(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 103941402 A
(43)申请公布日 2014.07.23

(21)申请号 201410107835.7

(22)申请日 2014.03.22

(71)申请人 中南大学
地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72)发明人 陶少华

(74)专利代理机构 长沙市融智专利事务所 43114
代理人 黄美成

(51)Int.Cl.
G02B 27/09(2006.01)
G21K 1/00(2006.01)

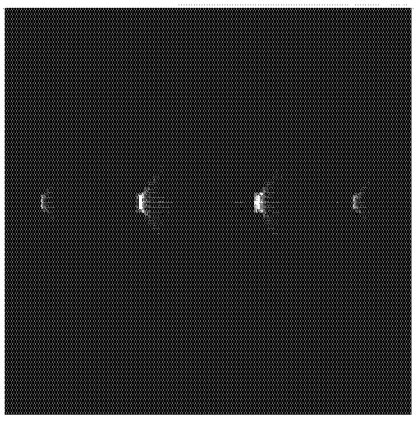
权利要求书1页 说明书9页 附图1页

(54)发明名称

产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法

(57)摘要

本发明公开了一种产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法，基于具有旋转位相分布的位相片在准直光束的照射下产生涡旋光束的整形原理，对旋转位相的方位角乘以一个比例常数且设旋转位相的旋转阶数为超高级次，从而在垂直于光轴方向的观察（或成像）平面产生光强分布类似于直线的光线，由于该光线是由旋转位相产生的，具有旋转角动量，称之为涡旋光线。该光束能在垂直于光轴的观察平面无机械移动式地移动微粒。通过叠加多个被闪耀光栅调制的旋转位相分布于同一个位相片上，可以产生平行排列的涡旋光线阵列。本发明产生的光束具有独特的光学性质，且产生方法简单、灵活，可用于光镊技术、光束整形和激光应用等领域。



CN 103941402 A

1. 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线的方法，将准直光束照射具有旋转位相分布的位相片，在与光轴方向垂直的成像平面成像；其特征在于，所述的位相片的方位角为：

$\theta = a \cdot y/x$；

式中，x 和 y 分别为 x 和 y 轴方向的坐标点值，a 为方位角比例常数，为实常数；且 $a \neq 1$；

位相片的旋转位相的旋转阶数的绝对值最大为位相片的长或宽（二者中较短者）像素值的一半；

所述的位相片的长宽尺寸为 M×M 像素的方形位相片，只利用位相片的一半部分，即位相片的像素为 M×(M / 2)，此时，在成像平面上得到一条具有旋转角动量的光线，即涡旋光线。

2. 根据权利要求 1 所述的产生具有旋转角动量的涡旋光线的方法，其特征在于，a 的绝对值的实用取值范围为 0.01-100，且 $a \neq 1$。

3. 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线阵列的方法，其特征在于，在权利要求 1 或 2 中的位相片上叠加 N-1 个相位图形成具有新的旋转位相分布的位相片，N 为整数，且 $N \geq 2$：

用准直光束照射位相片，在成像平面内形成包含 N 条涡旋光线的涡旋光线阵列；

所述的具有新的旋转位相分布的位相片的位相分布如下式表示：

$$\theta_{final} = angle[\exp(i \cdot n_1 \cdot \theta_1 + i \cdot k \cdot tg\alpha_1 \cdot x) + \exp(i \cdot n_2 \cdot \theta_2 + i \cdot k \cdot tg\alpha_2 \cdot x) + \exp(i \cdot n_3 \cdot \theta_3 + i \cdot k \cdot tg\alpha_3 \cdot x) + \ldots + \exp(i \cdot n_N \cdot \theta_N + i \cdot k \cdot tg\alpha_N \cdot x)] \quad (1)$$

其中 θ_{final} 为 N 个位相图叠加后的位相分布，angle() 为求复数的位相角的函数，i 是复数符号；$k = 2\pi / \lambda$，λ 表示入射光波波长，x 为入射光在光栅上的水平变量；

n_i 表示旋转位相的旋转阶数，$i = 1, 2, \ldots, N$；

θ_i 表示第 i 个位相图的方位角，$i = 1, 2, \ldots, N$；

α_i 表示第 i 个闪耀光栅的位相分布阶梯的倾斜角度，$i = 1, 2, \ldots, N$；

$\exp(i \cdot k \cdot tg\alpha_i \cdot x)$ 为由第 i 个闪耀光栅引起的位相；

涡旋光线阵列中的相邻涡旋光线的间隔距离为 $f \cdot tg[(m+1) \cdot 2\alpha] - f \cdot tg(m \cdot 2\alpha)$，其中 f 为透镜焦距，m 为光栅衍射级次，取整数；

产生每个涡旋光线的位相分布上所叠加的闪耀光栅的闪耀角都是互不相同的。

产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法

技术领域

[0001] 本发明属于光束整形、光束应用和光镊技术等领域，利用光束整形的方法产生涡旋光线或涡旋光线阵列，可用于激光在成像平面无机械操控地移动微粒、激光加工、或新型光束性质分析等，本发明具体涉及一种产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法。

背景技术

[0002] 近年来，随着光束整形技术和微纳技术的发展，光镊技术在物理、电子、化学、材料、冶金、医药、生物等众多领域得到了广泛的关注和实际应用。光镊技术是利用高度聚焦的激光光束固定、移动、拉伸、或旋转等手段操控微米、纳米，甚至原子级别的微小物体的技术。例如，利用光镊，可以将微米级别的物体固定在溶液中的某一位置，或无物理接触式地将物体从一个地方移到另一个地方，或者旋转物体，或者拉伸或压缩物体，等等。相比其它机械式接触和操控物体的方法，光镊具有无接触、无损伤、精确地操控微粒的优点。众所周知，激光光束是由光子组成，且光子具有动量。当高度聚焦的激光光束遇到微小物体时，光束会发生反射、折射、或被吸收，即光子的动量发生了改变，由此会产生冲量，发生作用力与反作用力。根据光束被物体反射、折射、或吸收的类型，激光光束产生的力会使被照射物体产生向光束聚焦中心靠近或远离的运动，即微粒会沿着光子流动方向正向或反向运动。但是，在实际应用中，我们可能需要微粒在垂直于光束传播方向的平面移动，例如，当我们利用显微镜的物镜聚焦光束时，显微镜观察平面和光束传播方向是互相垂直的。因此，要操控显微镜观察平面中的微粒，一般利用在观察平面移动光束或移动显微镜载物台的方法来实现，但是上述方法受到光束或载物平台的机械移动装置的精度限制，而且有些操作如物体旋转或按指定路线移动就很难实现。Brzobohatý [1] 等人利用两束互成一定角度的光束产生名为”tractorbeam”的光束，这种光束的合力方向落在显微镜的观察平面，由此可以驱动微粒在观察平面运动。Kajorndejnukul [2]，Mansuripur[3] 等人则利用被照射微粒的棱镜效应，使微粒附近的较小物体在观察平面移动并靠近或远离该微粒。但是，上述方法都存在微粒操控距离短，操控光束形成条件苛刻等问题。虽然利用光束的旋转位相或偏振特性可以使微粒在垂直于光束传播方向的观察平面旋转，如涡旋光束 [4] 和圆偏振光束 [5]，但是该类光束只能使微粒旋转，无法使微粒在观察平面沿直线移动。虽然利用放置在观察平面的光波导可以使微粒沿着波导运动 [6]，但是光波导的制作和光耦合仍然是非常棘手的难题。由于光波导的截面尺寸在微米或亚微米级别，且材料的选用需要考虑溶液的折射率而不是空气的折射率，另一方面，外部光源的光束与光波导之间高效且方便的光耦合仍是目前的技术瓶颈之一，因此，光波导用于光镊的应用仍受到制约。

[0003] 因此，有必要设计一种产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法。

[0004] 相关参考文献如下：

[0005] 1. Brzobohatý, O., Karásek, V., Siler, M., Chvátal, L., Čižmár, T., & Zemánek, 利用拖拉型光束实验展示光学输运、筛选和自组装，《自然光子学》，卷 7，123-127 页，2013

年。[Brzobohatý, O., Karásek, V., Šiler, M., Chvátal, L., Čižmár, T., & Zemánek,7, 123-127.(2013).Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a tractor beam.Nature Photonics.]

[0006] 2.Kajornd ejnukul, V., Ding, W., Sukhov, S., Qiu, C.W., Dogariu, A. 介质界面的线性动量增加与负光学力,《自然光子学》,卷 7,787-790 页,2013 年.[Kajomd ejnukul, V., Ding, W., Sukhov, S., Qiu, C.W., & Dogariu, A.(2013).Linear momentum increase and negative optical forces at dielectricinterface.Nature Photonics,7(10), 787-790.]

[0007] 3.Mansuripur,M. 光学操控:动量交换效应,《自然光子学》,卷 7,765-766 页,2013 年.[Mansuripur, M.(2013).Optical manipulation:Momentum exchange effect.Nature Photonics,7(10),765-766.]

[0008] 4.Gahagan,K.T.,Swartzlander Jr,G.A. 光学涡旋捕获微粒,《光学快报》,卷 21, 827-829 页,1996 年。[Gahagan, K.T., & Swartzlander Jr, G.A.(1996).Optical vortex trapping of particles.Optics Letters,21(11),827-829.]

[0009] 5.M.E.J.Friese, T.A.Nieminen, N.R.Heckenberg, H.Rubinsztein-Dunlop, 激光捕获的微粒的光学对准与旋转,《自然》,卷 394,348-350 页,1998 年。[M.E.J.Friese, T.A.Nieminen, N.R.Heckenberg, and H.Rubinsztein-Dunlop. "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles," Natu re394,348-350(1998).]

[0010] 6.Yang, A.H., Moore, S.D., Schmidt, B.S., Klug, M., Lipson, M., Erickson, D. 亚波长条形博导光学操控纳米颗粒与生物分子,《自然》,卷 457,71-75 页,2009 年。[Yang, A.H., Moore, S.D., Schmidt, B.S., Klug, M., Lipson, M., & Erickson, D.(2009). Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides.Nature,457(7225),71-75.]

[0011] 7. Čižmár, T., Siler, M., Šerý, M., Zemánek, P., Garcés-Chávez, V., Dholakia, K. 利用移动的驻波光学筛选与探测亚微米物体物理评论 B,卷 74,035105 页,2006 年。[Čižmár, T., Šiler, M., Šerý, M., Zemánek, P., Garcés-Chávez, V., & Dholakia, K.(2006). Optical sorting and detection of submicrometer objects in a motional standing wave.Physical Review B,74(3),035105.]

发明内容

[0012] 本发明所要解决的技术问题是提供一种产生具有旋转角动量的涡旋光线和

[0013] 涡旋光线阵列的方法,该产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法实施方便,产生方法简单、灵活。

[0014] 发明的技术解决方案如下:

[0015] 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线的方法,将准直光束照射具有旋转位相分布的位相片,在与光轴方向垂直的成像平面成像;其特征在于,所述的位相片的方位角为:【方位角又称 Azimuth angle,是从某点的指北方向线起,依顺时针方向到目标方向线之间的水平夹角。】

[0016] $\theta = a \cdot y/x$；

[0017] 式中，x 和 y 分别为 x 和 y 轴方向的坐标点值，a 为方位角比例常数，为实常数；且 $a \neq 1$；【a 取 1 的时候，成像是圆形的，a 的绝对值取值离 1 越远，成像越接近直线】

[0018] 【在二维平面内，平面上任一点的坐标为 (x,y)，该点取值由上式确定，即方位角大小范围为 0-2pi，该值即为位相片的位相值。如果用灰度图来画出这些位相值分布，将位相值 0-2pi 与灰度值 0-256 对应，即可画出位相图。】

[0019] 位相片的旋转位相的旋转阶数的绝对值最大为位相片的长或宽（二者中较短者）像素值的一半；

[0020] 所述的位相片的长宽尺寸为 M×M 像素的方形位相片，只利用所述位相片一半即像素为 M×(M / 2) 时，将在成像平面上得到一条具有旋转角动量的光线，即涡旋光线。将此 M×(M / 2) 位相片扩展为 M×M 像素的位相片后将仍然产生一条涡旋光线 a 的绝对值的实用取值范围为 0.01-100，且 $a \neq 1$。

[0021] 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线阵列的方法，在前述的位相片上叠加 N-1 个相位图形成具有新的旋转位相分布的位相片，N 为整数，且 $N \geq 2$；【叠加是按式 (1) 方法叠加；或直接将每个位相图对应位相值与另一个位相图对应的位相值直接相加，例如，甲位相图的 m 行 n 列点的灰度值为 100，则其对应的位相为 2pi*100 / 256，乙位相图的 m 行 n 列点的灰度值为 150，则其对应的位相为 2pi*150 / 256，叠加后的位相图的 m 行 n 列点的位相为 2pi*150 / 256，将其换算为灰度值，依次对所有点进行同样操作即可得到叠加后相应的位相灰度图。】用准直光束照射位相片，在成像平面内形成包含 N 条涡旋光线的涡旋光线阵列；所述的具有新的旋转位相分布的位相片的位相分布如下式表示：

[0022] $\theta_{final} = \text{angle}[\exp(i \cdot n_1 \cdot \theta_1 + i \cdot k \cdot tg\alpha_1 \cdot x) + \exp(i \cdot n_2 \cdot \theta_2 + i \cdot k \cdot tg\alpha_2 \cdot x) +$

[0023] $\exp(i \cdot n_3 \cdot \theta_3 + i \cdot k \cdot tg\alpha_3 \cdot x) + \ldots + \exp(i \cdot n_N \cdot \theta_N + i \cdot k \cdot tg\alpha_N \cdot x)]$ (1)

[0024] 【第一位相也加了一个闪耀光栅】

[0025] 其中 θ_{final}，为 N 个位相图叠加后的位相分布，angle() 为求复数的位相角的函数，i 是复数符号；$k = 2\pi / \lambda$，λ 表示入射光波波长，x 为入射光在光栅上的水平变量；

[0026] 【i 是虚数单位】；

[0027] n_i 表示旋转位相的旋转阶数，$i = 1, 2, \ldots, N$；

[0028] θ_i 表示第 i 个位相图的方位角，$i = 1, 2, \ldots, N$；

[0029] α_i 表示第 i 个闪耀光栅的位相分布阶梯的倾斜角度，$i = 1, 2, \ldots, N$；

[0030] $\exp(i \cdot k \cdot tg\alpha_i \cdot x)$ 为由第 i 个闪耀光栅引起的位相；

[0031] 涡旋光线阵列中的相邻涡旋光线的间隔距离为 $f \cdot tg[(m+1) \cdot 2\alpha] - f \cdot tg(m \cdot 2\alpha)$，其中 f 为透镜焦距，m 为光栅衍射级次，取整数，【m 只能取整数，如 -3,-2,-1,0,1,2,3 等，m 值绝对值越大，光束偏离光轴的距离越大。此外，通过旋转位相片的位相分布与 x 轴成一角度，如 30 度，90 度，120 度等，产生的涡旋光线也会旋转同样的角度；还可以通过旋转叠加的光栅位相分布与 x 轴成一角度，如 30 度，90 度，120 度等，产生的涡旋光线也会旋转同样的角度。产生旋转光束或光线阵列的位相片均为一个位相片】；【在每个只产生一条涡旋光线的位相分布上分别叠加一个闪耀光栅的位相分布，然后将叠加了位相光栅分布的所有单个涡旋光线的位相分布按式 (1) 或直接相加后便产生一个最终的位相分布，该位相分布被制做成位相片后，便可产生涡旋光线阵列。】

[0032] 产生每个涡旋光线的位相分布上所叠加的闪耀光栅的闪耀角都是互不相同的；

[0033] 【分隔距离由成像接收面大小决定，最大不超过接收面的长度或宽度。d 的取值由涡旋光线分隔距离来决定，一般在微米级别。如有 k 根光线，则 d 的最大值为 L / (k+1)，L 为接收面的边长，最小为光线的线条宽度。】【首先，计算出产生单个涡旋光线的位相分布，然后根据要产生的涡旋光线在成像平面上的位置计算出所用的闪耀光栅的闪耀角，将此闪耀光栅的位相分布与产生单个涡旋光线的位相分布相加，获得一个新的位相分布，如果将该位相分布制成位相片后，可以在指定的位置产生一条涡旋光线；类似地，利用产生单个涡旋光线的位相分布，然后根据要产生的涡旋光线在成像平面上的另一个位置计算出所用的闪耀光栅的闪耀角，将此闪耀光栅的位相分布与产生单个涡旋光线的位相分布相加，获得一个叠加的位相分布，如果将该位相分布制成位相片后，可以在另一指定的位置产生一条涡旋光线；依此类推，例如，若需要最终产生一组 4 条分开的涡旋光线，需要依上述方法分别计算出 4 个叠加了不同闪耀角光栅位相分布的涡旋光线位相分布，然后，将这 4 个位相分布直接叠加，最终形成一个位相分布，将此位相分布制作成位相片后，便可以使入射光束在成像平面形成 4 条分开的涡旋光线阵列了。】

[0034] 也可以通过 G-S 算法类的程序直接控制光束的振幅和位相，但这种方法与本文方法完全不同，所以不用保护。

[0035] 本发明的核心构思为：利用光束照射具有旋转位相分布的位相片产生涡旋光束的原理，将旋转位相的方位角乘以一个比例常数，该常数为正实数，且旋转位相的阶数根据位相片的像素数来决定，设为尽可能高。本例中位相片的像素数为 512×512，阶数设为 200，从而在与光轴方向垂直的成像平面产生具有近似直线线型分布的两条平行光线，由于该光线具有旋转角动量，称之为涡旋光线。

[0036] 如果只利用前述位相片的半部分，可产生一条涡旋光线。

[0037] (1) 利用不同闪耀角或不同放置方向的闪耀光栅调制权利 (2) 中的位相分布，可在成像平面的指定位置产生一条涡旋光线。若将多个被不同闪耀光栅调制的位相分布相互叠加，形成一个新的位相片，利用准直光束照射该位相片，可产生平行的涡旋光线阵列。

[0038] (2) 利用权利要求 (2) 中的位相片和不同的闪耀光栅调制，可以实现不同位置，不同放置方向，不同旋转角动量旋转方向，或不同间隔距离的涡旋光线或涡旋光线阵列。

[0039] 本发明的具体技术原理说明如下：

[0040] 我们知道，具有旋转位相分布的光束其远场为中心黑暗的圆环图像，该圆环即为涡旋光束。当微小物体被光束所形成的圆环捕获时，涡旋光束所具有的旋转角动量会推动物体沿着圆环旋转。涡旋光束的位相表达式为 $\exp(\pm in\theta)$，其中 ± 取值表示位相的旋转方向，i 为虚数单位，n 为涡旋光束的旋转阶数，θ 为方位角，可表达为 $\theta = y / x$，其中，x，y 分别为 x，y 方向的二维点阵分布。具有旋转位相的光束会在远场产生强度分布为中心暗斑的圆环。随着旋转阶数的增加，圆环的直径也相应增加。如图 1-4 所示，图 1 为产生涡旋光束的位相分布，其旋转阶数为 1，图 2 为涡旋光束的远场光强分布，图 3 为产生旋转阶数为 20 的涡旋光束的位相分布，图 4 为相应的远场光强分布。从图一中可看出，涡旋光束的旋转阶数越高，光环直径越大。同时，较高级次涡旋光束所具有的旋转角动量越高。但是，高级次涡旋光束的产生受到衍射光学元件象素数的分辨率限制，不能无限制地增加。例如，对于一个像素数为 512×512 的衍射光学元件，其产生的涡旋光束的位相旋转阶数无法大于 256。

[0041] 为了产生具有旋转角动量的直线型光束，我们对方位角的分布做出修改，即方位角表示为：

[0042] $\theta = \alpha \cdot y / x$ (1)

[0043] 式中，x 和 y 分别为 x 和 y 轴方向的坐标点值，a 为方位角比例常数，为实常数。这样，利用式 (1) 所示的位相分布产生的涡旋光束的光强分布不再是圆形，而是根据 a 的取值，光环在 x 或 y 方向受到压缩，变成了狭长的椭圆形。本发明中，首先，设定要产生涡旋光束的位相片的像素数为 512×512，像素点大小为 15μm×15μm，所用光波波长为 532nm，利用 exp(±in θ) 和式 (1) 中的方位角产生点阵状的位相分布，其中 n=200，位相分布取值范围为 0-2π。如图 5-6 所示，图 5 为产生旋转阶数为 200 的涡旋光束的位相分布，其中 a=8。位相值用灰度表示，图中灰度值 0-255 线性对应位相值 0-2π。当扩束并准直的激光照射到利用图 5 中的位相分布制作的位相元件，经过凸透镜的汇聚，即傅立叶变换，在成像焦面上将会得到衍射图像。图 6 为成像焦平面上的涡旋光束的光强分布。从图 6 中可看出，两条较长的椭圆边近乎直线，且相互平行，由于该光束的光强分布呈线状，位相分布为螺旋形，因此，我们称该光束为涡旋光线。根据图 5 中的位相图分布可知，产生的这两条光线的旋转角动量的旋转方向相反，大小相等。很明显，这两条椭圆边分别是由图 5 中的位相分布的上半部分和下半部分分别产生的。

[0044] 因此，如果我们只用图 5 中位相图的上半部分或下半部分，则只会产生一条近似直线的涡旋光线，将此 M×(M / 2) 位相片扩展为 M×M 像素的位相片将仍然产生一条涡旋光线，如图 7-8 所示，图 7 为图 5 中位相分布图的上半部分，图 8 为产生的相应的涡旋光线的光强分布。需要指出的是，涡旋光线本身的相位旋转方向由图 7 中的位相图决定。

[0045] 利用图 7-8 的方法可以产生一条涡旋光线，若要产生多条相互平行的涡旋光线，即涡旋光线阵列，类似于光波导阵列，则可以利用多个如图 7 所示的位相图，按下式方法叠加后而成，即

[0046] $\theta_{final}=\text{angle}[\exp(in_1\theta_1)+\exp(in_2\theta_2)+\exp(in_3\theta_3)+...+\exp(in_N\theta_N)]$ (2)

[0047] 其中，angle() 为求复数的位相角的函数，θ_{final} 为 N 个位相图叠加后的位相分布。为了控制光线阵列之间的相隔距离，我们在每个只产生一条涡旋光线的位相图上分别叠加一个闪耀光栅的位相分布，(2) 式可写为，

[0048] $\theta_{fianl}=\text{angle}[\exp(i\cdot n_1\cdot\theta_1+i\cdot k\cdot tg\alpha_1\cdot x)+\exp(i\cdot n_2\cdot\theta_2+i\cdot k\cdot tg\alpha_2\cdot x)+$

[0049] $\exp(i\cdot n_3\cdot\theta_3+i\cdot k\cdot tg\alpha_3\cdot x)+...+\exp(i\cdot n_N\cdot\theta_N+i\cdot k\cdot tg\alpha_N\cdot x)]$

[0050] (3)

[0051] 闪耀光栅是由位相分布呈锯齿形的线槽断面结构组成，其衍射能级的光能量集中某一方向上，即某一光谱级上。锯齿形位相分布与光栅平面的夹角称为闪耀角。闪耀光栅的位相分布阶梯的倾斜角度用 α 表示，则闪耀光栅引起的位相为 $\exp(i\cdot k\cdot tg\alpha\cdot x)$，其中 $k=2\pi/\lambda$，λ 表示入射光波波长，x 为入射光在光栅上的水平变量。并且所有叠加位相图上每个闪耀光栅的闪耀角都是互不相同的，其中，闪耀角的选定是根据要产生的涡旋光线阵列之间的分隔距离来确定的。闪耀角的取值是根据衍射图像指定出现的方位来决定的。当光束沿光栅平面法线方向入射时，其衍射角满足关系式 $d\cdot\sin(2\alpha)=m\cdot\lambda$，其中 d 为光栅常数，m 为光栅衍射级次，取整数，因此，衍射图像偏离光轴方向的角度可表示为 2α。间隔距离为 $f\cdot tg[(m+1)\cdot 2\alpha]-f\cdot tg(m\cdot 2\alpha)$，其中 f 为透镜焦距，m 为整数。本例中，

λ=532nm，x=15μm，2α ≈ 17°，m取值为1，2，3，f=10cm。

[0052] 如图9-10所示，图9为4个叠加了不同闪耀光栅的涡旋光线位相分布图，其中，每个未叠加闪耀光栅的涡旋光线位相分布图都如图7所示。图10为产生的相应涡旋光线阵列的光强分布图。

[0053] 此外，通过在叠加具有一定旋转角度的闪耀光栅到图7或图9中产生涡旋光线或涡旋光线阵列的位相图中，就可以得到与图8或图10中光线竖直方向成一定角度的光线或光线阵列分布。在图9-10中，我们还可以叠加不同级次的涡旋位相图，从而产生具有不同旋转角动量的涡旋光线阵列分布。例如，让涡旋阵列中的四根涡旋光线的旋转阶次分别为200，-200，190，-190，或为180，190，200，210，或其它任何高旋转阶次的组合。另外，通过控制叠加的闪耀光栅的闪耀角或放置方向，我们还可以控制涡旋光线的间距、成像位置和排列方位。例如，调整闪耀光栅的闪耀角，可以使涡旋光线之间的间距变大或变小。为了使涡旋光线成像在指定的位置，如使涡旋光线呈倾斜阶梯状分布，除了在每个产生涡旋光线的位相分布上叠加一个沿Y方向放置的闪耀光栅外，还需要在该位相分布上叠加一个沿X方向放置的闪耀光栅，从而使产生的涡旋光线在X方向上也产生偏移。例如，为了使四条涡旋光线分别按正方形的四条边摆放形式，我们将产生单个涡旋光线的位相分布分别旋转0°，90°，180°，270°后分别与闪耀光栅相叠加，叠加后的总的位相即可产生上述分布的涡旋光线组合。

[0054] 实验上可以利用制作的微光学元件或空间光调制器来整形激光光束实现上述的涡旋光线或涡旋光线阵列。例如，用微制作的方法将上述的位相分布图制作成为浮雕图形，其中浮雕图的蚀刻深度与位相值的大小对应，或利用空间光调制器的液晶平面，利用电脑将上述的位相分布图对应的灰度图上载到液晶平面，从而控制液晶平面所对应的每个象素点的折射率，使照射到液晶平面的光束所引起的位相差与上述的位相分布图相对应。当准直的激光光束照射到该微光学元件或空间光调制器的液晶平面时，光束会受到对应的位相分布图的调制，从而产生相应的涡旋光线或涡旋光线阵列。

[0055] 利用上述方法产生的涡旋光线或涡旋光线阵列，不仅可以用于筛选不同大小或材料的微粒，还可以利用涡旋光线的旋转角动量，完全无机械移动式地使微粒在垂直于光束传播方向的观察（或成像）平面移动。该光束可应用于光镊、光束整形、激光加工等领域。

[0056] 本发明基于涡旋光束的产生方法，利用设置涡旋光束的高旋转阶次和调整旋转位相的方位角比例，获得了光强分布呈线条状分布，但位相分布仍具有旋转角动量的涡旋光线及涡旋光线阵列。本发明中的目标光束一即涡旋光线或涡旋光线阵列都要求振幅和位相都具有指定分布，而目前还没有解析解能直接利用位相元件产生该型光束，且通过数值方法设计位相元件的光束整形算法一般只能控制目标光场的振幅或位相分布，很难同时控制目标光场的振幅和位相分布。与此对比，本方法设计简单，易于实现。利用现有的微制作方法制作位相型衍射光学元件或利用空间光调制器就可实现上述的位相分布，从而产生该类光束。本发明产生的涡旋光线或涡旋光线阵列可广泛用于光镊技术中，利用该光束，可以在垂直于光束入射的观察平面直接无接触式地移动微粒，实现光学导引、输运微粒，或光学筛选不同性质的微粒。

[0057] 有益效果：

[0058] 本发明的产生具有旋转角动量的涡旋光线和涡旋光线阵列的方法，基于具有旋转

位相分布的位相片在准直光束的照射下产生涡旋光束的整形原理，对旋转位相的方位角乘以一个比例常数且设旋转位相的旋转阶数为超高级次，如在本发明中根据所用位相片的像素数设为 200 级，从而在垂直于光轴方向的观察（或成像）平面产生光强分布类似于直线的光线，由于该光线是由旋转位相产生的，因此，仍具有旋转角动量，该光线被称之为涡旋光线。该光束能在垂直于光轴的观察（或成像）平面无机械移动式地移动微粒。通过叠加多个被闪耀光栅调制的旋转位相分布于同一个位相片上，可以产生平行排列的涡旋光线阵列。本发明产生的光束具有独特的光学性质，且产生方法简单、灵活，可用于光镊技术、光束整形和激光应用等领域。

[0059] 本发明提出一种利用光束整形方法实现的光线条的方案，该线条类似于放置在观察平面的直波导，可以使微粒在垂直于光束传播方向的观察平面直线运动，且运动路径将大于文献 [2-4] 中所提出的方法。而且，利用光束整形方法，可以在观察平面内产生类似于光波导阵列的多个平行直线条，用于光学筛选微粒 [7]，这样，不仅可以省掉制作光波导阵列所需的高昂成本和时间，还可以省掉光纤与波导耦合之间的难题。因此，本发明所提出的方法具有实现方法简便，灵活，效率高，成本低的优点。

附图说明

[0060] 图 1 为旋转阶数为 1 的涡旋光束位相分布图；

[0061] 图 2 为旋转阶数为 1 的相应的远场光强分布图；

[0062] 图 3 为旋转阶数为 20 的涡旋光束位相分布图；

[0063] 图 4 为旋转阶数为 20 的相应的远场光强分布图。

[0064] 图 5 为产生级次为 200 的椭圆涡旋光束的位相分布图，其中 a=8，灰度值 0-255 对应位相值 0-2π；

[0065] 图 6 为由图 5 所述位相分布图得到的相应光强分布（成像）图；

[0066] 图 7 为产生旋转级次为 200 的单条涡旋光线的位相分布图；

[0067] 图 8 为由图 7 所述位相分布图得到的相应光强分布（成像）图；

[0068] 图 9 为产生旋转级次为 200 的涡旋光线阵列的位相分布图

[0069] 图 10 为由图 9 所述位相分布图得到的相应光强分布（成像）图。

具体实施方式

[0070] 以下将结合附图和具体实施例对本发明做进一步详细说明：

[0071] 实施例 1：产生 1 条涡旋光线的方法：

[0072] 参见图 7-8，以及发明内容部分的说明。

[0073] 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线的方法，将准直光束照射具有旋转位相分布的位相片，在与光轴方向垂直的成像平面成像；其特征在于，所述的位相片的方位角为：【方位角又称 Azimuth angle，是从某点的指北方向线起，依顺时针方向到目标方向线之间的水平夹角。】

[0074] $\theta = a \cdot y/x$；

[0075] 式中，x 和 y 分别为 x 和 y 轴方向的坐标点值，a 为方位角比例常数，为实常数；且 $a \neq 1$；【a 取 1 的时候，成像是圆形的，a 的绝对值取值离 1 越远，成像越接近直线】

[0076] 【在二维平面内，平面上任一点的坐标为 (x,y)，该点取值由上式确定，即方位角大小范围为 0-2pi，该值即为位相片的位相值。如果用灰度图来画出这些位相值分布，将位相值 0-2pi 与灰度值 0-256 对应，即可画出位相图。】

[0077] 位相片的旋转位相的旋转阶数的绝对值最大为位相片的长或宽（二者中较短者）像素值的一半；

[0078] 当利用所述的位相片的长宽尺寸为 M×M 像素的方形位相片的一半时，即位相片的像素为 M×(M / 2)，将在成像平面上得到一条具有旋转角动量的光线，即涡旋光线，将此 M×(M / 2) 位相片扩展为 M×M 像素的位相片将仍然产生一条涡旋光线。

[0079] a 的绝对值的实用取值范围为 0.01-100，且 $a \neq 1$。

[0080] 实施例 2：产生涡旋光线阵列的方法

[0081] 参见图 9-10，以及发明内容部分的说明。

[0082] 一种产生具有旋转角动量的涡旋光线阵列的方法，在实施例 1 的位相片上叠加 N-1 个相位图形成具有新的旋转位相分布的位相片，N 为整数，且 $N \geq 2$；

[0083] 叠加是按式 (1) 方法或直接将每个位相图对应位相值与另一个位相图对应的位相值直接相加，例如，甲位相图的 m 行 n 列点的灰度值为 100，则其对应的位相为 2pi*100 / 256，乙位相图的 m 行 n 列点的灰度值为 150，则其对应的位相为 2pi*150 / 256，叠加后的位相图的 m 行 n 列点的位相为 2pi*150 / 256，将其换算为灰度值，依次对所有点进行同样操作即可得到叠加后相应的位相灰度图。

[0084] 用准直光束照射位相片，在成像平面内形成包含 N 条涡旋光线的涡旋光线阵列；

[0085] 所述的具有新的旋转位相分布的位相片的位相分布如下式表示：

[0086] $\theta_{final} = angle[exp(i \cdot n_1 \cdot \theta_1 + i \cdot k \cdot tg\alpha_1 \cdot x) + exp(i \cdot n_2 \cdot \theta_2 + i \cdot k \cdot tg\alpha_2 \cdot x) +$ 【第一位相也加

[0087] $exp(i \cdot n_3 \cdot \theta_3 + i \cdot k \cdot tg\alpha_3 \cdot x) + \ldots + exp(i \cdot n_N \cdot \theta_N + i \cdot k \cdot tg\alpha_N \cdot x)]$ 了一个闪耀光栅】

[0088] 其中 θ_{fianl} 为 N 个位相图叠加后的位相分布，angle() 为求复数的位相角的函数，i 是复数符号；$k=2\pi / \lambda$，λ 表示入射光波波长，x 为入射光在光栅上的水平变量；

[0089] 【i 是虚数单位】；

[0090] n_i 表示旋转位相的旋转阶数，i=1,2,...,N；

[0091] θ_i 表示第 i 个位相图的方位角，i=1,2,...,N；

[0092] α_i 表示第 i 个闪耀光栅的位相分布阶梯的倾斜角度，i=1,2,...,N；

[0093] $exp(i \cdot k \cdot tg\alpha_i \cdot x)$ 为由第 i 个闪耀光栅引起的位相；

[0094] 涡旋光线阵列中的相邻涡旋光线的间隔距离为 $f \cdot tg[(m+1) \cdot 2\alpha] - f \cdot tg(m \cdot 2\alpha)$，其中 f 为透镜焦距，m 为光栅衍射级次，取整数，m 只能取整数，如 -3,-2,-1,0,1,2,3 等，m 值绝对值越大，光束偏离光轴的距离越大.. 此外，通过旋转位相片的位相分布与 x 轴成一角度，如 30 度，90 度，120 度等，产生的涡旋光线也会旋转同样的角度；还可以通过旋转叠加的光栅位相分布与 x 轴成一角度，如 30 度，90 度，120 度等，产生的涡旋光线也会旋转同样的角度。产生旋转光束或光线阵列的位相片均为一个位相片；

[0095] 在每个只产生一条涡旋光线的位相分布上分别叠加一个闪耀光栅的位相分布，然

后将叠加了位相光栅分布的所有单个涡旋光线的位相分布相加后便产生一个最终的位相分布，该位相分布被制做成位相片后，便可产生涡旋光线阵列。产生每个涡旋光线的位相分布上所叠加的闪耀光栅的闪耀角都是互不相同的。

[0096] 分隔距离由成像接收面大小决定，最大不超过接收面的长度或宽度。d 的取值由涡旋光线分隔距离来决定，一般在微米级别。如有 k 根光线，则 d 的最大值为 L / (k+1)，L 为接收面的边长，最小为光线的线条宽度。

[0097] 首先，计算出产生单个涡旋光线的位相分布，然后根据要产生的涡旋光线在成像平面上的位置计算出所用的闪耀光栅的闪耀角，将此闪耀光栅的位相分布与产生单个涡旋光线的位相分布相加，获得一个新的位相分布，如果将该位相分布制成位相片后，可以在指定的位置产生一条涡旋光线；类似地，利用产生单个涡旋光线的位相分布，然后根据要产生的涡旋光线在成像平面上的另一个位置计算出所用的闪耀光栅的闪耀角，将此闪耀光栅的位相分布与产生单个涡旋光线的位相分布相加，获得一个叠加的位相分布，如果将该位相分布制成位相片后，可以在另一指定的位置产生一条涡旋光线；依次类推，例如，若需要最终产生一组 4 条分开的涡旋光线，需要依上述方法分别计算出 4 个叠加了不同闪耀角光栅位相分布的涡旋光线位相分布，然后，将这 4 个位相分布直接叠加，最终形成一个位相分布，将此位相分布制作成位相片后，便可以使入射光束在成像平面形成 4 条分开的涡旋光线阵列了。

[0098] 此外，通过在叠加具有一定旋转角度的闪耀光栅到图 7 或图 9 中产生涡旋光线或涡旋光线阵列的位相图中，就可以得到与图 8 或图 10 中光线竖直方向成一定角度的光线或光线阵列分布。在图 9-10 中，我们还可以叠加不同级次的涡旋位相图，从而产生具有不同旋转角动量的涡旋光线阵列分布。例如，让涡旋阵列中的四根涡旋光线的旋转阶次分别为 200，-200，190，-190，或为 180，190，200，210，或其它任何高旋转阶次的组合。另外，通过控制叠加的闪耀光栅的闪耀角或放置方向，我们还可以控制涡旋光线的间距、成像位置和排列方位。例如，调整闪耀光栅的闪耀角，可以使涡旋光线之间的间距变大或变小。为了使涡旋光线成像在指定的位置，如使涡旋光线呈倾斜阶梯状分布，除了在每个产生涡旋光线的位相分布上叠加一个沿 Y 方向放置的闪耀光栅外，还需要在该位相分布上叠加一个沿 X 方向放置的闪耀光栅，从而使产生的涡旋光线在 X 方向上也产生偏移。例如，为了使四条涡旋光线分别按正方形的四条边摆放形式，我们将产生单个涡旋光线的位相分布分别旋转 0°，90°，180°，270° 后分别与闪耀光栅相叠加，叠加后的总的位相即可产生上述分布的涡旋光线组合。

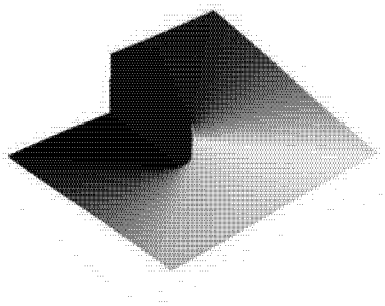


图 1

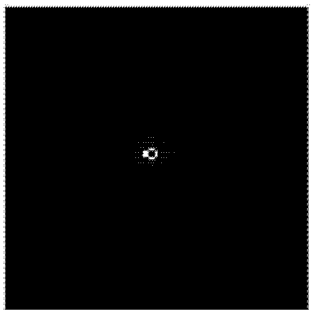


图 2

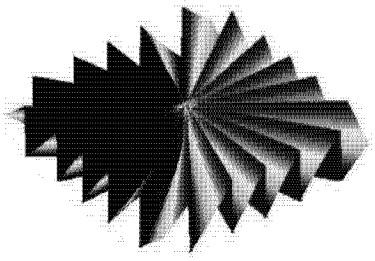


图 3

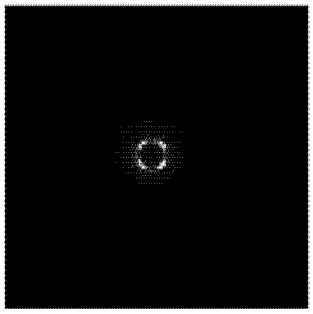


图 4

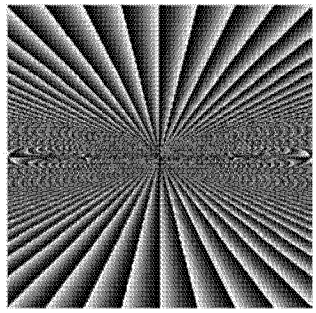


图 5

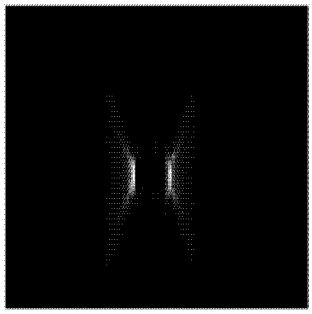


图 6

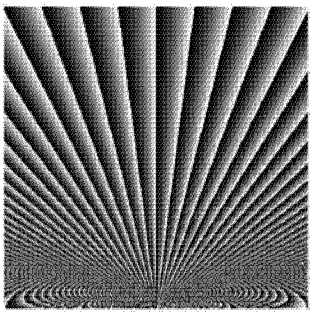


图 7

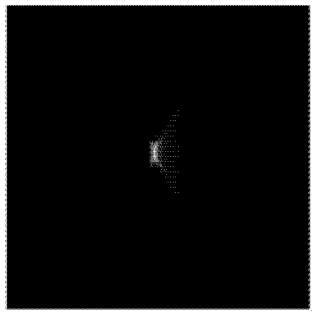


图 8

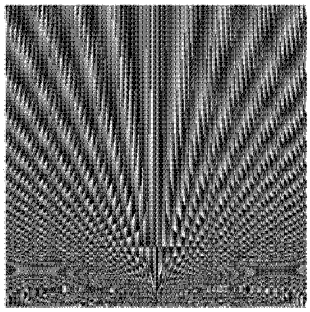


图 9

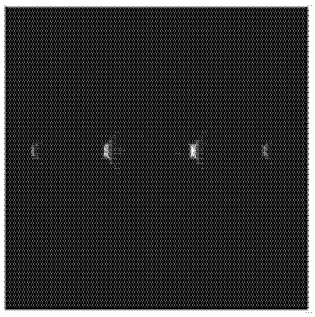


图 10