(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
2023 年 9 月 14 日 (14.09.2023)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2023/168555 A1

(51) 国际专利分类号:
G02B 27/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/079528

(22) 国际申请日: 2022 年 3 月 7 日 (07.03.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(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 610209 (CN)。 蒲明博 (**PU, Mingbo**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。 陈琰 (**CHEN, Yan**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。 张飞 (**ZHANG, Fei**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。 马晓亮 (**MA, Xiaoliang**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。 李雄 (**LI, Xiong**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。 赵泽宇 (**ZHAO, Zeyu**); 中国四川省成都市双流350信箱, Sichuan 610209 (CN)。

(74) 代理人: 中科专利商标代理有限责任公司 (**CHINA SCIENCE PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.**); 中国北京市海淀区西三环北路87号4-312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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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,

(54) **Title:** HIGH-ORDER ROTATIONAL SYMMETRY UNIT-BASED NONLINEAR GEOMETRIC PHASE METASURFACE

(54) **发明名称**: 基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面

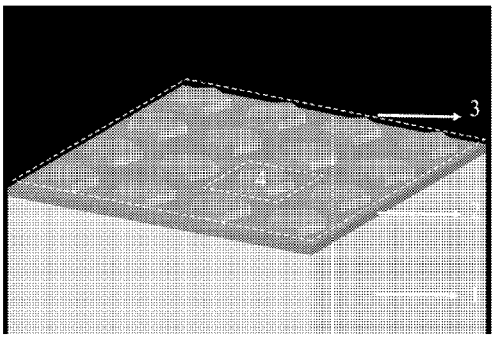


图 1

(57) **Abstract:** The present disclosure provides a high-order rotational symmetry unit-based nonlinear geometric phase metasurface, which sequentially comprises from the bottom to the top: a substrate (1); a nonlinear material layer (2); and a metasurface structure layer (3), comprising multiple super-configuration units (4) having local high-order rotational symmetry, wherein the super-configuration units (4) are periodically arranged to form a lattice structure which has global high-order rotational symmetry. Under the pumping of fundamental waves in a circular polarization state, the nonlinear geometric phase metasurface can simultaneously generate nonlinear harmonic waves having the same and opposite circular polarization states as the fundamental waves, and a nonlinear geometric phase of the generated nonlinear harmonic waves is regulated and controlled by a local rotational symmetry order and lattice structure of the super-configuration units.

(57) **摘要**: 本公开提供一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，自下而上依次包括：衬底(1)；非线性材料层(2)；超表面结构层(3)，包括多个具有局域高阶旋转对称性的超构单元(4)，超构单元(4)呈周期性排列形成具有全局高阶旋转对称性的晶格结构；非线性几何相位超表面在圆偏振态基波的泵浦下，能够同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波，且所产生非线性谐波的非线性几何相位受超构单元局域旋转对称阶数和晶格结构的调控。

WO 2023/168555 A1

[见续页]

SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, SC, 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))。

基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面

技术领域

本公开涉及电磁波调制技术领域，具体涉及一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面。

背景技术

在线性光学中，圆偏振光与各向异性超构单元作用可以产生具有相反手性的圆偏光，且转换后的光携带几何相位 $\Phi = 2\sigma\theta$，称为 Pancharatnam-Berry 几何相位。其中 θ 为超构单元的旋转角，$\sigma = \pm 1$ 代表入射光处于左旋或右旋圆偏振态（LCP 或 RCP）。

类似的概念也被引入到非线性光学中，当偏振态为 σ 的基波光入射到非线性超表面时，产生的+σ 或-σ 偏振态 n 次谐波具有几何相位（n-1）$\sigma\theta$ 或（n+1）$\sigma\theta$，称为非线性几何相位。非线性几何相位不依赖于结构尺寸和材料色散，且可以通过旋转超构单元实现 0~2π 的连续调控，因此被广泛应用于光的非线性调控。

在非线性超表面中，圆偏光 n 次谐波的产生需要满足选择定则：$n = Nm \pm 1$，其中 N 为整数，m 为超构单元旋转对称阶数，符号+和-代表谐波与基波具有相同或相反的圆偏振态。以倍频为例，具有 1 重旋转对称（C1）结构中可以产生与基波相同和相反圆偏振的倍频光，而三重旋转对称(C3)结构中只能产生相反圆偏振的倍频光，其余对称结构则不能发生圆偏光倍频。

因此，对于具体某一非线性过程，非线性几何相位只能在少数特定的旋转对称结构中产生。尽管同一过程可能在不同的旋转对称结构中产生，但非线性几何相位规律并不因此改变，比如在 C1 和 C3 结构中，偏振态与基波相反的圆偏倍频光几何相位都为 $3\sigma\theta$，这些限制关系制约了非线性几何相位的产生和调控灵活度。

发明内容

（一）要解决的技术问题

针对上述问题，本公开提供了一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，用于解决传统超表面对非线性几何相位的调控受限制较大等技术问题。

（二）技术方案

本公开提供了一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，自下而上依次包括：衬底；非线性材料层；超表面结构层，包括多个具有局域高阶旋转对称性的超构单元，超构单元呈周期性排列形成具有全局高阶旋转对称性的晶格结构；非线性几何相位超表面在圆偏振态基波的泵浦下，能够同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波。

进一步地，同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波的谐波阶数 n 为 2 或 3。

进一步地，超构单元的局域旋转对称阶数 m、晶格结构的全局旋转对称阶数 q、谐波阶数 n 满足以下条件：n+1 和 n-1 均能够被局域旋转对称阶数 m 与全局旋转对称阶数 q 的最大公因数整除。

进一步地，非线性谐波的谐波阶数 n 为 2 时，非线性谐波的几何相位 $\Phi = \pm m\theta$ 或 $\Phi = \pm 3m\theta$，其中，θ 为超构单元的旋转角；非线性谐波的谐波阶数 n 为 3 时，非线性谐波的几何相位 $\Phi = \pm 2m\theta$、$\pm m\theta$ 或 0。

进一步地，具有局域高阶旋转对称性的超构单元的局域旋转对称阶数 m 大于 4。

进一步地，超构单元呈周期性排列包括采用四方点阵或六角点阵的排布形成全局旋转对称阶数 q 为 4 或 6 的晶格结构。

进一步地，超构单元为亚波长金属结构，亚波长金属结构的材料包括但不限于金、铝中的一种。

进一步地，亚波长金属结构具有 m 阶旋转对称性即可，包括但不限于正 m 边形、正 m 星形，其中，m 为超构单元的局域旋转对称阶数。

进一步地，非线性材料层包括但不限于氧化铟锡、铌酸锂中的一种；衬底包括但不限于玻璃、蓝宝石中的一种。

进一步地，超构单元的厚度 $h<\lambda_0/2$、周期 $p<\lambda_0$；非线性材料层的厚度 $t<\lambda_0/2$；衬底的厚度为 $d>>\lambda_0$，其中，λ_0 为谐波波长。

（三）有益效果

本公开提供的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，利用超构单元和晶格结构的耦合效应，能在具有局域高阶旋转对称性的超构单元中同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波，且所产生非线性谐波的非线性几何相位受超构单元局域旋转对称阶数和晶格结构的调控；这打破了传统非线性超表面中的选择定则与几何相位规律，同时也丰富了非线性光场调控的方式。

附图说明

图 1 示意性示出了根据本公开实施例中基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面的结构示意图；

图 2 示意性示出了根据本公开实施例中三种不同亚波长金属结构的非线性几何相位超表面的三维视图和俯视图；

图 3 示意性示出了根据本公开实施例 1 中设计的非线性几何相位超表面的倍频仿真结果；

图 4 示意性示出了根据本公开实施例 1 中利用超构单元结构设计的偏折器件仿真结果；

图 5 示意性示出了根据本公开实施例 2 中非线性几何相位超表面的结构示意图以及三倍频仿真结果；

附图标记说明：

1. 衬底，2. 非线性材料层，3. 超表面结构层，4. 超构单元。

具体实施方式

为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本公开进一步详细说明。

在此使用的术语仅仅是为了描述具体实施例，而并非意在限制本公开。在此使用的术语“包括”、“包含”等表明了所述特征、步骤、操作和/或部件的存在，但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、步骤、操作或部件。

在此使用的所有术语（包括技术和科学术语）具有本领域技术人员通常所理解的含义，除非另外定义。应注意，这里使用的术语应解释为具有与本说明书的上下文相一致的含义，而不应以理想化或过于刻板的方式来解释。

本公开的实施例提供了一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，请参见图 1，自下而上依次包括：衬底 1；非线性材料层 2；超表面结构层 3，包括多个具有局域高阶旋转对称性的超构单元 4，超构单元 4 呈周期性排列形成具有全局高阶旋转对称性的晶格结构；该非线性几何相位超表面在圆偏振态基波的泵浦下，能够同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波，且所产生非线性谐波的非线性几何相位受超构单元局域旋转对称阶数和晶格结构的调控。

超表面结构层 3 的对称性由单个超构单元 4 的局域对称性和多个超构单元 4 的全局对称性共同决定，因此，本公开通过设计超构单元 4 的结构、尺寸以及其晶格结构的全局对称性来调节其非线性光学响应。具体地，本公开包括超表面结构层 3、具有垂直方向高非线性响应的非线性材料层 2 以及非线性响应可忽略的衬底 1，非线性响应主要在非线性材料层 2 中发生，超构单元 4 呈周期性排列形成的阵列主要用于调控电场对称性和增强非线性材料层 2 中 z 方向电场，并促进非线性谐波耦合到自由空间；衬底 1 则主要用于支撑非线性材料层 2 和超表面结构层 3。

其中，超表面结构层 3 采用具有局域高阶旋转对称性的超构单元 4，且该超构单元 4 排列形成具有全局高阶旋转对称性的晶格结构，利用超构单元 4 与晶格结构的耦合效应，在非线性超表面中可同时产生与基波相同和相反两种圆偏振态的非线性谐波，且所产生非线性谐波的非线性几何相位受超构单元 4 的旋转对称阶数和晶格结构调控。这打破了传统非线性超表面中的选择定则与几何相位规律，也丰富了非线性光场调控

的手段。

在上述实施例的基础上，同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波的谐波阶数 n 为 2 或 3。

本公开的非线性几何相位超表面既适用于二次谐波的调控也适用于三次谐波的调控，对应的非线性材料层 2 相应地选择二阶或三阶非线性材料，同时，利用超构单元 4 调控电场对称性，即可得到谐波阶数 n 为 2 或 3 的非线性谐波。

在上述实施例的基础上，为了实现上述技术效果，本公开中超构单元的局域旋转对称阶数 m、晶格结构的全局旋转对称阶数 q、非线性谐波的谐波阶数 n 需满足以下条件：n+1 和 n-1 均能够被局域旋转对称阶数 m 与全局旋转对称阶数 q 的最大公因数整除。

当超构单元 4 的局域高阶旋转对称阶数 m 与晶格结构的全局高阶旋转对称阶数 q 不匹配时，即 q 不能被 m 整除时，传统选择定则可以被打破，这时选择定则应考虑整体结构的旋转对称阶数，其可以表示为超构单元 4 的局域旋转对称阶数 m 与晶格结构的全局旋转对称阶数 q 的最大公因数。在设计超构单元 4 时，按照以下规则进行超构单元 4 的旋转对称阶数 m 的具体设计，即 m 需满足：(n+1)和(n-1)均能够被局域旋转对称阶数 m 与全局旋转对称阶数 q 的最大公因数整除，且 m 为大于 4 的正整数。其中，n 为非线性谐波的谐波阶数。

本公开设计得到的非线性几何相位超表面可以同时产生与基波相同和相反两种圆偏振的非线性谐波，且非线性几何相位由光场的偏振态和超构单元的旋转对称阶数，以及晶格结构共同决定。其中，所得二次谐波（倍频光）的几何相位为 $\Phi = \pm m\theta$ 或 $\Phi = \pm 3m\theta$，其中，θ 为超构单元 4 的旋转角，所得三次谐波（三倍频光）的几何相位为 $\Phi = \pm 2m\theta$、$\pm m\theta$ 或 0。

下面说明本公开中谐波产生和几何相位调控的原理，如下：

以二阶非线性效应为例，由于选择定则，人们认为非线性超表面中圆偏光的倍频只能发生在 C1 和 C3 旋转对称结构中，其中 C1 结构中可以产生与基波相同和相反两种圆偏振的倍频光，而 C3 结构中只能产生

与基波相反圆偏振的倍频光。与基波相同和相反圆偏振倍频光的非线性几何相位分别为 $\Phi = \pm\theta$ 和 $\Phi = \pm 3\theta$。

因此，在四方晶格结构中，对于二阶非线性效应，m 为 4 以上的奇数阶旋转对称超构单元都能同时产生两种圆偏振的倍频光。且由于超构单元与晶格结构的耦合效应，两种圆偏振倍频光都可以携带 $\Phi = \pm m\theta$ 的几何相位；其中，θ 为超构单元 4 的旋转角。比如对于 C5 结构，倍频光的几何相位可以为 $\Phi = \pm 5\theta$，而 C7 结构中倍频光几何相位可以达到 $\Phi = \pm 7\theta$。这表明非线性几何相位受超构单元旋转对称阶数调控。

对于三阶非线性效应，旋转对称阶数 m 为 4 以上且不为 4 的整数倍的超构单元也能同时产生两种圆偏振的三倍频光，且偏振态与基波相同的三倍频光几何相位为 $\Phi = \pm 2m\theta$ (m 为奇数)或 $\Phi = \pm m\theta$ (m 为偶数)，而偏振态与基波相反的三倍频光几何相位为 0。

在六角晶格结构中，对于二阶非线性效应，旋转对称阶数 m 为 4 以上的奇数且不为 3 的整数倍的超构单元中都能产生两种圆偏振倍频光，其中与基波具有相同圆偏振态的倍频光可以携带 $\Phi = \pm m\theta$ 的几何相位，与基波具有相反圆偏振态的倍频光可以携带 $\Phi = \pm 3m\theta$ 的几何相位，与四方晶格的情况稍有不同。这表明非线性几何相位也受晶格结构调控。

对于三阶非线性效应，旋转对称阶数 m 为 4 以上且不为 3 的整数倍的超构单元中都能产生两种圆偏振三倍频光，且两种圆偏振三倍频光都可以携带 $\Phi = \pm 2m\theta$ (m 为奇数)或 $\Phi = \pm m\theta$ (m 为偶数)的几何相位。

以上总结如下表 1：

表 1

谐波阶数	四方晶格排列（q=4）	六角晶格排列（q=6）
n=2	m 为 4 以上的奇数	m 为 4 以上的奇数且不为 3 的整数倍
n=3	m 为 4 以上且不为 4 的整数倍	m 为 4 以上且不为 3 的整数倍

在上述实施例的基础上，本公开具有局域高阶旋转对称性的超构单元 4 的局域旋转对称阶数 m>4。

其中，超构单元 4 的局域旋转对称阶数为 3 或 4 时虽然也能在特定

晶格中同时产生与基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波，但此时超构单元 4 与晶格结构的耦合效应还不足够明显；当局域旋转对称阶数为 3 或 4 时，相反圆偏振态的非线性谐波的强度远大于相同圆偏振态的非线性谐波的强度，所以本公开选择超构单元 4 的局域旋转对称阶数 m>4。

在上述实施例的基础上，超构单元 4 呈周期性排列包括采用四方点阵或六角点阵的排布形成全局旋转对称阶数 q 为 4 或 6 的晶格结构。

超构单元 4 采用四方点阵或六角点阵的周期性排列方式形成具有特定排列方式的晶格结构，即该晶格结构的晶格旋转对称阶数 q 为 4 或 6，晶格结构的高阶旋转对称性能与超构单元 4 的耦合效果更好。

在上述实施例的基础上，超构单元 4 为亚波长金属结构，本公开亚波长金属结构的材料可以包括但不限于金、铝中的一种。

亚波长金属结构以周期性排列方式形成晶格结构，主要用于调控电场对称性和增强非线性材料层 2 中 z 方向电场，并促进非线性谐波耦合到自由空间；亚波长金属结构以自身的中心旋转一定角度 θ 可以带来相应的几何相位变化。

在上述实施例的基础上，亚波长金属结构具有 m 阶旋转对称性即可，包括但不限于正 m 边形、正 m 星形，其中，m 为超构单元 4 的局域旋转对称阶数。

亚波长金属结构例如具有五重(C5)、七重(C7) 局域高阶旋转对称性，其具体结构如图 2 所示，图 2（a）为正五星形，图 2（b）为正五边形，图 2（c）为正七边形，当然，这里并不限定于以上三种亚波长金属结构，其它具有局域高阶旋转对称性的结构也适用于本公开的技术方案。需要说明的是，当亚波长金属结构为具有五重(C5)、七重(C7)等 5 以上的奇数阶旋转对称性的结构时，在 n=2，q=4 时效果最优。

在上述实施例的基础上，非线性材料层 2 包括但不限于氧化铟锡、铌酸锂中的一种；衬底 1 包括但不限于玻璃、蓝宝石中的一种。

非线性材料层 2 的材料可以为氧化铟锡(ITO)、铌酸锂等，其中铌酸锂具有高二阶非线性响应，ITO 同时具有较强的二阶和三阶非线性响应；衬底 1 的材料可以为玻璃、蓝宝石等，衬底 1 的材料只需要满足非线性

响应低、能起支撑作用即可。

在上述实施例的基础上，超构单元 4 的厚度 $h<\lambda_0/2$、周期 $p<\lambda_0$；非线性材料层 2 的厚度 $t<\lambda_0/2$；衬底 1 的厚度为 $d>>\lambda_0$，其中，λ_0 为谐波波长。

如图 2 所示，图 2 上半部分为非线性几何相位超表面的三维视图，其中，超构单元 4 的厚度和周期分别为 h 和 p，非线性材料层 2 和衬底 1 的厚度分别为 t 和 d；超构单元 4 的周期 p 需要小于谐波波长 λ_0，是为了避免产生高阶衍射；超构单元 4 的厚度 h 经验取值小于谐波半波长 $\lambda_0/2$，有利于效率优化。其中，二次谐波的波长是基波波长的一半，三次谐波的波长是基波波长的三分之一。

图 2 下半部分为非线性几何相位超表面的俯视图，θ 为亚波长金属结构的旋转角，将亚波长金属结构中垂直于 x 轴方向的初始对称轴作为对称轴并将垂直于对称轴的 x’轴（初始位置时与 x 轴重合）作为参考轴，此时 θ=0；当旋转亚波长金属结构时，对称轴随之旋转且参考轴 x’也随之旋转，则参考轴 x’与 x 轴之间的夹角即为旋转角 θ，可以通过设计调整每个亚波长金属结构的旋转角 θ 并得到具有不同旋转角 θ 的亚波长金属结构单元，继而可以通过周期性排列得到亚波长金属结构阵列。

本公开通过设计具有五重(C5)、七重(C7)等高阶旋转对称性的超构单元、具有垂直方向高非线性响应的非线性材料层，并利用超构单元与晶格结构的耦合效应，可以同时产生与基波相同和相反两种圆偏振的非线性谐波，且非线性几何相位由光场的偏振态和超构单元的旋转对称阶数，以及晶格结构共同决定；颠覆了人们对非线性超表面中谐波产生和几何相位的认知，对非线性光场调控的原理和应用具有重大意义。

下面通过具体实施方式对本公开作进一步说明。在以下实施例中对上述基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面进行具体说明。但是，下述实施例仅用于对本公开进行例示，本公开的范围不限于此。

实施例 1：

本实施例选择具有 C5 旋转对称性的非线性超表面为例进行说明。

该非线性几何相位超表面由具有周期性阵列排布的超构单元 4、非

线性材料层 2 和衬底 1 构成，其中，超构单元 4 为亚波长金属结构，该亚波长金属结构单元为正五边形，按四方点阵周期性排列形成晶格结构；亚波长金属结构单元的材料为金，其介电常数可以从 Palik 光学手册中获得。

非线性材料层 2 的材料为 ITO，ITO 是一种介电常数实部具有零点的材料，在零介电常数波长附近非线性相互作用可以得到大大增强。ITO 的相对介电常数可以用德鲁德模型描述为 $\varepsilon = \varepsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\Gamma\omega)$，其中 ω 为光的角频率。公式里其它参数取值可以通过实验制备条件进行控制，这里采用商用 ITO 薄膜的实验测试结果，即 $\varepsilon_\infty = 3.0404$，$\omega_p = 2.5695 \times 10^{13}$ Hz，$\Gamma = 1.4832 \times 10^6$ Hz，对应介电常数实部零点位于 1300nm 波长附近。ITO 的最大二阶非线性系数矩阵元为 $d_{33} = 0.18$ pm/V。

衬底 1 的材料为钠钙玻璃，其介电常数可以从 Palik 光学手册中获得。采用 COMSOL Multiphysics 软件模拟该结构中的倍频，基波波段设置为 1250 nm~1350 nm，优化的亚波长金属结构单元的周期和厚度分别为 p = 600 nm，h = 60 nm，正五边形的边长为 200 nm。非线性材料层 2 的厚度 t 为 15 nm，衬底 1 的厚度 d 为 1 mm。

图 3 为设计的非线性几何相位超表面的倍频仿真结果，其中图 3 (a)、图 3 (b)分别为左旋和右旋圆偏振基波入射下的倍频光（即二次谐波）不同圆偏分量强度，图 3 (c)、图 3 (d)分别为左旋圆偏基波光入射下产生的左旋和右旋圆偏振倍频光（即二次谐波）的几何相位。

倍频光强随波长变化如图 3(a)和图 3 (b)所示，在左旋和右旋基波光入射下，该结构中都可以产生两种圆偏振的倍频光，且在 ITO 介电常数零点附近，倍频光强度明显得到了增强。这意味着非线性超表面中的常规选择定则被打破。

图 3(c)和图 3 (d)展示了左旋基波光入射下，左旋和右旋圆偏振倍频光的几何相位随超构单元旋转角的变化。可以看出，亚波长金属结构单元每旋转 9°，左旋和右旋圆偏振倍频光的相位分别变化+45°和-45°，对应几何相位分别满足 $\Phi = 5\theta$ 和 $\Phi = -5\theta$。

接着，利用旋转亚波长金属结构单元设计了一个非线性光束偏折器

件来验证这种相位梯度。选取 24 个旋转角依次增加 3°的金属结构单元沿 x 方向排列，组成超构单元；再将超构单元周期性排布。当左旋圆偏振的平面基波光从下方入射时，产生的左旋和右旋倍频光将分别向+x 和-x 方向偏转，偏转角分别为 $\psi = \pm\arcsin(\lambda / P)$。这里 λ 为倍频光波长，P = 24p 为超级单元长度，p 为 600 nm。

图 4 为利用上述超构单元结构设计的偏折器件仿真结果，其中图 4 (a)为截面倍频光不同圆偏振分量的归一化电场分布，图 4 (b)为远场倍频光强分布。

具体地，图 4(a)展示了 1300 nm 左旋基波光入射下，倍频光两种圆偏振分量的归一化电场分布仿真结果。可以看出，不同偏振的倍频光向不同的方向偏转。远场分析表明，左旋和右旋圆偏振倍频光的衍射角分别为+5.2°和-5.2°，与理论计算结果一致，如图 4 (b)所示。

实施例 2：

本实施例选择具有 C7 旋转对称性的非线性超表面为例进行说明。

该非线性几何相位超表面由具有周期性阵列排布的超构单元 4、非线性材料层 2 和衬底 1 构成，如图 5(a)所示。其中，超构单元 4 为亚波长金属结构，该亚波长金属结构单元为正七星形，按六角点阵周期性排列形成晶格结构；亚波长金属结构单元的材料为铝，其介电常数可以从 Palik 光学手册中获得。

非线性材料层 2 的材料仍然为 ITO，与实施例 1 相同，不过这里用到的是 ITO 的三阶非线性效应。ITO 的相对介电常数在不同制备条件下具有不同的取值，这里用德鲁德模型描述为 $\varepsilon = \varepsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\Gamma\omega)$，并取 $\varepsilon_\infty = 1.0878$，$\omega_p = 1.0419\times10^{13}$ Hz，$\Gamma = 4.0950\times10^{6}$ Hz，对应介电常数实部零点位于 2000 nm 波长附近。ITO 的最大三阶非线性系数矩阵元为 $\chi_{1111} = 3.5\times10^{-18}$ m^2/V^2。

衬底 1 的材料为钠钙玻璃，其介电常数可以从 Palik 光学手册中获得。采用 COMSOL Multiphysics 软件模拟该结构中的三倍频，基波波段设置为 1900 nm~2100 nm，优化的亚波长金属结构单元的周期和厚度分别为 p = 600 nm，h = 100 nm，正七星形的棱长和宽度分别为 l = 120 nm

和 w = 130 nm。非线性材料层 2 的厚度 t 为 15 nm，衬底 1 的厚度 d 为 1 mm。

图 5 (b)~(d)为设计的非线性几何相位超表面的三倍频仿真结果，其中图 5 (b)为左旋和右旋圆偏振基波入射下的三倍频光（即三次谐波）不同圆偏分量强度，图 5 (c)、图 5 (d)分别为左旋圆偏基波光入射下产生的左旋和右旋圆偏振三倍频光（即三次谐波）的几何相位。

三倍频光强随波长变化如图 5(b)所示，在左旋和右旋基波光入射下，该结构中都可以产生两种圆偏振的三倍频光。由于非线性过程同时受电场强度和交叠积分影响，三倍频最强位置并不完全位于 ITO 的介电常数零点波长。这意味着非线性超表面中的常规选择定则被打破。

图 5(c)和图 5 (d)展示了左旋基波光入射下，左旋和右旋圆偏振三倍频光的几何相位随超构单元旋转角的变化。可以看出，亚波长金属结构单元每旋转 4.3°，左旋和右旋圆偏振三倍频光的相位分别变化+60°和-60°，对应几何相位分别满足 $\Phi = 1\theta$ 和 $\Phi = -1\theta$。

以上所述的具体实施例，对本公开的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本公开的具体实施例而已，并不用于限制本公开，凡在本公开的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本公开的保护范围之内。

权利要求

1、一种基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，自下而上依次包括：

衬底（1）；

非线性材料层（2）；

超表面结构层（3），包括多个具有局域高阶旋转对称性的超构单元（4），所述超构单元（4）呈周期性排列形成具有全局高阶旋转对称性的晶格结构；

所述非线性几何相位超表面在圆偏振态基波的泵浦下，能够同时产生与所述基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波。

2、根据权利要求 1 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述同时产生与所述基波相同和相反圆偏振态的非线性谐波的谐波阶数 n 为 2 或 3。

3、根据权利要求 2 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述超构单元（4）的局域旋转对称阶数 m、所述晶格结构的全局旋转对称阶数 q、所述谐波阶数 n 满足以下条件：

n+1 和 n-1 均能够被所述局域旋转对称阶数 m 与所述全局旋转对称阶数 q 的最大公因数整除。

4、根据权利要求 3 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述非线性谐波的谐波阶数 n 为 2 时，所述非线性谐波的几何相位 $\Phi = \pm m\theta$ 或 $\Phi = \pm 3m\theta$，其中，θ 为所述超构单元（4）的旋转角；

所述非线性谐波的谐波阶数 n 为 3 时，所述非线性谐波的几何相位 $\Phi = \pm 2m\theta$、$\pm m\theta$ 或 0。

5、根据权利要求 3 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述具有局域高阶旋转对称性的超构单元（4）的局域旋转对称阶数 m 大于 4。

6、根据权利要求 3 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述超构单元（4）呈周期性排列包括采用四

方点阵或六角点阵的排布形成全局旋转对称阶数q为4或6的晶格结构。

7、根据权利要求 1 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述超构单元（4）为亚波长金属结构，所述亚波长金属结构的材料包括金、铝中的一种。

8、根据权利要求 7 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述亚波长金属结构包括正 m 边形、正 m 星形，其中，m 为所述超构单元（4）的局域旋转对称阶数。

9、根据权利要求 1 所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述非线性材料层（2）包括氧化铟锡、铌酸锂中的一种；所述衬底（1）包括玻璃、蓝宝石中的一种。

10、根据权利要求1所述的基于高阶旋转对称单元的非线性几何相位超表面，其特征在于，所述超构单元（4）的厚度 $h<\lambda_0/2$、周期 $p<\lambda_0$；所述非线性材料层（2）的厚度 $t<\lambda_0/2$；所述衬底（1）的厚度为 $d>>\lambda_0$，其中，λ_0 为谐波波长。

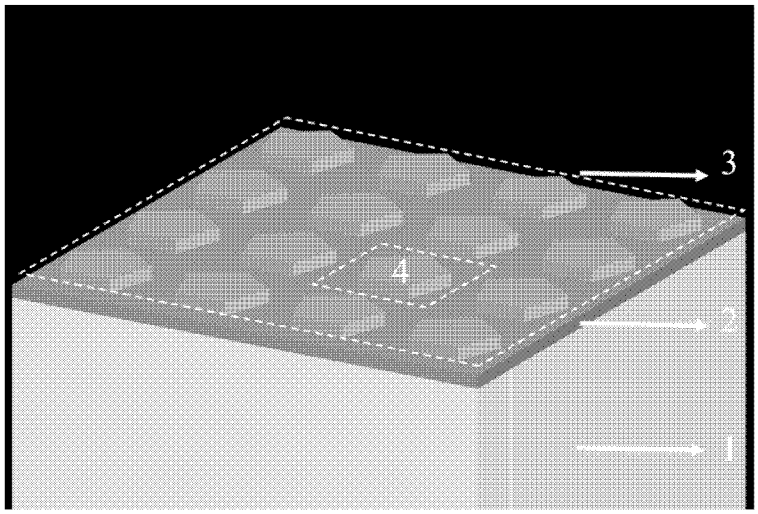


图 1

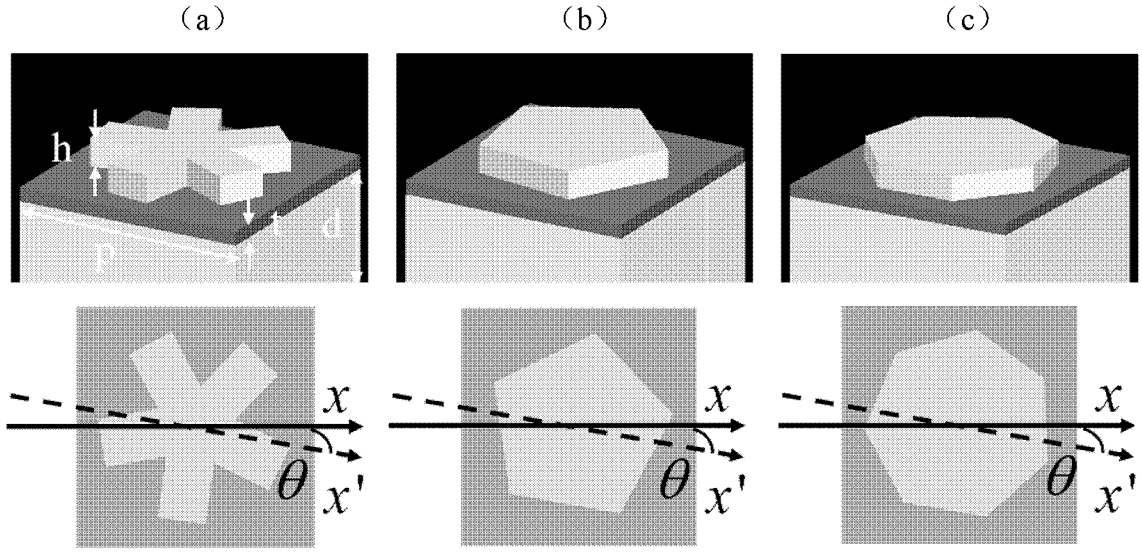


图 2

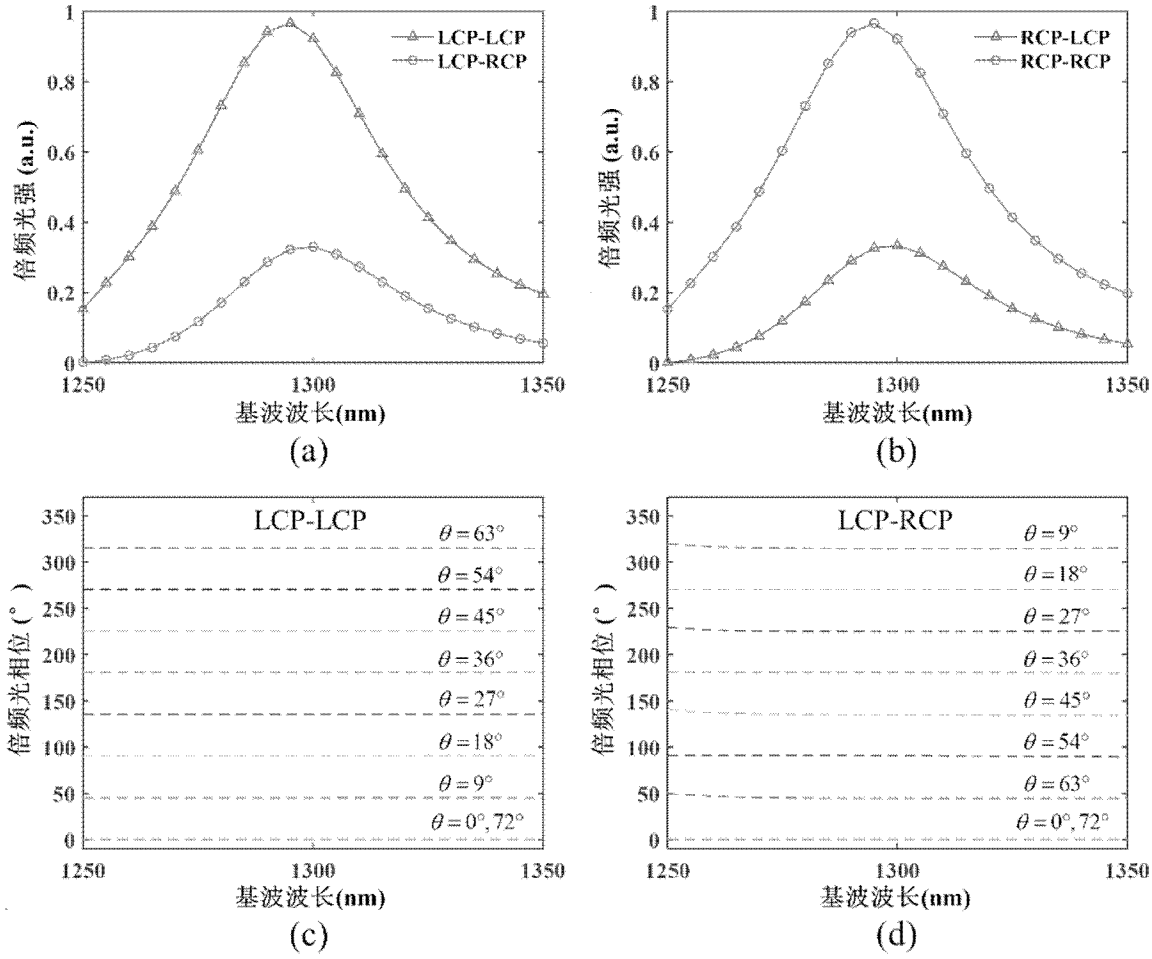
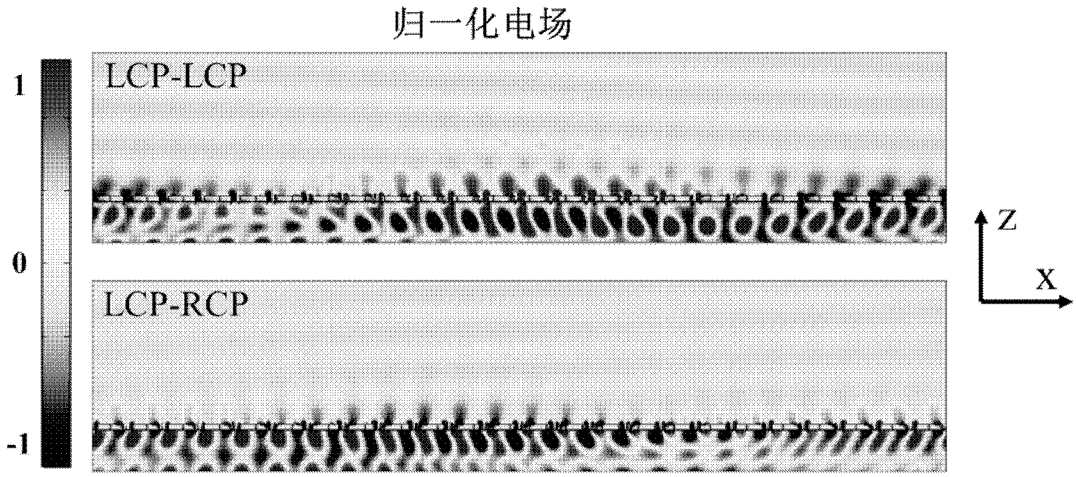
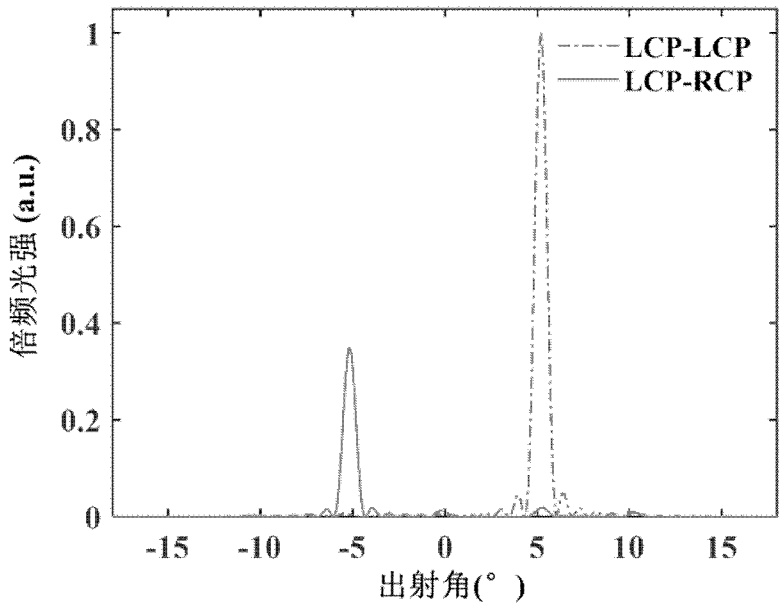

LCP-LCP
LCP-RCP
倍频光强 (a.u.)
基波波长(nm)
(a)
RCP-LCP
RCP-RCP
倍频光强 (a.u.)
基波波长(nm)
(b)
LCP-LCP
θ = 63°
θ = 54°
θ = 45°
θ = 36°
θ = 27°
θ = 18°
θ = 9°
θ = 0°, 72°
倍频光相位 (°)
基波波长(nm)
(c)
LCP-RCP
θ = 9°
θ = 18°
θ = 27°
θ = 36°
θ = 45°
θ = 54°
θ = 63°
θ = 0°, 72°
倍频光相位 (°)
基波波长(nm)
(d)

图 3


归一化电场
1
0
-1
LCP-LCP
LCP-RCP
Z
X

(a)


LCP-LCP
LCP-RCP
倍频光强 (a.u.)
出射角(°)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-15
-10
-5
0
5
10
15

(b)

图 4

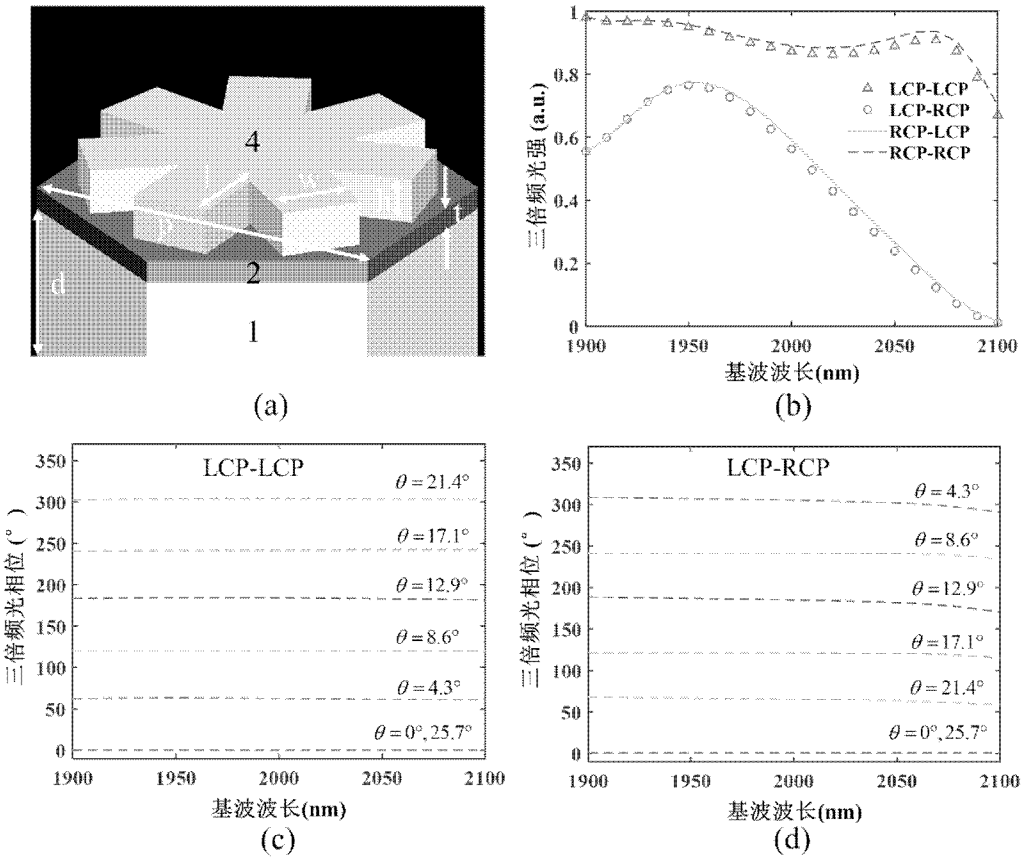

4
3
2
1
d
(a)
三倍频光强(a.u.)
基波波长(nm)
LCP-LCP
LCP-RCP
RCP-LCP
RCP-RCP
(b)
三倍频光相位(°)
LCP-LCP
θ=21.4°
θ=17.1°
θ=12.9°
θ=8.6°
θ=4.3°
θ=0°,25.7°
基波波长(nm)
(c)
LCP-RCP
θ=4.3°
θ=8.6°
θ=12.9°
θ=17.1°
θ=21.4°
θ=0°,25.7°
(d)

图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2022/079528

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 27/00(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)

G02B27

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)

CNABS, CNTXT, CNKI: 非线性, 几何相位, 超表面, 旋转对称, 圆偏振, 左旋, 右旋; VEN, USTXT, WOTXT, EPTXT, ISA: nonlinear, geometric phase, metasurface, rotational symmetry, circular polarization, LCP, RCP

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 113946009 A (THE INSTITUTE OF OPTICS AND ELECTRONICS, THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 18 January 2022 (2022-01-18) description, paragraphs 56-91, and figures 1-8	1-10
A	CN 108107498 A (THE INSTITUTE OF OPTICS AND ELECTRONICS, THE CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 01 June 2018 (2018-06-01) description, paragraphs 5-29, and figures 1-4	1-10
A	US 2022011646 A1 (WILLIAM MARSH RICE UNIVERSITY et al.) 13 January 2022 (2022-01-13) entire document	1-10
A	XIN, Xie et al. "Generalized Pancharatnam-Berry Phase in Rotationally Symmetric Meta-Atoms" *PHYSICAL REVIEW LETTERS,* Vol. 126, No. (18), 07 May 2021 (2021-05-07), ISSN: 0031-9007, entire document	1-10

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"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)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
14 November 2022	**07 December 2022**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088, China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2022/079528

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	赵文超 (ZHAO, Wenchao). "基于Au-WS2复合超表面的高效率二次谐波微纳功能器件研究 (non-official translation: Research on High Efficiency Second Harmonic Micro-Nano Functional Devices Based on Au-WS2 Composite Metasurface)" *中国博士学位论文全文数据库 工程科技I辑 (Engineering Science and Technology I, China Doctoral Dissertations Full-text Database),* No. 1, 15 January 2022 (2022-01-15), text, chapter II	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2022/079528

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 113946009 A	18 January 2022	None	
CN 108107498 A	01 June 2018	CN 108107498 B	31 December 2019
US 2022011646 A1	13 January 2022	WO 2020072502 A1	09 April 2020
		EP 3861404 A1	11 August 2021

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2022/079528

A. 主题的分类

G02B 27/00(2006.01)i

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

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G02B27

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

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））

CNABS,CNTXT,CNKI: 非线性，几何相位，超表面，旋转对称，圆偏振，左旋，右旋 VEN,USTXT,WOTXT,EPTXT,ISA: nonlinear, geometric phase, metasurface, rotational symmetry, circular polarization, LCP, RCP

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	CN 113946009 A (中国科学院光电技术研究所) 2022年1月18日 (2022-01-18) 说明书第56-91段及图1-8	1-10
A	CN 108107498 A (中国科学院光电技术研究所) 2018年6月1日 (2018-06-01) 说明书第5-29段及图1-4	1-10
A	US 2022011646 A1 (UNIV RICE WILLIAM M 等) 2022年1月13日 (2022-01-13) 全文	1-10
A	Xin Xie 等. "Generalized Pancharatnam-Berry Phase in Rotationally Symmetric Meta-Atoms" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 第126卷，第18期，2021年5月7日 (2021-05-07), ISSN：0031-9007, 全文	1-10
A	赵文超. "基于Au-WS2复合超表面的高效率二次谐波微纳功能器件研究" 中国博士学位论文全文数据库工程科技Ⅰ辑, 第1期，2022年1月15日 (2022-01-15), 正文第二章	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“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）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“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

“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

“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

“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

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2022年11月14日	2022年12月7日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 胡雅婷 电话号码 86-(20)-28950802

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2022/079528

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 113946009 A	2022年1月18日	无	
CN 108107498 A	2018年6月1日	CN 108107498 B	2019年12月31日
US 2022011646 A1	2022年1月13日	WO 2020072502 A1	2020年4月9日
		EP 3861404 A1	2021年8月11日