



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102279438 B

(45) 授权公告日 2013.04.03

(21) 申请号 201110209241.3

GB 2447966 A, 2008.10.01, 全文.

(22) 申请日 2011.07.25

US 5324933 A, 1994.06.28, 全文.

(73) 专利权人 中国科学院光电技术研究所  
地址 610209 四川省成都市双流 350 信箱

审查员 房元锋

(72) 发明人 庄须叶 罗吉 姚军

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任  
公司 11021

代理人 梁爱荣

(51) Int. Cl.

G02B 6/02 (2006.01)

G01D 5/26 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1795406 A, 2006.06.28, 全文.

JP 特开 2007-93298 A, 2007.04.12, 全文.

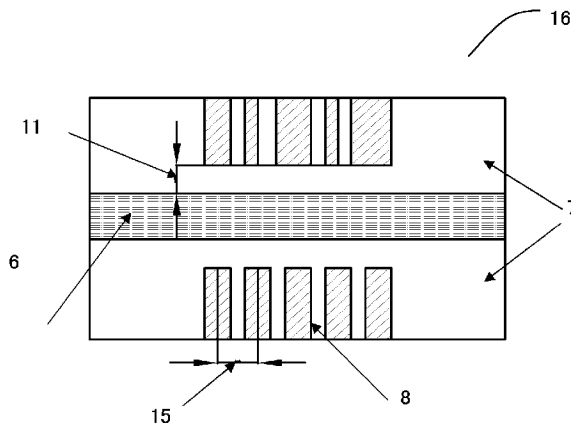
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 5 页

(54) 发明名称

微纳结构的光纤消逝场传感光纤

(57) 摘要

本发明涉及一种新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤,包括保留包层和包层替换的光纤消逝场传感光纤,通过在光纤包层上打微纳孔,控制微纳孔的尺寸特征、分布方式及孔底与纤芯界面的距离,并在微纳孔内填充被测物质进行折射率调制。包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤是将待处理光纤段的包层除掉,填充替换介质层,控制其折射率,并在上面修饰微纳孔,在微纳孔内填充被测物质,调控被测物质的折射率。本发明采用保留传感光纤包层并在其上打微纳孔和用介质层替换包层并在其上打微纳孔的方法制作了新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤,使高阶模式的消逝场能量最大化的参与反应,提高传感器灵敏度,利于光纤消逝场传感器小型化、集成化的发展。



1. 一种微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于包括:保留光纤包层的微纳结构的光纤消逝场传感光纤(16)和包层替换的微纳结构的光纤消逝场传感光纤(23);

所述的保留光纤包层的微纳结构的光纤消逝场传感光纤(16)包括:在光纤(1)上保留待处理光纤段(2)的光纤包层(7),在光纤包层(7)上设置有径向的微纳孔(8),微纳孔(8)沿待处理光纤段(2)的轴向设定有孔距(15),每个微纳孔(8)的孔底(10)距光纤纤芯(6)的界面设定有一段距离(11),微纳孔(8)内填充被测物质(9)进行折射率调制;

所述的包层替换的微纳结构的光纤消逝场传感光纤(23)的特征包括:去除光纤(1)的待处理光纤段(2)的光纤包层(7)的一部分形成残留包层(20),残留包层(20)与光纤纤芯(6)界面之间有一段距离(19),在残留包层(20)上覆盖一层替换介质层(21),在替换介质层(21)上设置有径向的微纳孔(8),微纳孔(8)沿待处理光纤段(2)的轴向设定有孔距(15);微纳孔(8)内填充被测物质(9)进行折射率调制。

2. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,所述保留光纤包层的微纳结构的光纤消逝场传感光纤(16)中的距离(11)在 $-10\lambda \sim 10\lambda$ 之间, $\lambda$ 是光源最长波长,负号表示微纳孔深入光纤纤芯(6)内。

3. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,所述轴向孔距(15)在 $0.001\lambda \sim 1000\lambda$ 之间, $\lambda$ 是光源最长波长。

4. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,所述微纳孔(8)的直径在 $0.001\lambda \sim 1000\lambda$ , $\lambda$ 是光源最长波长。

5. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,被测物质(9)的折射率控制在 $0.5n_2 \sim 2n_1$ 之间, $n_1$ 为光纤纤芯(6)的折射率, $n_2$ 为光纤包层(7)的折射率。

6. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,所述残留包层(20)的厚度(19)在 $-0.4d \sim d$ 之间, $d$ 为光纤外径,负号表示光纤纤芯(6)也被去除部分。

7. 如权利要求1所述的微纳结构的光纤消逝场传感光纤,其特征在于,所述替换介质层(21)的折射率在 $1.3 \sim 2.0$ 之间,替换介质层的厚度在 $1\text{nm} \sim 2d$ 之间, $d$ 为光纤外径。

## 微纳结构的光纤消逝场传感光纤

### 技术领域

[0001] 本发明属于光纤生化传感器技术领域,涉及用于医疗检测、环境监控和生化反恐等领域的光纤生化传感器的制作,具体涉及一种保留包层和包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤。

### 背景技术

[0002] 光纤消逝场传感器是上世纪 80 年代提出来的一种新型功能型的光纤传感器,它利用传感光纤激发的消逝场能量与处于能量作用范围内的被测物质相互作用,引起光纤内传输能量的吸收来实现传感效应。参与反应的消逝场能量越多,相应光纤传感器的灵敏度就越高。它的核心部件是光纤消逝场传感光纤。传统的传感光纤中,通常将光纤的包层除掉,使被测物质与光纤的消逝场能量发生相互作用完成传感过程。传感光纤激发的消逝场能量的多少对传感器灵敏度的高低起到决定的作用,对传感器性能的优劣有着至关重要的影响。

[0003] 通过激发高阶模式的光波导,促使更多的消逝场能量参与与被测物质的相互作用,可有效提高传感器的灵敏度。为获得高阶模式的光波导,许多学者通过将传感光纤制成锥形、组合锥形、U 形等结构或通过入射光的角度调制等措施对传感器进行改良。如文献 [B. D. Gupta, H. Dodeja, A. K. Tomar, Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe(基于能量吸收的 U 形光纤消逝场传感器),1996, Optical and Quantum Electronics 28:1629-1639 和 Anna Grazia Mignani, Riccardo Falciai, Leonardo Ciaccheri, Evanescent wave absorption spectroscopy by means of bi-tapered multimode optical fibers(基于能量吸收的多模双锥形光纤消逝场探测仪),1998,52(4):546-551 和 Yihui Wu, Xiaohong Deng, Feng Li, Xuye Zhuang, Less-mode optic fiber evanescent wave absorbing sensor:Parameter design for high sensitivity liquid detection(基于能量吸收的高灵敏度溶液检测少模光纤消逝场传感器的参数设计),2007,Sensors and Actuators B 122:127-133] 等所述。虽然通过将传感光纤制成锥形、组合锥形、U 形等形状可以较好的激励传感光纤中的高阶模式的光波导,但是因为光在传感光纤中传播时存在着模式损耗,降低了传感器的信噪比,它们激发的高阶光波导中的消逝场能量最多也只有光纤中传输总能量的 30%,同样存在着传感能量低的问题,对传感器灵敏度的提高能力有限。通过调制入射光的角度进行高阶模式光波导激励的方法增加了传感器系统的复杂性,不利于传感器的小型化、集成化发展。

[0004] 光子晶体光纤由于其特异的物理特性,尤其是空心光子晶体光纤(hollow-core photonic bandgap fiber)的空心区内存在着大量的光能,为高灵敏度光纤消逝场传感器的研制提供了载体。通过将物质填充到光子晶体光纤的空心内,可以得到新型的光纤消逝场传感器,但是工艺过程非常复杂,传感器的设计、分析工作量大,探测时间长,且难以把与被测物质反应的敏感膜或特征修饰在光纤的空心壁上,限制了传感器的灵敏度,制约了该类传感器的应用和发展。如文献 Jian Sun, Chi-Chiu Chan, Yi-Fan Zhang, Analysis

of hollow-core photonic bandgap fibers for evanescent wave biosensing(应用于消逝场生物传感的空心光子晶体带隙光纤分析), Journal of Biomedical Optics, 2008, 13(5):054048 和 Y. Y. Huang, Y. Xu, and A. Yariv, Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique(利用选择性填充制作微纳结构功能光纤的工艺方法), Appl. Phys. Lett., 2004, 85:5182-5184 所述。

## 发明内容

[0005] 为解决技术背景中传感光纤激发的消逝场能量低、制作工艺复杂的问题,本发明的目的是提供一种新型微纳结构光纤消逝场传感光纤。

[0006] 为实现所述目的,本发明提供新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的技术方案是:保留光纤包层的微纳结构的光纤消逝场传感光纤和包层替换的微纳结构的光纤消逝场传感光纤;所述的保留光纤包层的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤包括:在光纤上保留待处理光纤段的光纤包层,在光纤包层上设置有径向的微纳孔,微纳孔沿待处理光纤段的轴向设定有孔距,每个微纳孔的孔底距光纤纤芯的界面设定有一段距离,微纳孔内填充被测物质进行折射率调制;所述的包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的特征包括:去除光纤的待处理光纤段的光纤包层的一部分形成残留包层,残留包层与光纤纤芯界面之间有一段距离,在残留包层上覆盖一层替换介质层,在替换介质层上设置有径向的微纳孔,微纳孔沿待处理光纤段的轴向设定有孔距;微纳孔内填充被测物质进行折射率调制。

[0007] 优选实施例,所述距离在  $-10\lambda \sim 10\lambda$  之间,  $\lambda$  是光源最长波长,负号表示微纳孔深入光纤纤芯内。

[0008] 优选实施例,所述轴向孔距在  $0.001\lambda \sim 1000\lambda$  之间。

[0009] 优选实施例,所述微纳孔的尺寸在  $0.001\lambda \sim 1000\lambda$  。

[0010] 优选实施例,被测物质的折射率控制在  $0.5n_2 \sim 2n_1$  之间,  $n_1$  为光纤纤芯的折射率,  $n_2$  为光纤包层的折射率。

[0011] 优选实施例,所述残留包层的厚度在  $-0.4d \sim d$  之间,  $d$  为光纤外径根据选用光纤型号的不同而变化,负号表示光纤纤芯也被去除部分。

[0012] 优选实施例,所述替换介质层的折射率在  $1.3 \sim 2.0$  之间,替换介质层的厚度在  $1\text{nm} \sim 2d$  之间,  $d$  为光纤外径根据所用光纤型号确定。

[0013] 本发明的有益效果:本发明的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤中,通过在保留光纤包层的传感光纤和包层替换的传感光纤上加工径向微纳孔结构,不需要除掉光纤包层,光纤强度高,则使传感器的抗冲击能力强,更适合在复杂苛刻的物理环境下使用。通过控制微纳孔的尺寸、周向布局、轴向布局以及孔底与光纤纤芯界面的距离,并在微纳孔内填充被测物质进行折射率的匹配调制,将传感光纤内的高阶模式光波导的能量诱导至光纤表面的微纳孔内形成消逝场,更有效的参与传感,提高传感器的灵敏度。该传感光纤制作工艺简单,成本低,为光纤消逝场传感器的进一步发展提供了一条崭新的途径。

## 附图说明

[0014] 如图 1a 是本发明新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的制作示意图。

- [0015] 图 1b 是本发明所用实验用光纤示意图。
- [0016] 图 2a 至图 2b 是修饰处理段光纤的截面示意图。
- [0017] 图 3a 至图 3c 是微纳孔在光纤轴向排布的示意图。
- [0018] 图 4 是保留光纤包层的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的剖面示意图。
- [0019] 图 5a 至图 5c 是包层替换的光纤消逝场传感光纤的加工示意图。
- [0020] 图 6a 至图 6b 是光纤包层保留的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的模式电场云图。
- [0021] 图 7a 至图 7b 是包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的模式电场云图。

### 具体实施方式

[0022] 为使本发明的目的、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,对本发明进一步详细说明。

[0023] 如图 1a 示出本发明新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤的制作示意图,图 1b 示出本发明所用一根实验用光纤 1 包括待处理光纤段 2 和不需要处理的光纤段 3;本发明新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤包括两种微纳结构的光纤消逝场传感光纤为:保留光纤包层的微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16 和包层替换的微纳结构的光纤消逝场传感光纤 23;是在一根实验用光纤 1 的待处理光纤段 2 上进行保留包层并在其上设置微纳孔结构的处理;包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 23 是在一根实验用光纤 1 的待处理光纤段 2 上进行介质层替换包层并在其上设置微纳孔结构的处理。

[0024] 1. 所述的保留光纤包层的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16 包括:在光纤 1 上保留待处理光纤段 2 的光纤包层 7,在光纤包层 7 上设置有径向的微纳孔 8,微纳孔 8 沿待处理光纤段 2 的轴向设定有孔距 15,每个微纳孔 8 的孔底 10 距光纤纤芯 6 的界面设定有一段距离 11,微纳孔 8 内填充被测物质 9 进行折射率调制;

[0025] 保留光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16 的技术方案如下所示:图 2a 示出多个微纳孔 8 在光纤 1 周向均匀排布 4,图 2b 示出多个微纳孔 8 在光纤 1 周向非均匀排布 5,其中还示出光纤纤芯 6、包层 7、微纳孔 8、被测物质 9 和孔底 10。

[0026] 取一段长度在 0.2 ~ 100m 的实验用光纤 1,其种类可以是通讯用的单模光纤、多模光纤也可以是塑料光纤或其他特殊光纤,将实验用光纤 1 分为待处理光纤段 2 和不需要处理的光纤段 3。首先对一根实验用光纤 1 的待处理光纤段 2 进行处理,所述处理是在实验用光纤 1 上的待处理光纤段 2 上进行打微纳孔 8 的修饰处理,待处理光纤段 2 的长度在 5cm ~ 100cm 之间。首先对待处理的光纤段 2 进行打微纳孔 8,孔底 10 距光纤纤芯 6 的距离 11 控制在  $-10\lambda \sim 10\lambda$  之间, $\lambda$  是入射光源的最长波长,负号表示微纳孔 8 可深至光纤纤芯 6 内,实验用光纤 1 的种类确定,且孔底 10 的具体数值确定后微纳孔 8 的深度即可确定。微纳孔 8 的形状可以是圆柱形、方形或其他规则多边形或不规则形状都可。

[0027] 如图 3a 示出微纳孔 8 在光纤 1 的轴向均匀分布 12 的示意图,如图 3b 示出微纳孔 8 在光纤 1 的轴向交错分布 13 的示意图,如图 3c 示出微纳孔 8 在光纤 1 的轴向杂乱分布 14 的示意图,下面以图 4 示出保留光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16 的剖面图,及以圆柱形的微纳孔 8 为例对本发明内容进行阐述,在光纤 1 的待处理光纤段 2 上

设置有多个圆周,在每个圆周上打圆柱形的微纳孔 8 的数量控制在 2 ~ 50 个,按照周向均匀分布 4 或非均匀分布 5 在光纤 1 的待处理光纤段 2 的每个圆周上。圆柱形的微纳孔 8 的轴向间距 15 的尺寸控制在  $0.01\lambda \sim 1000\lambda$  之间,圆柱形的微纳孔 8 的排布形式可以规则排列 12、交错排列 13 或杂乱排列 14。圆柱形的微纳孔 8 的尺寸控制在  $0.001\lambda \sim 1000\lambda$  范围之内,具体大小可在此范围内自由变动,圆柱形的微纳孔 8 的直径控制在  $0.001\lambda \sim 1000\lambda$  范围之内。待处理光纤段 2 的长度控制在 1cm ~ 100cm 之间,光纤 1 的总长度控制在 0.1m ~ 100m 之间。不需要处理光纤段 3 是不打微纳孔 8 且保留光纤包层 7,不需要处理光纤段 3 在本发明中起到传输光的作用,制作完成的如图 4 所示的保留光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16。

[0028] 光纤纤芯 6 的折射率为  $n_1$ ,光纤包层 7 的折射率为  $n_2$ 。检测时,调配填充在微纳孔 8 内的被测物质 9 的折射率  $n_9$ ,使  $n_9$  控制在  $0.5n_2 \sim 2n_1$  之间。特殊的光纤结构,结合对微纳孔 8 内填充的被测物质 9 折射率的精确调控,就形成了保留光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16。

[0029] 2. 替换光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 23 的技术方案如下所示:所述的包层替换的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 23 的特征包括:去除光纤 1 的待处理光纤段 2 的光纤包层 7 的一部分形成残留包层 20,残留包层 20 与光纤纤芯 6 界面之间有一段距离 19,在残留包层 20 上覆盖一层替换介质层 21,在替换介质层 21 上设置有径向的微纳孔 8,微纳孔 8 沿待处理光纤段 2 的轴向设定有孔距 15;微纳孔 8 内填充被测物质 9 进行折射率调制。

[0030] 如图 5a 是光纤 1 除掉待处理光纤段 2 的光纤包层 7 示意图,图 5b 是光纤 1 除掉待处理光纤段 2 的光纤包层 7 后填充替换介质层 21 后的示意图,图 5c 是光纤包层 7 替换后的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 23 的示意图。图中示锥形过渡层 17、除包层区域 18、距离 19、残留包层 20、替换介质层 21 及替换介质层厚度 22;

[0031] 将光纤 1 中待处理光纤段 2 的光纤包层 7 除掉。如果选用光纤包层 7 的材料是掺杂二氧化硅,则多用氢氟酸 (HF) 湿法腐蚀的方法除掉光纤包层 7, HF 在径向腐蚀二氧化硅时,在轴向上对二氧化硅也有腐蚀作用,所以除掉光纤包层 7 处会有一锥形过渡层 17 存在。当选用的光纤包层 7 是其他材料,例如塑料时,一般用切割的方法除掉光纤包层 7,则不会有锥形过渡层 17。残留包层 20 的距光纤纤芯 6 的界面距离 19 控制范围在  $-0.4d \sim d$ ,  $d$  为光纤外径根据选用光纤型号的不同而变化,负号表示光纤纤芯 6 也被除掉一部分,然后在待处理光纤段 2 的去除了光纤包层 7 的部分上覆盖替换介质层 21,替换介质层的厚度 22 控制在  $1\text{nm} \sim 2d$  之间,  $d$  为光纤外径根据所用光纤型号确定。替换介质层 21 的折射率  $n$  的大小控制在 1.3 ~ 2.0 之间。

[0032] 然后在替换介质层 21 上打微纳孔 8,待处理光纤段 2 的圆周上微纳孔的个数,以及微纳孔 8 在待处理光纤段 2 的圆周和轴向的分布形式,轴向孔距 15、孔底 10 距光纤纤芯 6 界面的距离 11 以及微纳孔 8 的形状等和保留光纤包层 7 的新型微纳结构光纤消逝场传感光纤 16 的要求相同。光纤 1 的长度,待处理的待处理光纤段 2 的长度要求也和保留光纤包层 7 的新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤 16 的要求相同。

[0033] 调配被测物质 9 的折射率,并将其填充到微纳孔 8 内。被测物质 9 的折射率控制在 1.1 ~ 2.0 之间。本发明特殊的光纤结构结合对被测物质 9 的折射率的精确调控,就形

成了替换光纤包层 7 的新型微纳结构光纤消逝场传感光纤 23。

[0034] 新型微纳结构的光纤消逝场传感光纤本身是一个器件与检测方法的结合体,本发明要求对填充在微纳孔 8 内的被测物质的折射率进行控制。在传感光纤上加工出满足要求的特殊微纳结构后,调制光纤芯层 6、光纤包层 7、替换介质层 21 以及被测物质 9 的折射率使之相互匹配,就可以将所述传感光纤内高阶光波导的能量诱导至光纤 1 表面的微纳孔 8 内进行传感,达到发明要求。

[0035] 1、包层保留的新型微纳结构光纤消逝场传感光纤

[0036] 取一段长度 35cm 的光纤 1,光纤纤芯 6 直径  $18\ \mu\text{m}$ ,光纤包层 7 直径  $80\ \mu\text{m}$ ,待处理光纤段 2 的长度为 10cm,入射光波长  $1.554\ \mu\text{m}$ 。孔底 10 距纤芯界面距离为  $1\ \mu\text{m}$ ,光纤包层 7 的折射率 1.4378,光纤芯层 6 的折射率为 1.4459,微纳孔 8 内被测物质 9 的折射率为 1.4475,微纳孔 8 的孔径为  $5\ \mu\text{m}$ ,4 个微纳孔 8 均匀分布在待处理光纤段 2 的圆周上。取打微纳孔 8 光纤的某界面,分析其中光传播模式的特性,可得有效模数小于 1.4443 的高阶模式光波导的能量主要在微纳孔 8 内分布参与传感,而有效模数大于 1.4443 的低阶模式光波导的能量主要在光纤纤芯 6 内传播,起到信息传输的作用。图 6a 是有效模数为 1.444297 的高阶模式光波导的电场分量云图,约 86.2% 的能量在微纳孔内参与传感。图 6b 是有效模数为 1.444887 的低阶模式光波导的电场分量云图,约 97.5% 的能量约束在纤芯内传播。

[0037] 2、包层替换的新型微纳结构光纤消逝场传感光纤

[0038] 取另一段长度 35cm 的实验用光纤 1,光纤纤芯 6 直径  $18\ \mu\text{m}$ ,光纤纤芯 6 的折射率为 1.445,光纤包层 7 的直径为  $80\ \mu\text{m}$ ,光纤包层 7 的折射率为 1.4378,待处理光纤段 2 长度 10cm,除掉光纤包层 7 后残留包层的厚度为  $1\ \mu\text{m}$ ,填充替换介质层的折射率为 1.4358,填充厚度  $30\ \mu\text{m}$ ,入射光波长  $1.554\ \mu\text{m}$ 。4 个微纳孔 8 均匀分布在光纤 1 的圆周上,孔径  $5\ \mu\text{m}$ ,孔底 10 距光纤纤芯 5 的界面的距离为  $1\ \mu\text{m}$ ,微纳孔 8 内被测物质 9 的折射率为 1.447。取打微纳孔的待处理光纤段 2 的某界面,分析其中传播模式的特性,可得有效模数小于 1.44362 的高阶模式光波导的能量主要在微纳孔内分布参与传感,而有效模数大于 1.44362 的低阶模式光波导的能量主要在光纤纤芯内 6 传播,起到信息传输的作用。图 7a 是有效模数为 1.443615 的高阶模式光波导的电场分量云图,约 88.1% 的能量在微纳孔内参与传感。图 7b 是有效模数为 1.44401 的低阶模式光波导的电场分量云图,约 96.4% 的能量约束在光纤纤芯 6 内传播。

[0039] 以上所述,仅为本发明中的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉该技术的人在本发明所揭露的技术范围内,可理解想到的变换或替换,都应涵盖在本发明的包含范围之内。

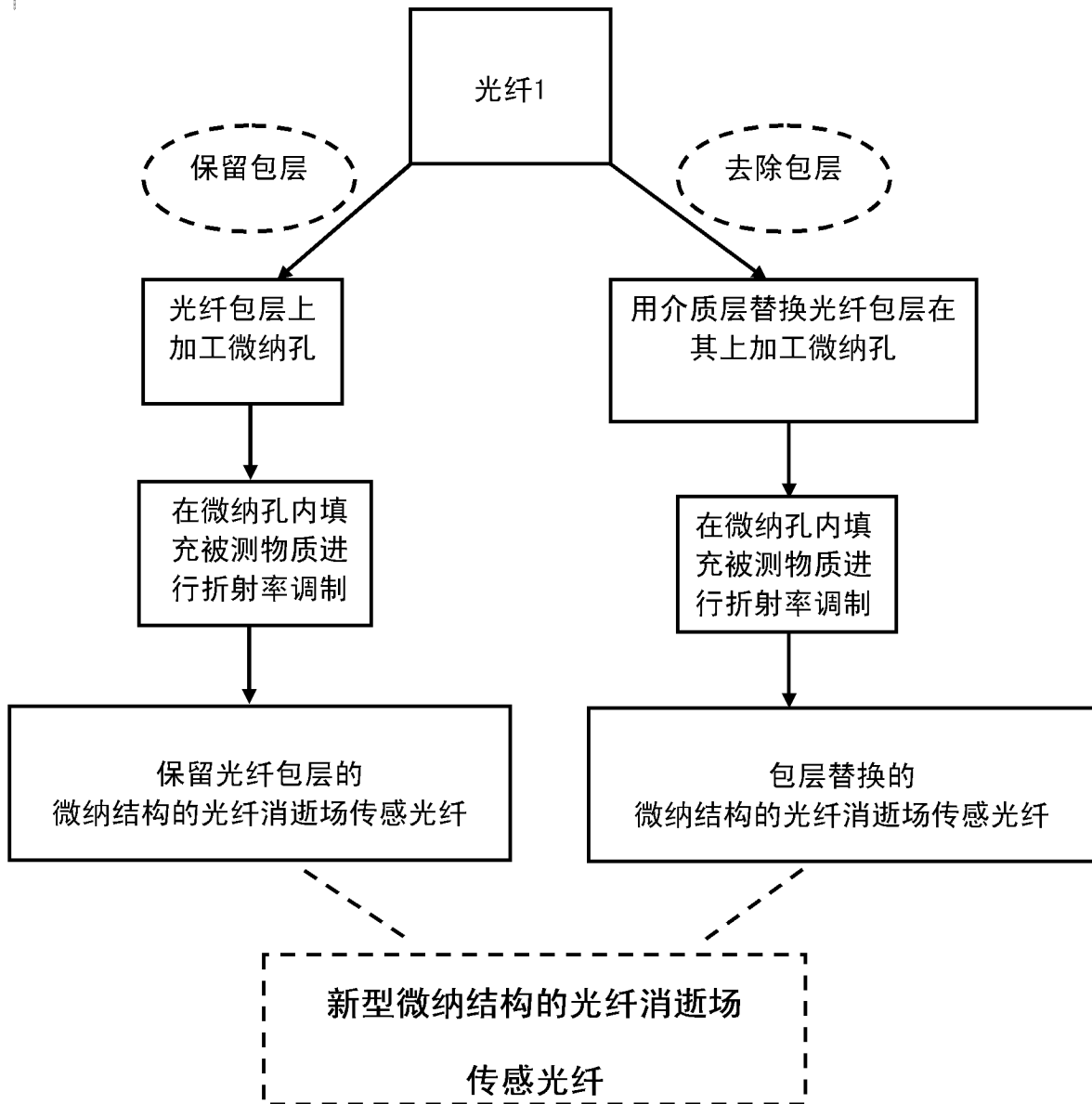


图 1a



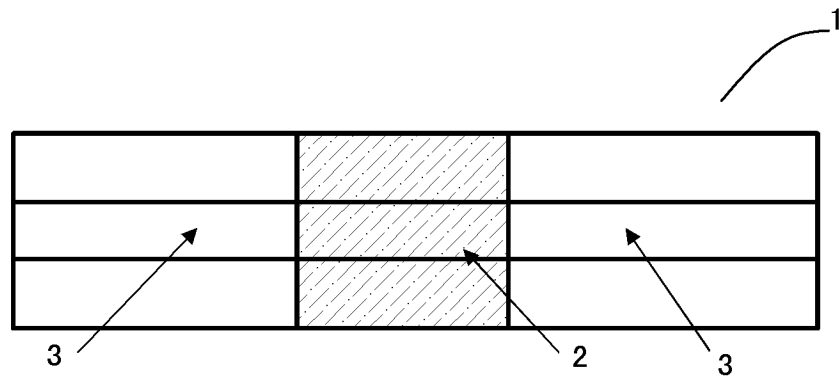


图 1b

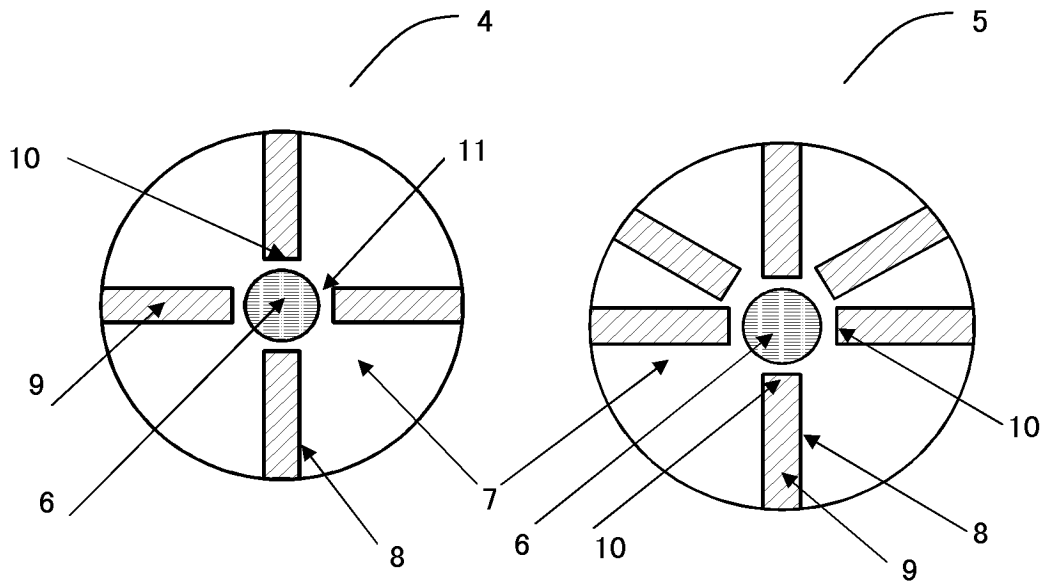


图 2a

图 2b

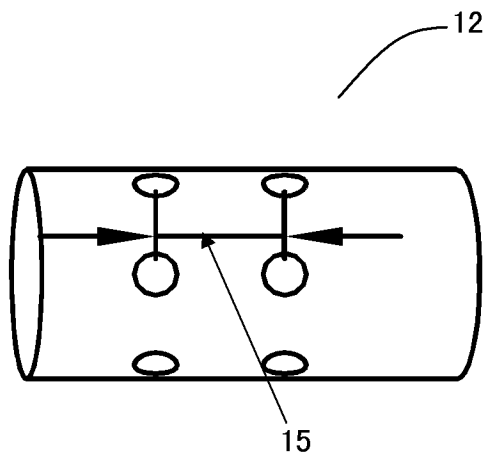


图 3a

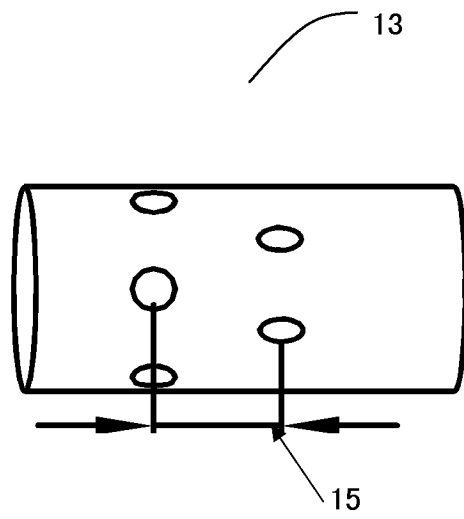


图 3b

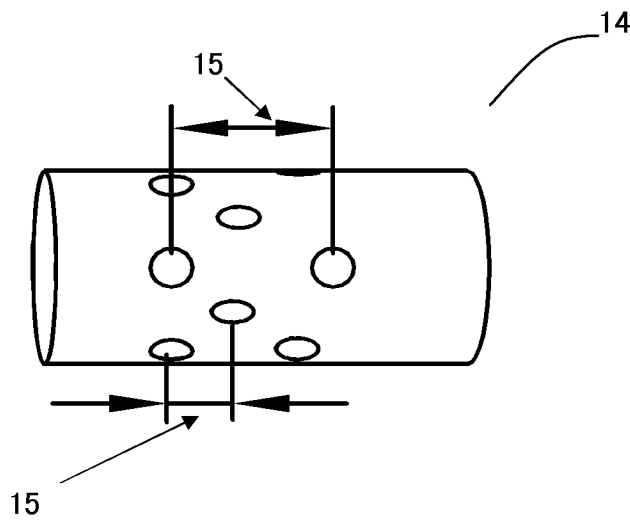


图 3c

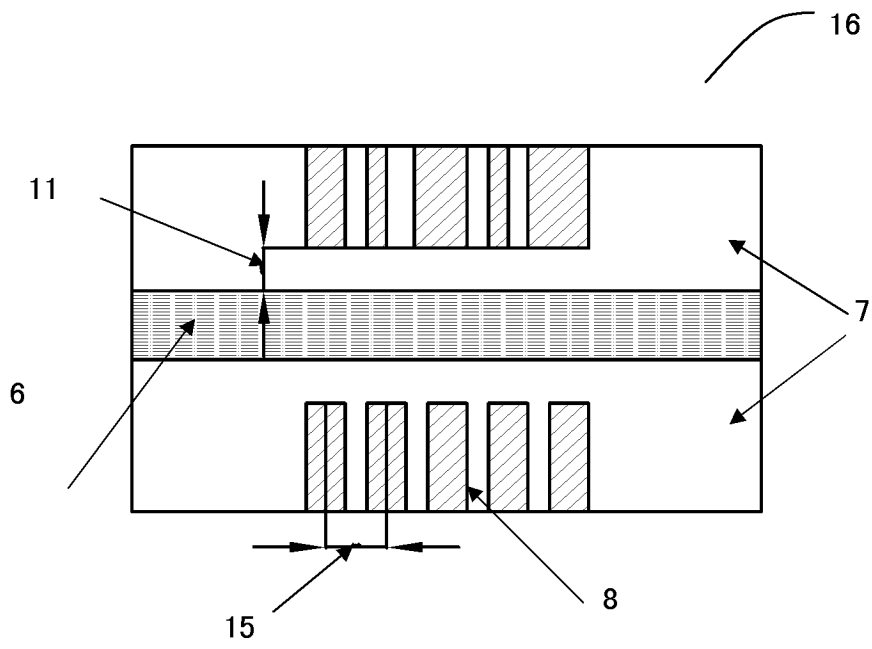


图 4

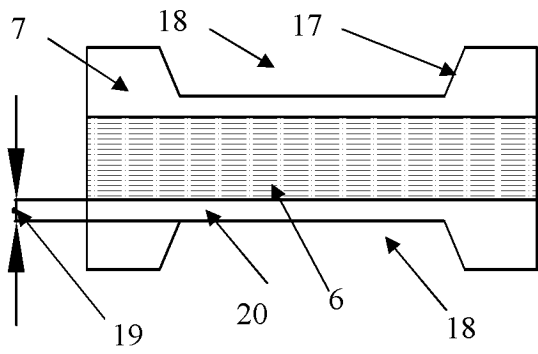


图 5a

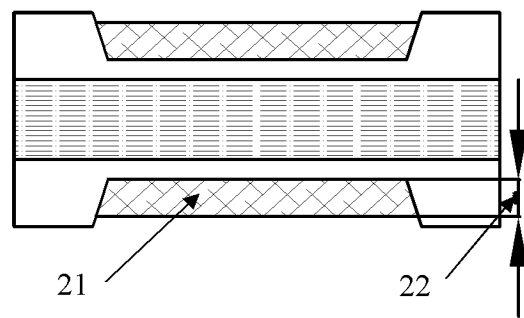


图 5b

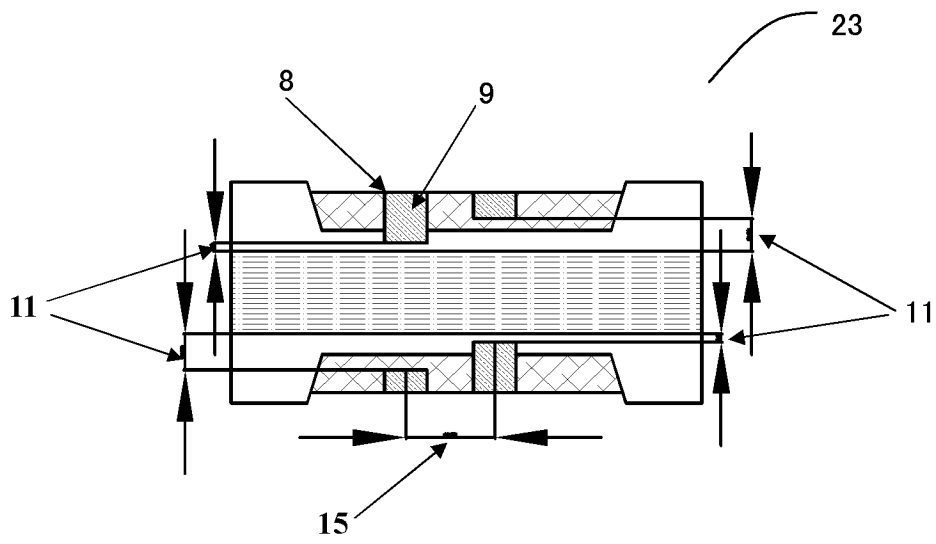


图 5c

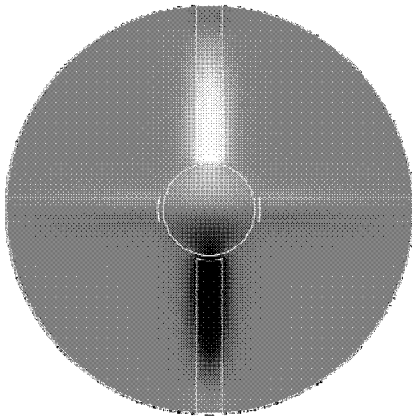


图 6a

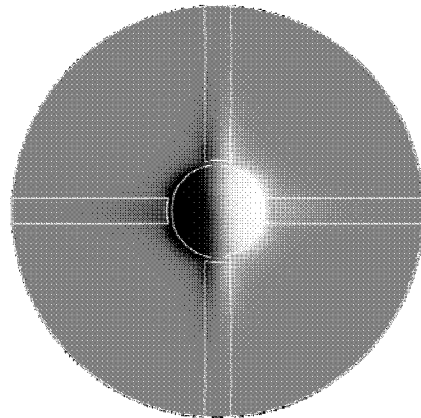


图 6b

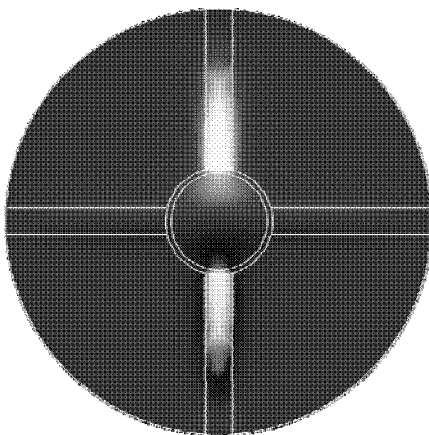


图 7a

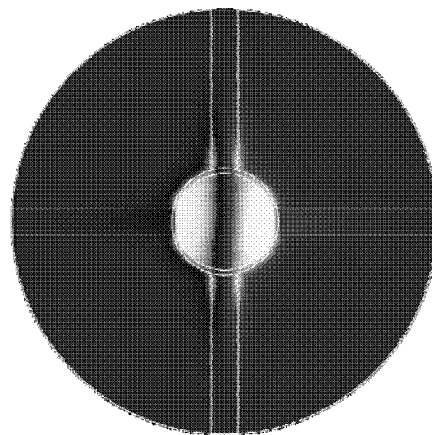


图 7b