

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2017年10月26日 (26.10.2017)

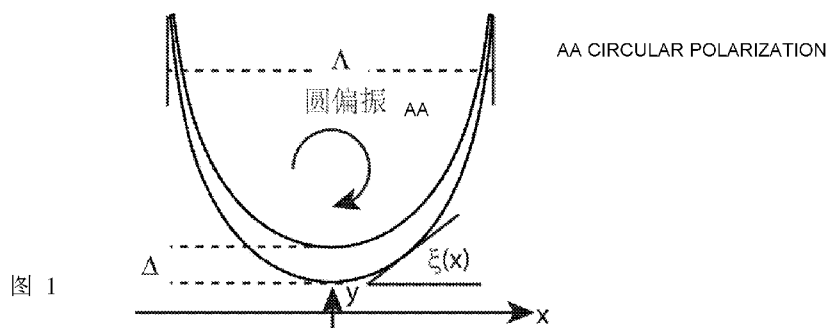


(10) 国际公布号
WO 2017/181530 A1

- (51) 国际专利分类号:
G02F 1/01 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/088081
- (22) 国际申请日: 2016年7月1日 (01.07.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610249928.2 2016年4月20日 (20.04.2016) CN
- (71) 申请人: 中国科学院光电技术研究所 (THE INSTITUTE OF OPTICS AND ELECTRONICS, THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) [CN/CN]; 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。
- (72) 发明人: 罗先刚 (LUO, Xiangang); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。蒲明博 (PU, Mingbo); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。赵泽宇 (ZHAO, Zeyu); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。李雄 (LI, Xiong); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。王彦钦 (WANG, Yanqin); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。马晓亮 (MA, Xiaoliang); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。王长涛 (WANG, Changtao); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 100029 (CN)。
- (74) 代理人: 中科专利商标代理有限责任公司 (CHINA SCIENCE PATENT & TRADEMARK

(54) Title: BROADBAND ELECTROMAGNETIC WAVE PHASE MODULATING METHOD AND METASURFACE SUB-WAVELENGTH STRUCTURE

(54) 发明名称: 宽带电磁波相位调控的方法和超表面亚波长结构



(57) Abstract: A broadband electromagnetic wave phase modulating method and a metasurface sub-wavelength structure. A sub-wavelength structure serves as a basic unit of a metasurface, arranged to form an array according to a rule determined by a pre-determined phase, and a geometric phase distribution having space continuity and frequency spectrum achromatism is generated between 0 and 2π , thereby enabling continuous modulation of a phase within a two-dimensional plane. An operating bandwidth of the phase modulating method and the metasurface sub-wavelength structure can encompass the entire electromagnetic frequency spectrum, and a number of types of optical instruments such as a reflective focusing/imaging element, a transmitting focusing/imaging element, a prism and an orbital angular momentum generator, can be designed according to the phase distribution generated by the sub-wavelength structure. The phase modulating method and the metasurface sub-wavelength structure can also be used to realize other novel electromagnetic wave functions for extension of phase modulation, such as broadband absorption and reduction in radar cross-section.

(57) 摘要: 一种宽带电磁波相位调控的方法和一种超表面亚波长结构。利用亚波长结构作为超表面的基本单元, 按照预定相位所决定的规则排列形成阵列, 在0到 2π 之间产生空间连续和频谱消色差的几何相位分布, 从而实现相位在二维平面内的连续调控。相位调控方法和超表面亚波长结构的工作带宽可覆盖整个电磁频谱, 根据这种亚波长结构所产生的相位分布可设计多种光学器件, 如反射聚焦/成像元件、透射聚焦/成像元件、棱镜、轨道角动量产生器。作为相位调控的扩展, 该相位调控方法和超表面亚波长结构也可实现其他新型的电磁波功能, 例如宽带吸收以及雷达散射截面缩减。

AGENT LTD.); 中国北京市海淀区西三环北路
87号4-1105室, Beijing 100089 (CN)。

- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

宽带电磁波相位调控的方法和超表面亚波长结构

本申请要求了 2014 年 4 月 20 日提交的、申请号为 201610249928.2 的发明名称为“宽带电磁波相位调控的方法和超表面亚波长结构”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本发明属于光场调控技术领域，特别涉及一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法和超表面亚波长结构。

背景技术

相位调控在各种光学元件中起着关键作用。特别是在包括平面透镜、分束器、棱镜等的平面光子器件中，在平面内实现光学相位 $[0, 360^\circ]$ 范围调节是相关技术的核心技术。

传统的相位调控技术包括以下几种：

1. 改变光学材料的面型和厚度 d （如传统曲面光学透镜和微透镜）， $\Phi=kd$ ，通过厚度变化实现相位调控；
2. 在厚的（ $d \sim \lambda$ ）金属薄膜上制备纳米尺寸的小孔，通过调节小孔的尺寸来改变相位延迟。例如中国发明专利 CN201310312163.9 “基于人工电磁材料的表面等离激元透镜”描述了这种技术；
3. 在厚的金属膜层或介质材料上制备亚波长小孔，通过改变等效折射率实现梯度折射率分布，从而调节相位延迟。例如中国发明专利 CN200710176013.4 “一种三维亚波长金属结构透镜”、中国发明专利 CN200810104602.6 “一种深度调制三维亚波长金属结构透镜”和中国发明专利 CN201410317149.2 “一种具有振幅和相位调控的亚波长孔结构阵列”描述了这种技术；
4. 在厚度远小于波长（ $d \ll \lambda$ ）的金属薄膜或介质材料上制备离散的金屬天线或纳米棒，通过旋转金属天线或纳米棒，实现非均匀的几何相位分布。例如中国实用新型专利 201520096254.8 “一种透射式硅纳米阵列光分束器”描述了这种技术。

在上述第 2、3、4 种技术中，通常是一个单元结构对应一个相位分布，所形成的相位分布是离散性的，并且很难实现宽带性能。

传统振幅型衍射元件存在高阶的衍射级次，无法实现对相位的调控；而传统相位型衍射光学元件也是通过厚度改变来实现相位调控，使得元件的尺寸、重量都很大，不能满足当前各种应用走向高效集成化和一体化的趋势。

近年来，作为一种二维超材料，基于亚波长结构的超表面结构被证实可以实现电磁波振幅、相位和偏振态的全面调控。利用超表面辅助的反射和折射定律，波前可以被任意调制。超表面结构丰富独特的物理特性及其对电磁波的灵活调控能力使其在隐身技术、天线技术、微波和太赫兹器件、光电子器件等诸多领域具有诱人的应用前景。但是，随着研究的深入，亚波长结构超表面的带宽问题成为限制其实际应用的重要障碍。

发明内容

本发明提出了一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法和超表面亚波长结构。本发明的通过亚波长结构产生的相位分布决定于表面结构形式。

本发明提供了一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，包括以下步骤：（1）对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分，得到一条曲线；（2）由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状，所述亚波长结构充当超表面的基本单元，按照预定相位所决定的规则排列形成亚波长结构阵列；以及用圆偏振光照射所述超表面亚波长结构，产生具有所述空间变化的相位的光束。

根据本发明的另一个方面，还提出了一种超表面亚波长结构，包括：由多个亚波长结构基本单元，其中所述亚波长结构基本单元按照预定相位所决定的规则排列而形成超表面亚波长结构阵列，其中所述亚波长结构基本单元的形状由以下曲线限定：（1）对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分，得到一条曲线；（2）由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

与现有技术相比,本发明的有益效果在于:本发明的单个亚波长结构即可在 $[0, 2\pi]$ 范围产生的线性相位分布,结合亚波长结构的光学和拓扑特性,本发明能够在纳米量级的单膜层中控制光子,可在平面内实现任意的相位分布,并且能够在超宽频谱范围(覆盖红外、太赫兹、微波等波段)工作,带宽远远超过传统结构形式,可用于构建超薄、轻量化的光学器件。

附图说明

- 图 1 为圆偏振光垂直入射在本发明实施例的亚波长结构的示意图;
- 图 2 为单个亚波长结构的扫描电镜图 (SEM);
- 图 3 为圆偏振光通过单个亚波长结构产生自旋-霍尔效应的光强测试图;
- 图 4 为圆偏振光通过单个亚波长结构产生自旋-霍尔效应的光强仿真图;
- 图 5 为本发明实施例的另一个超表面亚波长结构样品的扫描电镜图 (SEM);
- 图 6 为本发明实施例的通过亚波长结构阵列使光束发生偏折的衍射示意图;
- 图 7 为本发明实施例的产生聚焦光束的超表面亚波长结构样品的设计图;
- 图 8 为本发明实施例的产生聚焦光束的超表面亚波长结构样品的相位示意图;
- 图 9 为本发明实施例的产生聚焦光束的超表面亚波长结构样品的测试图;
- 图 10 为本发明实施例的产生贝塞尔光束的另一种超表面亚波长结构样品的扫描电镜图;
- 图 11 为右旋圆偏振光 RCP 透过贝塞尔产生器的强度分布图;
- 图 12 为本发明实施例的产生 OAM 光束的超表面亚波长结构样品的设计图;
- 图 13 为本发明实施例的另一种超表面亚波长结构样品的扫描电镜

图；

图 14 为本发明实施例的在不同波长和偏振下，距离样品表面几微米的强度图案。

具体实施方式

现在对本发明的实施例提供详细参考，其范例在附图中说明，图中相同的数字全部代表相同的元件。为解释本发明下述实施例将参考附图被描述。

以下结合附图，对本发明的实施进行详细说明，但本发明的保护范围并不仅限于下面的实施例，下面的具体实施方式仅仅是示意性的，而不是限制性的，应包括权利要求书中的全部内容；而且本领域技术人员从以下的一个实施例即可实现权利要求书中的全部内容，本领域的普通技术人员在本发明的启示下，在不脱离本发明的宗旨和权利要求所保护的范围内情况下，还可做出很多形式，这些均属于本发明的保护之内。

本发明的一个方面提供了一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，包括以下步骤：（1）对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分，得到一条曲线；（2）由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状，所述亚波长结构充当超表面的基本单元，按照预定相位所决定的规则排列形成亚波长结构阵列；以及用圆偏振光照射所述超表面亚波长结构，产生具有所述空间变化的相位的光束。

优选地，所述亚波长结构基本单元在每一个周期内曲线是完全连续的。

优选地，通过将所述曲线沿着光轴平移小于入射电磁波波长的距离 Δ ($0 \sim \lambda$) 得到两条曲线，并通过将两条曲线的端点连接在一起形成闭合区域，所述闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

优选地，每一个所述亚波长结构基本单元的平移距离 $\Delta < \lambda$ ，水平长度 $\Lambda > \lambda$ ，其中 λ 是入射电磁波的波长。

优选地，所述亚波长结构的基本单元或周期性阵列使圆偏振光产生

角度为 $\theta = \sigma \arcsin(\lambda/\Lambda)$ 的偏折, 其中 $\sigma = \pm 1$ 代表左旋和右旋圆偏振。

优选地, 所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束聚焦, 用于光学成像。

优选地, 所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束通过此结构产生带有轨道角动量 OAM 的光束。

优选地, 所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束通过此结构产生高阶贝塞尔 (HOBB) 光束。

优选地, 通过将所述亚波长结构进行尺寸缩放用于其他波段电磁波。

根据本发明的另一个方面, 还提出了一种超表面亚波长结构, 包括: 由多个亚波长结构基本单元, 其中所述亚波长结构基本单元按照预定相位所决定的规则排列而形成超表面亚波长结构阵列, 其中所述亚波长结构基本单元的形状由以下曲线限定: (1) 对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分, 得到一条曲线; (2) 由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

优选地, 将所述曲线沿着光轴平移小于入射电磁波波长的距离 Δ ($0 \sim \lambda$) 得到两条曲线, 并通过将两条曲线的端点连接在一起形成闭合区域, 所述闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

优选地, 在厚度 $30 \text{ nm} < T_g < 300 \text{ nm}$ 的薄膜上制备所述亚波长结构基本单元。

优选地, 所述薄膜是金属或介质。

优选地, 所述金属为: 金、银、铜、铝、铬、镉、金合金、银合金、铜合金、锌合金或铝合金。

优选地, 所述介质为以下半导体材料中的一种或多种: 单晶硅、多晶硅、锗、二氧化硅或砷化镓。

优选地, 所述亚波长结构的基材在不同的波段使用不同的材料。

优选地, 所述基材在光波段工作所用的材料包括: 石英、有机玻璃、硅片等介质材料。

优选地, 所述基材在微波段工作所用材料包括如 FR4 的微波介质材料。

优选地，所述基材在红外、太赫兹波段工作所用材料包括：硅、锗等红外介质材料。

优选地，所述基材具有平面结构或曲面结构。

优选地，在膜层上制备所述亚波长结构。

优选地，所述亚波长结构包括孔或孔的互补结构。

下面结合具体的结构详细地描述本发明的超表面亚波长结构的工作原理。

单个超表面亚波长结构产生自旋-霍尔效应

本发明实施例的具体步骤如下：

(1) 首先确定可产生自旋-霍尔效应的线性相位分布 $\Phi(x) = 2\pi x/\Lambda$ ；

(2) 对上述相位分布函数积分可得亚波长方程如下：

$$y = \frac{\Lambda}{\pi} \ln(|\sec(\pi x/\Lambda)|), \quad (1)$$

其中， Λ 是一个曲线的水平长度。将该曲线沿 y 轴平移小于波长的距离 Δ ，得到的亚波长结构如图 1 所示。由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。具体地，将原曲线和移动后的曲线的端点固定在一起，沿 y 轴将所述曲线平移小于波长的距离 Δ ，从而得到所述亚波长结构。

(3) 通过聚焦离子束 (FIB) 在 120nm 厚的金 (Au) 薄膜上制备一个亚波长样品 (图 2)，基底材料为 1 mm 厚的石英。所述亚波长样品具有由上述封闭曲线限定的形状。

(4) 如图 2 所示样品在圆偏振光 (CPL) 照射下，产生了一个线性几何相位， $\Phi(x) = 2\sigma \xi(x)$ ， $\xi(x)$ 为曲线切线与 x 轴之间的夹角，在左右端点之间变化从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ ，其中 $\sigma = \pm 1$ 表示左和右旋圆偏振 (LCP 和 RCP)，请参照图 3 和图 4。图 3 为圆偏振光通过单个亚波长结构产生自旋-霍尔效应光强测试图。图 4 为圆偏振光通过单个结构产生自旋-霍尔效应光强仿真图。由此说明本发明提供的方案能够实现自旋-霍尔效应。

利用亚波长结构阵列产生光束的偏折

本实施例具体步骤如下:

(1) 确定可产生光束偏折的线性相位分布 $\Phi(x) = k_a x$

(2) 对上述相位分布函数积分可得曲线方程如下:

$$y = -\frac{2\sigma}{k_a} \ln(|\cos(k_a x / 2)|) \quad (2)$$

其中, k_a 是结构产生的沿 x 方向的波矢量, 选择 $\sigma = 1$, 将该曲线沿 y 轴平移 Δ , 得到如图 1 所示的亚波长结构。

(3) 将得到的亚波长结构排列成线性阵列 (图 5), 沿 x 方向的周期 $P_x = 2 \mu\text{m}$, 沿 y 方向周期 $P_y = \Delta = 200 \text{ nm}$ 。通过聚焦离子束 (FIB) 在 120 nm 厚的金 (Au) 薄膜上制备一个样品, 基底材料为 1 mm 厚的石英。

(4) 如图 6a 和 6c 所示, 样品在 CPL ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 的照射下, 得到光束偏转角分别为 $\pm 18.5^\circ$, 与公式 $\theta = \sigma \sin^{-1}(\lambda / P_x)$ 所得到的理论值 $\pm 18.45^\circ$ 相当。

(5) 如图 6b 所示, 当线性偏振 (LP) 光束照射在亚波长结构中时, LCP 和 RCP 对称地偏折。

上述实验结果说明本发明提供的方案能够产生光束的偏折。

利用亚波长结构阵列产生聚焦光束

本实施例具体步骤如下:

(1) 确定可产生聚焦光束的相位分布:

$$\Phi(r, \varphi) = \sigma \left(k \sqrt{r^2 + f^2} + l\varphi \right), \quad (3)$$

其中, $k = 2\pi / \lambda$ 是真空中波数。设计参数为拓扑荷 $l = 2$, $f = 40 \mu\text{m}$ 。透镜的内、外半径为 10.6 和 $20.8 \mu\text{m}$ 。

(2) 对上述相位分布函数进行积分, 将该曲线沿 y 轴平移 Δ , 得到亚波长结构, 并将得到的亚波长结构按照图 7 的设计过程排列成阵列, 在厚度为 120 nm 的金薄膜上制作一个亚波长样品 (图 8), 基底材料为 1 mm 厚的石英。

(3) 如图 9 所示, 样品在 RCP ($\sigma = -1$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 照明下, 产生了聚焦光束。

利用亚波长结构阵列产生贝塞尔光束

本实施例具体步骤如下:

(1) 确定可产生贝塞尔光束的相位分布:

$$\Phi(r, \varphi) = \sigma(k_r r + l\varphi), \quad (4)$$

其中, k_r 为贝塞尔光束的横向波矢量, 设计参数为 $k_r = k \arcsin(\lambda / \Lambda)$, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, 拓扑荷 $l = 0$ 。

(2) 对上述相位分布函数进行积分后得到一条曲线, 将该曲线沿 y 轴平移 Δ , 得到亚波长结构 (图 10), 在厚度为 120nm 的金薄膜上制作亚波长结构的样品, 基底材料为 1 mm 厚的石英。

(3) 样品在 RCP ($\sigma = -1$, $\lambda = 785\text{nm}$) 照明下, 透过强度可通过显微镜测定, 如图 11 所示。由上述实验结果说明本发明提供的方案能够产生贝塞尔光束。

利用亚波长结构阵列产生普通的轨道角动量 (OAM) 光束

普通的 OAM 光束具有沿方位角方向的螺旋相位。本实施例具体步骤如下:

(1) 根据所需相位分布确定极坐标中的曲线方程:

$$r = (r_0 + m\Delta) \left(\left| \sec\left[\frac{(l-2)\varphi}{2}\right] \right| \right)^{\frac{2}{2-l}}, m = 0, 1, 2, 3... \quad (5)$$

其中, r_0 为最内侧曲线的顶点的位置, Δ 是在相邻的曲线两个顶点之间的距离, m 是这些曲线的序号。依据公式, 可以使用这个亚波长结构产生具有任意拓扑荷的 OAM 光束。

(2) 将得到的亚波长结构按照图 12 的设计过程排列成阵列, 通过聚焦离子束 (FIB) 在 120nm 厚的金 (Au) 薄膜制备了一个拓扑荷 $l = -3$ 的亚波长结构样品 (如图 13 所示), 其中 $\Delta = 200 \text{ nm}$, $r_0 = 1.5 \mu\text{m}$, 基底材料为 1 mm 厚的石英。

(3) 样品在 CPL 照明下, 亚波长结构同时产生两种相同强度的光束, 一束光具有均匀的相位, 另一束具有螺旋相位即为产生的 OAM 光束。

(4) 本实施例采用三个激光源 $\lambda = 532, 632.8$ 和 780nm 证明本发

明的宽带性能。如图 14 所示，不同波长和偏振下，距离样品表面几微米的强度图案。对于 x 和 y 偏振分量，可以看到旋转环绕光束中心的瓣，其中 l 的模量和符号是由瓣的个数和扭转方向决定的。由上述实验结果说明本发明提供的方案能够产生轨道角动量光束。

尽管已经参考本发明的典型实施例，具体示出和描述了本发明，但本领域普通技术人员应当理解，在不脱离所附权利要求所限定的本发明的精神和范围的情况下，可以对这些实施例进行形式和细节上的多种改变。

权 利 要 求 书

1. 一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，包括以下步骤：

形成亚波长结构基本单元，其中所述亚波长结构基本单元的形状由以下曲线限定：

(1) 对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分，得到一条曲线；

(2) 由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状，所述亚波长结构基本单元充当超表面结构的基本单元，按照预定相位所决定的规则排列以形成超表面亚波长结构阵列；以及用圆偏振光照射所述超表面亚波长结构，产生具有所述空间变化的相位的光束。

2. 根据权利要求1所述的利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，所述亚波长结构基本单元在每一个周期内曲线是完全连续的。

3. 根据权利要求1所述的利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其中通过将所述曲线沿着光轴平移小于入射电磁波波长的距离 Δ ($0 \sim \lambda$) 得到两条曲线，并通过将两条曲线的端点连接在一起形成闭合区域，所述闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

4. 根据权利要求1所述的利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，每一个所述亚波长结构基本单元的平移距离 $\Delta < \lambda$ ，水平长度 $\Lambda > \lambda$ ，其中 λ 是入射电磁波的波长。

5. 根据权利要求1所述的一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，所述亚波长结构的基本单元或周期性阵列使圆偏振光产生角度为 $\theta = \sigma \arcsin(\lambda/\Lambda)$ 的偏折，其中 $\sigma = \pm 1$ 代表左旋和右旋圆偏振。

6. 根据权利要求1所述的一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束聚焦，用于光学成像。

7. 根据权利要求 1 所述的一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束通过此结构产生带有轨道角动量 OAM 的光束。

8. 根据权利要求 1 所述的一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，所述亚波长结构阵列按照预定义的相位排布使平行光束通过此结构产生低阶和高阶贝塞尔光束。

9. 根据权利要求 1 所述的一种利用超表面亚波长结构进行宽带电磁波相位调控的方法，其特征在于，通过将所述亚波长结构进行尺寸缩放用于其他波段电磁波。

10. 一种超表面亚波长结构，包括：

由多个亚波长结构基本单元，其中所述亚波长结构基本单元按照预定相位所决定的规则排列而形成超表面亚波长结构阵列，其中所述亚波长结构基本单元的形状由以下曲线限定：

(1) 对预先定义的空间变化的相位分布函数进行积分，得到一条曲线；

(2) 由所述曲线所限定的闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

11. 根据权利要求 10 所述的超表面亚波长结构，其中将所述曲线沿着光轴平移小于入射电磁波波长的距离 Δ ($0 \sim \lambda$) 得到两条曲线，并通过将两条曲线的端点连接在一起形成闭合区域，所述闭合区域限定了所述亚波长结构基本单元的形状。

12. 根据权利要求 10 所述的超表面亚波长结构，其特征在于，在厚度 $30\text{nm} < T_g < 300\text{nm}$ 的薄膜上制备所述亚波长结构基本单元。

13. 根据权利要求 12 所述的超表面亚波长结构，其中所述薄膜是金属或介质。

14. 根据权利要求 13 所述的超表面亚波长结构，所述金属为：金、银、铜、铝、铬、镉、金合金、银合金、铜合金、锌合金或铝合金。

15. 根据权利要求 13 所述的超表面亚波长结构，其中所述介质为以下半导体材料中的一种或多种：单晶硅、多晶硅、锗、二氧化硅或砷化镓。

16. 根据权利要求 10 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述亚波长结构的基材在不同的波段使用不同的材料。

17. 根据权利要求 16 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述基材在光波段工作所用的材料包括: 石英、有机玻璃、硅片等介质材料。

18. 根据权利要求 16 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述基材在微波段工作所用材料包括如 FR4 的微波介质材料。

19. 根据权利要求 16 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述基材在红外、太赫兹波段工作所用材料包括: 硅、锗等红外介质材料。

20. 根据权利要求 16 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述基材具有平面结构或曲面结构。

21. 根据权利要求 10 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 在膜层上制备所述亚波长结构。

22. 根据权利要求 10 所述的超表面亚波长结构, 其特征在于, 所述亚波长结构包括孔或孔的互补结构。

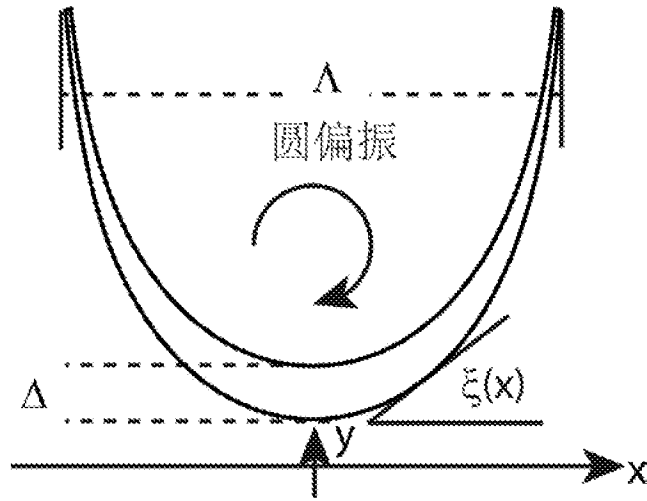


图 1

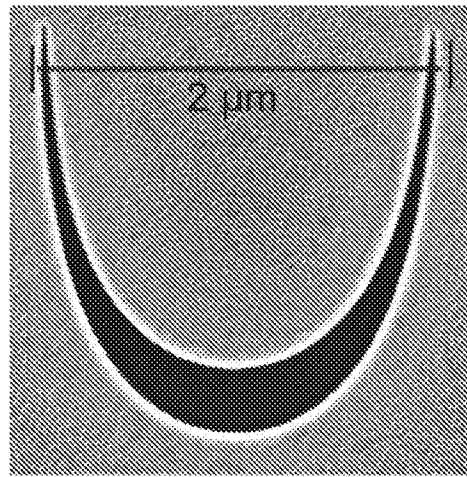


图 2

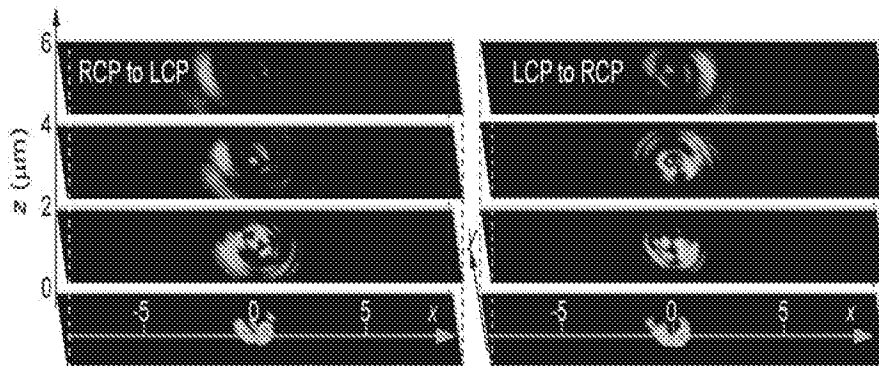


图 3

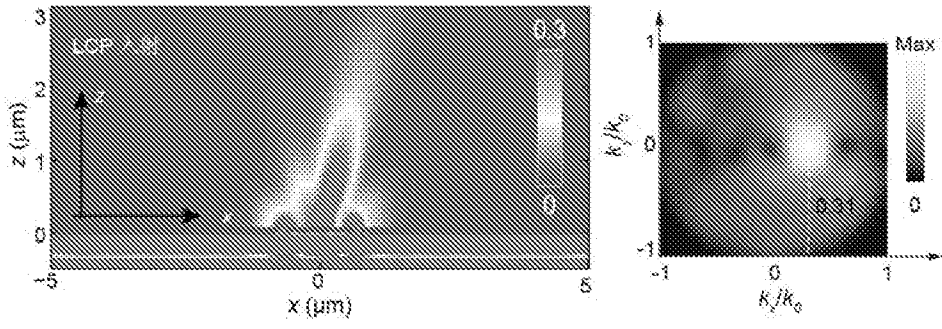


图 4

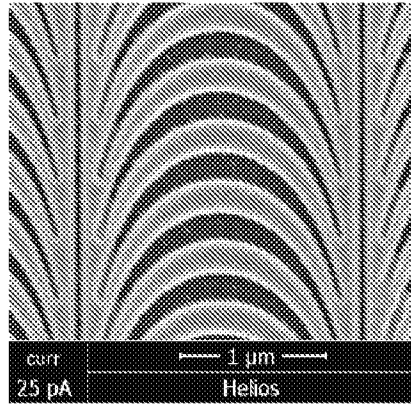


图 5

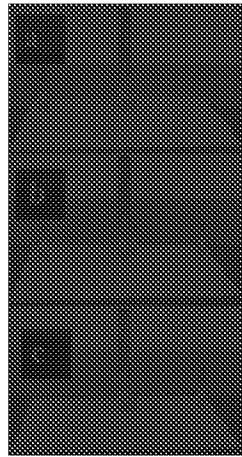


图 6

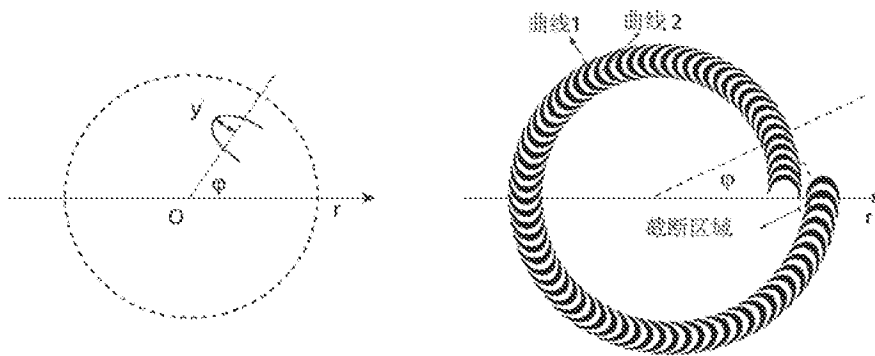


图 7

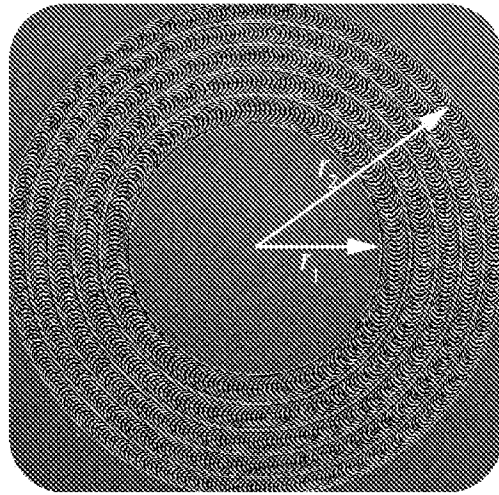


图 8

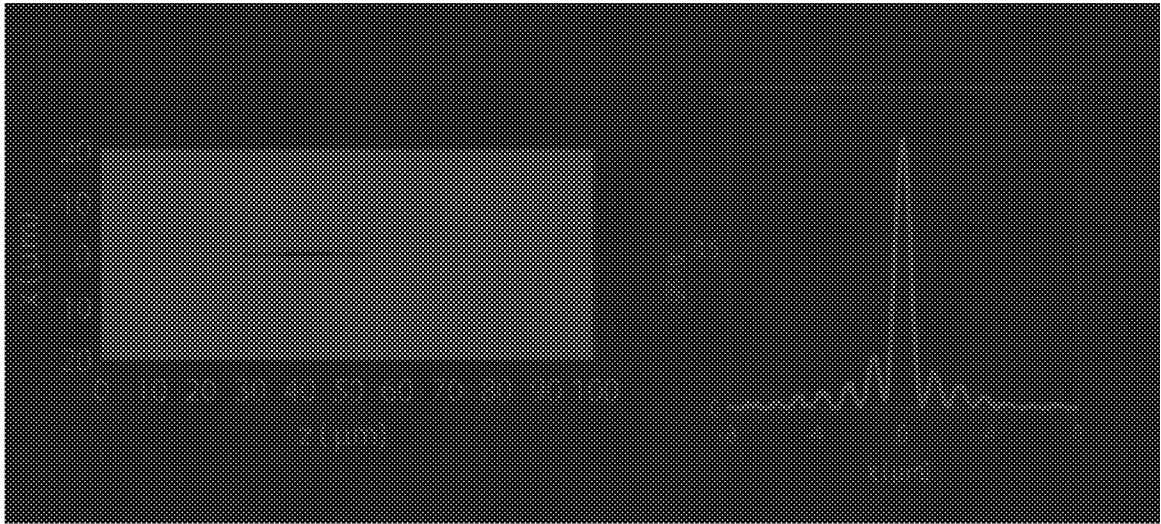


图 9

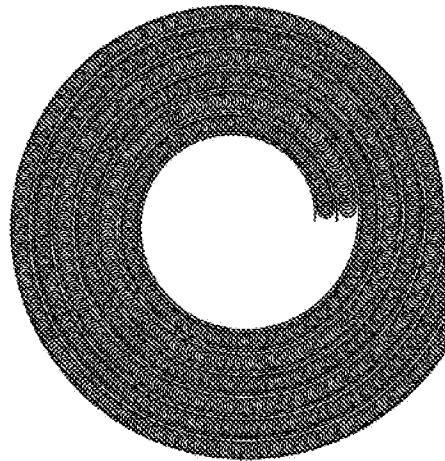


图 10

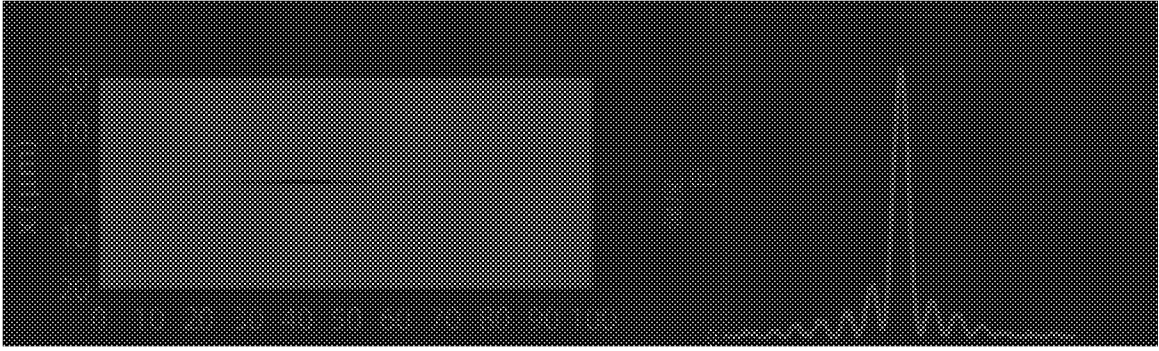


图 11

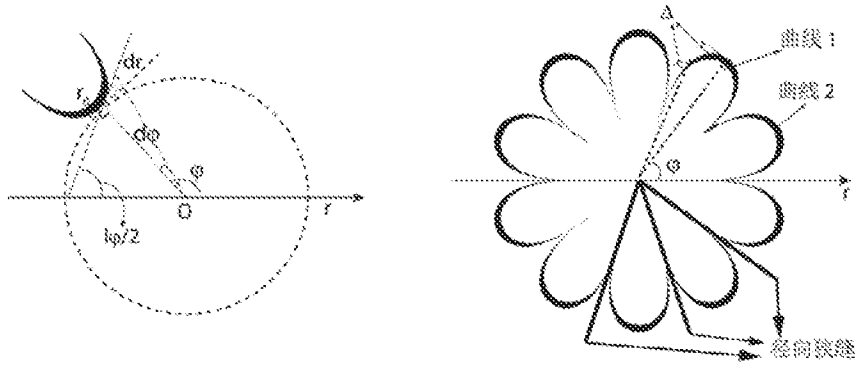


图 12

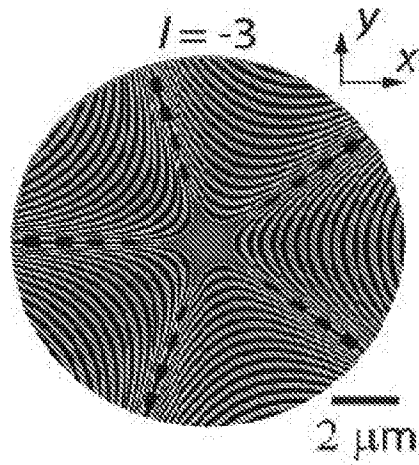


图 13

5/5

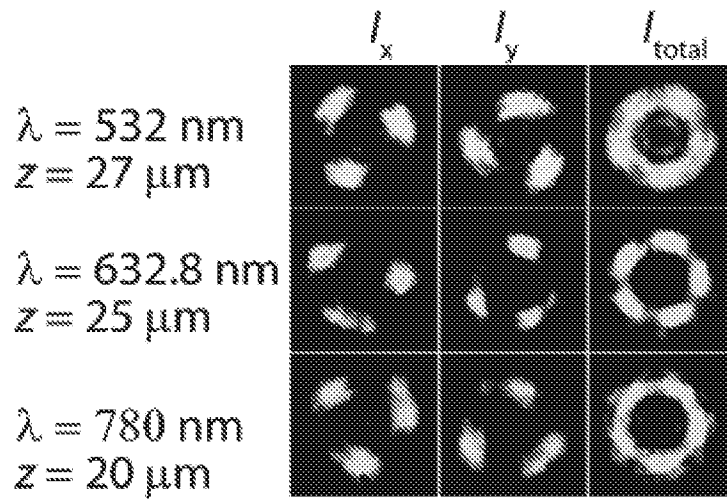


图 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/088081

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F 1/01 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02F1/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT; CNKI; EPODOC; WPI; ISI: metamaterial?, metasurface?, sub-wavelength, phas+, modula+, control+, adjust+, continu+, broad, band, catenary

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	PU, Mingbo et al. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, volume 1, 02 October 2015 (02.10.2015), the abstract, page 1, right column, line 6 to page 4, left column, line 8 from the bottom, and page 5, left column, line 3 from the bottom to right column, line 7, figures 1-5	1-3, 6-8, 10-15, 21, 22
Y	PU, Mingbo et al. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, volume 1, 02 October 2015 (02.10.2015), the abstract, page 1, right column, line 6 to page 4, left column, line 8 from the bottom, and page 5, left column, line 3 from the bottom to right column, line 7, and figures 1-5	4, 5, 9, 16-20
Y	WANG, Yanqin et al. "Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection" SCIENTIFIC REPORTS, volume 5, 04 December 2015 (04.12.2015), the abstract, page 3, two paragraphs from the bottom, and figures 2-4	4, 5, 9, 16-20

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search
13 December 2016

Date of mailing of the international search report
30 December 2016

Name and mailing address of the ISA
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer
SUN, Xian
Telephone No. (86-10) 62413961

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/088081

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	LI, Xiong et al. "Dynamic Control of the Extraordinary Optical Scattering in Semicontinuous 2D Metamaterials" ADVANCED OPTICAL MATERIALS, volume 4, 28 January 2016 (2016-01-28), page 659, right column, two paragraphs from the bottom to page 660, left column, paragraphs 1 and 2, and page 662, right column, and figures 1 and 2	1-3, 7, 10-14, 21, 22
A	LI, Xiong et al. "Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators" SCIENTIFIC REPORTS, volume 6, 04 February 2016 (2016-02-04), the whole document	1-22
A	CN 104584326 A (DUKE UNIVERSITY) 29 April 2015 (29.04.2015) the whole document	1-22
A	US 2010314040 A1 (TOYOTA MOTOR ENG. MFG. NORTH AMERICA, INC. et al.) 16 December 2010 (16.12.2010) the whole document	1-22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2016/088081

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104584326 A	29 April 2015	IL 235536 A	29 January 2015
		US 9268016 B2	23 February 2016
		US 2013335256 A1	19 December 2013
		IN 10174DEN2014 A	21 August 2015
		EP 2847823 A2	18 March 2015
		WO 2014025425 A2	13 February 2014
		US 2016266248 A1	15 September 2016
		KR 20150042746 A	21 April 2015
		US 2015030256 A1	29 January 2015
		US 9411042 B2	09 August 2016
US 2010314040 A1	16 December 2010	None	

<p>A. 主题的分类</p> <p>G02F 1/01 (2006.01) i</p> <p>按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类</p>																	
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)</p> <p>G02F1/-</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))</p> <p>CNPAT; CNKI; EPODOC; WPI; ISI; 超表面, 超材料, 亚波长, 相位, 调制, 控制, 连续, 宽带, 悬链线, metamaterial?, metasurface?, sub-wavelength, phas+, modula+, control+, adjust+, continu+, broad, band, catenary</p>																	
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5</td> <td>1-3, 6-8, 10-15, 21-22</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5</td> <td>4-5, 9, 16-20</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>WANG, Yanqin 等. "Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection" SCIENTIFIC REPORTS, 第5卷, 2015年 12月 4日 (2015 - 12 - 04), 摘要、第3页倒数两段、图2-4</td> <td>4-5, 9, 16-20</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>LI, Xiong 等. "Dynamic Control of the Extraordinary Optical Scattering in Semicontinuous 2D Metamaterials" ADVANCED OPTICAL MATERIALS, 第4卷, 2016年 1月 28日 (2016 - 01 - 28), 第659页右栏倒数两段-第660页左栏1-2段, 第662页右栏、图1-2</td> <td>1-3, 7, 10-14, 21-22</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5	1-3, 6-8, 10-15, 21-22	Y	PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5	4-5, 9, 16-20	Y	WANG, Yanqin 等. "Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection" SCIENTIFIC REPORTS, 第5卷, 2015年 12月 4日 (2015 - 12 - 04), 摘要、第3页倒数两段、图2-4	4-5, 9, 16-20	X	LI, Xiong 等. "Dynamic Control of the Extraordinary Optical Scattering in Semicontinuous 2D Metamaterials" ADVANCED OPTICAL MATERIALS, 第4卷, 2016年 1月 28日 (2016 - 01 - 28), 第659页右栏倒数两段-第660页左栏1-2段, 第662页右栏、图1-2	1-3, 7, 10-14, 21-22
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
X	PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5	1-3, 6-8, 10-15, 21-22															
Y	PU, Mingbo 等. "Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum" SCIENCE ADVANCES, 第1卷, 2015年 10月 2日 (2015 - 10 - 02), 摘要、第1页右栏第6行-第4页左栏倒数第8行, 第5页左栏倒数第3行-右栏第7行、图1-5	4-5, 9, 16-20															
Y	WANG, Yanqin 等. "Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection" SCIENTIFIC REPORTS, 第5卷, 2015年 12月 4日 (2015 - 12 - 04), 摘要、第3页倒数两段、图2-4	4-5, 9, 16-20															
X	LI, Xiong 等. "Dynamic Control of the Extraordinary Optical Scattering in Semicontinuous 2D Metamaterials" ADVANCED OPTICAL MATERIALS, 第4卷, 2016年 1月 28日 (2016 - 01 - 28), 第659页右栏倒数两段-第660页左栏1-2段, 第662页右栏、图1-2	1-3, 7, 10-14, 21-22															
<p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																	
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)</p> <p>"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>"X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>"Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>"&" 同族专利的文件</p>																	
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2016年 12月 13日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2016年 12月 30日</p>															
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10) 62019451</p>		<p>授权官员</p> <p>孙菟</p> <p>电话号码 (86-10) 62413961</p>															

C. 相关文件		
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	LI, Xiong 等. "Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators" SCIENTIFIC REPORTS, 第6卷, 2016年 2月 4日 (2016 - 02 - 04), 全文	1-22
A	CN 104584326 A (杜克大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 全文	1-22
A	US 2010314040 A1 (TOYOTA MOTOR ENG. &MFG. NORTH AMERICA, INC. 等) 2010年 12月 16日 (2010 - 12 - 16) 全文	1-22

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/088081

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利		公布日 (年/月/日)	
CN	104584326	A	2015年 4月 29日	IL	235536	A	2015年 1月 29日
				US	9268016	B2	2016年 2月 23日
				US	2013335256	A1	2013年 12月 19日
				IN	10174DEN2014	A	2015年 8月 21日
				EP	2847823	A2	2015年 3月 18日
				WO	2014025425	A2	2014年 2月 13日
				US	2016266248	A1	2016年 9月 15日
				KR	20150042746	A	2015年 4月 21日
				US	2015030256	A1	2015年 1月 29日
				US	9411042	B2	2016年 8月 9日
US	2010314040	A1	2010年 12月 16日	无			