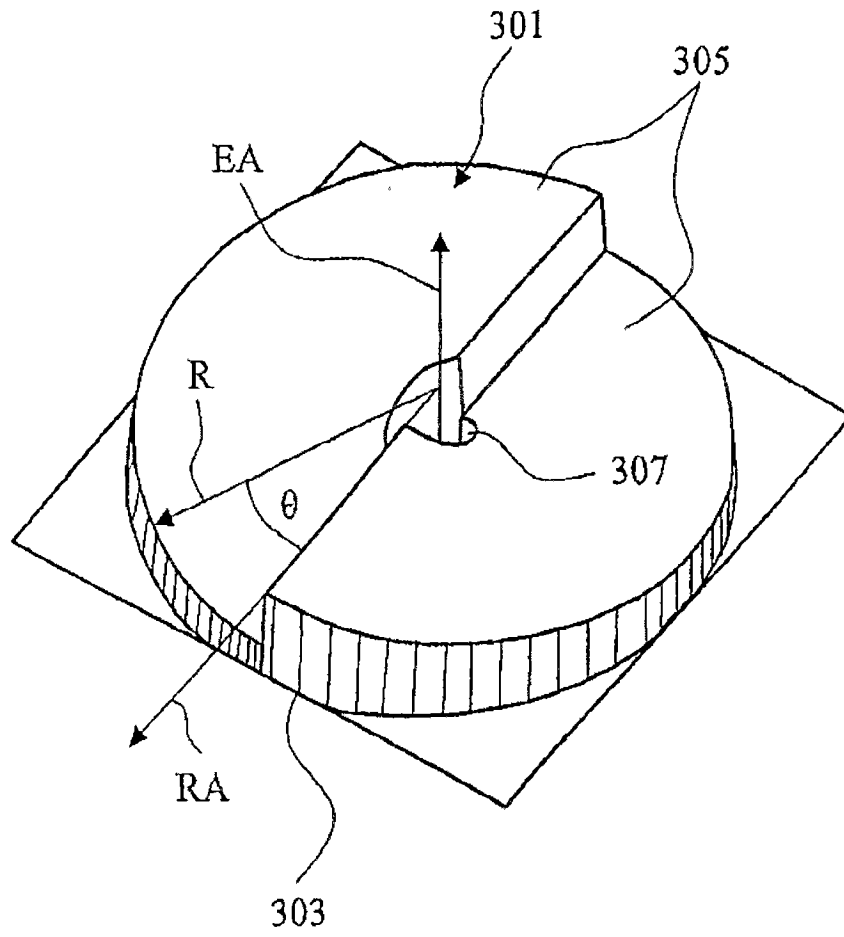


图 3

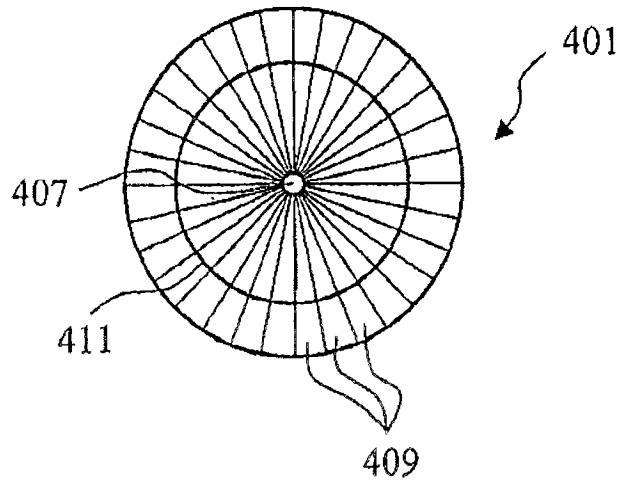


图 4a

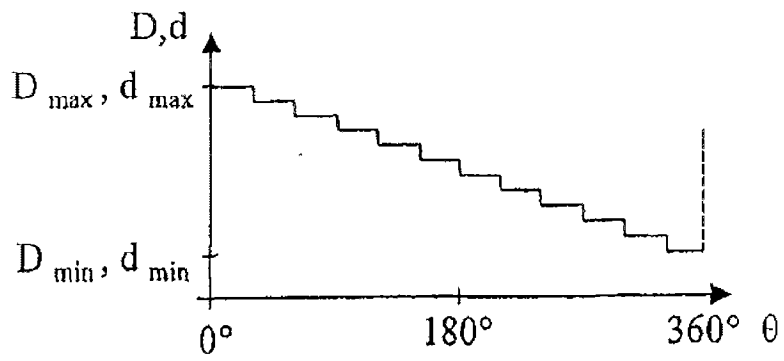


图 4b

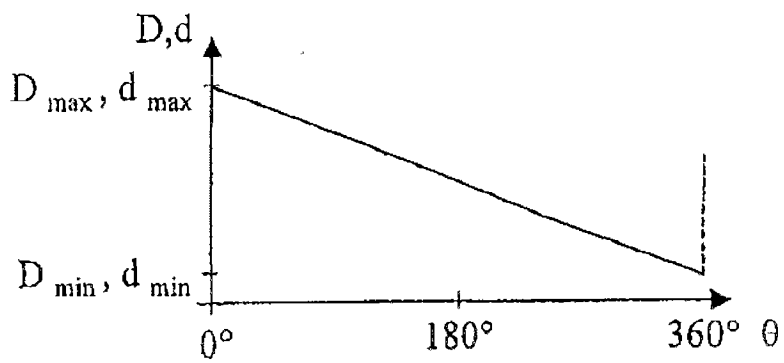


图 4c

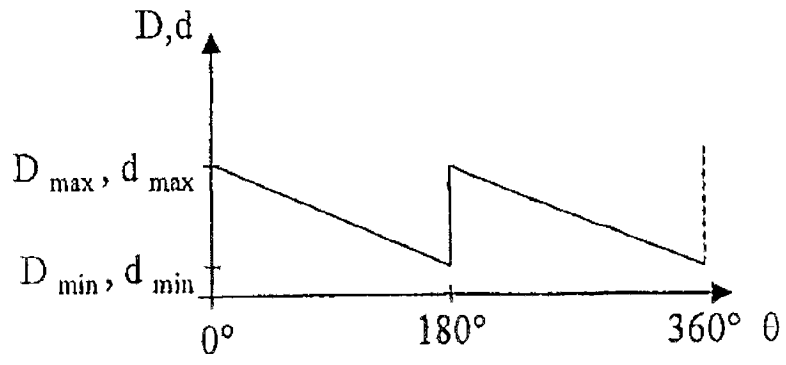


图 4d

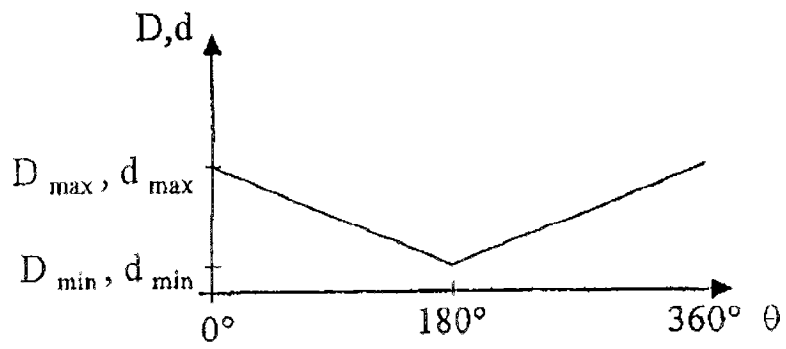


图 4e

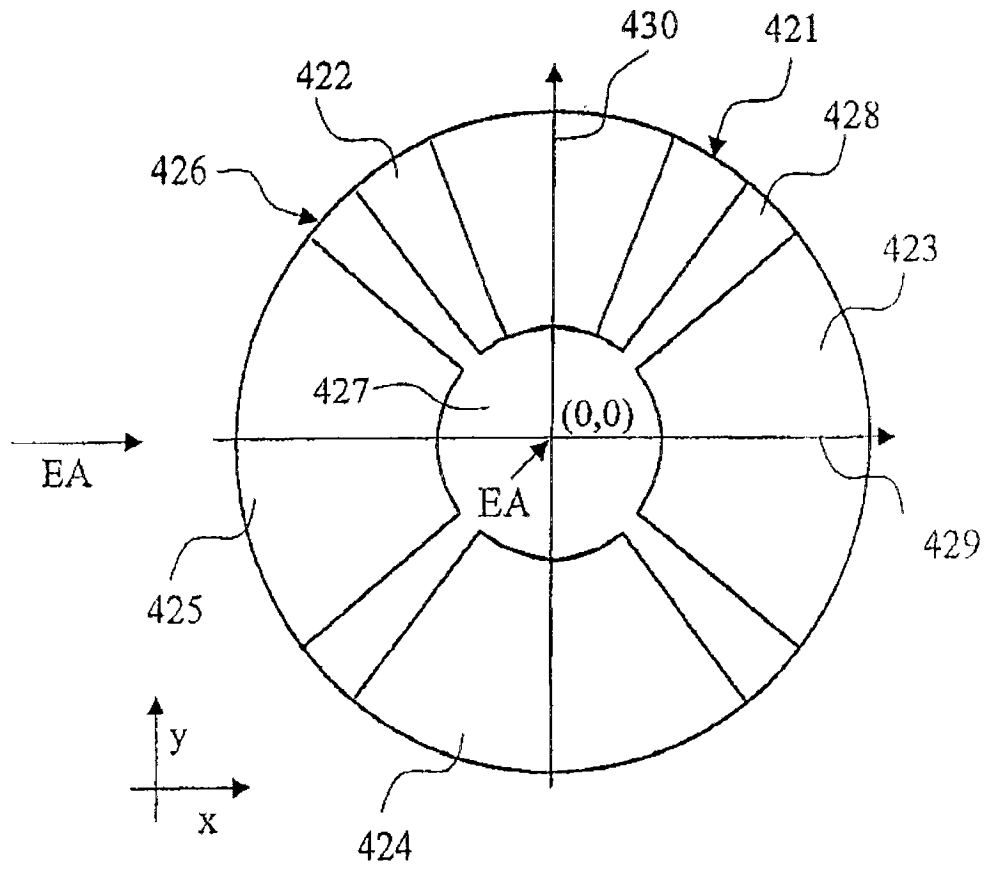


图 4f

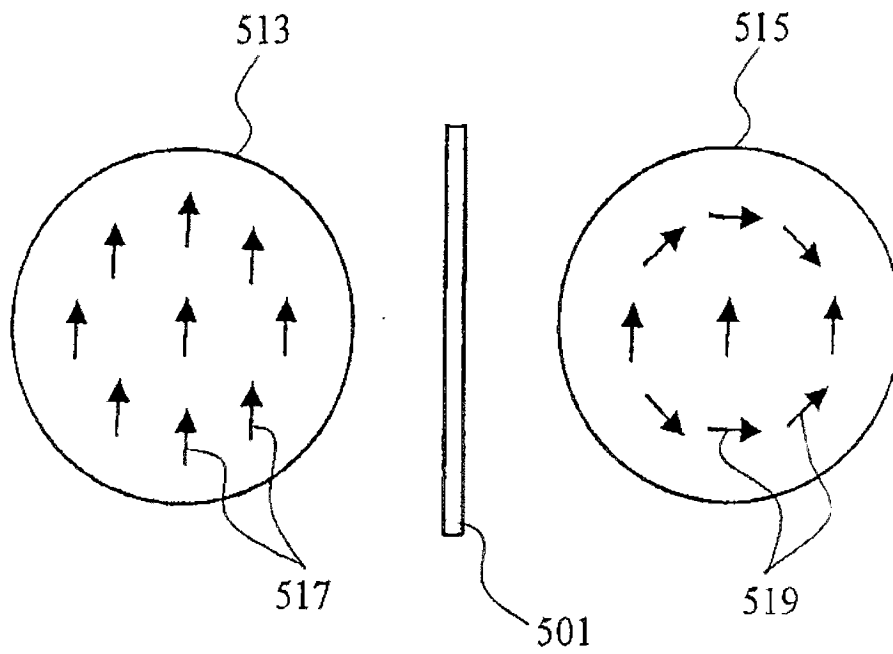


图 5

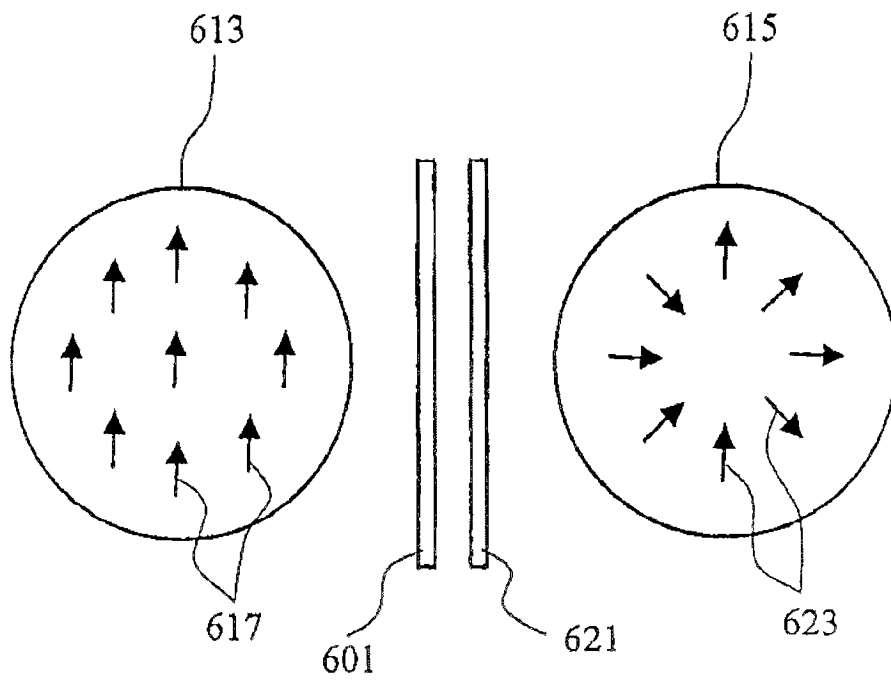


图 6

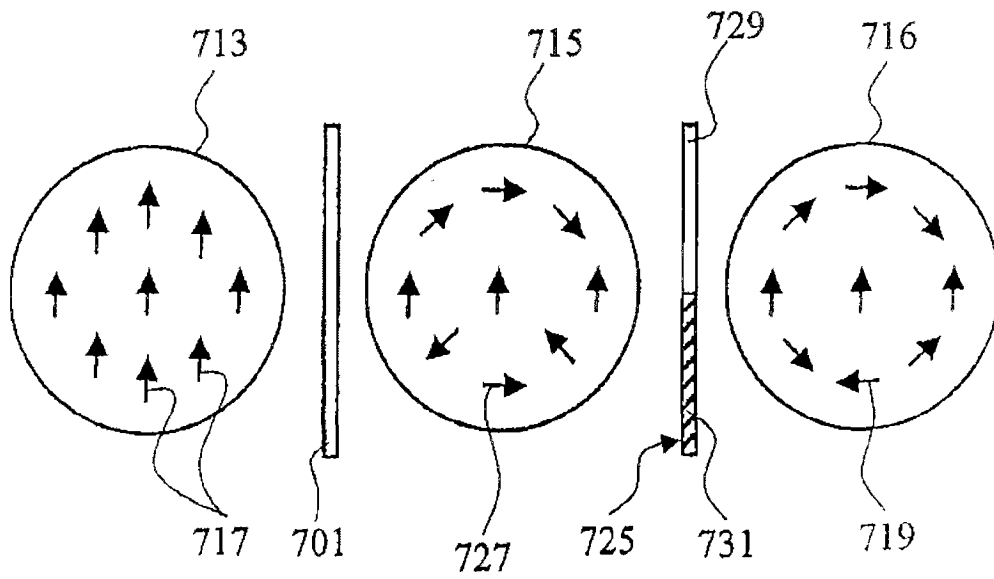


图 7a



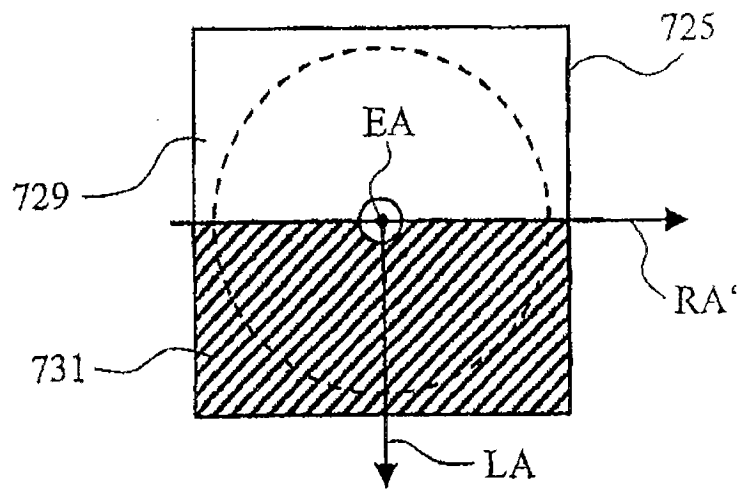


图 7b

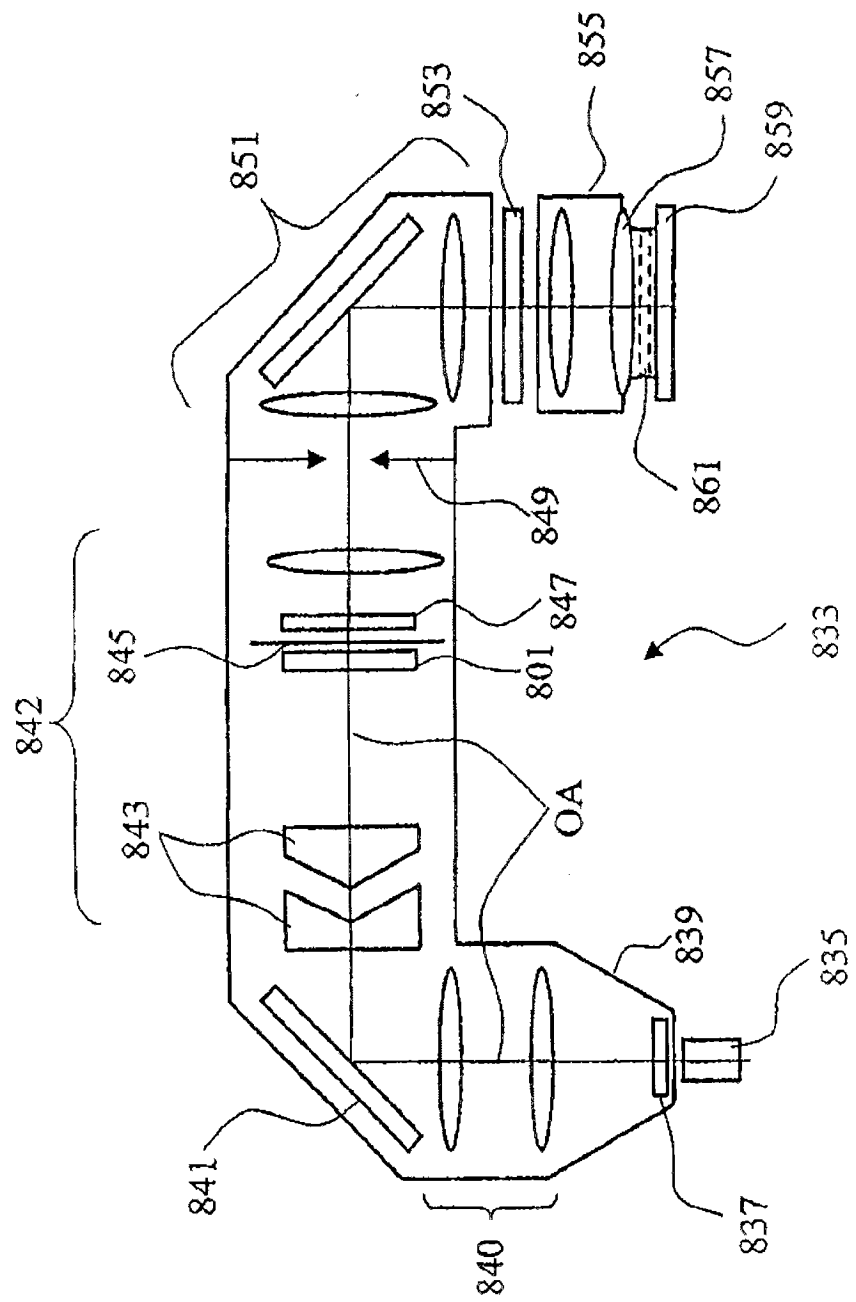


图 8

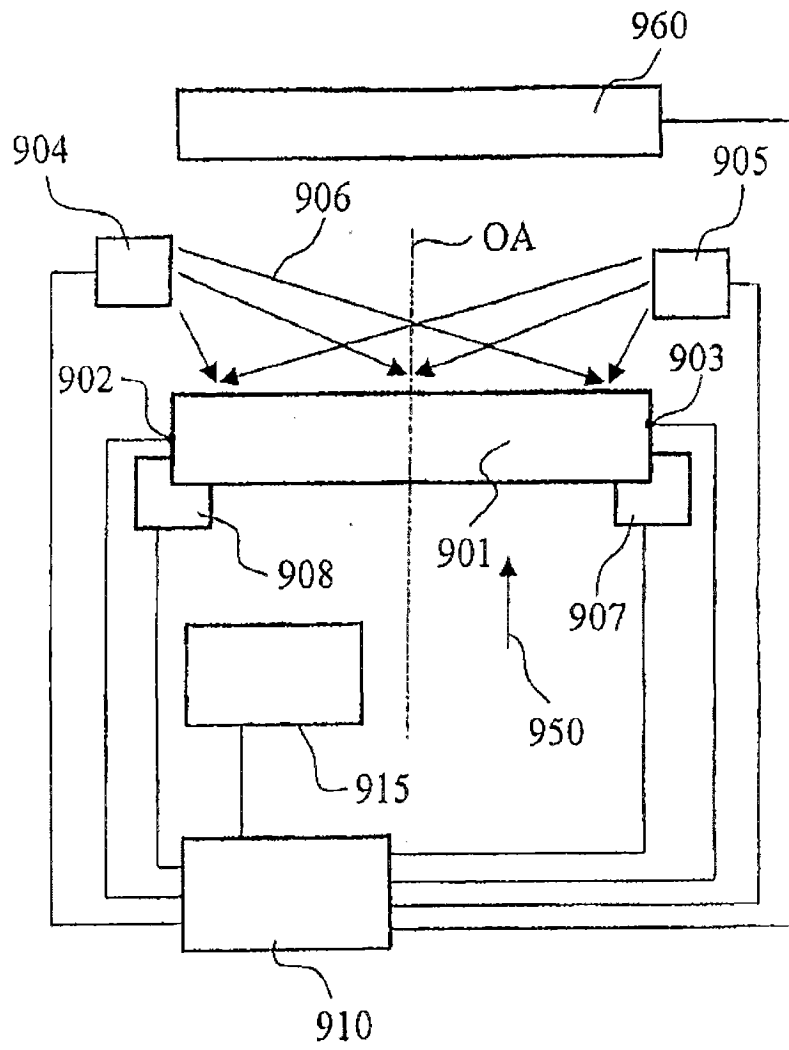


图 9

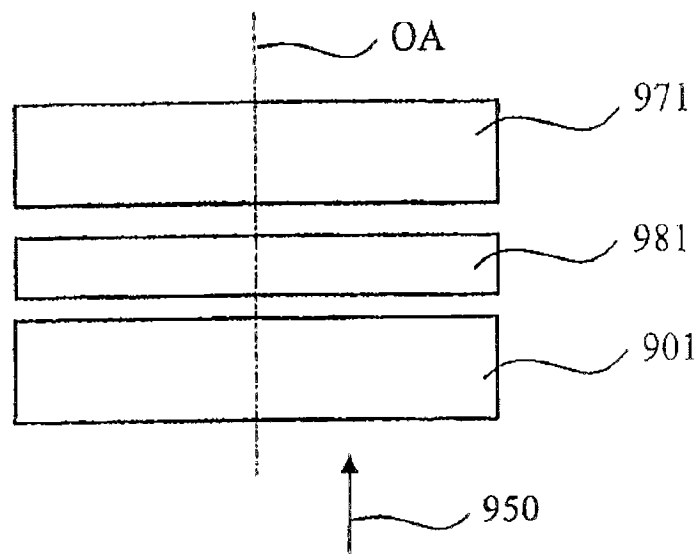


图 10

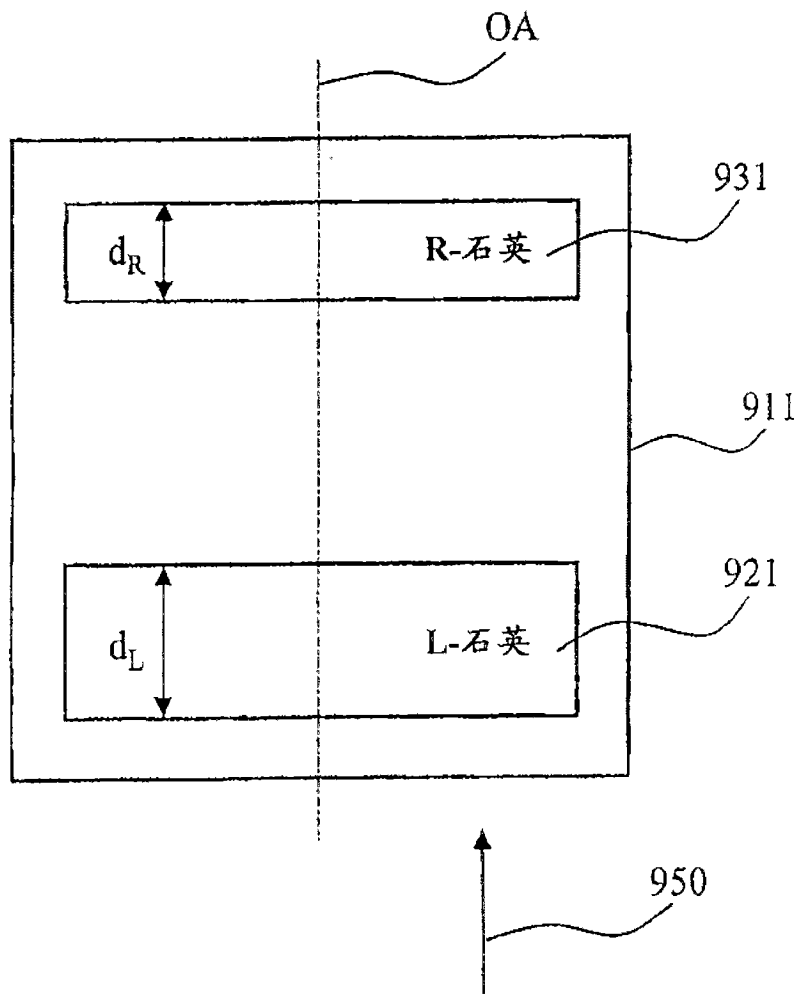


图 11