

(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7月20日 (20.07.2017)



(10) 国际公布号
WO 2017/121160 A1

- (51) 国际专利分类号:
G02B 6/032 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/102805
- (22) 国际申请日: 2016年10月21日 (21.10.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
2016100149250 2016年1月11日 (11.01.2016) CN
- (71) 申请人: 烽火通信科技股份有限公司 (FIBER-HOME TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES CO., LTD) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。
- (72) 发明人: 罗文勇 (LUO, Wenyong); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 刘志坚 (LIU, Zhijian); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 李伟 (LI, Wei); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 柯一礼 (KE, Yili); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。

(CN)。 赵磊 (ZHAO, Lei); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 杜城 (DU, Cheng); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 胡福明 (HU, Fuming); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 雷琼 (LEI, Qiong); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 杜琨 (DU, Kun); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 康志文 (KANG, Zhiwen); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。 但融 (DAN, Rong); 中国湖北省武汉市东湖开发区光谷创业街67号赵靖朝, Hubei 430074 (CN)。

(74) 代理人: 武汉智权专利代理事务所(特殊普通合伙) (WUHAN ZHI QUAN PATENT AGENCY); 中国湖北省武汉市东湖新技术开发区珞喻路727号星光无限4栋21层2103室张凯, Hubei 430000 (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,

[见续页]

(54) Title: LOW-LOSS RADIATION-PROOF BIREFRINGENT PHOTONIC CRYSTAL FIBRE

(54) 发明名称: 一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤

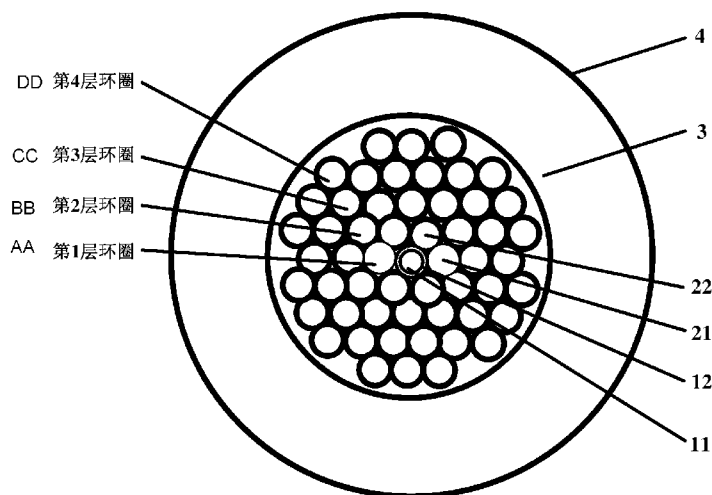


图 2

AA First layer of rings
BB Second layer of rings
CC Third layer of rings
DD Fourth layer of rings

(57) Abstract: A low-loss radiation-proof birefringent photonic crystal fibre, comprising a central fibre core (1). The central fibre core (1) comprises a pure silicon fibre core (11) and a deep fluorine-doped concave inner cladding (12) coating the outside of the pure silicon fibre core (11). An air pore layer (2) and a quartz cladding (3) successively coat the outside of the central fibre core (1) from inside to outside. The outside of the quartz cladding (3) is coated with a coating layer (4). The air pore layer (2) comprises four layers of rings composed of air pores from inside to outside. The first layer of rings is composed of two large air pores (21) and a plurality of small air pores (22). The second, third and fourth layers of rings are all composed of the plurality of small air pores (22). The air pores of the four layers of rings are all arranged in a regular hexagonal manner. All the air pores are connected by means of a quartz connecting wall. The fibre realizes birefringence, and at the same time has low-loss and radiation-proof performances, and satisfies the usage requirements in special environment application occasions, such as aerospace.

(57) 摘要:

[见续页]



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, JP, KE, KG, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

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:

(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,

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤, 包括中心纤芯(1), 中心纤芯(1)包括纯硅纤芯(11)和包覆于纯硅纤芯(11)外部的深掺氟下凹内包层(12)。中心纤芯(1)的外部由内到外依次包覆有空气孔层(2)和石英包层(3)。石英包层(3)的外部涂覆有涂覆层(4)。空气孔层(2)由内至外包括由空气孔组成的四层环圈。第 1 层环圈由 2 个大空气孔(21)和多个小空气孔(22)组成。第 2、第 3 和第 4 层环圈均由多个小空气孔(22)组成。四层环圈的空气孔均呈正六边形排列。所有空气孔之间通过石英连接壁连接。该光纤在实现双折射的同时具备低损耗和抗辐照性能, 满足航天航空等特殊环境应用场合下的使用需求。

说明书

一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤

技术领域

本发明涉及光子晶体光纤领域，具体来讲是一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤。

背景技术

在通信、传感等领域高双折射光纤有着广泛的应用。以保偏光纤为核心元件的光纤传感技术，特别是光纤陀螺技术和光纤水听技术受到更多的重视。保偏光纤具有优良的双折射效应，使其在内部传输的基模的两个正交组成模式 HE_{x11} 与 HE_{y11} 的传播常数差别增大，减小了这两个正交模式的耦合几率，从而在传输线偏振光时能良好地保持其偏振态。随着光通信系统和光纤传感等领域从幅度调制向相位或偏振态调制的深入发展，光纤技术取得了长足的进展。保偏光纤所具有的线偏振保持能力，使得保偏光纤在许多与偏振相关的应用领域具有使用价值。

但是，由于常规保偏光纤需要采用芯层掺铒，应力区掺硼的结构设计，因此其对外界的环境干扰比较敏感。当前以常规保偏光纤为核心元件的光纤陀螺器件最关心的问题之一就是包括其温度特性。因为当保偏光纤的温度由高到低或由低到高发生变化时，由于其内部的各个区域的材料的应力特性不一样，因此在温度变化时，各个区域间将因此产生应力起伏，造成不同区域的光信号传输的特性不同。虽然人们相继发明四极、八极等对称绕法，但仍无法完全避免该问题。另外，由于常规保偏光纤为了保证在芯层形成全反射，需要在芯层掺入一定

量的锺，这也导致其在辐照环境下会发生衰减劣化，给光信号的传输带来影响。

为了解决上述问题，目前新兴的技术是光子晶体光纤（Photonic Crystal Fibers, PCF）。光子晶体光纤具备许多独特而新颖的物理特性，这些特性是常规石英单模光纤（保偏光纤）很难或无法实现的。利用光子晶体光纤的灵活特性，可以通过在包层排布空气孔，实现芯层单模传输，同时利用特殊的空气孔排布结构，可以实现光信号在芯层传输时因排布结构的几何双折射从而带来良好的双折射效应。相比常规保偏光纤采用应力区或非圆纤芯的方法，光子晶体光纤由于结构的灵活性，可以采用多种不同的方法获得具有不同模场面积、双折射大小和色散等特性的光纤。这些潜在的优势，从传输特性、结构、性能价格比、工作波段扩展等诸多方面为保偏光纤产品更新换代奠定了基础。

但是，现有的光子晶体光纤还局限在对常规保偏光纤性能的简单代替上，即通过空气孔的排布实现良好的双折射效应以替代常规保偏光纤的双折射效应。而对于光纤损耗的降低，抗辐照性能的提升都还存在一定的限制，使现有的光子晶体光纤无法满足例如航天航空等特殊环境应用场合下的使用需求，因此，也迟迟未能有适合于更高精度光纤陀螺研制的双折射光子晶体光纤的实用化研究成果。

发明内容

针对现有技术中存在的缺陷，本发明的目的在于提供一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，在实现双折射的同时，具备良好的低损耗和抗辐照性能，能够满足例如航天航空等特殊环境应用场合下的使用需求。

为达到以上目的，本发明采取的技术方案是：一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，包括中心纤芯，中心纤芯的外部由内到外依

次包覆有空气孔层和石英包层,石英包层的外部涂覆有涂覆层,其中,所述中心纤芯包括纯硅纤芯和包覆于纯硅纤芯外部的深掺氟下凹内包层;所述空气孔层由内至外包括由空气孔组成的四层环圈:第1层环圈、第2层环圈、第3层环圈和第4层环圈,所述空气孔分为大空气孔和小空气孔,第1层环圈由2个大空气孔和多个小空气孔组成,第2层环圈、第3层环圈和第4层环圈均由多个小空气孔组成,四层环圈的空气孔均呈正六边形排列,所有空气孔之间通过石英连接壁连接;所述双折射光子晶体光纤的工作波长为1550nm时,其衰减达到1dB/km以下,串音达到-25dB/km;在100krad总辐照剂量下,1550nm感生损耗增加值小于2dB/km。

在上述技术方案的基础上,所述第1层环圈包括2个大空气孔和4个小空气孔,2个大空气孔以中心纤芯为中心对称分布;第2层环圈由12个小空气孔组成;第3层环圈、第4层环圈均由18个小空气孔组成,且第4层环圈所排列成的正六边形的六角处留有空隙。

在上述技术方案的基础上,所述小空气孔的半径为1.2 μm ~3.0 μm ;所述大空气孔的半径为2.4 μm ~4.8 μm 。

在上述技术方案的基础上,所述纯硅纤芯与深掺氟下凹内包层之间的相对折射率差为-0.50%~-0.05%;所述石英连接壁的折射率与纯硅纤芯的折射率相等。

在上述技术方案的基础上,所述纯硅纤芯的半径为2.0 μm ~4.0 μm ;所述深掺氟下凹内包层的半径为2.5 μm ~5.0 μm ;所述石英连接壁的半径为2.5 μm ~5.0 μm 。

在上述技术方案的基础上,所述石英包层的直径为80 μm ~135 μm ;所述涂覆层的直径为135 μm ~250 μm 。

在上述技术方案的基础上,所述大空气孔、小空气孔采用分区独

立气压控制，经高温熔融成型而成；大空气孔的控制气压大于小空气孔的控制气压。

在上述技术方案的基础上，所述大空气孔的控制气压与小空气孔的控制气压的比值为 1.0~1.3。

在上述技术方案的基础上，所述涂覆层为单层的涂层，其采用聚酰亚胺材料，并经热固化处理而成。

在上述技术方案的基础上，所述涂覆层为双层的涂层，其内涂层的杨氏模量为 0.2MPa~10MPa，其外涂层的杨氏模量为 450MPa~2000MPa，且内涂层、外涂层均经热固化或紫外线固化处理而成。

本发明的有益效果在于：

1、本发明对传统的光子晶体光纤的空气孔层进行了优化排列设计，形成了由空气孔组成的四层环圈结构，其中，第 1 层环圈由 2 个大空气孔和多个小空气孔组成，第 2 层环圈、第 3 层环圈和第 4 层环圈均由多个小空气孔组成，四层环圈的空气孔均呈正六边形排列，能在实现双折射的同时，有效将光约束在纤芯区域，实现低损耗的光信号传输，进而使得本发明的光子晶体光纤在 1550nm 时的衰减控制在 1dB/km（分贝/千米）以内，串音可达到 -25dB~-30dB/km，拍长可达到 0.5~4.5mm。

在此基础上，本发明的纤芯采用纯硅纤芯，其外包覆有深掺氟下凹内包层。与现有技术相比，纯硅纤芯避免了“色心”材料的引入，可有效实现抗辐照特性，且设计的深掺氟下凹内包层不但可以阻挡部分外界污染的浸入，还进一步保证了光纤的抗辐照性能，使得本发明的光子晶体光纤在 100krad 总辐照剂量下，1550nm 感生损耗增加值小于 2dB/km。

综上所述，本发明通过空气孔的优化设计、纯硅纤芯及深掺氟下

凹内包层的设计,使得光子晶体光纤在实现双折射的同时,具备良好的低损耗和抗辐照性能,能够满足例如航天航空等特殊环境应用场合下的使用需求。

2、本发明中,纯硅纤芯的半径为 $2.0\mu\text{m}\sim 4.0\mu\text{m}$,深掺氟下凹内包层的半径为 $2.5\mu\text{m}\sim 5.0\mu\text{m}$,石英连接壁的半径为 $2.5\mu\text{m}\sim 5.0\mu\text{m}$,在结合优化的空气孔结构设计下,光子晶体光纤可以在极小弯曲半径下良好工作,当弯曲半径达 2mm 时,光纤在 1550nm 的串音仍可达到 -25dB/km 以下,附加衰减小于 0.5dB ,从而可绕制更小尺度的光纤环。

3、本发明中,石英包层的外部涂覆有单层或双层的涂覆层。若为单层的涂覆层时,该涂覆层采用聚酰亚胺材料,并经热固化处理;若为双层的涂覆层时,内涂层涂覆杨氏模量为 $0.2\text{MPa}\sim 10\text{MPa}$ 的材料,外涂层涂覆杨氏模量为 $450\text{MPa}\sim 2000\text{MPa}$ 的材料,且内涂层、外涂层均经热固化或紫外线固化处理而成。特殊的涂层组分设计,可使制得的双折射光子晶体光纤具有优良的全温性能,在 $-45^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 范围内, 1550nm 全温串音变化量小于 0.5dB ,可以在太空、核辐照等恶劣环境下良好工作。

4、本发明中,石英包层的直径为 $80\mu\text{m}\sim 135\mu\text{m}$,涂覆层的直径为 $135\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$,可根据不同的应用需求形成不同直径的双折射光子晶体光纤,适用范围广。

附图说明

图 1 为本发明实施例中低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤的结构示意图;

图 2 为本发明实施例中低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤端面的结构示意图;

图 3 为本发明实施例中中心纤芯及第 1 层环圈的结构示意图；

图 4 为本发明实施例中纯硅纤芯的波导结构示意图。

附图标记：1—中心纤芯，11—纯硅纤芯，12—深掺氟下凹内包层；2—空气孔层，21—大空气孔，22—小空气孔；3—石英包层；4—涂覆层。

具体实施方式

以下结合附图及实施例对本发明作进一步详细说明。

参见图 1 和图 2 所示，本发明实施例提供一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，包括中心纤芯 1，中心纤芯 1 的外部由内到外依次包覆有空气孔层 2 和石英包层 3，石英包层 3 的外部涂覆有单层或双层的涂覆层 4。其中，中心纤芯 1、空气孔层 2 和石英包层 3 组成光纤的石英部分。

参见图 2 和图 3 所示，中心纤芯 1 包括纯硅纤芯 11 和包覆于纯硅纤芯 11 外部的深掺氟下凹内包层 12，该深掺氟下凹内包层 12 可以阻挡部分外界污染的浸入，具有一定的抗辐照性能，还可以为光子晶体光纤的低损耗传输提供更好的设计基础。空气孔层 2 由内至外包括由空气孔组成的四层环圈：第 1 层环圈、第 2 层环圈、第 3 层环圈和第 4 层环圈，所述空气孔分为大空气孔 21 和小空气孔 22，大空气孔 21 的半径大于小空气孔 22 的半径，第 1 层环圈由 2 个大空气孔 21 和多个小空气孔 22 组成，第 2 层环圈、第 3 层环圈和第 4 层环圈均由多个小空气孔 22 组成，四层环圈的空气孔均呈正六边形排列，且所有空气孔之间通过石英连接壁连接。

具体来说，第 1 层环圈紧挨中心纤芯 1 设置，包括 2 个大空气孔 21 和 4 个小空气孔 22，2 个大空气孔 21 以中心纤芯 1 为中心对称分布；第 2 层环圈由 12 个小空气孔 22 组成；第 3 层环圈、第 4 层环圈

均由 18 个小空气孔 22 组成,且第 4 层环圈所排列成的正六边形的六角处留有空隙。四层环圈的空气孔总数为 54 个,其中,大空气孔 21 数量为 2 个,小空气孔 22 数量为 52 个。本实施例中,小空气孔 22 的半径 $r_{\text{小}}$ 为 $1.2\mu\text{m}\sim 3.0\mu\text{m}$;大空气孔 21 的半径 $r_{\text{大}}$ 为 $2.4\mu\text{m}\sim 4.8\mu\text{m}$ 。

参见图 3 和图 4 所示,设纯硅纤芯 11 的折射率为 $n_{\text{纤}}$ (由于为纯硅芯,则其对应纯硅芯石英折射率值),半径为 $r_{\text{纤}}$;设深掺氟下凹内包层 12 的折射率为 $n_{\text{包}}$,半径为 $r_{\text{包}}$;设石英连接壁的折射率为 $n_{\text{壁}}$,半径为 $r_{\text{壁}}$ 。

双折射光子晶体光纤的相对折射率差的计算公式为: $\Delta = (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2) * 100\%$,其中 Δ 为相对折射率差。当计算纯硅纤芯 11 与深掺氟下凹内包层 12 之间的相对折射率差 $\Delta n_{\text{包纤}}$ 时,上述公式中 n_2 取值为纯硅纤芯 11 的折射率 $n_{\text{纤}}$, n_1 的取值为深掺氟下凹内包层 12 折射率 $n_{\text{包}}$ 。

在此基础上,参见图 4 所示,纯硅纤芯 11 的波导结构为折射率引导型波导结构,纯硅纤芯 11 与深掺氟下凹内包层 12 之间的相对折射率差 $\Delta n_{\text{包纤}}$ 为 $-0.50\% \sim -0.05\%$,石英连接壁的折射率 $n_{\text{壁}}$ 与纯硅纤芯 11 的折射率 $n_{\text{纤}}$ 相等,使得光子晶体光纤可实现 1550nm 附近的优良的双折射效应。同时,纯硅纤芯 11 的半径 $r_{\text{纤}}$ 为 $2.0\mu\text{m}\sim 4.0\mu\text{m}$,深掺氟下凹内包层 12 的半径 $r_{\text{包}}$ 为 $2.5\mu\text{m}\sim 5.0\mu\text{m}$,石英连接壁的半径 $r_{\text{壁}}$ 为 $2.5\mu\text{m}\sim 5.0\mu\text{m}$,在结合优化的空气孔结构设计下,光子晶体光纤可以在极小弯曲半径下良好工作,当弯曲半径达 2mm 时,光纤在 1550nm 的串音仍可达到 -25dB/km 以下,附加衰减小于 0.5dB ,从而可以绕制更小尺度的光纤环。

本发明实施例中,石英包层 3 的直径为 $80\mu\text{m}\sim 135\mu\text{m}$,涂覆层 4 的直径为 $135\mu\text{m}\sim 250\mu\text{m}$,可根据不同的应用需求形成不同直径的双

折射光子晶体光纤。

进一步地，所述大空气孔 21、小空气孔 22 采用分区独立气压控制，经高温熔融成型而成。其中，大空气孔 21 的控制气压 P_1 大于小空气孔 22 的控制气压 P_2 ，从而使光纤成型过程中由大空气孔 21 形成的中心孔的膨胀比例大于由小空气孔 22 组成的外层环圈的膨胀比例。具体来说，大空气孔 21 的控制气压 P_1 与小空气孔 22 的控制气压 P_2 的比值为 1.0~1.3。

实际生产中，当石英包层 3 的外部涂覆有单层的涂覆层 4 时，该涂覆层 4 采用聚酰亚胺材料，并经热固化处理，可使制得的光子晶体光纤的工作温度达到 350 度以上。当石英包层 3 的外部涂覆有双层的涂覆层 4 时，涂覆层 4 的内涂层的杨氏模量为 0.2MPa~10MPa，涂覆层 4 的外涂层的杨氏模量为 450MPa~2000MPa，且内涂层、外涂层均经热固化或紫外线固化处理而成，可使制得的光子晶体光纤具有优良的全温性能，在 -45°C ~ 85°C 范围内，1550nm 全温串音变化量小于 0.5dB。

本发明实施例中的双折射光子晶体光纤的工作波长为 1550nm 时，其衰减达到 1dB/km 以下，串音达到 -25dB/km，具有优良的低损耗性能；在 100krad 总辐照剂量下，1550nm 感生损耗增加值小于 2dB/km，具有优良的抗辐照性能。

本发明中的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤的设计原理如下：

双折射光子晶体光纤采用折射率引导型的波导结构设计，其与常规保偏光纤的导光机理一致，均为全反射原理。这要求纤芯的折射率高于包层的折射率。常规保偏光纤的折射率引导型实现方式为纤芯采用掺锗来抬高其折射率，包层为纯石英，从而实现纤芯的折射率高于包层的折射率。对于本发明的光子晶体光纤而言，其包层中分布有数圈空气孔，这些空气孔将会降低其所在区域的整体折射率，从而使包

层的有效折射率得以降低，这样纤芯不掺锗也可以实现纤芯的折射率大于包层的折射率，从而实现全反射来传输光信号。这样就可以为耐辐照光子晶体光纤的设计提供基础。

对于光纤的耐辐照特性而言，主要的抗辐照实现方式是在导光的纤芯避免引入会造成“色心”缺陷的材料，如锗、铝等金属离子。而由于光子晶体光纤是通过包层引入空气孔的方式来大幅降低包层的有效折射率，因此，这为结合抗辐照光纤和光子晶体光纤的特性创造了条件。为此，本发明的光子晶体光纤的纤芯采用纯硅纤芯11，包层为空气孔环圈排列方式，这既可以实现全反射导光，还可以有效实现抗辐照特性（因为避免了“色心”材料的引入）。当然，在实际设计中，还需要考虑形成空气孔的毛细管排布时可能给纤芯带来的污染传递，此时需要在纤芯和空气孔之间设计特殊的阻碍层，即本发明中的深掺氟下凹内包层12，这层材料既可以阻挡部分外界污染的浸入，又使得光纤具有一定的抗辐照性能，还可以为光子晶体光纤的低损耗传输提供更好的设计基础。

本发明中，双折射光子晶体光纤的纯硅纤芯11的周围对称引入有2个与其他空气孔尺寸不一致的空气孔（即大空气孔21）。这2个空气孔的尺寸比其他空气孔的尺寸要大，从而在其所处的区域充分压低包层有效折射率，使这2个空气孔连线方向的纤芯传输的模场被压缩，从而使在纤芯传输模场为椭圆模场，进而实现双折射。在此基础上，由于大空气孔21的尺寸与周围小空气孔22的尺寸比例不同时，会带来不同的双折射效应，传光特性也会有不同，再结合纤芯周围的空气孔环圈的数量，则会有更优的双折射光子晶体光纤的设计。

基于上述原理，本发明对空气孔的排列、环圈数量等进行了优化设计，形成了由空气孔组成的四层环圈，四层环圈的空气孔均呈正六

边形排列，能有效实现低损耗特性，再结合前述的深掺氟下凹内包层 12 设计，进而实现一种具备良好的低损耗和抗辐照性能的双折射光子晶体光纤，满足了例如航天航空等特殊环境应用场合下的使用需求。

下面通过 2 个实施例具体说明本发明的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤。

实施例 1：采用双层的涂覆层 4，经紫外线固化处理的 5 种双折射光子晶体光纤：光纤 1、光纤 2、光纤 3、光纤 4 和光纤 5，光纤 1、光纤 2、光纤 3、光纤 4 和光纤 5 的具体参数见表 1。

表 1、双层涂覆层经紫外线固化的 5 种光纤的参数表

	光纤 1	光纤 2	光纤 3	光纤 4	光纤 5
Δn 包纤	-0.33%	-0.25%	-0.2%	-0.50%	-0.05%
r 纤	4.0	3.2	2.8	2.5	2.0
r 包	4.5	4.0	5.0	3.0	2.5
r 壁	4.5	4.0	5.0	3.0	2.5
r 小	3.0	2.0	2.4	2.0	1.2
r 大	4.5	3.9	4.8	2.9	2.4
P1/P2	1.0	1.1	1.3	1.3	1.2
石英包层直径 μm	80	90	100	125	135
涂覆层直径 μm	135	140	145	245	250
内涂层杨氏模量 Mpa	0.2	0.3	0.5	3.9	10
外涂层杨氏模量 Mpa	450	800	1050	1500	2000
1550nm 衰减 dB/km	0.5	0.7	0.8	0.9	0.92
1550nm 拍长 mm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
1550nm 串音 dB/km	-30	-25	-27	-26	-29
2mm 弯曲半径条件下时 1550nm 附加衰减 dB	0.2	0.35	0.32	0.41	0.45
2mm 弯曲半径条件下时 1550nm 串音 dB/km	-25	-24	-25	-23	-25
-45℃~85℃ 范围内， 1550nm 全温串音变化量 dB	0.3	0.25	0.32	0.5	0.41
100Krad 辐照剂量下 1550nm 感生损耗 dB/km	1.8	1.7	1.65	1.32	1.2

参见表 1 所示，当涂覆层 4 为双层时，进行了 5 种光纤的实施。

从实施例可以看到：在工作波长为 1550nm 时，其衰减控制在 1dB/km 以下，最优值可达到 0.5dB/km，其串音可达到-25dB/km~-30dB/km，拍长可达到 0.5mm~4.5mm，具有优良的低损耗性能；当弯曲半径为 2mm 时，光纤在 1550nm 的串音仍可达到-25dB/km，附加衰减仍小于 0.5dB，具有优越的抗弯性能；在 100krad 总辐照剂量下，1550nm 感生损耗增加值小于 2dB/km，具有优良的抗辐照性能；在-45℃~85℃ 范围内，1550nm 全温串音变化量小于 0.5dB，具有优良的全温性能。

实施例 2：采用单层的涂覆层 4，经热固化处理的 5 种双折射光子晶体光纤：光纤 6、光纤 7、光纤 8、光纤 9 和光纤 10，光纤 6、光纤 7、光纤 8、光纤 9 和光纤 10 的具体参数见表 2。

表 2、单层涂覆层经热固化的 5 种光纤的参数表

	光纤 6	光纤 7	光纤 8	光纤 9	光纤 10
Δn 包纤	-0.31%	-0.33%	-0.05%	-0.50%	-0.2%
r 纤	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
r 包	5.0	4.0	4.5	3.0	2.5
r 壁	5.0	4.0	4.5	2.5	2.5
r 小	3.0	2.5	2.6	1.8	1.2
r 大	4.8	4.0	4.4	2.8	2.4
P1/P2	1.2	1.1	1.0	1.3	1.1
石英包层直径 μm	135	126	100	90	80
涂覆层直径 μm	250	245	135	135	135
1550nm 衰减 dB/km	0.9	0.95	0.8	0.9	0.92
1550nm 拍长 mm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
1550nm 串音 dB/km	-25	-25	-30	-26	-25
2mm 弯曲半径条件下时 1550nm 附加衰减 dB	0.48	0.49	0.5	0.45	0.46
2mm 弯曲半径条件下时 1550nm 串音 dB/km	-22	-24	-25	-23	-21
-45℃~85℃ 范围内， 1550nm 全温串音变化量 dB	0.5	0.48	0.42	0.5	0.41
100Krad 辐照剂量下 1550nm 感生损耗 dB/km	1.7	1.67	1.55	1.42	1.32

参见表 2 所示,当涂覆层 4 为单层时,同样进行了 5 种光纤的实施。从实施例可以看到:在工作波长为 1550nm 时,其衰减依然可控制在 1dB/km 以下,最优值可达到 0.8dB/km,其串音可达到 -25dB/km~-30dB/km,拍长可达到 0.5mm~4.5mm,同样具有优良的低损耗性能;当弯曲半径为 2mm 时,光纤在 1550nm 的串音仍可达到-25dB/km,附加衰减仍小于 0.5dB,同样具有优越的抗弯性能;在 100krad 总辐照剂量下,1550nm 感生损耗增加值小于 2dB/km,同样具有优良的抗辐照性能;在-45℃~85℃范围内,1550nm 全温串音变化量小于 0.5dB,同样具有优良的全温性能。

本发明不局限于上述实施方式,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也视为本发明的保护范围之内。本说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

权 利 要 求 书

1. 一种低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤, 包括中心纤芯(1), 中心纤芯(1)的外部由内到外依次包覆有空气孔层(2)和石英包层(3), 石英包层(3)的外部涂覆有涂覆层(4), 其特征在于: 所述中心纤芯(1)包括纯硅纤芯(11)和包覆于纯硅纤芯(11)外部的深掺氟下凹内包层(12);

所述空气孔层(2)由内至外包括由空气孔组成的四层环圈: 第1层环圈、第2层环圈、第3层环圈和第4层环圈, 所述空气孔分为大空气孔(21)和小空气孔(22), 第1层环圈由2个大空气孔(21)和多个小空气孔(22)组成, 第2层环圈、第3层环圈和第4层环圈均由多个小空气孔(22)组成, 四层环圈的空气孔均呈正六边形排列, 所有空气孔之间通过石英连接壁连接;

所述双折射光子晶体光纤的工作波长为 1550nm 时, 其衰减达到 1dB/km 以下, 串音达到 -25dB/km; 在 100krad 总辐照剂量下, 1550nm 感生损耗增加值小于 2dB/km。

2. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤, 其特征在于: 所述第 1 层环圈包括 2 个大空气孔(21)和 4 个小空气孔(22), 2 个大空气孔(21)以中心纤芯(1)为中心对称分布; 第 2 层环圈由 12 个小空气孔(22)组成; 第 3 层环圈、第 4 层环圈均由 18 个小空气孔(22)组成, 且第 4 层环圈所排列成的正六边形的六角处留有空隙。

3. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤, 其特征在于: 所述小空气孔(22)的半径为 1.2 μ m~3.0 μ m; 所述大空气孔(21)的半径为 2.4 μ m~4.8 μ m。

4. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤,

其特征在于：所述纯硅纤芯（11）与深掺氟下凹内包层（12）之间的相对折射率差为 $-0.50\% \sim -0.05\%$ ；所述石英连接壁的折射率与纯硅纤芯（11）的折射率相等。

5. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述纯硅纤芯（11）的半径为 $2.0\mu\text{m} \sim 4.0\mu\text{m}$ ；所述深掺氟下凹内包层（12）的半径为 $2.5\mu\text{m} \sim 5.0\mu\text{m}$ ；所述石英连接壁的半径为 $2.5\mu\text{m} \sim 5.0\mu\text{m}$ 。

6. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述石英包层（3）的直径为 $80\mu\text{m} \sim 135\mu\text{m}$ ；所述涂覆层（4）的直径为 $135\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$ 。

7. 如权利要求 1 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述大空气孔（21）、小空气孔（22）采用分区独立气压控制，经高温熔融成型而成；大空气孔（21）的控制气压大于小空气孔（22）的控制气压。

8. 如权利要求 7 所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述大空气孔（21）的控制气压与小空气孔（22）的控制气压的比值为 $1.0 \sim 1.3$ 。

9. 如权利要求 1 至 8 中任一项所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述涂覆层（4）为单层的涂层，其采用聚酰亚胺材料，并经热固化处理而成。

10. 如权利要求 1 至 8 中任一项所述的低损耗抗辐照的双折射光子晶体光纤，其特征在于：所述涂覆层（4）为双层的涂层，其内涂层的杨氏模量为 $0.2\text{MPa} \sim 10\text{MPa}$ ，其外涂层的杨氏模量为 $450\text{MPa} \sim 2000\text{MPa}$ ，且内涂层、外涂层均经热固化或紫外线固化处理而成。

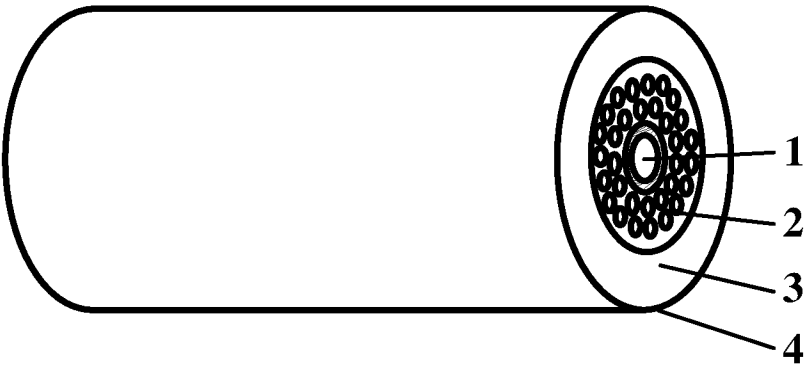


图 1

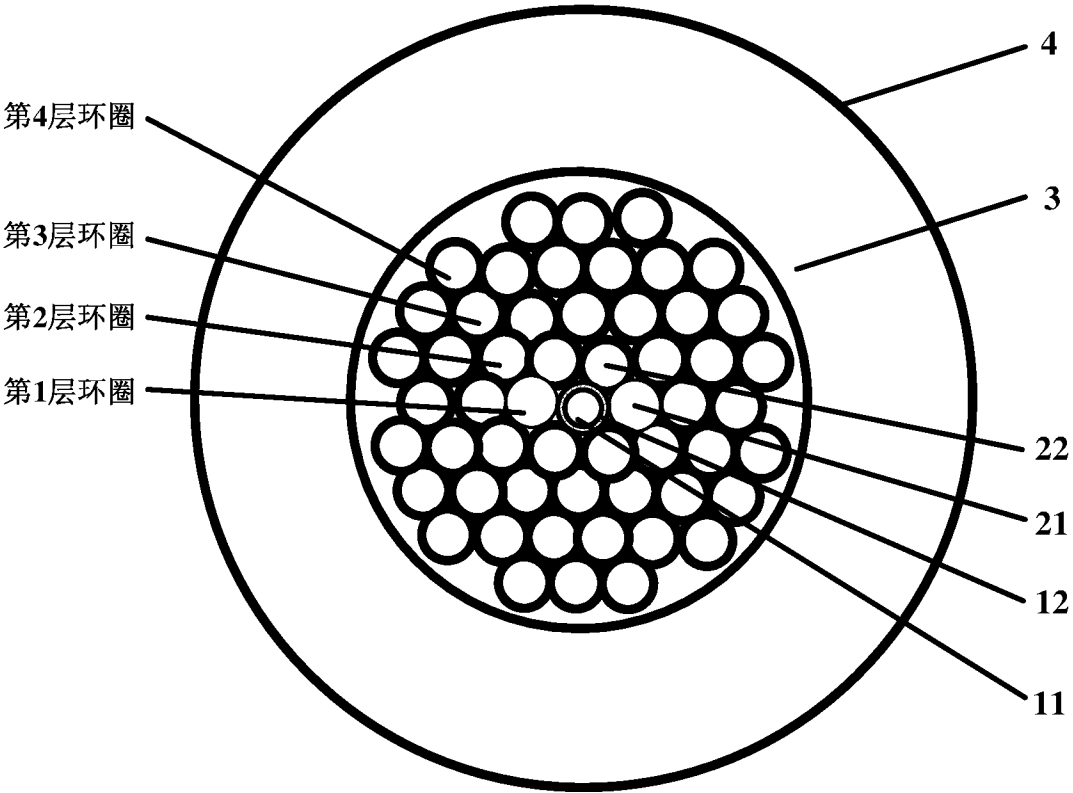


图 2

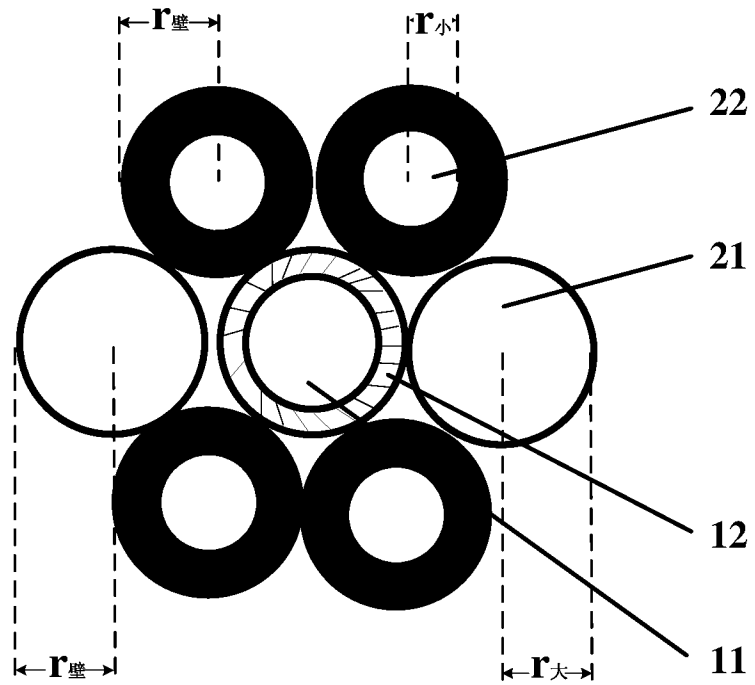


图 3

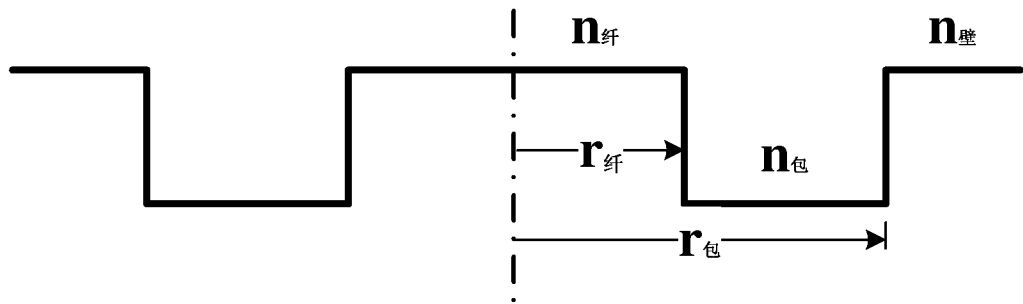


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/102805

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 6/032 (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)

G02B 6

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)

VEN, CNABS, CNKI, CNTXT: photonic crystal, optical fibre, photonic bandgap, radiation, silicon, concave, refractive index distribution, refractive index profile, W type, inner cladding, large, small, diameter, symmetric, fiber, fibre, optic+, photon+, crystal, pcf, band, gap, lattice?, refract+, index, profile, W, core?, inner, cladding, fluo+, hole?, air, size, birefring+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 1782755 A (THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY), 07 June 2006 (07.06.2006), description, page 9, line 18 to page 11, line 8, and figures 1-5b	1-10
Y	CN 1535389 A (CRYSTAL FIBRE A/S), 06 October 2004 (06.10.2004), description, page 20, lines 1-2 and 15-20, and figure 2	1-10
PX	CN 105403952 A (FIBERHOME TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES CO., LTD. et al.), 16 March 2016 (16.03.2016), claims 1-10	1-10
A	CN 104048923 A (CHINA JILIANG UNIVERSITY), 17 September 2014 (17.09.2014), the whole document	1-10
A	CN 102540326 A (DRAKA COMTEQ B.V.), 04 July 2012 (04.07.2012), the whole document	1-10
A	US 2005238307 A1 (HANSEN, K.P. et al.), 27 October 2005 (27.10.2005), the whole document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 16 December 2016 (16.12.2016)	Date of mailing of the international search report 18 January 2017 (18.01.2017)
Name and mailing address of the ISA/CN: 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 ZHANG, Zhi Telephone No.: (86-10) 62085561

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2016/102805

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 1782755 A	07 June 2006	US 7190869 B2	13 March 2007
		CN 100443934 C	17 December 2008
		US 2006093296 A1	04 May 2006
CN 1535389 A	06 October 2004	JP 2004522195 A	22 July 2004
		JP 4203320 B2	24 December 2008
		WO 02084350 A1	24 October 2002
		US 7174078 B2	06 February 2007
		CN 1275057 C	13 September 2006
		EP 1381894 A1	21 January 2004
		CA 2443037 A1	24 October 2002
		US 2005069269 A1	31 March 2005
CN 105403952 A	16 March 2016	None	
CN 104048923 A	17 September 2014	None	
CN 102540326 A	04 July 2012	US 2012134376 A1	31 May 2012
		FR 2968092 B1	14 December 2012
		FR 2968092 A1	01 June 2012
		EP 2457882 A1	30 May 2012
US 2005238307 A1	27 October 2005	AU 2003226890 A1	29 September 2003
		WO 03079074 A1	25 September 2003
		US 7266275 B2	04 September 2007

A. 主题的分类 G02B 6/032 (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) G02B6 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)) VEN, CNABS, CNKI, CNTXT: 光子晶体, 光纤, 光子带隙, 双折射, 辐照, 辐射, 硅, 包层, 下凹, 折射率分布, 折射率剖面, W型, 芯, 内包层, 氟, 孔, 大, 小, 直径, 对称, 双折射, fiber, fibre, optic+, photon+, crystal, pcf, band, gap, lattice?, refract+, index, profile, W, core?, inner, cladding, fluo+, hole?, air, size, birefring+																							
C. 相关文件 <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>Y</td> <td>CN 1782755 A (香港理工大学) 2006年 6月 7日 (2006 - 06 - 07) 说明书第9页第18行至第11页第8行, 附图1-5b</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 1535389 A (晶体纤维公司) 2004年 10月 6日 (2004 - 10 - 06) 说明书第20页第1-2行、15-20行, 附图2</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 105403952 A (烽火通信科技股份有限公司 等) 2016年 3月 16日 (2016 - 03 - 16) 权利要求1-10</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104048923 A (中国计量学院) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102540326 A (德拉克通信科技公司) 2012年 7月 4日 (2012 - 07 - 04) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2005238307 A1 (HANSEN KIM P等) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文</td> <td>1-10</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	Y	CN 1782755 A (香港理工大学) 2006年 6月 7日 (2006 - 06 - 07) 说明书第9页第18行至第11页第8行, 附图1-5b	1-10	Y	CN 1535389 A (晶体纤维公司) 2004年 10月 6日 (2004 - 10 - 06) 说明书第20页第1-2行、15-20行, 附图2	1-10	PX	CN 105403952 A (烽火通信科技股份有限公司 等) 2016年 3月 16日 (2016 - 03 - 16) 权利要求1-10	1-10	A	CN 104048923 A (中国计量学院) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文	1-10	A	CN 102540326 A (德拉克通信科技公司) 2012年 7月 4日 (2012 - 07 - 04) 全文	1-10	A	US 2005238307 A1 (HANSEN KIM P等) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
Y	CN 1782755 A (香港理工大学) 2006年 6月 7日 (2006 - 06 - 07) 说明书第9页第18行至第11页第8行, 附图1-5b	1-10																					
Y	CN 1535389 A (晶体纤维公司) 2004年 10月 6日 (2004 - 10 - 06) 说明书第20页第1-2行、15-20行, 附图2	1-10																					
PX	CN 105403952 A (烽火通信科技股份有限公司 等) 2016年 3月 16日 (2016 - 03 - 16) 权利要求1-10	1-10																					
A	CN 104048923 A (中国计量学院) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文	1-10																					
A	CN 102540326 A (德拉克通信科技公司) 2012年 7月 4日 (2012 - 07 - 04) 全文	1-10																					
A	US 2005238307 A1 (HANSEN KIM P等) 2005年 10月 27日 (2005 - 10 - 27) 全文	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 2016年 12月 16日		国际检索报告邮寄日期 2017年 1月 18日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 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 传真号 (86-10) 62019451		授权官员 张陟 电话号码 (86-10) 62085561																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/102805

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	1782755	A	2006年 6月 7日	US	7190869	B2	2007年 3月 13日
				CN	100443934	C	2008年 12月 17日
				US	2006093296	A1	2006年 5月 4日
CN	1535389	A	2004年 10月 6日	JP	2004522195	A	2004年 7月 22日
				JP	4203320	B2	2008年 12月 24日
				WO	02084350	A1	2002年 10月 24日
				US	7174078	B2	2007年 2月 6日
				CN	1275057	C	2006年 9月 13日
				EP	1381894	A1	2004年 1月 21日
				CA	2443037	A1	2002年 10月 24日
				US	2005069269	A1	2005年 3月 31日
CN	105403952	A	2016年 3月 16日	无			
CN	104048923	A	2014年 9月 17日	无			
CN	102540326	A	2012年 7月 4日	US	2012134376	A1	2012年 5月 31日
				FR	2968092	B1	2012年 12月 14日
				FR	2968092	A1	2012年 6月 1日
				EP	2457882	A1	2012年 5月 30日
US	2005238307	A1	2005年 10月 27日	AU	2003226890	A1	2003年 9月 29日
				WO	03079074	A1	2003年 9月 25日
				US	7266275	B2	2007年 9月 4日