

(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
2020 年 6 月 4 日 (04.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/107254 A1

- (51) 国际专利分类号:
G02F 1/01 (2006.01) **G02B 6/02** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/117890
- (22) 国际申请日: 2018 年 11 月 28 日 (28.11.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 白志勇(BAI, Zhiyong); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。 张岩(ZHANG, Yan); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。 王义平(WANG, Yiping); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。 付彩玲(FU, Cailing); 中国广东省深圳市南山区南海大道

道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。 刘申(LIU, Shen); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号深圳大学光电工程学院, Guangdong 518060 (CN)。

(74) 代理人: 广州华进联合专利商标代理有限公司 (ADVANCE CHINA IP LAW OFFICE); 中国广东省广州市天河区珠江东路6号4501房 (部位: 自编01-03和08-12单元) (仅限办公用途), Guangdong 510623 (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, 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, SL,

(54) Title: CHIRAL FIBER GRATING-BASED POLARIZATION-INDEPENDENT ORBITAL ANGULAR MOMENTUM MODULATOR, PREPARATION METHOD THEREFOR, AND ORBITAL ANGULAR MOMENTUM BEAM GENERATOR

(54) 发明名称: 基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器及其制备方法和轨道角动量光束发生器

100

110



图 1

(57) Abstract: The present application relates to a chiral fiber grating-based polarization-independent orbital angular momentum modulator, a preparation method therefor, and an orbital angular momentum beam generator. The orbital angular momentum modulator comprises a fiber main body which has a spiral fiber structure, the spiral fiber structure having a long-period fiber grating effect. The fiber main body has periodic spiral refractive index modulation in the axial direction, a period of the spiral refractive index modulation is in the order of hundreds of micrometers, and the spiral refractive index modulation is distributed in axial, radial, and angular directions of the fiber main body for use in exciting a helical phase and generating an orbital angular momentum beam. The present chiral fiber grating-based polarization-independent orbital angular momentum modulator is an all-fiber structure which has polarization independence and high coupling efficiency.

(57) 摘要: 本申请涉及一种基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器及其制备方法和轨道角动量光束发生器。轨道角动量调制器包括光纤主体, 所述光纤主体具有螺旋光纤结构, 所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应。所述光纤主体轴向具有周期性的螺旋折射率调制, 所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级, 所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体的轴向、径向和角向, 用于激发螺旋相位, 产生轨道角动量光束。基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器为全光纤结构, 具有偏振无关性且耦合效率高。

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))。

基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器及其制备方法和轨道角动量光束发生器

技术领域

本申请涉及轨道角动量应用技术领域，特别是涉及一种基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器及其制备方法和轨道角动量光束发生器。

背景技术

携带有轨道角动量（orbital angular momentum, OAM）的涡旋光与传统的平面波、球面波及其他偏振光在波前结构方面存在着很大的差别，涡旋光围绕光束中心呈现出特有的螺旋型波前结构，其相位因子中存在用数学公式可表示为 $\exp(il\theta)$ 的一项，其中 θ 为旋转相位角， l 为光学涡旋的拓扑荷数。

相关技术中，螺旋相位片（Spiral phase plates, SPP）可以在不改变模式的前提下提高转换效率。螺旋相位片是一块厚度不均匀的光学调制器件，其中一面为平面，另外一面是厚度随方位角变化的螺旋曲面介质圆盘。其螺旋相位片平板厚度随方位角按 $h=l\lambda\theta/2\pi r(n-1)$ 关系变化，其中 n 为材料折射率， l 为产生的轨道角动量光束拓扑荷值， θ 为方位角。当一束高斯光经过该透射型介质平板时，不同半径处所经过的厚度与折射角均不相同，得到不同的光程差，进而引起不同的相位差。对于特定波长，若旋转一周形成 $2l\pi$ 的相位差即可产生的拓扑荷数为 l 。该方法可以直观的产生螺旋相位，不需要其他辅助设备。但是，使用一个螺旋相位片不能同时产生多个不同阶数的轨道角动量光束，且只能在特定工作波长处产生轨道角动量光束。此外，螺旋相位片沿角向的螺距要求严格，需要非常精密的制备技术。

可以利用空间调制器产生的计算全息图实现衍射光学元件（Diffractive Optical Elements, DOEs）的功能。通过电脑程序控制可以在空间光调制器的液晶屏上加载不同的电压，改变晶体的形态，从而在液晶屏上加载不同的全

息图。利用不同全息图即可灵活的控制产生的轨道角动量光束的拓扑荷数。但是，空间光调制器存在价格昂贵、具有偏振相关性、耦合效率低以及只能产生低功率轨道角动量光束等缺点。

长周期光纤光栅与压力板、旋转器或偏振控制器相结合可以激发出螺旋相位。长周期光纤光栅实现模式由基模到高阶模式的耦合，而其他附件可以在耦合的高阶模式间产生 $\pm\pi/2$ 的相位差。虽然该方法具有耦合效率高、插损低、质量轻、成本低、抗电磁干扰以及与光纤通信系统完全兼容等优势。但是，长周期光纤光栅激发螺旋相位需要外加附件以实现相位调制，具有偏振相关性。

综上所述，相关技术实现螺旋相位激发具有波长依赖性、偏振相关性、结构复杂以及制备困难等问题。

发明内容

基于此，有必要针对激发螺旋相位的相关技术存在波长依赖性和偏振相关性、结构复杂以及制备困难的问题，提供一种基于手征光纤光栅的偏振无关型轨道角动量调制器及其制备方法和轨道角动量光束发生器。

一种偏振无关型轨道角动量调制器，包括：

光纤主体，具有螺旋光纤结构，所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应；

所述光纤主体轴向具有周期性的螺旋折射率调制，所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级，所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体的轴向、径向和角向，用于激发螺旋相位，产生轨道角动量光束。

一种偏振无关型轨道角动量调制器制备方法，包括：

加热光纤主体至熔融状态；

扭曲熔融状态的所述光纤主体；

冷却所述光纤主体。

采用上述偏振无关型轨道角动量调制器制备方法具有较高的稳定性，加

工得到的手征光纤非常均匀，能够较好的接近理论的极限值，具有较高的耦合效率。

一种轨道角动量光束发生器，包括：

光源；

5 偏振控制器，输入端与所述光源连接；

偏振无关型轨道角动量调制器，与所述偏振控制器输出端连接；以及

第一光纤跳线，与所述偏振无关型轨道角动量调制器远离所述偏振控制器的一端连接；

其中，所述偏振无关型轨道角动量调制器包括：

10 光纤主体，具有螺旋光纤结构，所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应；

所述光纤主体轴向具有周期性的螺旋折射率调制，所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级，所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体的轴向、径向和角向，用于激发螺旋相位，产生轨道角动量光束。

15 上述偏振无关型轨道角动量调制器，通过采用光纤主体作为基底，所述光纤主体具有周期性分布的螺旋光纤结构，可以在一定带宽内激发螺旋相位。所述光纤主体形成的螺旋光纤结构具有螺旋对称性，不会形成对偏振敏感的特定方向，具有偏振无关性。所述偏振无关型轨道角动量调制器为全光纤结构，通信中有利于集成，具有良好的兼容性，无需其他器件辅助，具有结构
20 简单、容易制备等优势。进一步的，所述偏振无关型轨道角动量调制器耦合效率高，产生的 OAM 可以携带任意偏振态，且具有高纯度。所述偏振无关型轨道角动量调制器制备方法，采用高温热源对所述光纤主体进行加热的同时，将所述光纤主体保持拉伸状态进行平移和扭曲，可以完成所述偏振无关型轨道角动量调制器的制备。且可以通过设置扭曲和平移的速度制备特定周
25 期的所述偏振无关型轨道角动量调制器，具有方法简单、容易操作等优势。所述轨道角动量光束发生器，可以在一定带宽内产生带有螺旋相位的光束，所述光束不会形成对偏振敏感的特定方向，具有偏振无关性。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其它的附图。

图 1 为本申请实施例提供的一种偏振无关型轨道角动量调制器结构示意图；

图 2 为本申请实施例提供的一种偏振无关型轨道角动量调制器螺旋折射率调制面示意图；

图 3 为本申请实施例提供的一种偏振无关型轨道角动量调制器制备方法流程图；

图 4 为本申请实施例提供的另一种偏振无关型轨道角动量调制器制备方法流程图；

图 5 为本申请实施例提供的一种轨道角动量光束发生器；

图 6 为本申请实施例提供的一种偏振无关型轨道角动量调制器测试装置示意图；

图 7 为本申请实施例提供的一种偏振无关型轨道角动量调制器测试光谱结果图；

图 8 为本申请实施例提供的一种不同偏振状态偏振无关型轨道角动量调制器测试结果图。

附图标号说明

偏振无关型轨道角动量调制器 100、光纤主体 110、轨道角动量光束发生器 400、光源 410、偏振控制器 420、第一光纤跳线 430、第二光纤跳线 440、单模光纤 450、少模光纤 460。

具体实施方式

为使本申请的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图对本申请的具体实施方式做详细的说明。在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本申请。但是本申请能够以很多不同于在此描述的其它方式来实现，本领域技术人员可以在不违背本申请内涵的情况下做类似改进，
5 因此本申请不受下面公开的具体实施的限制。

需要说明的是，当元件被称为“固定于”另一个元件，它可以直接在另一个元件上或者也可以存在居中的元件。当一个元件被认为是“连接”另一个元件，它可以是直接连接到另一个元件或者可能同时存在居中元件。

除非另有定义，本文所使用的所有的技术和科学术语与属于本申请的技术领域的技术人员通常理解的含义相同。本文中在本申请的说明书中所使用的术语只是为了描述具体的实施例的目的，不是旨在于限制本申请。本文所使用的术语“及/或”包括一个或多个相关的所列项目的任意的和所有的组合。
10

请参见图 1，本申请提供一种偏振无关型轨道角动量调制器 100。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 包括光纤主体 110。所述光纤主体 110 具有螺旋光纤结构，所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应。所述光纤主体 110 轴向具有周期性的螺旋折射率调制，请一并参见图 2。所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级，所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体 110 的轴向、径向和角向，用于激发螺旋相位，产生轨道角动量光束。
15

所述光纤主体 110 沿光纤轴向具有周期性的螺旋折射率调制。沿光纤轴向上，光栅调制的周期在 $200\mu\text{m}$ - $2000\mu\text{m}$ 范围内。在该范围的周期上，光栅谐振峰产生在 C+L 波段，有利于与通信系统集成使用。所述折射率调制周期在百微米量级，使得该螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应。所述螺旋光纤结构为呈螺旋状的纤芯结构，可以对入射光产生螺旋状折射率调制。不同
20 传统长周期光纤光栅的折射率调制，所述折射率调制沿光纤轴向、径向和角向均具有分布。因而，在一个光栅周期内，入射到光纤光栅中的光除受到光栅反射产生高阶模式外，还将受到螺旋折射率分布的影响而产生一个附加的
25

螺旋相位。在多个光栅调制周期的作用下，高阶模式和螺旋相位被谐振增强，从而形成具有螺旋相位的高阶模式，即轨道角动量光束。由于所形成的轨道角动量光束仅受螺旋折射率调制的影响，与入射光的电场振动方向无关，故而所述轨道角动量调制器 100 可以用来激发偏振无关的轨道角动量模式。

5 所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 采用手征光纤光栅作为基底，可以直接实现轨道角动量的耦合，无需如偏振控制器和应力调制板等其他附属设备。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有均匀的螺旋折射率调制结构，可以对基模光进行周期性的散射。由于所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 中螺旋微扰的存在，可以使基模的平面相位发生周期的变化。所述轨道角动量调制器 100 具有两种作用，一是轨道角动量光束的产生，另一种是
10 轨道角动量光束的转换。对于轨道角动量光束的产生，因为螺旋的折射率调制，采用任一偏振态的输入光入射均可以实现螺旋相位的产生，从而产生轨道角动量光束。在满足与所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 中光纤光栅相位匹配的条件下，基模光的能量可以通过谐振耦合到高阶模式上，其平面
15 相位在周期性谐振的作用下转换为螺旋形态，从而实现螺旋相位的激发，即实现轨道角动量的产生。

 在一个实施例中，所述光纤主体 110 为双模光纤或四模光纤。所述光纤主体也可以为其他少模光纤中的一种。所述光纤主体 110 可以包括光纤纤芯和包层。所述光纤纤芯直径可以为 19 微米，所述包层直径可以为 125 微米。
20 所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 为全光纤器件，具有的螺旋光纤结构可以直接激发螺旋相位，不需要其他附件辅助。在通信中有利于集成，具有良好的兼容性。

 所述光纤主体 110 轴向具有周期和深度均匀的所述螺旋折射率调制，所述螺旋折射率调制量的范围为 2×10^{-4} 至 2×10^{-3} 。所述螺旋折射率调制沿光纤轴向具有周期和深度均匀的螺旋折射率调制。在一个实施例中，所述光纤主体 110 任一截面的所述螺旋折射率调制具有非对称性，沿所述光纤主体 110 径向，所述螺旋折射率调制随半径的增大而减小。所述螺旋折射率调制深度
25

具有螺旋性分布，用于激发光束的螺旋相位。非对称的螺旋折射率调制，有利于高阶非对称模式的耦合激发。在所述光纤主体 110 轴向任一位置的截面内，沿角向旋转一周，对应的折射率调制不均匀且不对称，可以在一个光栅周期内实现 2π 的整数倍的相位延迟量。为实现高耦合效率、低插损的模式耦合，在任一周期内，手征光纤光栅的折射率调制量 2×10^{-4} - 2×10^{-3} 范围内。在一个实施例中，所述光纤主体 110 的长度范围为 1 厘米至 6 厘米。在模式耦合上，该手征光纤光栅根据周期的变化，可以实现高阶纤芯模式的激发。

所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的螺旋折射率调制为光栅固有形态，因此螺旋折射率调制功能不随外界变化而变化，具有不受温度、震动、扭曲和弯曲等外界条件影响的优点。且可以理解，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 产生的螺旋相位的旋性只与构成所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的手征光纤光栅本身的螺旋调制有关，而不随输入光的偏振态改变而改变。进一步的，当具有螺旋相位节点 l 但旋性不同时，两者不发生相互耦合。

在一个实施例中，所述螺旋光纤结构具有偏振无关性。螺旋相位由所述螺旋折射率调制而成，与入射光偏振态无关。螺旋相位的旋向由光栅本身的螺旋折射率旋向决定，与入射光偏振态无关。螺旋相位的所代表的模式纯度由螺旋折射率的周期和强度决定，与入射光偏振态无关。

所述螺旋光纤结构具有螺旋对称性，从而不会形成对偏振敏感的特定方向。因此，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有偏振无关特性。当对所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 输入任意偏振态的基模光时，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 耦合的高阶模式均具有螺旋相位，因此所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有偏振无关性，激发产生的 OAM 可以携带任意偏振态。即所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的输入光的偏振态任意变化时，经过所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 均可激发螺旋相位。且激发的高阶模式的偏振特性与输入的基模光一致。在一个实施例中，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有较高的耦合效率，产生的螺旋相

位的纯度与偏振态无关，同时产生的 OAM 纯度高。所述偏振无关型轨道角动量调制器 110 在一定带宽内可以产生 OAM。所述带宽可以为 3dB。

在一个实施例中，所述螺旋光纤结构的旋向相同，所述旋向为顺时针或逆时针。依据所述旋向的不同可以分为右手手征光纤光栅构成的所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 和左手手征光栅光纤构成的所述偏振无关型轨道角动量调制器 100。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 可以产生拓扑电荷为 $l=+1$ 或者 $l=-1$ 的轨道角动量光束。

在一个实施例中，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 还包括保护层。所述保护层位于所述光纤主体 110 外部，对所述光纤主体 110 形成机械保护，延长所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的使用寿命。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 为全光型器件，方便与其他光纤器件连接耦合，且具有很高的兼容。可以理解，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有质量轻、抗电磁干扰的特性。

请一并参见图 3，本申请提供一种偏振无关型轨道角动量调制器制备方法。所述偏振无关型轨道角动量调制器制备方法包括：S10，加热光纤主体 110 至熔融状态。S20，扭曲熔融状态的所述光纤主体 110。S30，冷却所述光纤主体 110。

在步骤 S10 之前，将所述光纤主体 110 两端固定，一端固定于光纤旋转器上，另一端固定于光纤夹上。光纤夹具与光纤旋转器分别固定在一个位移平台上。在步骤 S10 中，在高温条件下，所述光纤主体 110 发生均匀的熔融。所述高温条件为 1800°C 以上。所述光纤主体 110 为少模光纤，所述少模光纤为模式高质量传输的通道。所述少模光纤可以为双模、四模等光纤。所述少模光纤具有质量轻、抗电磁干扰等优点。在步骤 S20 中，均匀地高速扭曲熔融的所述光纤主体 110。在步骤 S30 中，待所述光纤主体 110 移除加热区时，迅速冷却所述光纤主体 110。在所述光纤主体 110 的冷却过程中，冻结了部分残余应力，从而形成螺旋折射率调制，得到手征光纤光栅，完成偏振无关型轨道角动量调制器 100 的制备。

利用高温热源对所述光纤主体 100 局部加热至熔融状态的同时，对所述光纤主体 110 进行平移和扭曲，可以制备出具有螺旋型折射率分布的手征光纤光栅。所述手征光纤光栅可以作为所述偏振无关型轨道角动量调制器 100。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有较高的耦合效率。所述耦合效率为将输入的基模光耦合到光纤的高阶模式中的比例。所述耦合效率与螺旋光栅结构和加工的方式有关。采用上述偏振无关型轨道角动量调制器制备方法具有较高的稳定性，加工得到的手征光纤非常均匀，能够较好的接近理论的极限值，具有较高的耦合效率。

请一并参见图 4。在一个实施例中，所述加热光纤主体 110 至熔融状态步骤中，采用 CO₂ 激光、电弧持续放电、高温炉或线圈任一种热源加热所述光纤主体 100 至熔融状态。

在一个实施例中，在所述扭曲熔融状态的所述光纤主体 110 步骤中，沿顺时针或逆时针方向扭曲熔融状态的所述光纤主体 110。在一个实施例中，在所述冷却所述光纤主体 110 步骤中，将所述光纤主体 110 移除加热区，将扭曲过程中产生的残余应力冻结在所述光纤主体 110 中。

请一并参见图 5，本申请提供一种轨道角动量光束发生器 400。所述轨道角动量发生器 400 包括光源 410、偏振控制器 420、偏振无关型轨道角动量调制器 100 以及第一光纤跳线 430。所述偏振控制器 420 的输入端与所述光源 410 连接的。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 与所述偏振控制器 420 的输出端连接。所述第一光纤跳线 430 与所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 远离所述偏振控制器 420 的一端连接。其中，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 包括光纤主体 110。所述光纤主体 110 具有螺旋光纤结构，所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应。所述光纤主体 110 直径相同。所述光纤主体 110 轴向具有周期性的螺旋折射率调制，所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级，所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体 110 的轴向、径向和角向，用于激发螺旋相位，产生轨道角动量光束。

所述光源 410 可以为可调激光器。所述可调激光器可以调节在所需波段。

轨道角动量光束发生器 400 可以在一个较宽的带宽内产生所需的 OAM 光束。在一个实施例中，所述带宽为 3dB。通过调节所述偏振控制器 420 可以得到所需偏振态的输入光。所述第一光纤跳线 430 用于与其他仪器连接，方便所述轨道角动量光束发生器 400 在通信中进行应用。可以理解，各类光纤之间
5 通过对应的适配器，即法兰进行连接。

在其中一个实施例中，所述轨道角动量光束发生器 400 还包括第二光纤跳线 440。所述偏振控制器 420 输入端通过所述第二光纤跳线 440 与所述光源 410 连接。通过所述第二光纤跳线 440 可以保证光束的稳定传输。所述第二光纤跳线 440 可以为单模。

10 在其中一个实施例中，所述轨道角动量光束发生器 400 还包括单模光纤 450。所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 通过所述单模光纤 450 与所述偏振控制器 420 输出端连接。所述单模光纤 450 可以实现所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 与所述偏振控制器 420 之间光束的低损耗传输。

15 在其中一个实施例中，所述轨道角动量光束发生器 400 还包括少模光纤 460。所述第一光纤跳线 430 通过所述少模光纤 460 与所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 连接。所述少模光纤 460 可以保证具有轨道角动量的光束的稳定传输。

请一并参见图 6，采用测试装置测试所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的偏振相关性。搭建一套基于空间干涉的系统来检测所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 产生的轨道角动量光束。通过 OAM 光束与球面波或平面波进行干涉，从而检测 OAM 的相位。该方法是将高斯光束和基于长周期手征光栅的所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 产生的带有拓扑荷 l 的 OAM 光束在空间中干涉，若两束光在空间中同轴，对于球面波干涉条纹表现为拓扑荷数为 l 的螺旋相位图案。干涉条纹逆时针或顺时针的旋向取决于
20 OAM 光束的拓扑荷数 l 的符号。

25 可调谐单波长激光器输出的光经光纤跳线输出再经 10 倍物镜准直后进入可调分光比偏振分束器（Polarization Beam Splitter, PBS）分成两个光路，

即参考光路和测试光路。所述参考光路的输入光经过 1/2 波片后, 进入合束器。所述测试光路的输入光顺序经过起偏器、1/4 波片、10 倍物镜、所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品、40 倍物镜和检偏器后进入合束器。两路光在所述合束器上相遇进而产生干涉, 最后利用红外 CCD (Charge Coupled Device) 实时记录干涉条纹。

进一步的, 所述可调激光器发出的光首先经过所述 10 倍物镜进行准直放大。在一个实施例中, 采用型号为 VA5-1550, Thorlabs 的 PBS 对准直放大后的光束进行分束。所述 PBS 的分光比可调且分出的两束光分别是 p 偏振光和 s 偏振光。所述测试光路的输入光经反射镜改变光路方向后, 依次经所述起偏器和所述 1/4 波片后产生不同偏振态的输入光。所述输入光包括线偏振 (linear polarization, LP), 左旋圆偏振 (left-handed circular polarization, CP-) 和右旋圆偏振 (right-handed circular polarization, CP+)。所述测试光路的输入光随后经过 10 倍物镜、所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 以及 40 倍物镜后, 进入所述检偏器。所述检偏器对产生的 OAM 光束的偏振态进行分析。所述参考光路的输入光经 1/2 波片将线偏振输入光的振动方向调整到与从所述检偏器出来的测试光路光的振动方向相同, 确保参考光和测试光两束光发生干涉。最后采用合束器 (Beam Combiner, BS) 收集两路光进行干涉。在一个实施例中, 所述 BS 型号为 VC5-1550, Thorlabs。

完成光路搭建后, 首先不加入参考光, 只是用所述测试光路测量模场的分布。同时使用精密切割装置对所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品的两端进行切割, 并保证样品的端面平整度。然后将利用光纤夹持器 220 将其样品光纤端面固定在置于物镜之间的平台上。在一个实施例中, 所述光纤夹持器 220 可以为双臂光纤夹具。

完成准备工作后, 首先, 从所述测试光路移除所述起偏器、所述 1/4 波片和所述检偏器, 并将所述可调谐单波长激光器的波长设定在所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的谐振波长处。精密调节所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 两端的三维位移台。使得所述偏振无关型轨道角动量调制器 100

前后两个物镜分别聚集到所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品的左右两个端面。在调试的过程中，通过所述红外 CCD 实时的检测光斑强度，直到从所述红外 CCD 的屏幕上观察到的光斑亮度最大位置，此时的从物镜到所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的耦合效率最高。

5 其次，在所述测试光路放入所述起偏器、所述 1/4 波片和所述检偏器。首先测试所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品的输入光为线偏振光的情况。为了便于描述，规定平行于纸面的方向为 0 度。由于所述可调激光器的输出光为线偏振光，将所述起偏器的通光轴方向和所述 1/4 波片的快轴方向都置于 0 度位置，即可得到线偏振的输入光。所述线偏振光经过所述偏振
10 无关型轨道角动量调制器 100 样品后，再经过所述检偏器。利用所述 CCD 分别记录当所述检偏器透光轴位于四个不同角度：0 度，90 度，180 度和 270 度时单独的模场信息。

再次，加入所述参考光路，使所述参考光路与所述测试光路中的光进行干涉。利用所述 CCD 记录检偏器位于所述：0 度，90 度，180 度和 270 度四
15 个角度时的干涉信息，通过干涉的方式可以得到轨道角动量的相位信息。

最后，通过调节起偏器的透光轴与 1/4 波片的快轴夹角，可以得到左旋圆偏振和右旋圆偏振。每次输入不同的偏振态的输入光时，都重复上述操作，即可完成对所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的测试过程。

在同轴干涉测试螺旋相位测试装置的光路中，增加所述起偏器和所述波
20 片等，实现任意偏振态的输入光，将偏振测试与螺旋相位相结合，可以测试所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的特性。调节所述检偏器透光轴和所述 1/4 波片快轴的夹角，可以产生线偏振和圆偏光等任意偏振态的光，由此可以输入不同偏振态的光。同时后端的所述检偏器可以用来分析输出光所具有的偏振态。通过这种方式就可以测试出在不同偏振态对于模式激发影响。

25 请一并参见图 7，所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的右旋和左旋光谱如图 7(a) 和图 7(b) 所示。两个所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品周期都是 1192um，右旋偏振无关型轨道角动量调制器 100 的谐振峰的位置

置在 1554.5nm，耦合深度-24.6dB。左旋偏振无关型轨道角动量调制器 100 的谐振峰的位置在 1550.9nm，耦合深度-22.5dB。结果表明所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 的耦合效率高达 86%。两根所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品的谐振峰的细小差异在于所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 制作过程中的外界抖动导致光栅的结构局部不均匀所致。可以理解，所述谐振峰的位置周期决定。所述耦合深度与光栅周期数，即螺旋个数，和加工过程的均匀性相关。

请一并参见图 8，首先用右手所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 样品测试在不同偏振态下轨道角动量的激发情况，其结果如图 8(a) 所示。当输入光为线偏振光时，不加参考光路的模场如图 8(a11) 所示。当光经过所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 后，基模被激发到高阶的轨道角动量。从图上可以看到空心的圆环，并且当所述检偏器旋转一周，会出现明暗的变化，说明产生的光束具有线偏振的特点。为了观察螺旋相位信息，加入所述参考光路，并与所述测试光路进行干涉，通过干涉方法确定其相位信息。从图 8(a12) 可以发现逆时针旋转的螺旋光场分布，即拓扑电荷 $l=+1$ 。通过上述实验可以得知，当输入光为线偏振光时可以激发出带有线偏振的轨道角动量。同样的当输入光为右旋圆偏振 (CP+) 时，从图 8(a21) 可以看到空心的圆环，并且当所述检偏器旋转一周时，光斑的强度没有发生改变，这说明该光束的偏振态为圆偏振。此外可以观察到顺势旋转的干涉条纹，说明产生了拓扑电荷为 $l=+1$ 的轨道角动量。当输入光的偏振态为左旋圆偏振 (CP-) 时也有和 CP+ 一样的现象。通过上述实验表明所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 在不同偏振态时都可以激发 $l=+1$ 的轨道角动量，具有偏振不相关的特性。此外我们利用左手螺旋的所述偏振无关型轨道角动量调制器 100，在不同的偏振态下也可以激发出 $l=-1$ 的轨道角动量。实验表明，通过高温热源局部加热并平移扭曲的方法制备的所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 具有偏振无关的特点，该器件有望在通信领域发挥巨大作用。

本申请所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 基于手征光纤光栅的偏振

不相关特性，可以在任意偏振态的条件下，激发 $l=\pm 1$ 阶的轨道角动量光束，并且激发的 $l=-1$ 或者 $l=+1$ 仅取决于所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 螺旋光纤光栅的旋性。其周期在百微米量级，螺旋调制均匀，光谱质量高，模式耦合清晰。同时所述偏振无关型轨道角动量调制器 100 基于少模光纤，
5 是一种全光纤型的调制器，具有体积小，成本低，耦合效率高，易集成等优势，在光纤通信，光镊，微粒操控等领域有重要应用。

以上所述实施例的各技术特征可以进行任意的组合，为使描述简洁，未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述，然而，只要这些技术特征的组合不存在矛盾，都应当认为是本说明书记载的范围。

10 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式，其描述较为具体和详细，但并不能因此而理解为对申请专利范围的限制。应当指出的是，对于本领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本申请的保护范围。因此，本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

权利要求书

1、一种偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,包括:

光纤主体(110),具有螺旋光纤结构,所述螺旋光纤结构具有长周期光纤光栅效应;

所述光纤主体(110)轴向具有周期性的螺旋折射率调制,所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级,所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体(110)的轴向、径向和角向,用于激发螺旋相位,产生轨道角动量光束。

2、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤主体(110)为双模光纤或四模光纤。

3、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤主体(110)轴向具有周期和深度均匀的所述螺旋折射率调制,所述螺旋折射率调制量的范围为 2×10^{-4} 至 2×10^{-3} 。

4、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤主体(110)包括光纤纤芯和包层。

5、根据权利要求4所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤纤芯直径为19微米,所述包层直径为125微米。

6、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤主体(110)任一截面的所述螺旋折射率调制具有非对称性,沿所述光纤主体(110)径向,所述螺旋折射率调制随半径的增大而减小。

7、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,所述光纤主体(110)的长度范围为1厘米至6厘米。

8、根据权利要求1所述的偏振无关型轨道角动量调制器(100),其特征在于,还包括保护层。

9、一种偏振无关型轨道角动量调制器制备方法,其特征在于,包括:

加热光纤主体(110)至熔融状态;

扭曲熔融状态的所述光纤主体(110);

冷却所述光纤主体(110)。

10、根据权利要求 9 所述的偏振无关型轨道角动量调制器制备方法，其特征在于，在所述加热光纤主体（110）至熔融状态步骤中，采用 CO₂ 激光、电弧持续放电、高温炉或线圈任一种热源加热所述光纤主体（100）至熔融状态。

5 11、根据权利要求 9 所述的偏振无关型轨道角动量调制器制备方法，其特征在于，在所述扭曲熔融状态的所述光纤主体（110）步骤中，沿顺时针或逆时针方向扭曲熔融状态的所述光纤主体（110）。

12、根据权利要求 9 所述的偏振无关型轨道角动量调制器制备方法，其特征在于，在所述冷却所述光纤主体（110）步骤中，将所述光纤主体（110）
10 移除加热区，将扭曲过程中产生的残余应力冻结在所述光纤主体（110）中。

13、一种轨道角动量光束发生器（400），其特征在于，包括：

光源（410）；

偏振控制器（420），输入端与所述光源（410）连接；

偏振无关型轨道角动量调制器（100），与所述偏振控制器（420）输出端
15 连接；以及

第一光纤跳线（430），与所述偏振无关型轨道角动量调制器（100）远离所述偏振控制器（420）的一端连接；

其中，所述偏振无关型轨道角动量调制器（100）包括：

光纤主体（110），具有螺旋光纤结构，所述螺旋光纤结构具有长周期光
20 纤光栅效应；

所述光纤主体（110）轴向具有周期性的螺旋折射率调制，所述螺旋折射率调制周期位于百微米量级，所述螺旋折射率调制分布于所述光纤主体（110）的轴向、径向和角向，用于激发螺旋相位，产生轨道角动量光束。

14、根据权利要求 13 所述的轨道角动量光束发生器（400），其特征在于，
25 还包括：

第二光纤跳线（440），所述偏振控制器（420）输入端通过所述第二光纤跳线（440）与所述光源（410）连接。

15、根据权利要求 13 所述的轨道角动量光束发生器(400), 其特征在于, 还包括:

单模光纤(450), 所述偏振无关型轨道角动量调制器(100)通过所述单模光纤(450)与所述偏振控制器(420)输出端连接。

5 16、根据权利要求 13 所述的轨道角动量光束发生器(400), 其特征在于, 还包括:

少模光纤(460), 所述第一光纤跳线(430)通过所述少模光纤(460)与偏振无关型轨道角动量调制器(100)连接。

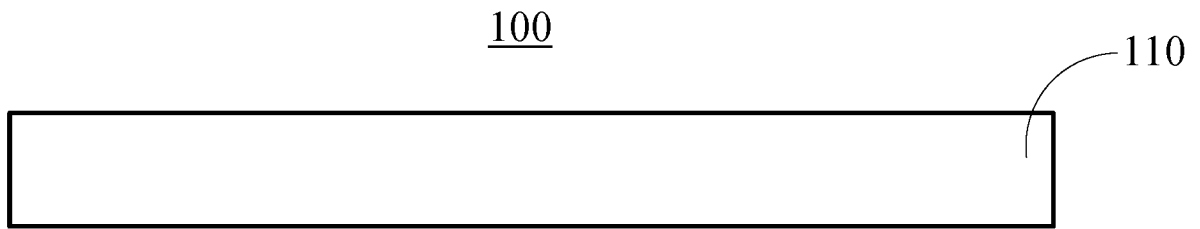


图 1

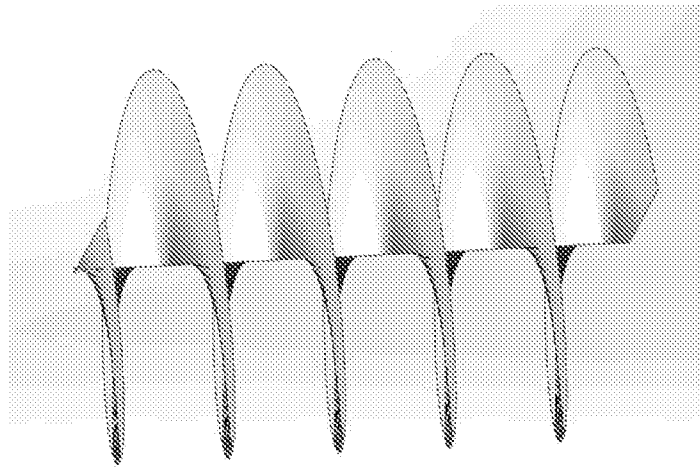


图 2

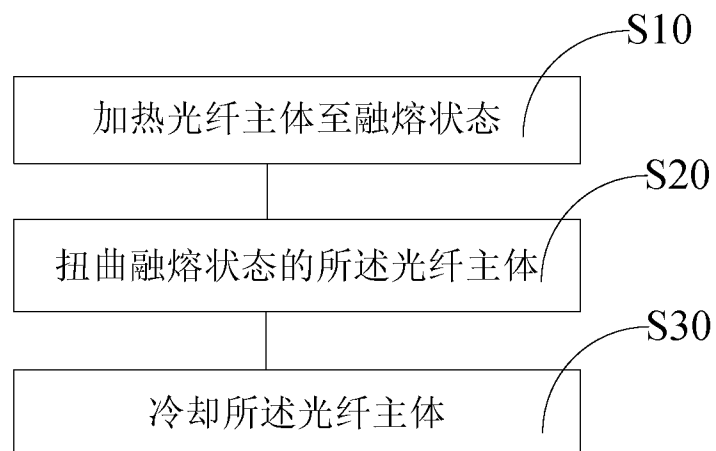


图 3

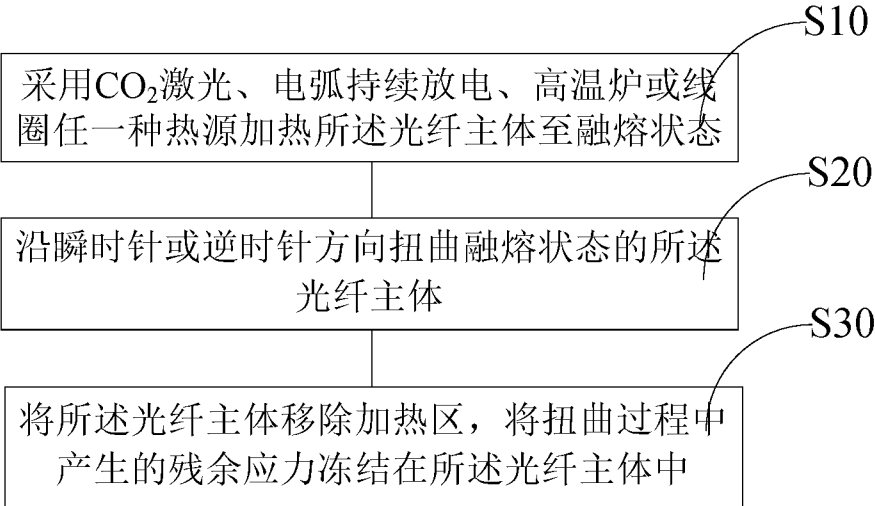


图 4

400

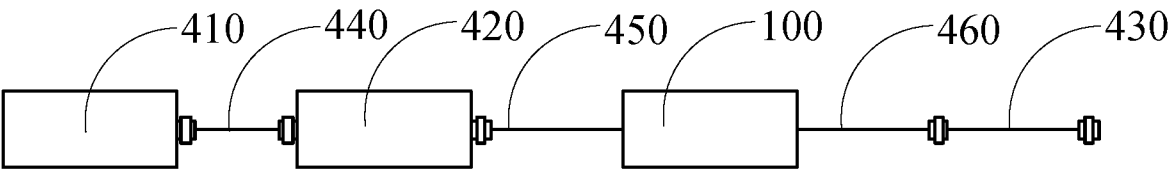


图 5

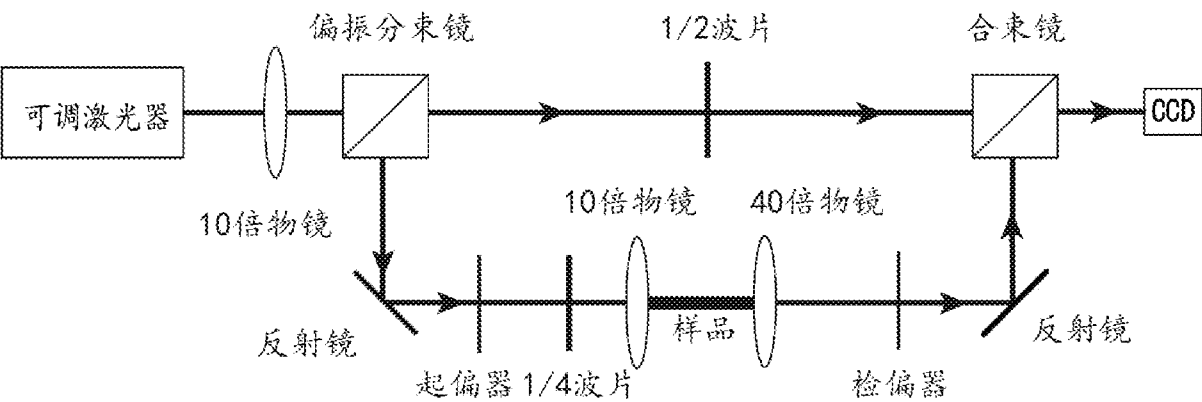


图 6

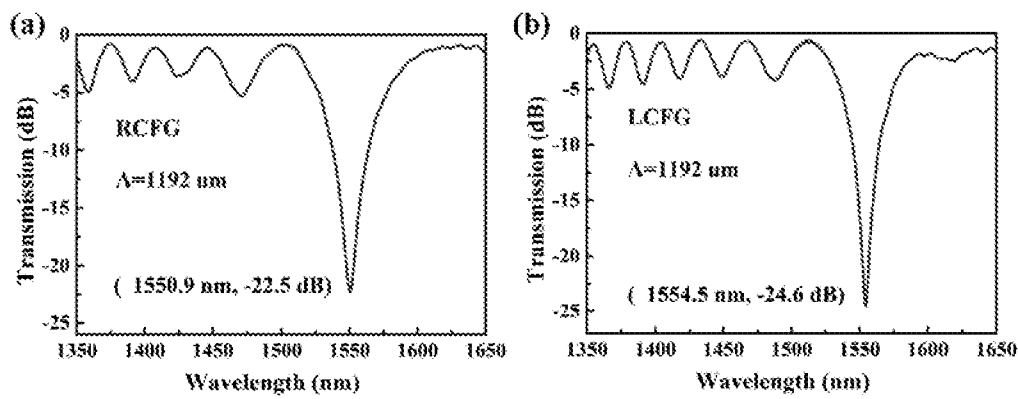


图 7

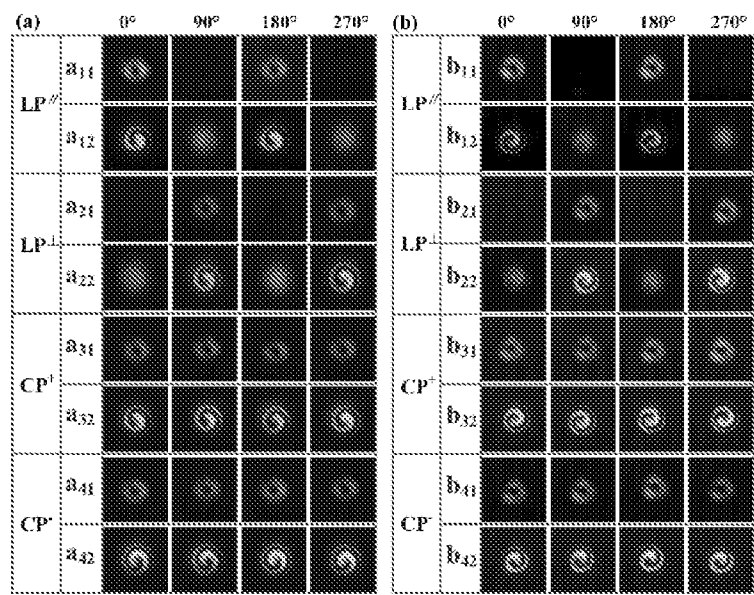


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/117890

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F 1/01(2006.01)i; G02B 6/02(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)

G02F; G02B

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; VEN; USTXT; WOTXT; EPTXT; CNKI: 轨道角动量, 涡旋, 光纤, 长周期, 光栅, 螺旋, 折射率, 调制, 轴向, 径向, 角向, 双模, 四模, 少模, 熔融, 熔融, 扭曲, 旋转, 偏振, OAM, orbital angular momentum, helical, helicoidal, two, four, few, mode, long, period, grat+, fiber?, modulat+, twist+, rotat+, mov+, polari+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Woojin Shin et al. "High Strength Coupling and Low Polarization-Dependent Long-Period Fiber Gratings Based on The Helicoidal Structure" <i>Optical Fiber Technology</i> , Vol. 14, No. 4, 10 April 2008 (2008-04-10), ISSN: 1068-5200, text, p. 324, column 1, paragraph 1, line 1 to p. 325, column 2, paragraph 1, line 16, and figures 1-3	1-16
A	CN 103969739 A (WUXI WANRUN PHOTON TECHNOLOGY CO., LTD.) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document	1-16
A	CN 103969737 A (WUXI WANRUN PHOTON TECHNOLOGY CO., LTD.) 06 August 2014 (2014-08-06) entire document	1-16
A	CN 208000395 U (JINAN UNIVERSITY) 23 October 2018 (2018-10-23) entire document	1-16
A	US 2008101754 A1 (Michael Charles Parker et al.) 01 May 2008 (2008-05-01) entire document	1-16



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

10 July 2019

Date of mailing of the international search report

16 August 2019

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
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/117890

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	103969739	A	06 August 2014	CN	103969739	B	11 May 2018
CN	103969737	A	06 August 2014	CN	103969737	B	12 April 2017
CN	208000395	U	23 October 2018	None			
US	2008101754	A1	01 May 2008	JP	2006243735	A	14 September 2006
				DE	602005006383	D1	12 June 2008
				EP	1705503	B1	30 April 2008
				DE	602005006383	T2	04 June 2009
				EP	1705503	A1	27 September 2006

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/117890

A. 主题的分类

G02F 1/01 (2006.01) i; G02B 6/02 (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)

G02F; G02B

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; VEN; USTXT; WOTXT; EPTXT; CNKI: 轨道角动量, 涡旋, 光纤, 长周期, 光栅, 螺旋, 折射率, 调制, 轴向, 径向, 角向, 双模, 四模, 少模, 熔融, 熔融, 扭曲, 旋转, 偏振, OAM, orbital angular momentum, helical, helicoidal, two, four, few, mode, long, period, grat+, fiber?, modulat+, twist+, rotat+, mov+, polari+

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
X	Woojin Shin 等. "High strength coupling and low polarization-dependent long-period fiber gratings based on the helicoidal structure" Optical Fiber Technology, 第14卷, 第4期, 2008年 4月 10日 (2008 - 04 - 10), ISSN: 1068-5200, 正文第324页第1栏第1段第1行-第325页第2栏第1段第16行, 图1-3	1-16
A	CN 103969739 A (无锡万润光子技术有限公司) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文	1-16
A	CN 103969737 A (无锡万润光子技术有限公司) 2014年 8月 6日 (2014 - 08 - 06) 全文	1-16
A	CN 208000395 U (暨南大学) 2018年 10月 23日 (2018 - 10 - 23) 全文	1-16
A	US 2008101754 A1 (PARKER MICHAEL CHARLES 等) 2008年 5月 1日 (2008 - 05 - 01) 全文	1-16

☐ 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

2019年 7月 10日

国际检索报告邮寄日期

2019年 8月 16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

宋丽妍

电话号码 86-(0512)-88997428

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/117890

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	103969739	A	2014年 8月 6日	CN 103969739 B	2018年 5月 11日
CN	103969737	A	2014年 8月 6日	CN 103969737 B	2017年 4月 12日
CN	208000395	U	2018年 10月 23日	无	
US	2008101754	A1	2008年 5月 1日	JP 2006243735 A	2006年 9月 14日
				DE 602005006383 D1	2008年 6月 12日
				EP 1705503 B1	2008年 4月 30日
				DE 602005006383 T2	2009年 6月 4日
				EP 1705503 A1	2006年 9月 27日