



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110235036 A

(43)申请公布日 2019.09.13

(21)申请号 201880008795.7

(22)申请日 2018.01.24

(30)优先权数据

1701355.8 2017.01.27 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2019.07.26

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2018/050195 2018.01.24

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/138490 EN 2018.08.02

(71)申请人 瑞尼斯豪公司

地址 英国格洛斯特郡

(72)发明人 布莱恩·约翰·爱德华·史密斯

C·罗斯 罗伯特·汤姆森

(74)专利代理机构 北京柏杉松知识产权代理事

务所(普通合伙) 11413

代理人 谢攀 刘继富

(51)Int.Cl.

G02B 6/32(2006.01)

B23K 26/18(2006.01)

B29D 11/00(2006.01)

A61B 1/00(2006.01)

A61B 1/07(2006.01)

G02B 23/24(2006.01)

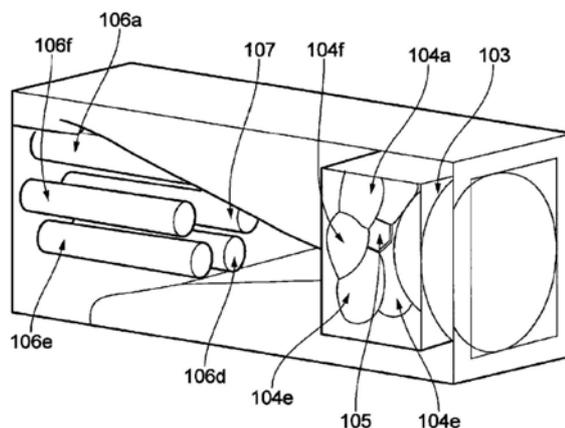
权利要求书2页 说明书17页 附图16页

(54)发明名称

激光直写与化学刻蚀和光学器件

(57)摘要

本发明涉及一种光学器件,该光学器件包括光学透明材料的整体基底。该整体基底中形成有至少一个收集透镜(104a至104f)和通道(106a至106f),该通道(106a至106f)用于接纳光纤并且被布置为对准插入其中的光纤,使得收集透镜将收集透镜(104a至104f)收集的光耦合到光纤中。



1. 一种光学器件,所述光学器件包括光学透明材料的整体基底,所述整体基底中形成有至少一个收集透镜和通道,所述通道用于接纳光纤并被布置为对准插入其中的所述光纤,以使得所述收集透镜将由所述收集透镜收集的光耦合到所述光纤中。

2. 根据权利要求1所述的光学器件,其中,所述收集透镜被布置为将所收集的光聚焦到处于所述光纤的端部或内部的点。

3. 根据权利要求1或2所述的光学器件,其中,所述整体基底进一步包括一个或多个透射透镜,所述透射透镜用于将激发光聚焦到在所述整体基底外部的焦点,并且所述收集透镜被布置为将从所述焦点散射的光耦合到所述光纤中。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的光学器件,其中,所述整体基底中形成有透射透镜和用于接纳递送光纤的另一通道,所述另一通道被布置为对准插入其中的所述递送光纤,以使得由所述递送光纤递送的激发光照射在所述透射透镜上。

5. 根据权利要求4所述的光学器件,其中,所述透射透镜是用于准直所述激发光的准直透镜。

6. 根据权利要求4所述的光学器件,其中,与所述通道相对于所述收集透镜而终止的位置相比,所述另一通道更靠近所述透射透镜而终止。

7. 根据权利要求1至6中任一项所述的光学器件,其中,所述整体基底包括多个收集透镜,每个收集透镜具有与其相关联的相应通道,所述相应通道用于接纳光纤并被布置为对准插入其中的所述光纤,使得所述收集透镜将由所述收集透镜收集的光耦合到所述光纤中。

8. 根据权利要求7所述的光学器件,其中,所述多个收集透镜以花瓣式设计来布置。

9. 根据权利要求8所述的光学器件,其中,所述花瓣式设计包括所述多个收集透镜,从而提供成圆形或环形的收集透镜的连续体。

10. 根据权利要求7至9中任一项所述的光学器件,其中,每个收集透镜的孔径是非圆形的。

11. 根据权利要求10所述的光学器件,其中,每个收集透镜的孔径是圆或环的扇区。

12. 根据从属于权利要求3至6中任一项的权利要求8所述的光学器件,其中,收集透镜的所述花瓣式设计以所述透射透镜或其中的一个透射透镜为中心。

13. 根据权利要求12所述的光学器件,其中,所述多个收集透镜呈绕所述透射透镜或其中一个透射透镜的环形。

14. 根据权利要求13所述的光学器件,其中,每个收集透镜从所述透射透镜或其中一个透射透镜伸出。

15. 根据前述权利要求中任一项所述的光学器件,包括另一分离基底,所述另一分离基底包括聚焦透镜,所述聚焦透镜用于将激发光聚焦到点和/或用于准直源自被暴露于激发光的点/所述点的光,所述另一分离基底通过连接构造而连接到所述整体基底。

16. 根据权利要求1至15中任一项所述的光学器件,包括聚焦透镜,所述聚焦透镜用于准直源自被暴露于激发光的点/所述点的光并且将经准直的所述光引导到所述收集透镜/多个收集透镜上,其中,由所述收集透镜/多个收集透镜填充的所述经准直光的孔径的部分大于 $2/3$ 、优选地大于 $7/10$ 、最优选地大于 $9/10$ 。

17. 根据权利要求1至16中任一项所述的光学器件,其中,所述光学器件是内窥镜。

18. 根据权利要求17所述的光学器件,其中,所述整体器件形成所述内窥镜的远端的一部分。

19. 根据权利要求17或18所述的光学器件,包括被插入所述整体基底的通道中的收集光纤。

20. 根据从属于权利要求4的权利要求17至19中任一项所述的光学器件,包括递送光纤,所述递送光纤被接纳在所述整体基底的所述另一通道中。

21. 一种形成根据权利要求1至20中任一项所述的光学器件的方法,所述方法包括:通过选择性地激光刻写光学透明基底并化学刻蚀经激光刻写的所述基底以移除所述经激光刻写的基底的材料,而形成所述经激光刻写的基底。

22. 一种光学器件,所述光学器件包括光学透明材料的整体基底,所述整体基底中形成有至少一个透镜和通道,所述通道用于接纳光纤并且被布置为对准插入其中的所述光纤,使得所述透镜将由所述透镜收集的光耦合到所述光纤中或者准直从所述光纤发射的光。

## 激光直写与化学刻蚀和光学器件

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光直写与化学刻蚀以及光学器件。本发明特别适用于使用激光直写和化学刻蚀来制造器件的方法和设备以及由此制造的器件。

### 背景技术

[0002] 已经证明超快激光脉冲可以用来直写光波导<sup>1</sup>。这种技术(其现在被称为超快激光刻写(ULI))已经逐渐发展成为用于复杂三维(3D)波导<sup>2-4</sup>的先进制造方法。ULI也称为飞秒微加工和激光直写,其依靠聚焦的亚带隙光超短脉冲来驱动在电介质材料内的非线性多光子吸收,从而引起材料局部结构的永久改变。ULI引起的改变的公知表现是局部折射率的改变,这有利于直接刻写具有不均匀折射率分布的3D器件,例如,光波导和体光栅<sup>5,6</sup>。

[0003] 聚焦体积内发生的改变通常被分类为三种类型(类型I、类型II和类型III)中的一种,这主要取决于刻写期间使用的脉冲能量和持续时间。类型I描述了由构成无定形二氧化硅<sup>13</sup>的SiO<sub>4</sub>四面体环的致密化引起的局部折射率的近似均匀增加。这种方式通常仅在使用亚200fs激光脉冲<sup>14</sup>的熔融石英中可用。类型II改变的特征在于形成有组织的“纳米光栅”;垂直于电场偏振<sup>15</sup>形成的具有高折射率和低折射率的材料周期性交替平面。在较高的脉冲能量下,在纳米光栅变得无序并且微爆<sup>16</sup>在聚焦体积内形成空隙的情况下,出现类型III改变。

[0004] 近年来,纳米光栅的形成已被广泛研究,但确切的基本过程仍是当前研究的主题。已经提出了基于驻波干扰<sup>15</sup>和纳米等离子体激元<sup>11</sup>等的模型,并且真实的性质可以结合每一个的组合。纳米光栅的精确构造表明存在正反馈回路,由此能量周期性累积,从而引起纳米光栅的形成。进一步的研究表明,由于在来自纳米平面<sup>17</sup>的散射光的相长干涉产生的相邻纳米平面之间出现的强度峰,纳米光栅随着周期的缩短而演变。

[0005] 已经得到相当大兴趣的第二表现是ULI可以用来提高激光改变区域的化学刻蚀速率。最近,将ULI与化学刻蚀结合使用的做法获得了很大的吸引力,并且使得能够制造微米级的微光学器件<sup>7</sup>、微流体器件<sup>8</sup>和微机械器件<sup>9</sup>,同时其应用范围从电信到医学。

[0006] 与其他玻璃微制造技术相比,利用化学刻蚀的ULI提供了产生具有自由形式结构的部件的特别独特的优势。进一步地,该工艺适应性强、可扩展且具有成本效益,从而使得其非常适合于生产大量应用的定制光学器件。然而,ULI的复杂性质(起源于许多变量在刻写期间对整个玻璃改变有贡献的事实)意味着从一个系统到下一个系统的可重复制造并不总是容易的。

[0007] 光谱技术被用于医学研究,以辨别体内的组织类型。已经研究了许多形式的光谱分析,包括涉及光子吸收、发射和散射的光谱分析。在这些类别中的任意一个中用于执行光谱分析的关键步骤通常是相同的:激发光或泵浦光被递送到靶部位;光与物质相互作用,并被散射或吸收;收集光谱变化的光;分散所收集的光以解析光谱信息并标识构成物质的原子和分子。通常,感兴趣的组织部位难以接近,并且在组织与探测仪器之间没有直接视线。这个的实例包括食管和远端肺的衬壁。

[0008] 光纤已经用于在难以到达身体的区域时进行光谱分析。使用光纤,沿着经由皮下注射针穿过空腔、中空器官或穿过软组织的内窥镜仪器通道递送和收集光。为了收集尽可能多的光,在远端处需要光学器件系统以将光引导到组织上,并且然后再返回到(多个)光纤中。由于手术的侵入性质,因此期望使远端光学系统(DOS)小型化。从制造角度来看,这种小型化过程具有挑战性。通常需要复杂的手动对准单独微部件。因此,目前的DOS制造技术昂贵、劳动强度大,并且通常不适合商业制造。

## 发明内容

[0009] 根据本发明的第一方面,提供一种制造器件的方法,该方法包括:激光刻写介电基底以对基底材料进行改变,并且以比未改变材料更高的刻蚀速率来化学刻蚀基底以移除经改变的材料,其中控制激光刻写使得经改变材料具有从多种经改变材料类型中选择类型,所选择的类型具有比未改变材料更高的刻蚀速率。

[0010] 通过控制经改变材料的类型,可以实现期望的刻蚀速率选择性,从而提高制造工艺的可靠性。

[0011] 多种类型的经改变材料可以包括类型I、类型II和类型III或由类型I、类型II和类型III组成。所选择的类型对于所有的经改变材料可以是相同的,并且优选地为类型II。认为与类型I和类型III的经改变材料相比,类型II的改变实现了更大的刻蚀速率选择性(经改变材料和未改变材料的刻蚀速率之比)。然而,对于某些器件的制造,可能期望经改变材料的不同区域之间的刻蚀速率不同。因此,不同的选择类型可以用于基底的不同区域。不同类型的经改变材料之间的过渡区域可以用于控制刻蚀剂的传输。

[0012] 多种类型的经改变材料可以包括不同取向的纳米光栅(例如,在类型II经改变材料中实现的具有高折射率和低折射率的材料周期性平面)。所选择的类型可以为将纳米光栅基本上在刻写方向上的对准。

[0013] 可以控制激光刻写以控制激光束相对于刻写方向的偏振取向。可以控制激光刻写,使得激光束的电场基本上垂直于刻写方向而被对准。

[0014] 可以控制激光刻写,使得激光束的能量保持高于能量阈值,以获得所选择的类型的经改变材料。基底可以包括二氧化硅材料,并且能量阈值可以在100-200nJ之间。

[0015] 激光刻写可以包括使用脉冲激光器,并且可以控制激光器以将激光脉冲的重复频率保持在预定的重复频率阈值内。基底可以包括二氧化硅材料,并且重复频率阈值可以小于1MHz和/或大于2MHz。

[0016] 可以控制激光刻写以形成经改变材料的层,其中经改变材料的层之间的间隔保持在预定的层间隔阈值内。基底可以包括二氧化硅材料,并且层间隔阈值可以在0.7 $\mu\text{m}$ 与10 $\mu\text{m}$ 之间。

[0017] 激光刻写可以通过控制激光束的偏振来控制,以使得器件具有期望的表面形貌。

[0018] 可以控制激光刻写,以使得当在将形成器件表面的位置处形成经改变材料时,激光束的偏振基本上垂直于该表面。这导致化学刻蚀在表面产生侧向脊。这种表面可以有利于实现期望的光学效果,诸如衍射光栅。

[0019] 可以控制激光刻写,以使得当在将形成器件表面的位置处形成经改变材料时,激光束的偏振基本上平行于该表面定向或者是圆偏振的。相比于激光束具有垂直于该表面的

偏振的情况,这可以导致形成更光滑的表面。

[0020] 该方法可以包括在化学刻蚀之后火焰抛光基底。火焰抛光可以用于降低器件的表面粗糙度,同时保持总体表面轮廓。

[0021] 根据本发明的第二方面,提供了一种为要被用于器件制造的激光刻写设备生成指令的方法,其中该器件将通过激光刻写介电基底以对基底材料进行改变、并且以比未改变材料更高的刻蚀速率来化学刻蚀基底以移除经改变材料来制造,该方法包括:基于使用参数实现的预定刻蚀速率选择性来选择激光刻写参数,并生成用于激光刻写设备的指令,以使激光刻写设备基于所选择的参数来激光刻写该基底。

[0022] 该方法可以包括基于要形成的器件的几何结构来确定参数。用于改变基底材料的参数可以取决于基底表面的取向、基底的功能(诸如所需的表面粗糙度)和/或不同经改变材料块体所需的不同刻蚀速率。可以选择参数来实现这些期望的结果。

[0023] 参数可以是激光束的偏振(例如相对于要形成的器件的刻写方向和/或表面)、激光束的能量、激光束的重复频率、经改变材料的层之间的间隔和写入速度中的一个或多个。

[0024] 根据本发明的第三方面,提供了一种其上存储有指令的数据载体,其中当被处理器执行时,这些指令使该处理器执行本发明第二方面的方法。

[0025] 本发明的上述方面的数据载体可以是用于向机器提供指令的适合的介质,例如非瞬态数据载体,例如软盘、CD ROM、DVD ROM/RAM(包括-R/-RW和+R/+RW)、HD DVD、Blu Ray(TM)盘、存储器(例如记忆棒(TM)、SD卡、小型闪存卡等)、磁盘驱动器(例如,硬盘驱动器)、磁带、任何磁/光存储器、或者瞬态数据载体(例如,有线或光纤上的信号或无线信号)、例如通过有线或无线网络发送的信号(例如,互联网下载、FTP传输等)。

[0026] 根据本发明的第四方面,提供了一种制造器件的方法,该方法包括:激光刻写介电基底以对基底材料进行改变,并且以比未改变材料更高的刻蚀速率化学刻蚀基底以移除改变材料,其中基于根据本发明的第二方面生成的指令来控制激光刻写。

[0027] 根据本发明的第五方面,提供了一种光学器件,该光学器件包括光学透明材料的整体基底,该整体基底中形成有至少一个收集透镜和通道,该通道用于接纳光纤并被布置为对准插入其中的光纤,以使得收集透镜将由收集透镜收集的光耦合到光纤中。

[0028] 收集透镜可以将所收集的光聚焦到处于光纤的端部或内部的点。

[0029] 该整体基底可以进一步包括一个或多个透射透镜,透射透镜用于将激发光聚焦到整体基底外部的焦点,并且收集透镜被布置为将从该焦点散射的光耦合到光纤中。

[0030] 整体基底中可以形成有透射透镜和用于接纳递送光纤的另一通道,该另一通道被布置为对准插入其中的递送光纤,以使得由递送光学器件递送的激发光照射在该透射透镜上。透射透镜可以是用于准直激发光的准直透镜。与该通道相对于收集透镜(沿着收集透镜的光轴)而终止的位置相比,该另一通道可以更靠近透射透镜(沿着透射透镜的光轴)而终止。以这种方式,与沿着它们各自的光轴在相同位置处终止通道和另一通道相比,(多个)收集透镜与准直透镜的面积比可以被增加。该比率定义了整体器件的填充因子,从而影响了光学器件的相应收集效率。

[0031] 该光学器件可以包括另一分离基底,该另一分离基底包括聚焦透镜,该聚焦透镜用于将激发光(可能已经被准直透镜准直)聚焦到某个点和/或用于准直源自被暴露于激发光的某个点/该点的光,该另一分离基底通过连接构造连接到该整体基底。整体基底可以被

布置为由该分离基底接纳和/或接纳该分离基底。例如,整体基底可以包括公或母连接部分,该公或母连接部分将被该分离基底的相应母连接部分或公连接部分接纳或用于接纳该分离基底的相应母连接部分或公连接部分。提供载有聚焦透镜和收集透镜的分离基底可以简化每个透镜表面的抛光(诸如火焰抛光),而如果这些透镜被结合到单个整体基底中,抛光可能更困难。

[0032] 整体基底可以包括多个收集透镜,每个收集透镜具有与其相关联的相应通道,相应通道用于接纳光纤并被布置为对准插入其中的光纤,使得收集透镜将由收集透镜收集的光耦合到光纤中。多个收集透镜可以以花瓣式设计来布置。花瓣式设计可以以这些透射透镜或其中的一个透射透镜(诸如准直透镜)为中心。

[0033] 花瓣式设计可以包括多个收集透镜,从而提供成圆形或环形的收集透镜的连续体。收集透镜的连续体可以呈绕这些透射透镜或其中一个透射透镜的环形。每个收集透镜的孔径可以是非圆形的。每个收集透镜的孔径可以是圆形或环扇形。每个收集透镜可以从这些透射透镜或其中一个透射透镜伸出。

[0034] 光学器件可以包括聚焦透镜,该聚焦透镜用于准直源自暴露于激发光的点的光并且将准直的光引导到一个/多个收集透镜上,其中,一个/多个收集透镜填充的准直光的孔径的部分大于2/3、优选地大于7/10、最优选地大于9/10。

[0035] 该器件可以包括内窥镜。整体器件可以形成内窥镜远端端部的一部分。

[0036] 内窥镜可以包括插入到整体基底的通道中的收集光纤。收集光纤的端部可以包括涂层,以过滤激发波长的激发光,使其不进入收集光纤中。

[0037] 内窥镜可以包括用于发射激发光的源。该源可以包括递送光纤。递送光纤可以被接纳在整体基底的另一通道中。

[0038] (多个)收集光纤和/或递送光纤可以胶粘在相应的通道或另一通道中。

[0039] 根据本发明的第六方面,提供了一种形成根据本发明第五方面的光学器件的方法,该方法包括通过选择性地激光刻写光学透明基底并且化学刻蚀经激光刻写的基底以移除基底的材料来形成经激光刻写的基底。

## 附图说明

[0040] 图1是用于实施本发明的设备的示意性表示;

[0041] 图2a和图2b示出了被刻写用于测量(a) 1D侧向通道和(b) 2D表面(每个表面具有刻写工具路径)的刻蚀速率的几何结构;

[0042] 图3a是一组单扫描通道的显微照片,这些通道利用100到520nJ的递增脉冲能量刻写,并在5%的HF溶液中刻蚀持续90分钟,以及图3b示出了刻蚀剂渗透到被刻写并在5%的HF中刻蚀持续90分钟的2D表面中。刻蚀剂渗透到玻璃的两面,这两个面被表示为近(左)和远(右),对应于它们在激光写入期间距刻写物镜的距离。

[0043] 图4a至图4d示出了1D通道的参数研究结果。测量了对于每个重复频率在每个偏振态和整个脉冲能量范围内,在样品中刻写250 $\mu\text{m}$ 、500 $\mu\text{m}$ 和750 $\mu\text{m}$ 深的通道的选择性。

[0044] 图5a至图5d示出了平面的参数研究结果。对于每个重复频率,绘制了示出刻有每个偏振态的表面的选择性的曲线图。

[0045] 图6是示出对于每个偏振态根据刻写层之间的间距而变的刻蚀速率的曲线图;

[0046] 图7a和图7b是利用垂直于表面对齐(图7a)和平行于表面对齐(图7b)的电场刻写的表面之间的比较。水平间断指示一个参数和下一个参数之间的间距;

[0047] 图8a至图8c示出了对于利用相对于激光平移方向垂直、平行和圆形(分别为a至c)的偏振刻写的特征,利用AFM测量的表面形貌,并且图8e至图8f是每个表面的所附线轮廓;每个线切口跨越 $50\mu\text{m}$ ,每种情况下的景深为约 $400\text{nm}$ ;

[0048] 图9是利用不同激光偏振(此处示出为 $-2.5^\circ$ 至 $2.5^\circ$ )刻写并在HF中刻蚀的表面的高对比度显微照片。偏振垂直于中心的表面,并且对于每个相邻表面旋转 $\pm 0.5^\circ$ ;

[0049] 图10a和图10b是所测量的根据偏振角 $\theta$ 而变的脊间隔 $s$ 的曲线图。将线拟合应用于测量值,从而允许获得纳米光栅间隙 $d$ ;

[0050] 图11是微透镜表征的实验装置。透镜被刻写并刻蚀在熔融石英基底的边缘上。光由单模阶梯式折射率光纤递送,并且孔径通过CCD成像;

[0051] 图12a是具有 $400\mu\text{m}$ 直径和 $32\mu\text{m}$ 厚度的刻写和刻蚀的非球面微透镜的显微照片,以及图12b和图12c是利用原子力显微镜在透镜表面的 $42.9\mu\text{m}$ 的区段上测量的3D和2D表面轮廓。所测量的区段在高度方面跨度为 $0.58\mu\text{m}$ 。高空间频率表面(HF刻蚀的签名)是清晰可见的,并且量化了 $91.5\text{nm}$ 的RMS表面粗糙度;

[0052] 图13a是在经过火焰抛光后的所制造的微透镜的显微照片,以及图13b和图13c重复经抛光的透镜的AFM扫描数据,示出了 $42\mu\text{m}$ 正方形区段的表面形貌和相应的线轮廓。

[0053] 图14是火焰抛光前后所测量的透镜轮廓与所刻写的轮廓的对比曲线图。经抛光的透镜具有稍微不太陡的轮廓,并且因此具有更为球面的表面轮廓。所刻写的透镜和所刻蚀的透镜之间的差异是由于刻写路径周围的区域中原始材料的刻蚀而产生的;

[0054] 图15a是从单模光纤成像到CCD上的模式图像,以及图15b和图15c示出通过刻写的微透镜(即未抛光(b)和经火焰抛光(c))成像的相同光纤模式;

[0055] 图16示出了用于通过中心光纤递送光并收集由六根周围光纤使用的反向散射光的远端光学系统(DOS)的二维示意图;

[0056] 图17示出了用于在发散通过微光学器件的长度后使来自光纤的激发光准直的透镜的建模结果;

[0057] 图18示出了聚焦配置(左)和准直配置(右)下的聚焦透镜的建模结果,这两种配置将泵浦光向下聚焦到样品上并使返回的拉曼信号准直;

[0058] 图19示出了将拉曼信号耦合到具有 $50\mu\text{m}$ 纤芯直径的多模光纤中的建模结果;

[0059] 图20示出了组成DOS的组装组件的呈现,其中拉曼信号收集透镜重叠以最大化信号检测效率;

[0060] 图21是聚焦到DOS后面的光斑的激发光和拉曼信号发生的光线轨迹模型,其中光线指示通过透镜对准直和收集的信号的比例。利用DOS孔径检测到的一些光线朝向收集光纤被反射回进入,但不能耦合进入;

[0061] 图22是入射到位于收集光纤入口处的检测器平面上的光的强度分布;

[0062] 图23a是六个微透镜围绕一个微透镜的照片,图23b是从上方观察的微透镜的光学显微照片,以及图23c是处于一定角度的微透镜的光学显微照片;

[0063] 图24a是透过微透镜阵列的 $780\text{nm}$ 光的的图像,示出了7个发散光斑,图24b至图24d是示出了由用于在光通过焦点时收集光的 $25\text{mm}$ 透镜生成的光斑的图像,以及图24e是被聚

焦的7个光斑的相机图像；

[0064] 图25是根据本发明另一实施例的远端光学系统的截面图；

[0065] 图26是图25所示的远端光学系统的端视图；以及

[0066] 图27a和图27b示出了a)具有圆形收集透镜阵列和b)具有重叠“花瓣”设计的收集透镜阵列的两个透镜表面。

## 具体实施方式

[0067] 选择性刻蚀

[0068] 当浸没在氢氟酸 (HF) 溶液中时,熔融石英将溶解形成第一氟化硅,然后在以下化学反应后形成氢氟硅酸<sup>18</sup>:

[0069]  $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$ 。

[0070] 熔融石英的刻蚀速率取决于玻璃与刻蚀剂之间的分子化学作用、以及诸如温度等外部因素。对于选择性刻蚀,通常使用含有1%与40%之间的酸的水溶液,并且刻蚀时间可以从几分钟到若干小时变化。当浸没在5%的HF溶液中时,未改变或原始熔融石英具有约0.05 $\mu\text{m}/\text{min}$ 的刻蚀速率。已经表明了经改变的类型I、类型II和类型III的每一个有助于提高刻蚀率<sup>19</sup>,并且对于某些刻写参数,可以实现高达两个数量级的提高<sup>20</sup>。对刻蚀速率方面的提高有贡献的机制取决于存在的改变类型。对于类型I改变,由于环序的缩短而引起的平均Si-O-Si键角的减小与刻蚀速率相关<sup>21,22</sup>。

[0071] 对于类型II,刻蚀速率主要取决于纳米光栅的取向,其中在沿着取向平面的方向上观察到最大刻蚀速率。纳米裂纹<sup>23</sup>和材料的多孔平面<sup>24</sup>的存在(其允许更快的刻蚀剂传输)能够潜在地解释在这种方式中观察到的定向刻蚀速率提高。最后,除了在类型I中发生的改变之外,对于类型III改变所观察到的提高的刻蚀速率可以由材料中微孔的存在来解释。

[0072] 为了实现微光学器件的高效制造,首先,应在刻蚀后复制所刻写的光学器件的形式。详述这一点,制造的分辨率极限不仅由刻写工艺设定,还由刻蚀阶段设定。因为原始熔融石英具有固有的刻蚀速率,所以当浸没在HF中时,经改变和未改变区域都将刻蚀。特征分辨率通过最小化刻蚀阶段期间的总时间而被最大化。换句话说,应该最大化刻蚀选择性,即经改变和未改变材料的刻蚀速率之间的比率。其次,刻蚀后获得的表面粗糙度应该最小化,以便最大化微光学器件的光通量和质量。

[0073] 实验方法

[0074] 刻写程序

[0075] 激光刻写是使用发射处于1030nm的350fs脉冲的Menlo Systems BlueCut光纤激光器实现的。脉冲重复频率可在250kHz、500kHz、1MHz和2MHz之间选择。束脉冲能量和偏振态的自动控制是使用图1那样布置的偏振分束器和安装到电动旋转安装件上的一系列波片实现的。当在熔融石英(折射率=1.450)中被聚焦时,使用0.4NA非球面物镜将束聚焦成衍射受限斑,其具有2.19 $\mu\text{m}$ 的理论 $1/e^2$ 光斑直径和7.30 $\mu\text{m}$ 的共焦参数。将要刻写的样本(测量为10 $\times$ 10 $\times$ 1mm)安装在方形孔径内,从而允许从上方和下方两者进行询问。在刻写期间,使用在每个方向上具有25mm行程且分辨率为0.1微米的3轴ALIO工业公司的平移台来使样品平移经过聚焦束。使用与气动平衡块配对的交叉滚柱轴承来实现平稳的3维行程。该平台通

过以太网 (Ethernet) 经由ACS运动控制SPiiPlus NTM网络管理器 (ACS Motion Control SPiiPlus NTM Network Manager) 进行控制, 其中每个轴具有UDMnt从模块。

[0076] 使飞秒激光脉冲经过一系列自动旋转波片和偏振分束器 (PBS), 以便控制它们的能量和偏振。束被背面抛光 (BP) 的反射镜偏转通过0.4NA非球面透镜 (其从下方聚焦到样本上)。监视电源, 并实时成像刻写过程。

[0077] 刻蚀程序

[0078] 所有刻蚀都在5%氢氟酸 (HF) 水溶液中进行, 该氢氟酸水溶液是通过将1份40%的HF原液稀释到7份去离子水而制备。在刻蚀时间期间 (通常在一小时到四小时之间), 样本被浸没在刻蚀剂中且被置于超声波浴中。在进行刻蚀之后, 样本首先在去离子水中漂洗多次并最后在丙酮超声波浴中漂洗多次。

[0079] 参数研究

[0080] 方法

[0081] 刻写期间能量沉积到材料中的过程可能对发生的改变具有重大影响。能量沉积可以通过改变许多辐射参数来控制, 这些辐射参数包括波长、脉冲持续时间、脉冲能量、偏振态、脉冲重复频率和聚焦NA。除了辐射参数之外, 材料平移经过斑点的速度、深度和方向也可以影响改变。因此, 存在可以对其进行不同的材料改变的巨大参数空间。进行试图在整个参数空间上找到总体最佳参数的实验是不切实际的, 并且不能保证这样的最佳参数会从一个系统到下一个系统保持不变。而是, 特别地已经找到了考虑到微光学制造的局部最佳参数。为此, 表1中总结了所研究的参数空间。

[0082] 表1

[0083]

参数	范围	备注
激光源	固定	1030 nm, ~350fs 脉冲持续时间
脉冲能量	40-520 nJ	与重复频率相关
脉冲重复频率	250 kHz、500 kHz、1 MHz、2 MHz	-

[0084]

激光偏振	平行 $\vec{E}_s$ 、垂直 $\vec{E}_r$ 、圆形 $\vec{E}_s$	关于刻写的特征
层间隔	0.6-10 $\mu\text{m}$	适用于2D几何结构
刻写深度	250 $\mu\text{m}$ 、500 $\mu\text{m}$ 、750 $\mu\text{m}$	适用于通道
平移速度	0.5 $\mu\text{m}/\text{s}$	固定

[0085] 刻写几何形状也影响刻蚀速率。例如, 归因于刻蚀剂传输穿过材料, 当以相同的辐射参数刻写时, 1D通道可以以不同于2D表面的速率来刻蚀。对于3D特征的制造, 通常会写入表面和横向通道 (transverse channel) 的组合。因此, 针对这些几何形状中的每一个研究了参数空间。所刻写的形状的形式在图2a和图2b中示出。

[0086] 通过将基底沿单个轨道侧向平移经过激光焦点一次来刻写通道。对于在玻璃基底边缘附近刻写的通道, 由于与高NA透镜相关联的陡峭入射角, 会发生束削波。削波减少了改

变的效果,并且这在更深的刻写深度时更加突出。为了显示块体中均匀改变的材料,玻璃边缘被研磨回几十微米,并在刻蚀前抛光。

[0087] 通过将焦点光栅扫描穿过样本来刻写表面,其中形成跨整个基底厚度的经改变材料的平面。以230 $\mu\text{m}$ 的宽度以及相邻平面之间的20 $\mu\text{m}$ 的间隔写入表面。基底被部分刻蚀,并且测量了刻蚀剂渗透每个表面的距离。然后对选定的基底刻蚀第二次,从而允许刻蚀剂完全渗透穿过样品。

[0088] 随后,基底被劈开以显示经改变的区域,并为表面轮廓描绘和询问提供直接通路。

[0089] 结果

[0090] 刻蚀速率选择性

[0091] 选择性被测量作为经改变和未改变材料的刻蚀速率之间的比率。尽管玻璃的刻蚀本质上是三维的,但我们感兴趣的刻蚀剂的传输可以简化为单向的。因此,这里所有的刻蚀速率都以长度/时间为单位来表示。纯净原材料的刻蚀速率通过将原始熔融石英浸没在5% HF溶液中持续24小时并沿与所讨论的刻写结构相同的轴线(即对于通道而言沿长轴(y轴)而对于表面而言沿短边(z轴))测量回蚀长度来测量。使用这种方法,分别沿y轴和z轴测得原刻蚀速率为 $0.051 \pm 0.005$ 微米/分钟( $\mu\text{m}/\text{min}$ )和 $0.047 \pm 0.005 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

[0092] 一维通道

[0093] 刻蚀后获得的刻写通道的典型显微照片在图3a中呈现。通道的逐渐变细(其本身是选择性的指示)是由在刻蚀剂传播穿过时通道所经历的原始材料的向外刻蚀引起的。

[0094] 测量通道的长度,并将其用于计算各个参数集的选择性。选择性S计算为

$S = \frac{l}{T\epsilon} + 1$ ,其中l是通道长度, $\epsilon$ 是纯净原材料刻蚀速率,以及T是刻蚀时间。在图4a至图4d中

以图形方式呈现了关于每个重复频率和写入深度,根据脉冲能量而变的刻蚀速率。

[0095] 各个辐射参数是在通道的刻蚀速率中观察到的趋势的原因。这里总结了每个参数的贡献:

[0096] 脉冲能量:最小的脉冲能量是需要的,改变阈值,在达到最小的脉冲能量前不发生选择性的增加。刻蚀速率方面的急剧上升对应于改变进入类型II方式。当在基底中刻写得更深时,改变阈值增大。这是由于通过玻璃聚焦的斑点的偏差。发现改变阈值在100-200nJ的范围内。在达到阈值后,对于平行偏振和圆偏振来说选择性继续稍微增加,而对于垂直偏振来说选择性稳步下降。较高脉冲能量的选择性的降低可以通过在改变从类型II转变为类型III时纳米光栅的预期无序化来解释。

[0097] 偏振:在确定选择性时最重要的变量是激光电场的取向。当垂直于刻写方向对准时,与5-10的平行偏振和圆偏振相比,发现对于每个重复频率来说最大选择性大于100。结果与当前的理论一致,即可渗透纳米光栅允许快速的刻蚀剂传输<sup>25</sup>,并垂直于偏振方向形成。

[0098] 重复频率:脉冲重复频率对经改变材料的刻蚀速率影响没那么显著。发现对于1MHz的高脉冲能量来说,选择性急剧下降。这可能是由于刻写期间与高重复频率相关的热积累而引起的,其中可能导致纳米光栅的坍塌。

[0099] 平面

[0100] 在刻蚀九十分钟后,通过基底边缘拍摄经辐射表面的照片,并测量蚀刻剂渗透深

度。在图3b中呈现了典型的刻蚀表面。图5a至图5d中绘出了同样作为脉冲能量的函数的且关于所研究的参数中的每一个的刻蚀速率选择性。对于利用250kHz的脉冲重复频率刻写的平面,还额外研究了层间隔,即,表面光栅图案的相邻梯级之间的间距,并将结果绘制在图6中。

[0101] 同样,分析了每个参数组对刻蚀速率的贡献:

[0102] 脉冲能量:对于表面,刻蚀速率改变阈值达到约100nJ/脉冲。在较高的脉冲能量下,除了平行偏振逐渐增加之外,选择性表现出平稳状态。

[0103] 偏振:与所刻写的通道一样,当利用垂直于刻写方向对准的入射电场刻写时,表面展现出最大的选择性。这同样是归因于在经改变材料内形成的纳米光栅的对准(垂直于线偏振取向)。结果突出显示了偏振在蚀刻剂传输穿过经改变区域的重要性;当纳米平面沿着表面对准时,刻蚀剂可以渗透横穿表面,而在垂直纳米平面的情况下,刻蚀剂只能纵向渗透穿过基底。

[0104] 重复频率:由于平移速度始终保持不变,每单位长度上沉积的总能量随脉冲重复频率线性变化。重复频率表现出对选择性只有细微的影响,除了在1MHz的刻写(相对于其他重复频率的刻写,该刻写平均选择性降低了一半)。认为块体中的热积累可能是纳米光栅的破裂和刻蚀速率的明显降低的原因。然而,刻蚀速率在2MHz下恢复,其中预期热积累会更大。当在类型II改变与纳米光栅开始无序化的类型III改变之间转变时,蚀剂传输受到的阻碍最大。

[0105] 层间隔:对于垂直偏振,观察到层之间的间隔对刻蚀速率几乎没有影响,如图6中平坦的蓝色曲线所示。然而,对于平行偏振和圆偏振,刻蚀速率随着层在一起靠得越来越远而提高。实际上,在刻蚀速率与层间隔之间存在权衡,因为制造时间与层间隔的倒数成比例。0.7到1 $\mu\text{m}$ 的层间隔似乎是最佳的,并且在这个水平上,圆偏振和平行偏振的选择性接近垂直偏振的选择性。

[0106] “刻写方向”是从一个几何坐标到下一个几何坐标的侧向位移的方向。例如,使用图2中所示的坐标系,通过沿着y平移样本,利用沿着y轴的刻写方向来刻写一维通道。纳米光栅在x-y平面中垂直于电场取向(线性偏振角)形成。如果通道沿y刻写,并且偏振在x-y平面中也沿y定向,那么偏振被标记为“平行”。如果通道沿y刻写,但偏振在x-y平面中沿x定向,那么偏振被标记为“垂直”。

[0107] 表面轮廓

[0108] 在刻写期间对每个表面进行的特定改变不仅决定了刻蚀速率,而且决定了刻蚀后获得的表面结构。能量沉积的印记是作为表面形貌上的永久人造物实现的。图7a和图7b中的显微照片示出了利用分别与(a)和(b)中的写入方向垂直和平行对准的激光偏振刻写的表面的明显不同的形式。

[0109] 为了更近地检查表面,在 $50 \times 50 \mu\text{m}$ 的区域上进行原子力显微镜(AFM)扫描。测量在所有其他参数保持不变的情况下利用线性(垂直并平行于写入方向)偏振和圆偏振刻写的表面的表面形貌。从AFM扫描获得的表面形貌呈现在图8a至图8f中。

[0110] 当偏振态是线性的并且垂直于刻写表面定向(如图8a中那样)时,观察到侧向脊沿着表面(近似垂直于偏振方向)形成。这些脊被测得具有 $20 \mu\text{m}$ 量级的不同间隔和约200nm的阶梯高度。在 $100 \mu\text{m}^2$ 面积上的脊之间的平面上采样标准均方根(RMS)表面粗糙度和峰到峰

表面粗糙度,并且发现平均值分别为16.52nm和71.1nm。

[0111] 在偏振如图8b中那样沿刻写方向对准的情况下,表面脊的空间间隔减小了大约一个数量级,并旋转90度,从而纵向穿过表面而形成。发现平均采样RMS表面粗糙度和峰到峰表面粗糙度分别为98.8nm和377.9nm。

[0112] 当入射光如图8c所示被圆偏振时,发现了类似的表面结构。再次测量RMS表面粗糙度和峰到峰表面粗糙度,并获得85.48nm和357.2nm的相应值。

[0113] 为了试图解释图8a中观察到的周期性脊的原点,用刻写束的线性偏振来刻写表面,其中刻写束以 $0.5^\circ$ 步长从垂直于平移方向一直重复到约 $\pm 7^\circ$ 。刻蚀表面利用标准白光反射显微镜成像。图像被增强以为清晰目的并且将其缝合在一起,结果呈现在图9中。

[0114] 观察到,当偏振垂直于表面对准时,脊间隔距离达到峰值。脊取向也遵循明确的图案。当偏振垂直对准时,脊表现出是水平的。将偏振仅仅旋转 $6^\circ$ 后,测得的脊角为与水平方向成 $87.6^\circ$ 。

[0115] 这些观察结果可以用模型来解释。当纳米光栅垂直于表面(平行偏振)形成时,纳米光栅将其边缘直接印到表面上,其中周期 $s$ 等于纳米光栅间距 $d$ 的周期。随着纳米光栅旋转,纳米光栅的周期随着纳米光栅与表面所成的角度 $\theta$ 的正弦值的周期而增加,当 $\theta=0$ 时该

周期变成无穷大。从图10b中,可以预期, $S = \left| \frac{d}{\sin(\theta)} \right|$ 。为了测试模型的有效性,绘制了 $\theta$ 对 $1/s$

的曲线图(为了避免渐近线而反转),其结果呈现在图10a中。进行了数据拟合,表明实验数据与根据模型预期的值之间的良好一致性。根据拟合曲线,发现纳米光栅周期为 $366 \pm 8\text{nm}$ ,这与纳米光栅形成<sup>26</sup>的第一阶段的纳米等离子体激元模型预测的 $\lambda/2n$ (355nm)一致。观察到了在刻写期间的离激光最近的表面附近的纳米光栅周期的减小。纳米等离子体激元模型进一步预测纳米光栅的演变;随着脉冲数量或沉积的总能量的增加,纳米光栅间距减小。观察结果可以通过这个来解释;在靠近表面的地方,聚焦体积不会发生偏差,并且因此会发生最大的改变。而在样本深处,有偏差的脉冲对总改变的贡献减小。

[0116] 讨论

[0117] 已经表明,对于垂直于写入方向对准的偏振,2D表面的纵向选择性显著增加了100倍,而与所研究范围的层间隔无关。所需的用于改变的最小脉冲能量始终在100与150nJ之间,其中峰值改变发生在200nJ附近。这个范围内的改变被稳固地处于类型II方式中,其中纳米光栅的形成是预期的。已经观察到刻蚀后获得的表面上的纳米光栅的“足迹”,并且纳米平面的侧向堆叠沿着刻蚀表面形成波纹,其对所获得的表面粗糙度作出贡献。在相邻脊之间的间距中测得的RMS表面粗糙度为16.52nm,对应于与利用圆偏振光刻写的表面相比减少了五倍,和对于光谱应用中常用的800nm光而言约为 $\lambda/50$ 。已经进一步观察到,当在基底中刻写得更深时脊之间的间距减小,并且将其归因于较低的有效脉冲能量。为此,精确控制刻写束的偏振和脉冲能量将使纳米光栅和表面能够对准,这在原理上将使脊间隔趋向无穷大。当实施时,可实现具有光学表面质量的结构的可重复制造。

[0118] 表2中给出了对于ULI微加工发现的最佳局部参数的总结。

[0119] 表2

[0120]

参数	光学质量特征	结构特征
脉冲能量	200 nJ	260 nJ
脉冲重复频率	500 kHz	500 kHz

[0121]

激光偏振	垂直于表面	垂直于表面
层间隔	1 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
平移速度	0.5 $\mu\text{m/s}$	1 $\mu\text{m/s}$

[0122] 优化制造

[0123] 方法

[0124] 刻写过程

[0125] 为了刻写2D结构(诸如透镜),首先使用数值建模或CAD软件生成表面轮廓。然后将表面切割成表示刻写激光的单个扫描工具路径的层。从离刻写物镜最远的层开始,依次刻写这些层,直到获得完整的轮廓。这种方法确保在刻写期间在经改变区域和束之间不会发生交叉,否则这可能导致不必要的偏差。除了透镜表面之外,还写入刻蚀通道和平面,以便允许刻蚀剂快速渗透基底。透镜表面的典型刻写时间约为二十分钟,并且刻蚀在三小时后完成。

[0126] 为了表征所制造的透镜的质量,表面轮廓、粗糙度和光通量被测量。在图11中示出用于表征的实验装置。透镜被设计为使来自0.13NA、780HP光纤的输出与5.0 $\mu\text{m}$ 的模场直径准直。透镜被刻写在玻璃段的边缘上,该玻璃段的长度等于透镜焦距,如图11所示。使光纤与透镜段的后边缘接触,并且使用折射率匹配流体来减少这个界面处的任何散射。标准的模制非球面用来将准直光聚焦到光电检测器上。通过将所检测的从光纤直接射出进入自由空间的光和透射过微透镜的光相比较来测量微透镜的通量。

[0127] 火焰抛光

[0128] 火焰抛光描述了将热量施加到材料表面以便降低其表面粗糙度的过程。当材料被加热时,表面上构造成凸凹不平的高空间频率人造物比块体基底加热得更快。因此,在加热期间存在这样的瞬间,即该瞬间中表面上的精细层变成液体并自由流动。在冷却之前,自然表面张力将液体层吸引向块体,试图最小化表面积。因此,高频率表面粗糙度在表面上被永久地变得平滑。先前已经表明,CO<sub>2</sub>激光加热可以用来将ULI制造的立方体变形为具有亚纳米表面粗糙度的接近完美球体<sup>27</sup>。此外,已经通过直接应用氢氧火焰<sup>12</sup>来改善ULI制造表面的表面粗糙度。使用了类似的方法以便提高微透镜的表面质量,同时通过直接应用来自精密火焰的热量来保持整个表面轮廓。

[0129] 使用具有氢氧化钾电解质的氢氧火焰发生器来实现火焰抛光,从而提供约1800 $^{\circ}\text{C}$ 的峰值火焰温度。将透镜与火焰直接接触以进行单个五秒火焰爆发,之后发生明显的表面抛光。

[0130] 结果和表征

### [0131] 粗糙度

[0132] 图12中呈现了利用最佳参数刻写并被刻蚀的具有400 $\mu\text{m}$ 直径的微透镜。在42.9 $\times$ 42.9 $\mu\text{m}$ 区段上进行AFM扫描,并在100 $\mu\text{m}^2$ 区域上采样RMS表面粗糙度和峰到峰表面粗糙度。发现RMS平均表面粗糙度值和峰到峰平均表面粗糙度值分别为91.5nm和323.6nm。

[0133] 然后对相同微透镜进行如上所述的火焰抛光,并重复表面粗糙度的测量。在图13中呈现了AFM扫描的结果。已经发现,表面质量显著提高,其中RMS平均表面粗糙度和峰到峰平均表面粗糙度分别被测得为2.15nm和6.16nm。这些对应于RMS表面粗糙度降低到未抛光透镜的粗糙度的2.34%。

[0134] 图12中观察到的透镜的高空间频率粗糙度现在在表面上变得平滑,报告的RMS粗糙度为2.15nm。

### [0135] 表面轮廓

[0136] 为了将火焰抛光前后的刻蚀透镜的形式与刻写的形式进行比较,使用白光干涉仪描绘表面的轮廓。所测得的数据和数值拟合绘制在图14中。

[0137] 刻蚀透镜和刻写透镜之间有很大的差异。这可以通过分析刻蚀剂在透镜表面上的传输来解释。刻蚀剂从表面边缘渗透,因此这些区域比靠近透镜中心的区域经历更长的刻蚀时间。除此之外,由于纳米光栅在表面上的固定取向,具有较大斜率的透镜区域将刻蚀更缓慢。刻蚀后,通过在刻写期间动态控制偏振,可以更紧密地复制表面轮廓。火焰抛光后的透镜的轮廓与未抛光透镜的轮廓紧密匹配。测得透镜矢高减小约1 $\mu\text{m}$ ,并且斜率明显更缓。在火焰抛光的同时,玻璃的液体层流动以减小表面积,从而呈现近似球形形式并使斜率变平。该不期望的效应可以在激光刻写期间得到补偿。

### [0138] 光通量

[0139] 直接从光纤中射出的所测量的功率为5.12 $\pm$ 0.05mW。透射在火焰抛光前和后的两者透镜后检测到的光分别为5.02 $\pm$ 0.05mW和5.16 $\pm$ 0.05mW。这分别对应于未抛光的透镜和经火焰抛光后的透镜的98.0% $\pm$ 1.4%和100.8% $\pm$ 1.4%的光通量。利用在抛光前后的两者透镜来成像从光纤发射的模场,并且在图15中示出了光斑图。

### [0140] 远端光学系统(DOS)

[0141] 图16至图21示出了用于将光引导到靶组织上并收集拉曼信号的远端光学系统(DOS) 100。DOS将在很大程度上取决于多种因素,包括被选择用于光递送和收集的光纤、光纤配置以及将使用探头的实际应用。

[0142] 光纤几何形状的具体值是实例,并且对这些值的改变在本文描述的本发明的范围内。

[0143] 图16中示意性地示出了该器件的基本工作原理。泵浦光由具有3.5 $\mu\text{m}$ 的纤芯直径和125 $\mu\text{m}$ 的包层直径以及0.12的数值孔径的单模光纤101递送。光纤101将涂覆上窄带滤波器以阻止在纤芯中生成的拉曼前向散射,然后被插入DOS的中心槽/通道107中。具有分别为50 $\mu\text{m}$ 和125 $\mu\text{m}$ 的纤芯直径和包层直径、以及0.22的NA的六根多模收集光纤102a、102b将被涂覆上高通滤波器,以阻止处于泵浦波长的光进入光纤。这些光纤被插入剩余的六个光纤槽/通道106a至106f中。泵浦光在向下聚焦到DOS 101的后部的靶之前被准直。生成的拉曼信号朝所有方向发射。那个信号中的一部分将辐射回到DOS 101中,通过聚焦透镜103准直,并通过收集透镜环阵列104耦合到收集光纤102a、102b中。

[0144] 为了优化器件,使用了光线追踪软件“Zemax”。首先,每个透镜都是以“顺序”模式单独建模的。在顺序模式下,对于预定义的规格(诸如波长和NA),从一个表面到下一个表面求解光线方程。Zemax允许定义“评价函数”,其用于基于用户需求来优化光学系统。这类要求以“操作数”的形式输入到评价函数中。

[0145] 这些光纤将被插入并胶粘在从器件上刻蚀出来的槽中。胶被选择成使光纤纤芯与基底折射率匹配,以便在进入器件时最小化光的折射和散射。光遇到的第一透射透镜105的功能是使束准直,如图17所示。光离开0.12NA的单模光纤的3.5 $\mu\text{m}$ 纤芯。为了最大化感测效率,完全填充透射透镜孔径至关重要。为了实现这一点,通过改变到透射透镜105的距离,向评价函数添加操作数,该操作数将光线最大高度设置为所选择的半直径。为了优化用于准直的透射透镜形状,使用了求解图像平面处光线入射角的操作数,其中目标设置为0°。然后,对该函数求解非球面的最佳半径和圆锥常数,以获得所示结果。

[0146] 泵浦束遇到的下一表面是聚焦透镜103。聚焦透镜103的目的是将泵浦光聚焦到光学器件后面的组织上,然后在相反方向上准直拉曼信号。激发波长为785nm,并且感兴趣的指纹范围引入了800与1800 $\text{cm}^{-1}$ 之间的偏移。这与837与914nm之间的拉曼信号波长范围相关。为了对聚焦透镜进行建模,选择跨这个范围的多个波长同时求解。聚焦透镜105在拉曼信号准直配置下被优化(图18),因为这个信号透射过聚焦透镜的整个截面,而泵浦光仅透射过中心。微光学器件的背面和焦点之间的距离被设置为200 $\mu\text{m}$ ,这与已经被示出为富含癌症前标识符的组织深度有关。使用与第一透镜相同的操作数对透镜进行了优化以便进行准直。后壁的厚度和透镜的直径被选择为最大化所接受的光的圆锥角,而不会在透镜表面上出现TIR,同时保持结构完整性。

[0147] 光遇到的最后结构是收集透镜环阵列104。收集透镜阵列104是一组六个相同的透镜104a至104f,这些透镜将光耦合到多模收集光纤中。在优化过程中,对单个透镜进行建模,如图19所示。对于收集透镜,数值孔径为0.22。透镜和光纤端部之间的间距关于等于纤芯半直径(50 $\mu\text{m}$ )的入射光线高度(在光纤尖端处)进行优化,同时保持0.22的NA。透镜的直径被设计成填充中心透镜的边缘与器件的外边缘之间的空间,以便最大化填充因子并因此最大化所收集的拉曼信号。在这种配置中,环形阵列中的各个透镜重叠。这允许实现最大填充系数,并且使用ULI不会带来可预见的制造问题。

[0148] 各个透镜表面在CAD建模程序中组装;图20中示出了整个器件。

[0149] 为了将器件作为整体进行建模,顺序光线追踪被证明是不够的,因为存在多个光(泵浦光和拉曼信号)源,并且几何形状复杂,许多表面可以与杂散光束相互作用。Zemax还提供了非顺序光线追踪功能性,因此光线按照它们相遇的物理顺序与表面相互作用,非常像真实世界。非顺序模式允许多个光源、物体和检测器在三维空间中自由定位,因此泵浦光的分析和拉曼信号检测可以同时进行。需要注意的是,当从外部源导入CAD文件时,由于文件类型转换,可能会形成几何形状异常,并且这些异常可能会影响模拟期间各个光线与器件交互的方式。

[0150] 激发光被建模为点源,其中在熔融石英中圆锥角与0.12的NA相关,该激发光从中心光纤槽的端部射出。将第二点源放置为表示发生在泵浦光焦点处的拉曼散射。实际上,拉曼信号将朝所有方向均等地发射,然而,为了建模,选择将聚焦透镜的孔径填充过满的锥角,以便更密切地模拟现实。图21示出了进入和错过透镜的孔径的光线采取的路径。一小部

分光线在被朝向收集光纤发送之前,沿着DOS的侧面被完全内反射。然而,此光进入光纤是不可能的,因为入射角超过了NA允许的入射角。到达中心光纤的任何拉曼信号都将被窄带光纤涂层阻止。

[0151] 在图22中绘制了关于500,000条光线所模拟的入射在检测平面上的光的强度分布。存在标记收集光纤纤芯的入口的清晰强度峰,每个入口具有与芯直径相关的50 $\mu\text{m}$ 范围内的直径。由于透镜系统是围绕中心轴线对称的,所以人们会期望每个强度峰围绕自己的中心对称。然而,情况并非如此,并且轻微的不对称形状可能是导入的CAD文件的人造物(artefact),而不是系统本身固有的。

[0152] 利用ULI,制造定制表面和透镜轮廓的能力更好地控制光如何递送和分布到靶组织中。

[0153] 制造了绕一个“花瓣”的透镜布置(类似于DOS器件中使用的透镜布置)的实例。以500kHz的重复频率在熔融石英基底的边缘制造透镜,其厚度被设计成与透镜焦距相匹配(图23a)。在视觉上,观察到微透镜的表面具有一些微小的粗糙度,但是没有观察到明显的人造物(图23b)。

[0154] (c)

[0155] 再次利用单模光纤来测试花瓣式微透镜布置。在光纤从样品稍微向后定位以确保束充满微透镜阵列的情况下,观察到相对较快地发散7个斑点的图案(图24a)。使用25mm焦距的透镜使束聚焦(图24b至图24d),并且观察到了具有最小散射光的明确焦点(图24e)。在焦点处,与其中微透镜从系统中移除的情况下的4.6mW相比,测量到4.16mW的功率。这证明了通量较高。在这种情况下,大多数损耗是由于光纤和微透镜阵列背面的菲涅尔损耗引起的,这在所完成的器件中是不存在的,e)。

[0156] 图25和图26中示出了根据本发明的远端光学系统的进一步的实施例。在图25和图26中,相同的附图标记但在系列200中被用来指代这个实施例的特征,这些特征对应于参考图16至图24描述的先前实施例的特征。对于这些特征的与先前实施例相同或相似的方面,参考上面的描述。

[0157] 这个实施例与前一实施例的区别在于,远端系统200由两个分离的基底/部件200a和200b形成。第一部件200a包括整体二氧化硅基底,该二氧化硅基底中形成有收集透镜204a至204f、第一透射透镜/准直透镜205以及通道206a至206f和207。第二部件200b包括其中形成有聚焦透镜203的整体二氧化硅基底。第一部件200a形成用于插入到第二部件200b的孔径中的阳连接构件。在这方面,第二部件200b包括由聚焦透镜203覆盖的中空接纳区段208,该中空接纳区段208的尺寸被确定用于接纳第一部件200a。接纳区段208具有阶梯状内部轮廓208,其中台阶被布置成与第一部件200a的外部轮廓中的相应台阶接合,以限制第一部件200a能够插入部件200b中的程度。

[0158] 将光学表面204a至204f、205和203设置在由组装的部件200a和200b形成的空腔内确保了远端系统与患者组织的接触不会影响这些光学表面的性能。聚焦透镜203的后表面209(其确实接触患者组织)被光学抛光。

[0159] 收集和准直透镜204a至204f和205的花瓣式设计另一实施例的不同之处在于,准直透镜205具有圆形而不是六边形的孔径,如图26中可以看见的,并且每个收集透镜204a至204f都具有孔径,该孔径具有与准直透镜205的外部范围相对应的内部弯曲边界。在这个

实施例中,准直透镜具有100 $\mu\text{m}$ 的直径,并且收集透镜204a至204f的外径为800 $\mu\text{m}$ 。

[0160] 聚焦透镜203和收集透镜204a至204f两者具有非球面轮廓。

[0161] 光递送光纤201具有较小NA,使得从其射出的光具有低发散度,并充满中央准直透镜205。通道207以及因此中心光纤201也更靠近透镜205的表面终止207a,使得激发光在花瓣表面上具有小的占用空间。传输光纤201的远端有涂层212,以滤除递送光纤201中生成的不利光波长,诸如拉曼背景。

[0162] 透镜花瓣表面的填充因子FF被定义为将收集落在其上的光的表面分数。这由1减去图27b中由r和R定义的圆的面积之比得出。

$$[0163] \quad FF = \frac{(R^2 - r^2)}{R^2}$$

[0164] 收集的光量I与花瓣式透镜的表面积成比例。所描述的远端光学器件200被计算为具有0.984的FF或者98.4%的理论收集效率。这比图2所示的六个透镜具有圆孔径的表面高得多。

[0165] 收集光纤202a至202f的端部有涂层213a、213d,以过滤不利的荧光和反向散射的激发光。

[0166] 通过将光纤光学器件胶粘在相应的通道206a至206f、207中,光纤光学器件耦合到远端系统。将光纤光学器件插入到通道中起到将光纤光学器件端部与相应透镜对准的作用。收集光纤202a至202f相对于用于递送光纤的小纤芯单模光纤207是大纤芯多模光纤。收集光纤202a至202f的大数值孔径有助于光纤耦合和光收集,而递送光纤的小数值孔径保持激发光在透镜表面上的占用空间相对较小。

[0167] 结论

[0168] 已经解释了为了优化3D微结构的ULI和化学蚀刻制造工艺的各种刻写参数对熔融石英的蚀刻速率的贡献。“纳米光栅”的形成和布置在允许蚀刻剂快速渗透玻璃方面发挥了作用。通过利用被设置为垂直于表面的激光偏振来刻写表面,纳米平面平行于表面形成并增强蚀刻。通过这样做,对于150与200nJ之间的脉冲能量,获得了高达100的蚀刻速率选择性,这对于类型II改变是最佳的。与增强蚀刻速率一起,纳米光栅在蚀刻后在刻写表面上形成永久特征。通过在刻写期间精确控制偏振,表面粗糙度可以降低大约五倍。3D结构通常是逐层刻写,类似于3D打印。层之间的间距可以从1 $\mu\text{m}$ 增加到10 $\mu\text{m}$ ,其中蚀刻速率降低很少或没有降低,但是表面粗糙度增加。利用这些知识,对于没有光学要求的结构,刻写时间可以显著减少。已经证明了制造微透镜的能力,其中表面粗糙度对应于对于可见光到NIR波长的约 $\lambda/10$ ,在780纳米处的通量为98.0%。利用火焰抛光,表面粗糙度已经降低到大约 $\lambda/360$ ,并且在实验误差范围内将通量增加到100%,同时保持整个透镜轮廓。未抛光的透镜适用于涉及光的引导和收集的 optics 应用,而抛光的透镜应适用于显微成像,甚至在较短的波长下显微成像。

[0169] (d)

[0170] 参考文献

[0171] [1] Davis, K.M., Miura, K., Sugimoto, N. et al., "Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," Optics Letters, 21 (21), 1729-1731 (1996).

[0172] [2] Thomson, R.R., Harris, R.J., Birks, T.A. et al., "Ultrafast laser

inscription of a 121-waveguide fan-out for astrophotonics,”*Optics Letters*,37 (12) ,2331–2333 (2012) .

[0173] [3]Chen,F.,and de Aldana,J.R.V.,“Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining,”*Laser& Photonics Reviews*,8 (2) ,251–275 (2014) .

[0174] [4]Marshall,G.D.,Ams,M.,and Withford,M.J.,“Direct laser written waveguide-Bragg gratings in bulk fused silica,”*Optics Letters*,31 (18) ,2690–2691 (2006) .

[0175] [5]Nolte,S.,Will,M.,Burghoff,J.et al.,“Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics,”*Applied Physics a-Materials Science&Processing*,77 (1) ,109–111 (2003) .

[0176] [6]Hirao,K.,and Miura,K.,“Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser,”*Journal of Non-Crystalline Solids*,239 (1–3) ,91–95 (1998) .

[0177] [7]Choudhury,D.,Arriola,A.,Allington-Smith,J.R.et al.,“Towards freeform microlens arrays for near infrared astronomical instruments,”*Proceedings of SPIE*.9151 (2014) .

[0178] [8]Wu,D.,Xu,J.,Niu,L.G.et al.,“In-channel integration of designable microoptical devices using flat scaffold-supported femtosecond-laser microfabrication for coupling-free optofluidic cell counting,”*Light-Science& Applications*,4,8 (2015) .

[0179] [9]Sugioka,K.,and Cheng,Y.,“Fabrication of 3D microfluidic structures inside glass by femtosecond laser micromachining,”*Applied Physics a-Materials Science&Processing*,114 (1) ,215–221 (2014) .

[0180] [10]Horstmann-Jungemann,M.,Gottmann,J.,and Wortmann,D.,“Nano-and Microstructuring of SiO<sub>2</sub> and Sapphire with Fs-laser Induced Selective Etching,”*Journal of Laser Micro Nanoengineering*,4 (2) ,135–140 (2009) .

[0181] [11]Bhardwaj,V.R.,Simova,E.,Rajeev,P.P.et al.,“Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica,”*Physical Review Letters*, 96 (5) ,4 (2006) .

[0182] [12]He,F.,Cheng,Y.,Qiao,L.L.et al.,“Two-photon fluorescence excitation with a microlens fabricated on the fused silica chip by femtosecond laser micromachining,”*Applied Physics Letters*,96 (4) , (2010) .

[0183] [13]Bellouard,Y.,Barthel,E.,Said,A.A.et al.,“Scanning thermal microscopy and Raman analysis of bulk fused silica exposed to low-energy femtosecond laser pulses,”*Optics Express*,16 (24) ,19520–19534 (2008) .

[0184] [14]Hnatovsky,C,Taylor,R.S.,Rajeev,P.P.et al.,“Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica,”*Applied Physics Letters*,87 (1) , (2005) .

- [0185] [15] Shimotsuma, Y., Kazansky, P.G., Qiu, J.R. et al., "Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses," *Physical Review Letters*, 91 (24), 4 (2003).
- [0186] [16] Glezer, E.N., and Mazur, E., "Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials," *Applied Physics Letters*, 71 (7), 882-884 (1997).
- [0187] [17] Liao, Y., Pan, W.J., Cui, Y. et al., "Formation of in-volume nanogratings with sub-100-nm periods in glass by femtosecond laser irradiation," *Optics Letters*, 40 (15), 3623-3626 (2015).
- [0188] [18] Kang, J.K., and Musgrave, C.B., "The mechanism of HF/H<sub>2</sub>O chemical etching of SiO<sub>2</sub>," *Journal of Chemical Physics*, 116 (1), 275-280 (2002).
- [0189] [19] Marcinkevicius, A., Juodkazis, S., Watanabe, M. et al., "Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica," *Optics Letters*, 26 (5), 277-279 (2001).
- [0190] [20] Hnatovsky, C., Taylor, R.S., Simova, E. et al., "Polarization-selective etching in femtosecond laser-assisted microfluidic channel fabrication in fused silica," *Optics Letters*, 30 (14), 1867-1869 (2005).
- [0191] [21] Bellouard, Y., Said, A., Dugan, M. et al., "Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching," *Optics Express*, 12 (10), 2120-2129 (2004).
- [0192] [22] Agarwal, A., and Tomozawa, M., "Correlation of silica glass properties with the infrared spectra," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 209 (1-2), 166-174 (1997).
- [0193] [23] Taylor, R., Hnatovsky, C., and Simova, E., "Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass," *Laser & Photonics Reviews*, 2 (1-2), 26-46 (2008).
- [0194] [24] Canning, J., Lancry, M., Cook, K. et al., "Anatomy of a femtosecond laser processed silica waveguide Invited," *Optical Materials Express*, 1 (5), 998-1008 (2011).
- [0195] [25] Fiorin, R., da Costa, L.N., Abe, I. et al., "Manufacturing of microchannels in soda-lime glass by femtosecond laser and chemical etching," 2013 Sbmo/Ieee Mtt-S International Microwave & Optoelectronics Conference (Imoc), 3 (2013).
- [0196] [26] Richter, S., Heinrich, M., Doring, S. et al., "Formation of femtosecond laser-induced nanogratings at high repetition rates," *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 104 (2), 503-507 (2011).
- [0197] [27] Drs, J., Kishi, T., and Bellouard, Y., "Laser-assisted morphing of complex three dimensional objects," *Optics Express*, 23 (13), 17355-17366 (2015).

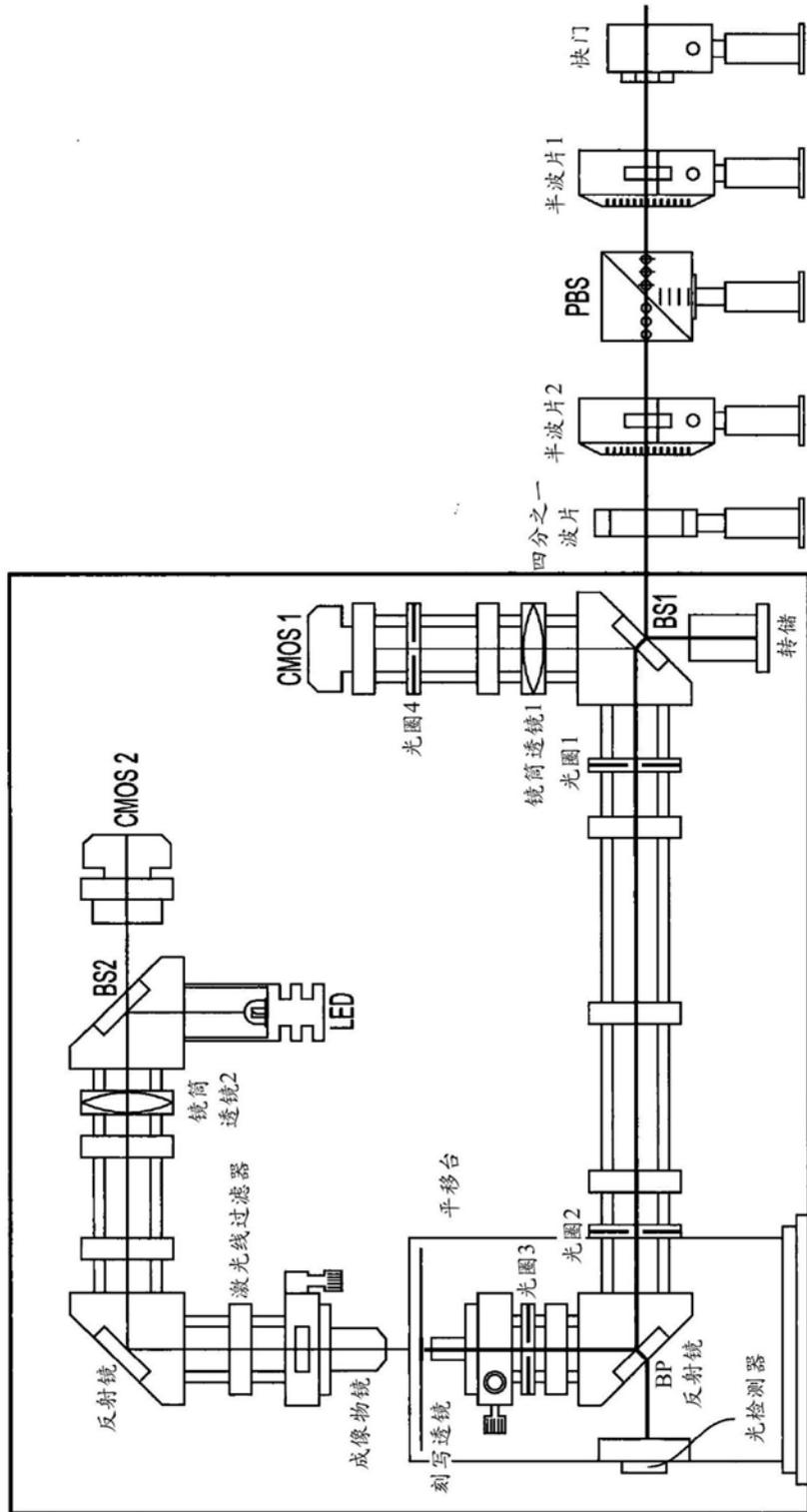


图1

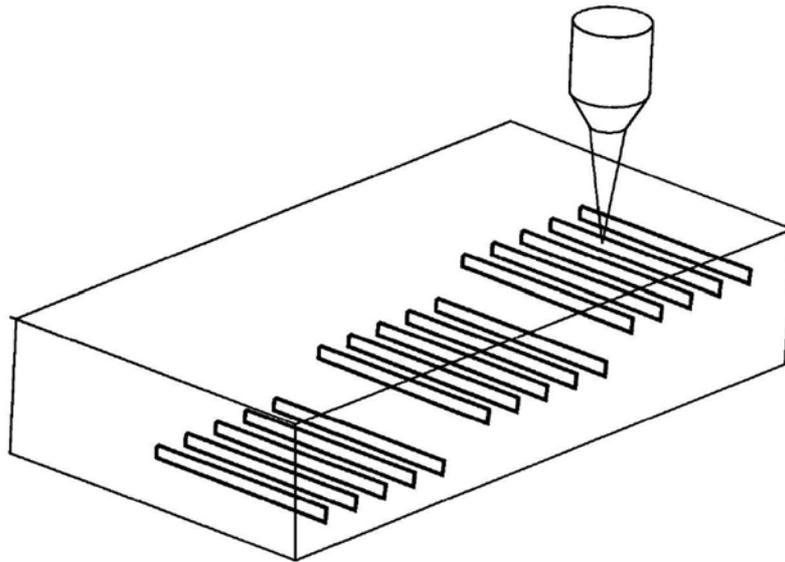


图2a

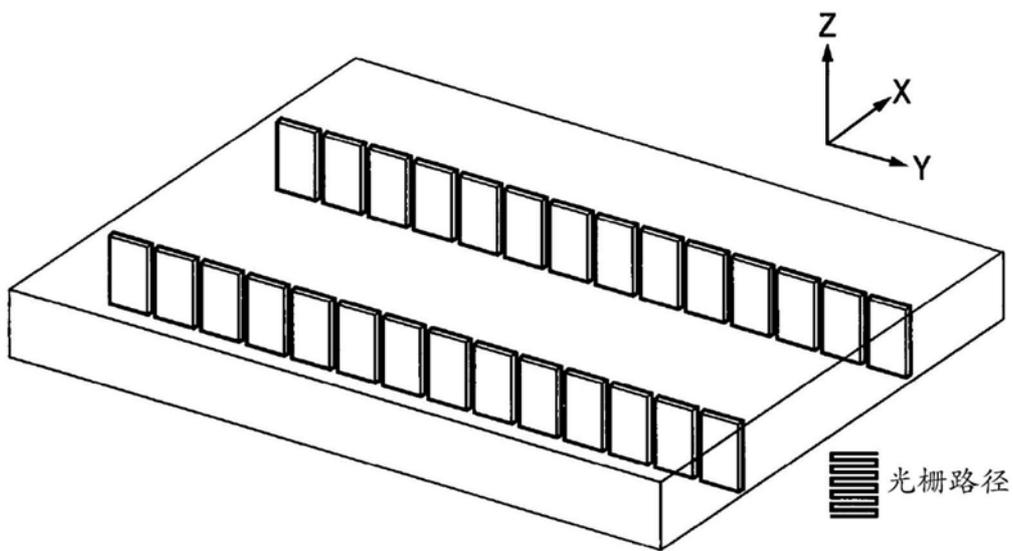


图2b

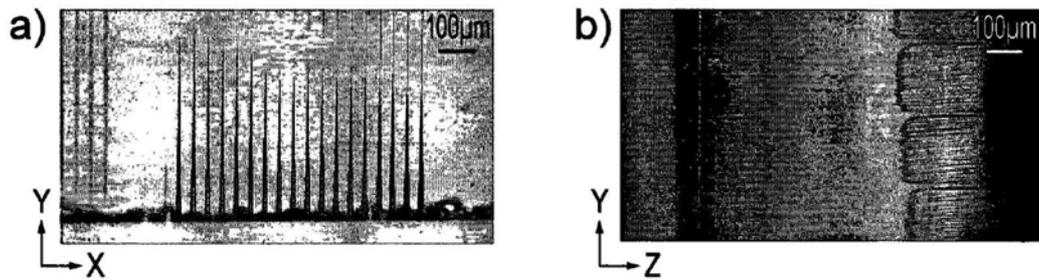


图3

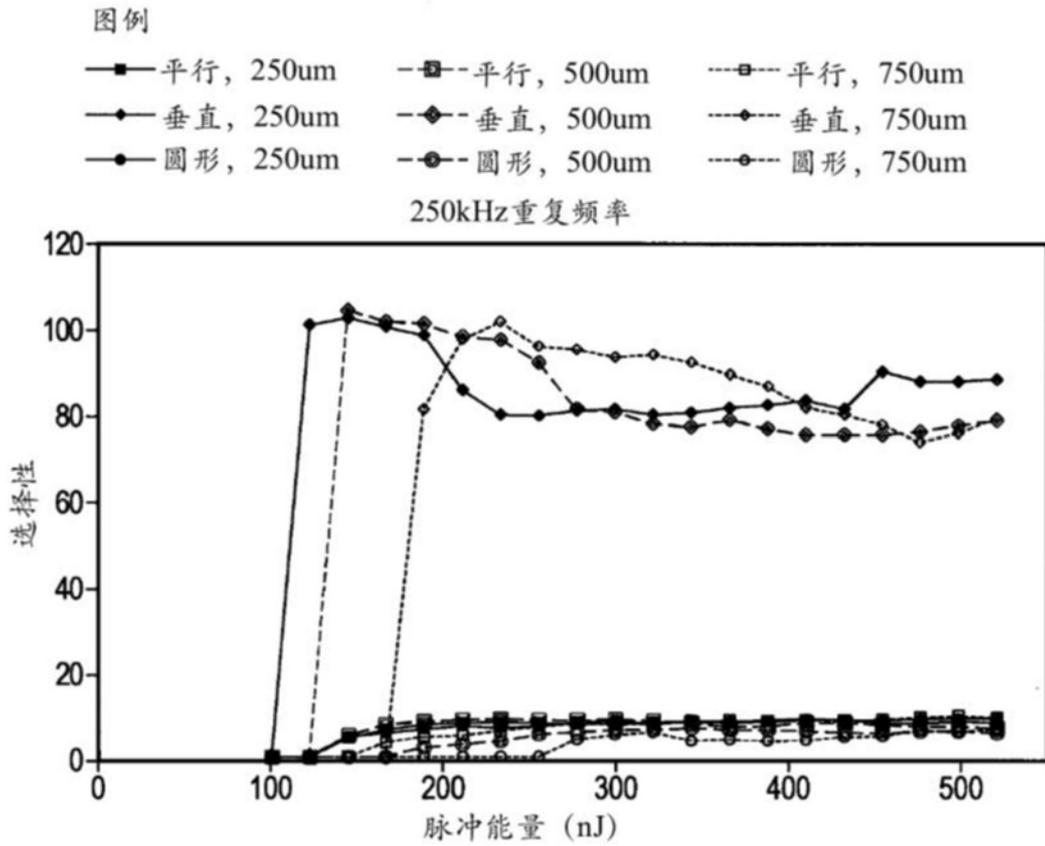


图4a

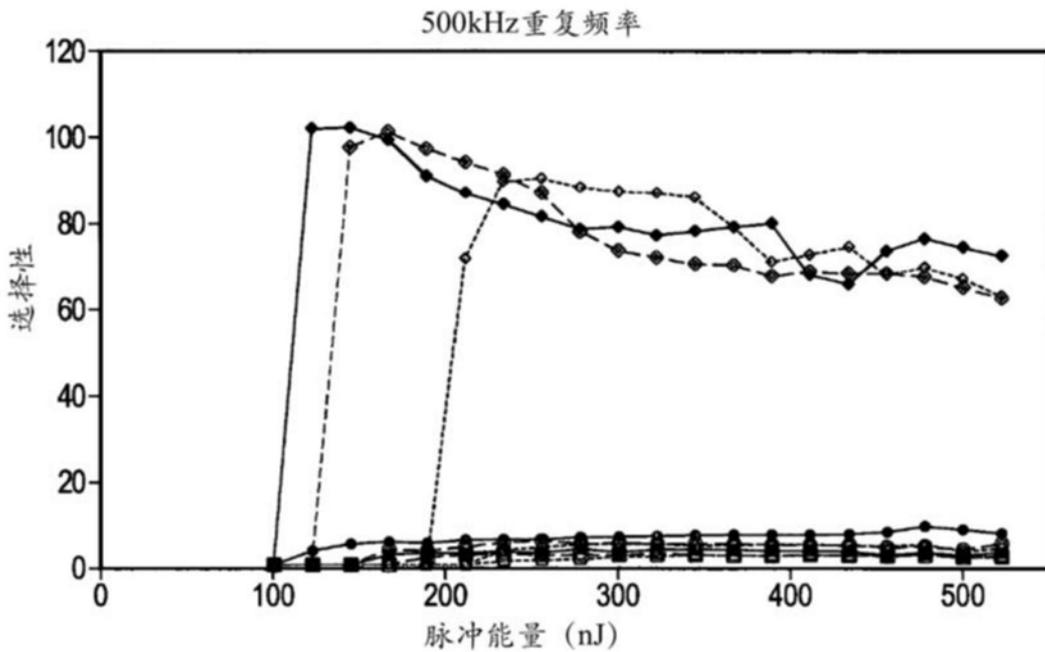


图4b

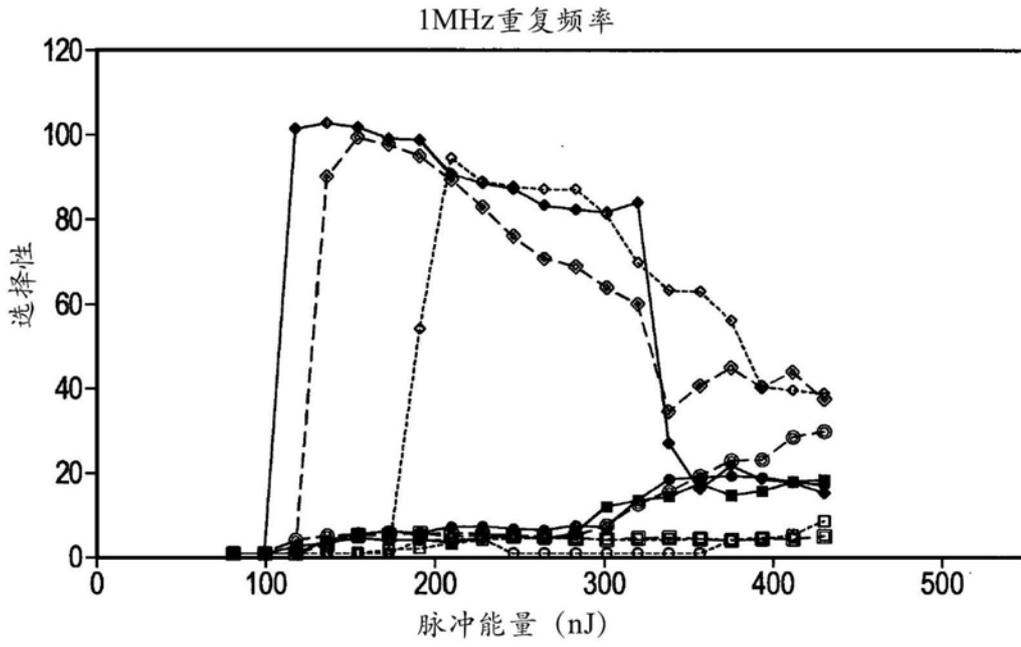


图4c

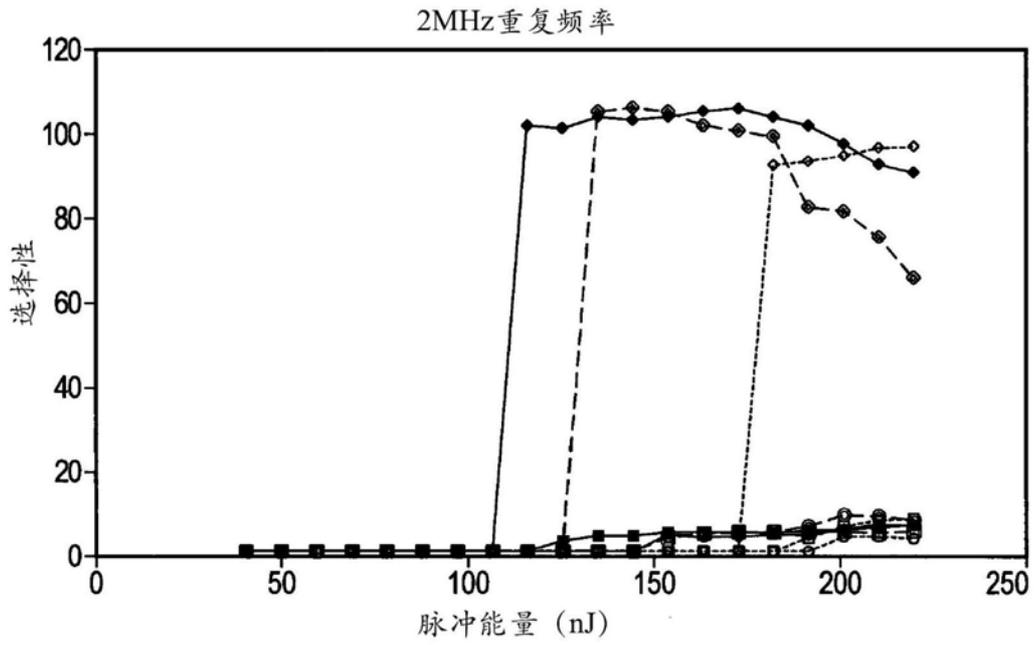


图4d

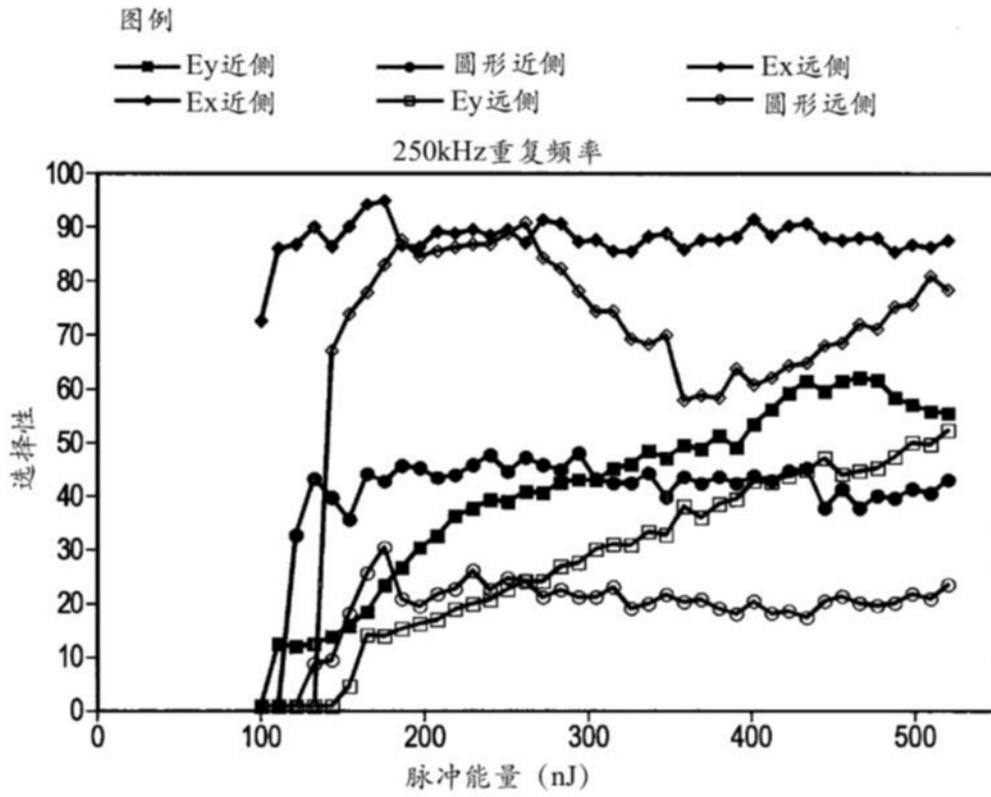


图5a

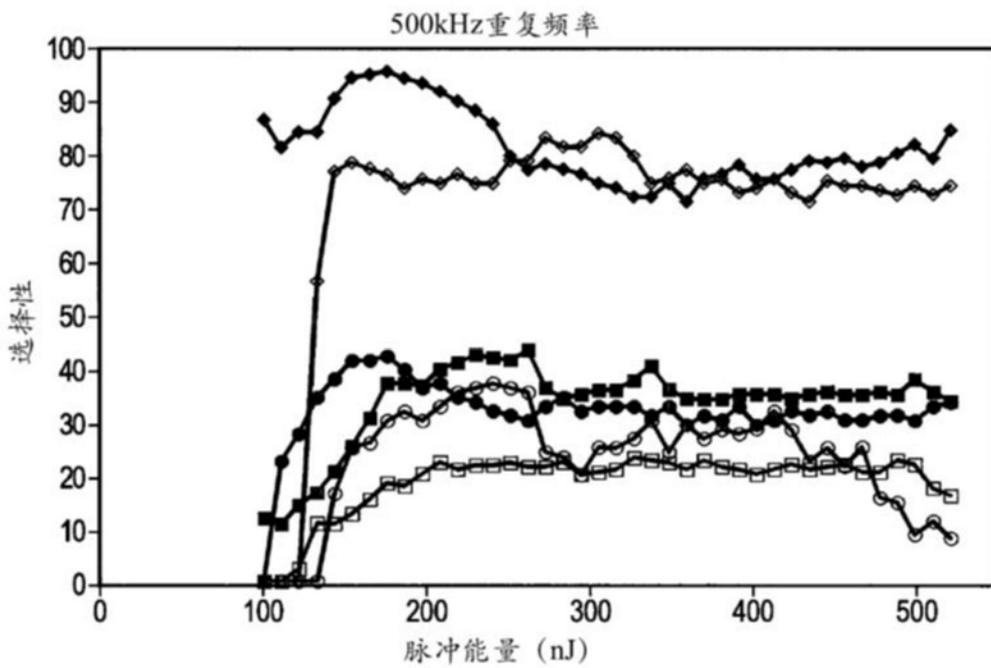


图5b

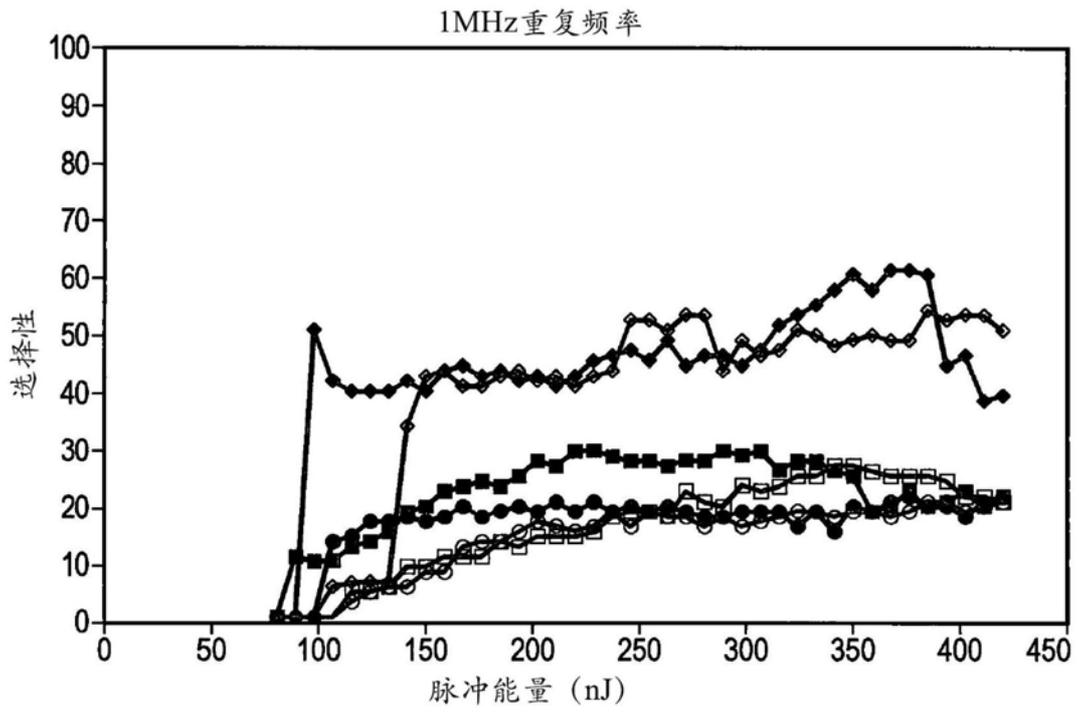


图5c

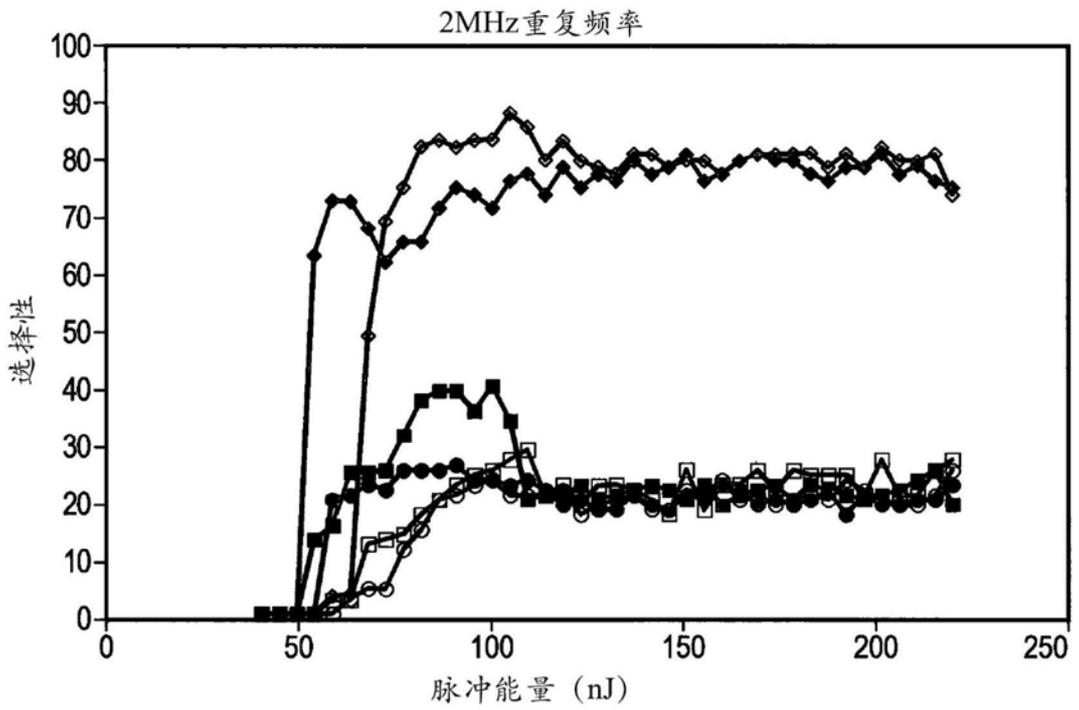


图5d

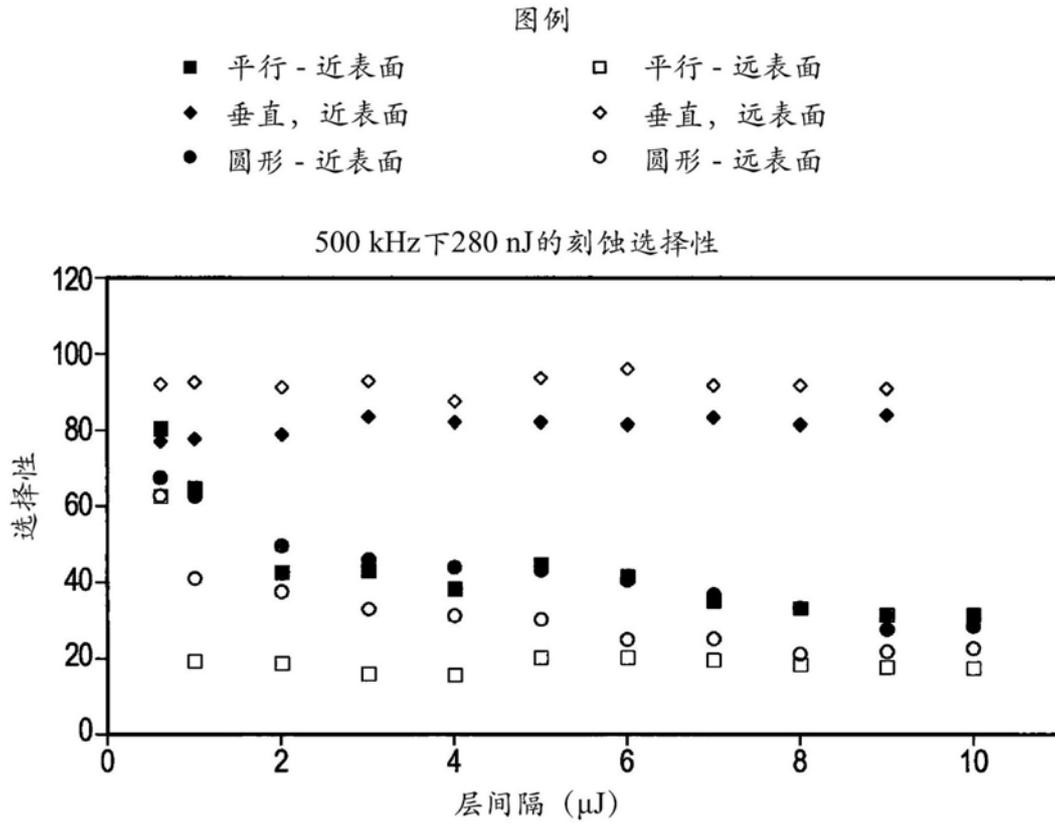


图6

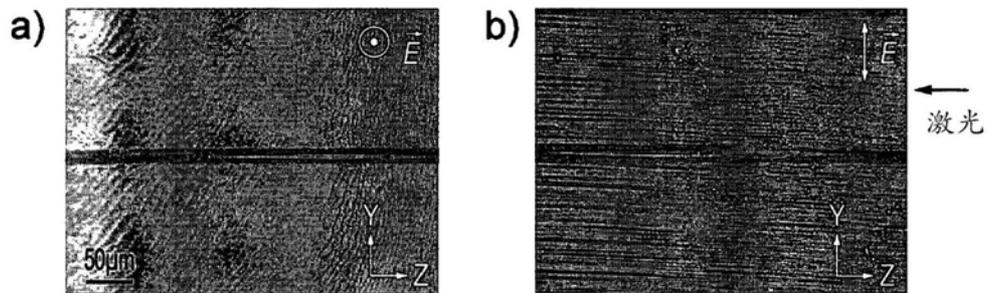


图7

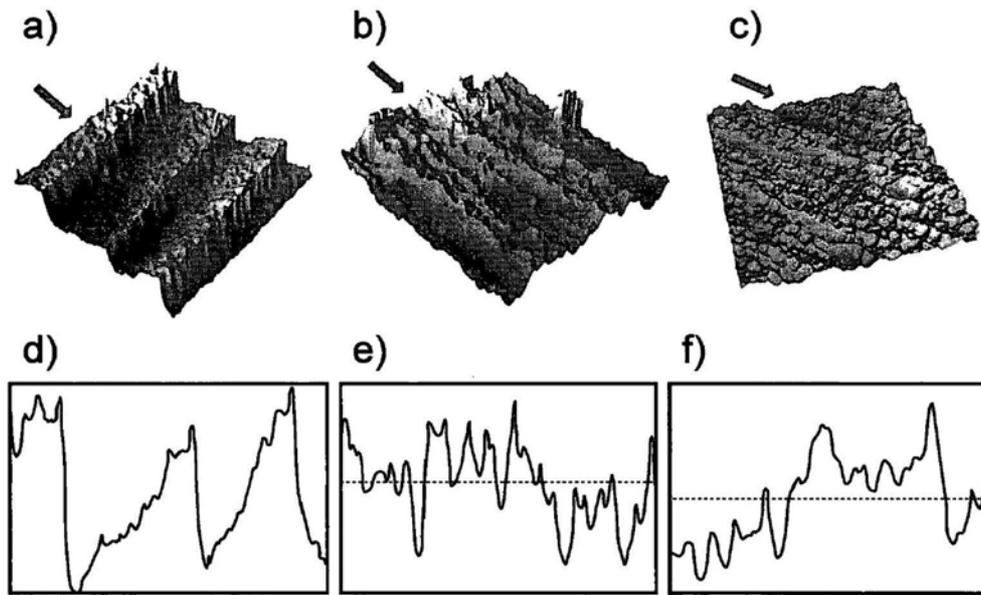


图8

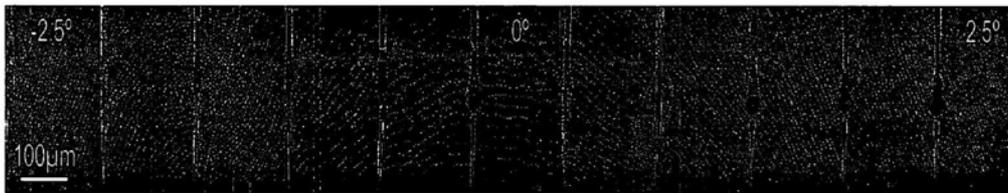


图9

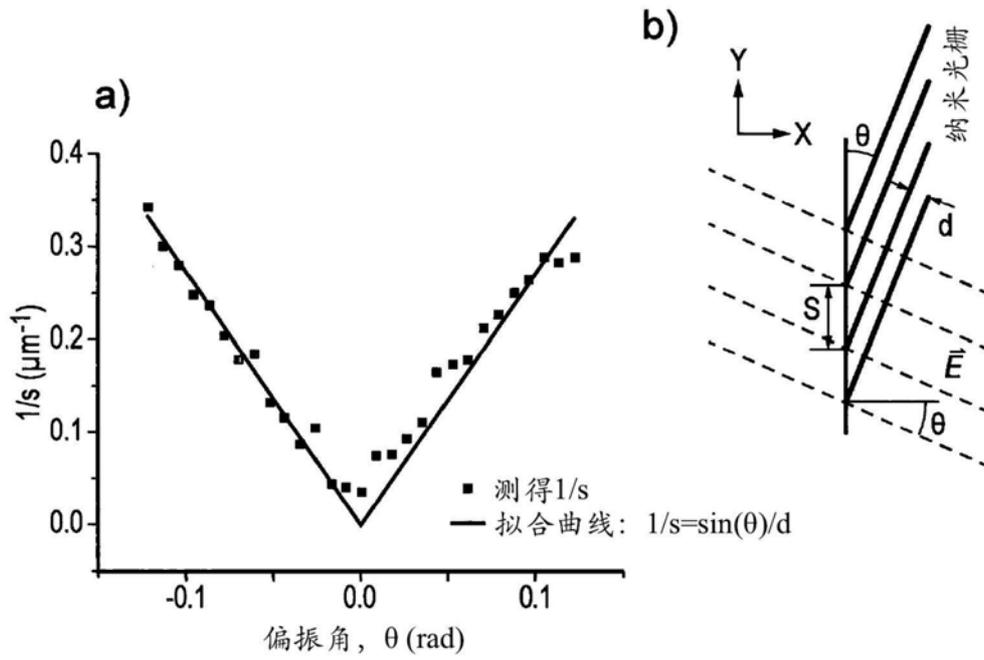


图10

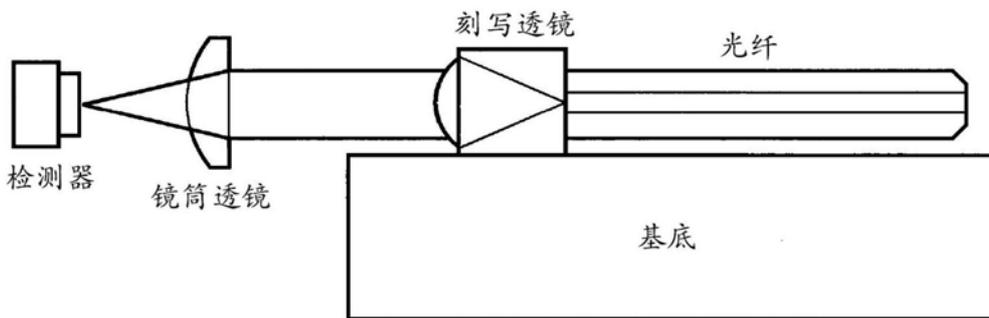


图11

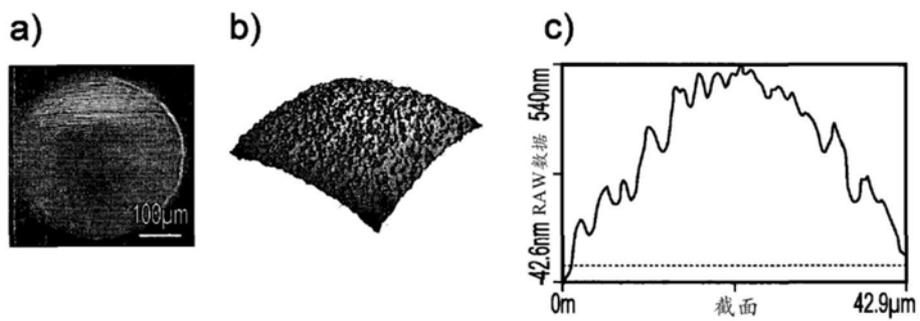


图12

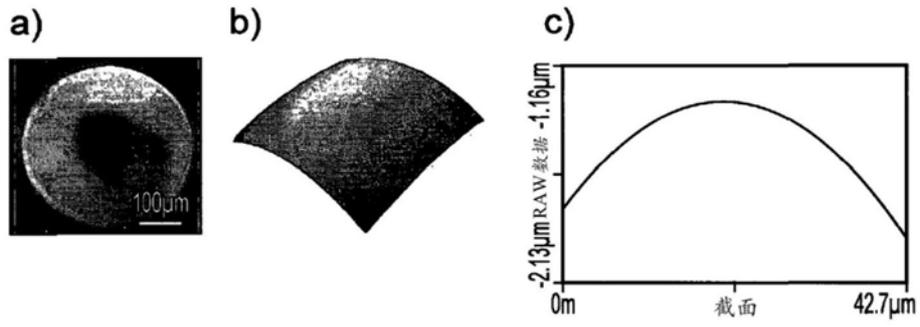


图13

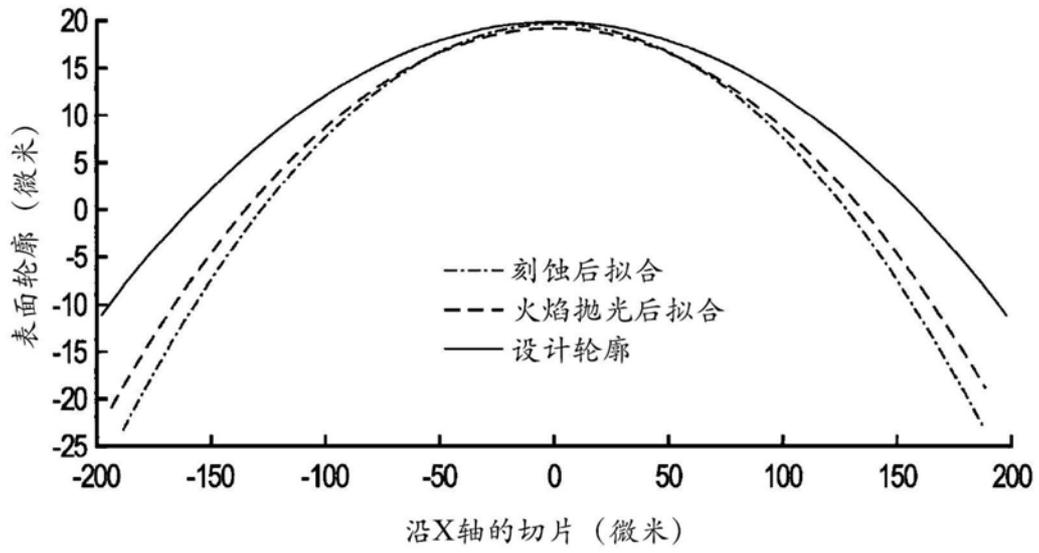


图14

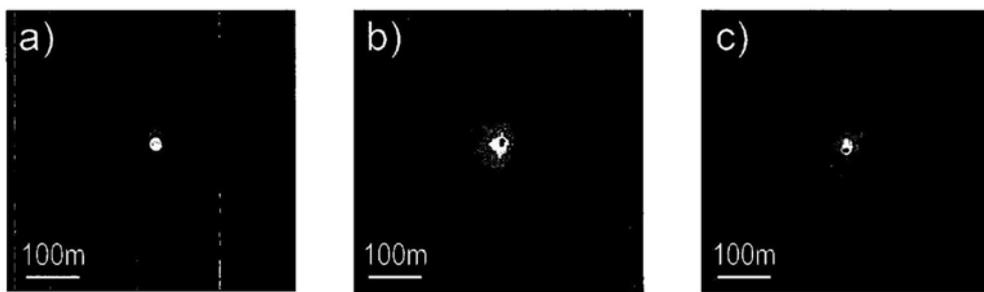


图15

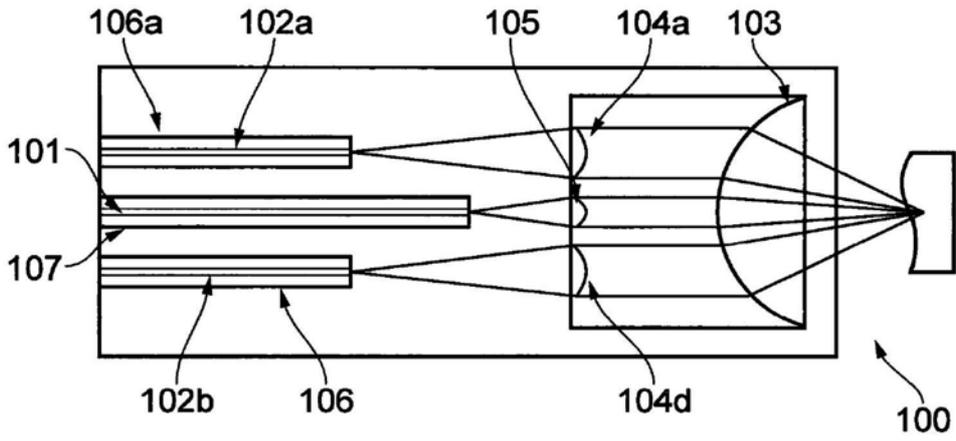


图16

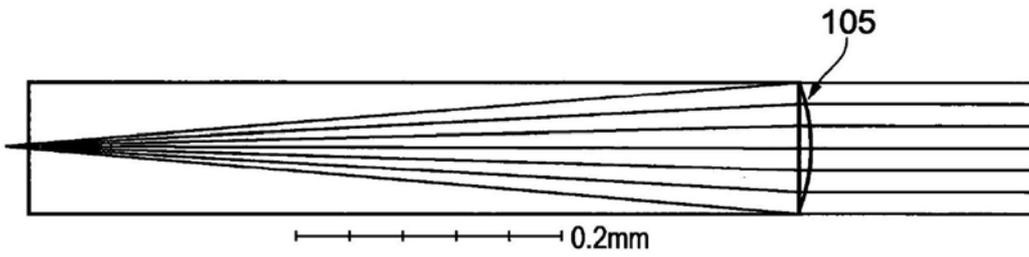


图17

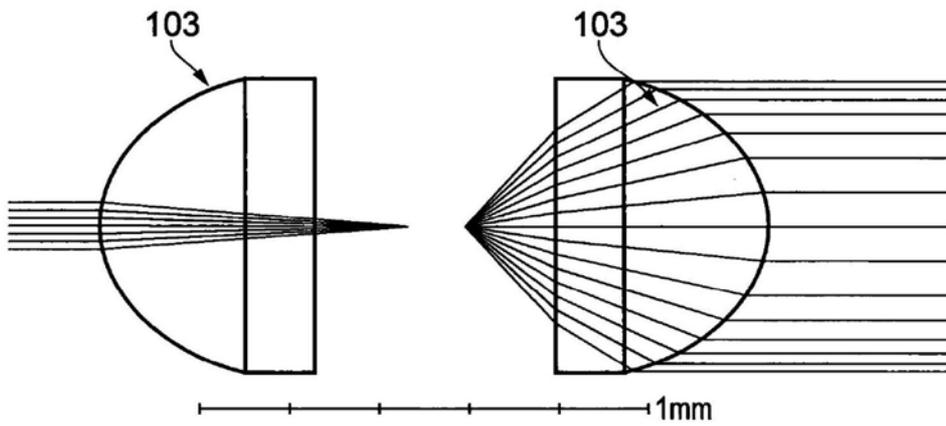


图18

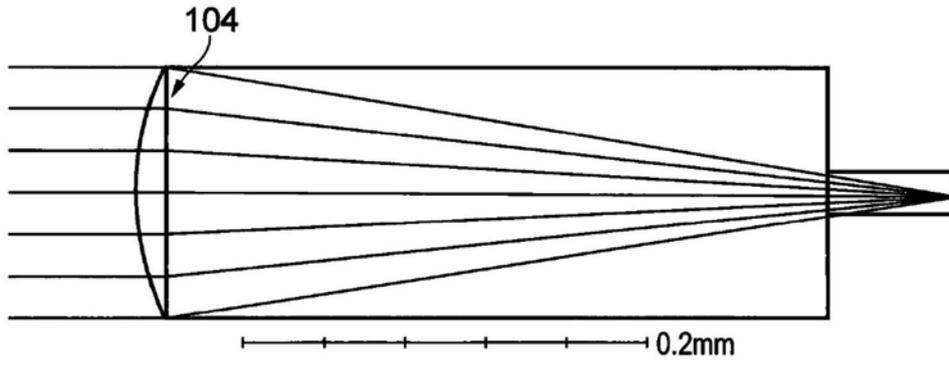


图19

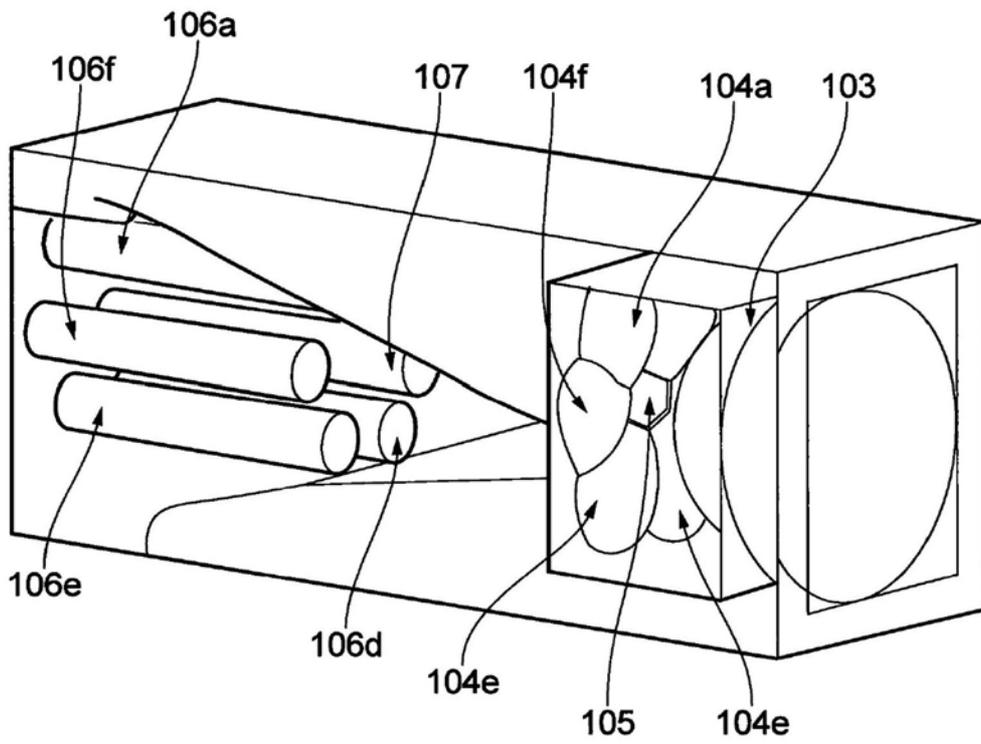


图20

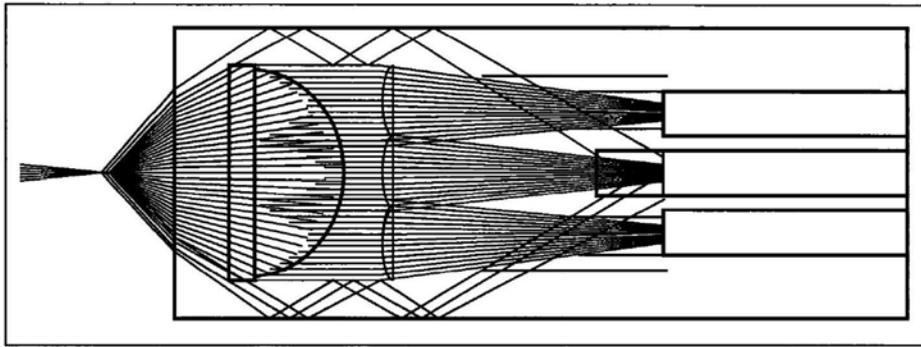


图21

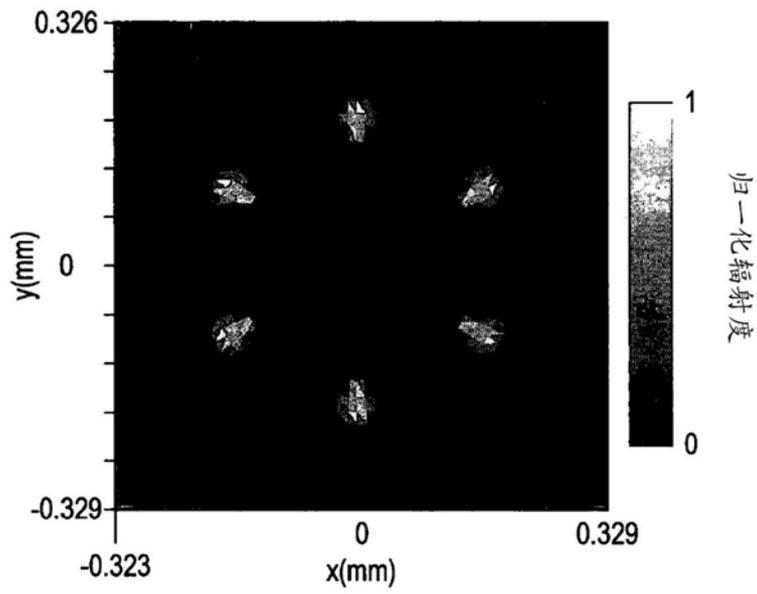


图22

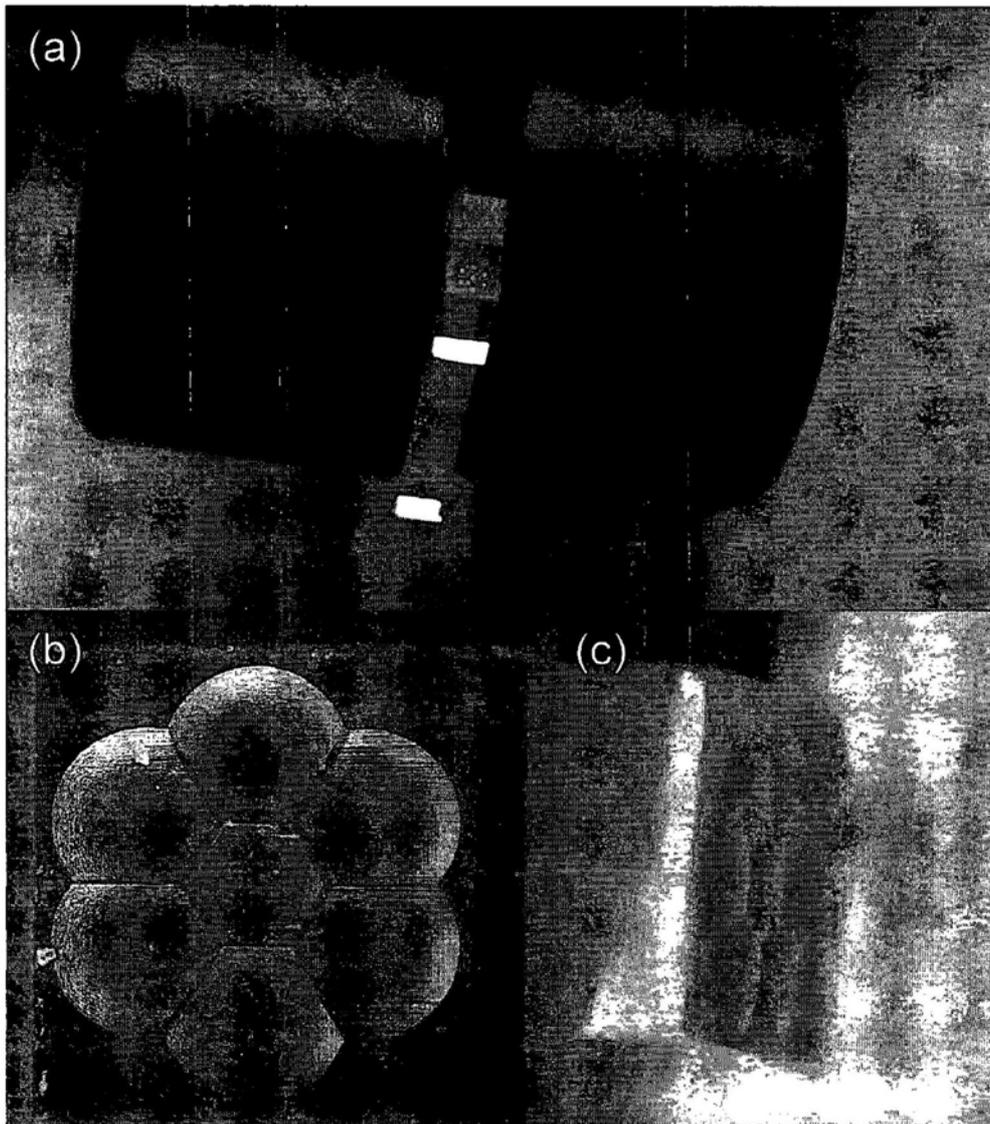


图23

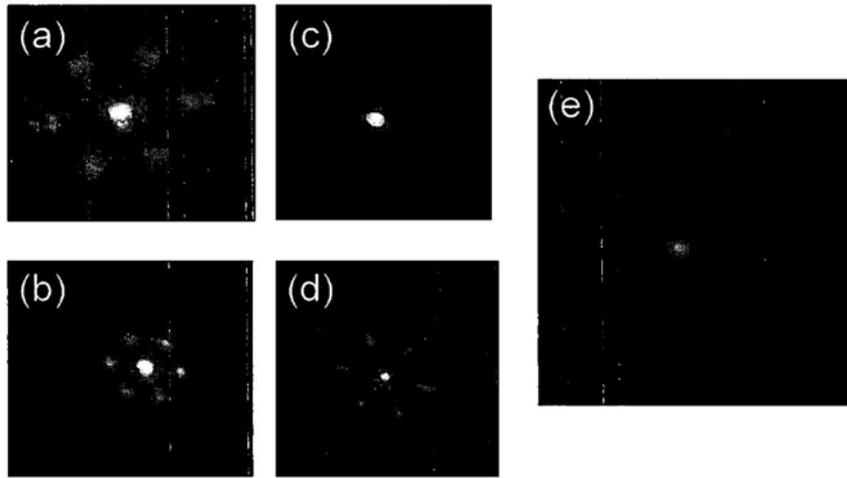


图24

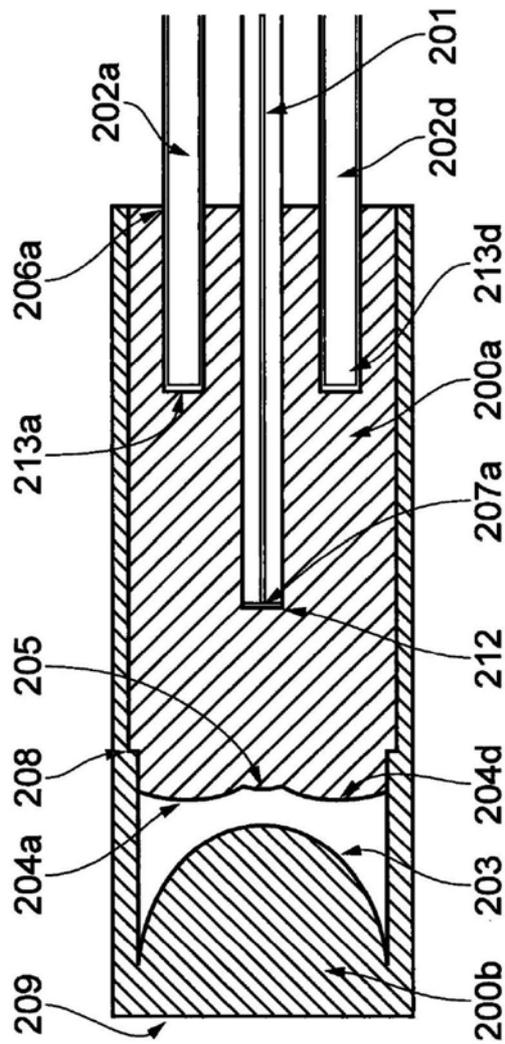


图25

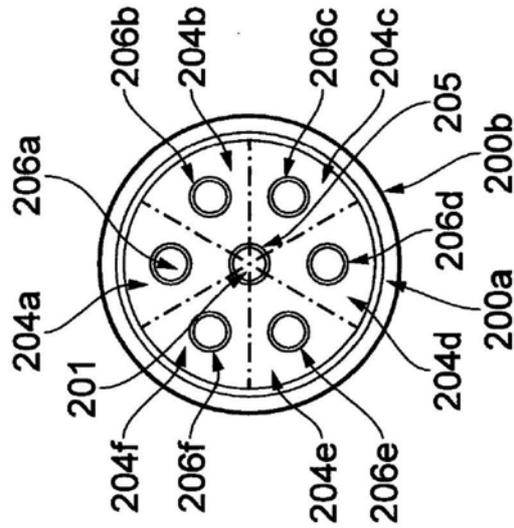


图26

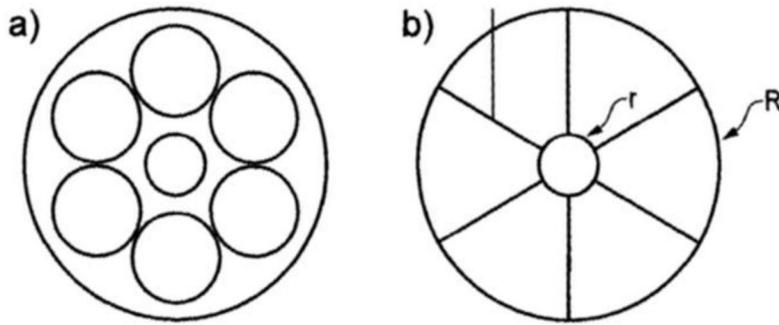


图27