



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106037663 A

(43)申请公布日 2016. 10. 26

(21)申请号 201610508393.6

(22)申请日 2016.06.29

(71)申请人 华南师范大学

地址 510631 广东省广州市天河区石牌中山大道西55号

(72)发明人 杨思华 马海钢 邢达

(74) 专利代理机构 广州市华学知识产权代理有限公司 44245

代理人 裘晖

(51) Int.Cl.

A61B 5/00(2006.01)

A61B 8/00(2006.01)

A61B 8/08(2006.01)

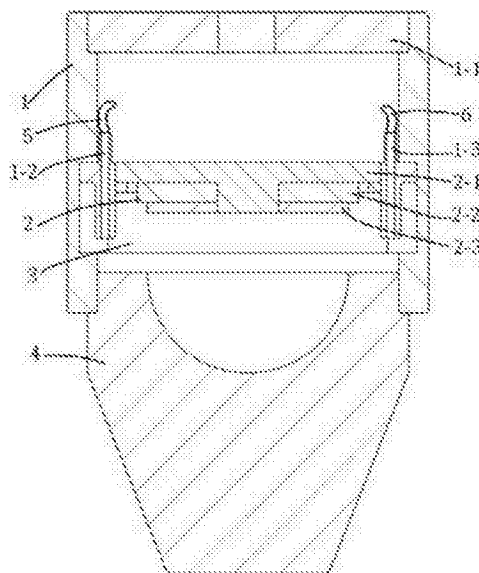
权利要求书1页 说明书5页 附图6页

(54)发明名称

一种连续变焦超声探头及其变焦方法

(57)摘要

一种连续变焦超声探头,包括:外壳;设置在外壳内壁上的环形超声换能器,其具有发射接收超声波的发射接收表面;连续变焦声透镜,其包括声阻抗可连续变化的第一透镜部和设有半球形凹槽的第二透镜部;环形超声换能器、外壳的内壁、第二透镜部围成密封的容腔。本发明还涉及一种连续变焦方法。本发明采用可连续变焦的特殊声透镜,能够实现多层次深度成像,该特殊声透镜的像差校正到足以获得具有横向分辨率以及深度分辨率的高分辨率成像的程度,属于无损检测领域。



1. 一种连续变焦超声探头, 其特征在于, 包括: 外壳; 设置在外壳内壁上的环形超声换能器, 其具有发射接收超声波的发射接收表面; 连续变焦声透镜, 其包括声阻抗可连续变化的第一透镜部和设有半球形凹槽的第二透镜部; 环形超声换能器、外壳的内壁、第二透镜部围成密封的容腔。

2. 根据权利要求1所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 所述环形超声换能器包括环形压电元件、凸形光学镜片以及环形吸声板; 凸形光学镜片上设有凸台, 环形吸声板及环形压电元件依次套装在凸形光学镜片的凸台上。

3. 根据权利要求2所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 所述凸形光学镜片的材质采用光学玻璃镜片材料, 且透光率 $\geq 98\%$; 所述环形吸声板的材质为玻璃纤维材料, 且吸声率 $\geq 96\%$, 凸形光学镜片的下表面与环形超声换能器发射接收表面齐平。

4. 根据权利要求1所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 声阻抗可连续变化的第一透镜部是由浓度可变的混合液形成的, 混合液注入所述的容腔内。

5. 根据权利要求4所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 所述的混合液为甘油-乙醇混合液, 该甘油-乙醇混合液的密度变化范围为 $0.789 \sim 1.261 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 声速变化范围为 $1.21 \sim 1.94 \text{ km/s}$, 声阻抗变化范围为 $0.955 \sim 2.446 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$, 透光率 $\geq 96\%$ 。

6. 根据权利要求4所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 所述的外壳设有两个通液孔, 一个通液孔上安装有进液管, 另一个通液孔上安装有出液管, 进液管和出液管用于向容腔注入和排出混合液。

7. 根据权利要求6所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 所述的外壳设有出线孔, 环形超声换能器设有信号线和地线; 环形超声换能器的信号线、进液管及出液管均从出线孔引出, 环形超声换能器的地线设置在外壳的内壁上。

8. 根据权利要求1所述的连续变焦超声探头, 其特征在于, 设有半球形凹槽的第二透镜部的密度为 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 声速为 2.39 km/s , 声阻抗为 $2.52 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$, 透光率 $\geq 96\%$ 。

9. 一种应用上述任意一项权利要求所述的连续变焦超声探头实现的连续变焦方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

(1) 用自动注射泵向连续变焦超声探头的容腔注满甘油-乙醇混合液, 该甘油-乙醇混合液具有预定的浓度、声速以及声阻抗; 使该甘油-乙醇混合液注满整个容腔, 最终注满的容腔内无气泡;

(2) 根据惠更斯原理, 利用亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理计算环形超声换能器的发射声场, 算出此时超声探头的声焦长、声焦斑直径、声焦深;

(3) 从容腔内抽出一定量的甘油-乙醇混合液, 同时连续注入等量的甘油或乙醇, 来增大或减小甘油-乙醇混合液浓度, 从而增大或减小甘油-乙醇混合液浓度、声速和声阻抗, 最终改变超声探头的声焦长、焦斑直径、焦深。

10. 根据权利要求9所述的连续变焦方法, 其特征在于, 通过步骤(3)中连续改变容腔内甘油-乙醇混合液的浓度来改变第一透镜部的声速和声阻抗, 最终实现对超声探头的连续变焦, 超声探头的声焦长的调节范围为 $10.14 \sim 40.88 \text{ mm}$ 、声焦斑直径的调节范围为 $35 \sim 86 \mu \text{ m}$ 及声焦深的调节范围为 $0.2425 \sim 0.9919 \text{ mm}$ 。

一种连续变焦超声探头及其变焦方法

技术领域

[0001] 本发明属于无损检测领域,更特别地,本发明适用于光声显微成像领域,涉及一种连续变焦超声探头及其光声成像方法。

背景技术

[0002] 超声诊断是将超声检测技术应用于人体,通过测量了解生理或组织结构的数据和形态,发现疾病,作出提示的一种诊断方法。超声诊断是一种无创、无痛、方便及直观的有效检查手段,但是它的成像方法依赖与生物组织的声阻抗,由于有些肿瘤组织的声阻抗无明显的差异,这就限制超声成像技术的运用范围并且它的重组图像的对比度很低。

[0003] 光声成像技术是近年来发展的一种无损检测医学成像技术,它结合光学成像和超声成像的优点,正逐步成为医学无损检测的一个新的研究方向。该成像技术以短脉冲激光作为激励源,以及由此激发的超声信号作为信息载体,通过相应的图像重建算法重建组织内部结构和功能信息的成像方法。该技术结合了光学成像和声学成像的特点,可提供深层组织高分辨率和高对比度的组织层析图像,在生物医学临床诊断以及在体成像领域具有广泛的应用前景。

[0004] 目前,光声显微成像技术中所用到的超声探头很难实现声学连续变焦,难以获得更高的横向分辨率和深度分辨率,不能在深度方向上实现多层次成像;在光声显微成像技术中所用到的超声探头大多数是非环形超声探头,很难保证入射光与超声探头同轴,最终会影响光声显微成像系统的分辨率和检测灵敏度;更特别地,对于光声显微技术中的散斑光源,非变焦超声探头难以获得更高的信噪比,检测灵敏度不高。

发明内容

[0005] 针对现有技术的上述缺陷,本发明提供了一种连续变焦超声探头及其光声成像方法。该连续变焦超声探头具有较佳的成像效果,可连续变焦的性能能够使光声显微成像系统在深度方向上实现多层次成像,获得更高的横向分辨率和深度分辨率;采用环形超声换能器,能够确保入射光与超声探头同轴,很大的提高了光声显微成像系统的分辨率和检测灵敏度;同时对于散斑光源,通过调节超声探头的声焦斑直径,系统可获得更高的信噪比。

[0006] 本发明提供了一种连续变焦超声探头,包括:外壳;设置在外壳内壁上的环形超声换能器,其具有发射接收超声波的发射接收表面;连续变焦声透镜,其包括声阻抗可连续变化的第一透镜部和设有半球形凹槽的第二透镜部;环形超声换能器、外壳的内壁、第二透镜部围成密封的容腔。

[0007] 优选的是,所述环形超声换能器包括环形压电元件、凸形光学镜片以及环形吸声板;凸形光学镜片上设有凸台,环形吸声板及环形压电元件依次套装在凸形光学镜片的凸台上。

[0008] 优选的是,所述凸形光学镜片的材质采用光学玻璃镜片材料,且透光率 $\geq 98\%$;所述环形吸声板的材质为玻璃纤维材料,且吸声率 $\geq 96\%$,凸形光学镜片的下表面与环形超

声换能器发射接收表面齐平。

[0009] 优选的是,声阻抗可连续变化的第一透镜部是由浓度可变的混合液形成的,混合液注入所述的容腔内。

[0010] 优选的是,所述的混合液为甘油-乙醇混合液,该甘油-乙醇混合液的密度变化范围为 $0.789\sim 1.261\times 10^3\text{kg/m}^3$,声速变化范围为 $1.21\sim 1.94\text{km/s}$,声阻抗变化范围为 $0.955\sim 2.446\times 10^6\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$,透光率 $\geq 96\%$ 。

[0011] 优选的是,所述的外壳设有两个通液孔,一个通液孔上安装有进液管,另一个通液孔上安装有出液管,进液管和出液管用于向容腔注入和排出混合液。

[0012] 优选的是,所述的外壳设有出线孔,环形超声换能器设有信号线和地线;环形超声换能器的信号线、进液管及出液管均从出线孔引出,环形超声换能器的地线设置在外壳的内壁上。

[0013] 优选的是,设有半球形凹槽的第二透镜部的密度为 $1.05\times 10^3\text{kg/m}^3$,声速为 2.39km/s ,声阻抗为 $2.52\times 10^6\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$,透光率 $\geq 96\%$ 。

[0014] 本发明提供了一种应用上述连续变焦超声探头实现的连续变焦方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0015] (1)用自动注射泵向连续变焦超声探头的容腔注满甘油-乙醇混合液,该甘油-乙醇混合液具有预定的浓度、声速以及声阻抗;使该甘油-乙醇混合液注满整个容腔,最终注满的容腔内无气泡;

[0016] (2)根据惠更斯原理,利用亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理计算环形超声换能器的发射声场,算出此时超声探头的声焦长、声焦斑直径、声焦深;

[0017] (3)从容腔内抽出一定量的甘油-乙醇混合液,同时连续注入等量的甘油或乙醇,来增大或减小甘油-乙醇混合液浓度,从而增大或减小甘油-乙醇混合液浓度、声速和声阻抗,最终改变超声探头的声焦长、焦斑直径、焦深。

[0018] 优选的是,通过步骤(3)中连续改变容腔内甘油-乙醇混合液的浓度来改变第一透镜部的声速和声阻抗,最终实现对超声探头的连续变焦,超声探头的声焦长的调节范围为 $10.14\sim 40.88\text{mm}$ 、声焦斑直径的调节范围为 $35\sim 86\mu\text{m}$ 及声焦深的调节范围为 $0.2425\sim 0.9919\text{mm}$ 。

[0019] 本发明相对于现有技术具有如下的优点及效果:

[0020] (1)本发明能够实现光声显微成像系统的光声共焦激发探测功能,通过该超声探头的连续变焦,使光焦点只在超声探头的声场焦腰上进行扫描,通过空间微移动光声激发光学焦点,实现在一定范围内高的、均匀的图像分辨率及对比度,提高了探测灵敏度。

[0021] (2)本发明能够通过连续变焦,调节超声探头的声焦长及声焦深的大小,最终能够实现光声显微成像系统的多层次深度成像,通过像差校正到足以获得具有横向分辨率以及深度分辨率的高分辨率成像的程度。

[0022] (3)对于散斑光源,通过连续调节超声探头的声焦斑直径,可以使激光光源的散斑最大化的落在声场焦斑内,使超声探头可以接收更多的光声信号,进而光声成像系统的信噪比会得到很大的提高。

[0023] (4)本发明提供了一种连续变焦超声探头,结构简单,操控方便,能够更好的配合超声、光声成像系统,有利于推广及应用。

附图说明

[0024] 结合以下说明书附图,对本发明的具体实施方式进行详细介绍,其中:

[0025] 图1为实施例1的一种连续变焦超声探头的剖面结构示意图;其中:1外壳、1-1外壳上盖、1-2通液孔、1-3通液孔、1-4出线孔、2环形超声换能器、2-1凸形光学镜片、2-2环形吸声板、2-3环形压电元件、3容腔、4设有半球形凹槽的第二透镜部、5进液管、6出液管。

[0026] 图2为实施例1的一种连续变焦超声探头的立体图;其中:1外壳、1-1外壳上盖、1-4出线孔、4设有半球形凹槽的第二透镜部、5进液管、6出液管、7环形超声换能器的信号线。

[0027] 图3为甘油-乙醇混合液的密度 ρ 随甘油摩尔分数 x_1 的变化曲线图。

[0028] 图4为甘油-乙醇混合液的声速 V 随甘油摩尔分数 x_1 的变化曲线图。

[0029] 图5为甘油-乙醇混合液的声阻抗 Z 随甘油摩尔分数 x_1 的变化曲线图。

[0030] 图6为连续改变实施例1的一种连续变焦超声探头中的甘油-乙醇混合溶液浓度时,超声探头的声焦长 F 随甘油-乙醇混合溶液浓度的变化曲线图。

[0031] 图7为连续改变实施例1的一种连续变焦超声探头中的甘油-乙醇混合溶液浓度时,超声探头的声焦斑直径 D 随甘油-乙醇混合溶液浓度的变化曲线图。

[0032] 图8为连续改变实施例1的一种连续变焦超声探头中的甘油-乙醇混合溶液浓度时,超声探头的声焦深 L 随甘油-乙醇混合溶液浓度的变化曲线图。

[0033] 图9为实施例1的一种连续变焦超声探头的回波信号图。

[0034] 图10是超声探头立体方向的结构示意图,未画出环形超声换能器和第二透镜部。

具体实施方式

[0035] 下面通过实施例,对本发明的技术方案做进一步具体的说明。

[0036] 如图1和2所示,一种连续变焦超声探头,包括1外壳、1-1外壳上盖、1-2通液孔、1-3通液孔、1-4出线孔、2环形超声换能器、2-1凸形光学镜片、2-2环形吸声板、2-3环形压电元件、3容腔、4设有半球形凹槽的第二透镜部、5进液管、6出液管、7环形超声换能器的信号线。

[0037] 实施例1

[0038] 结合图1、图2和图10所示,环形超声换能器2包括凸形光学镜片2-1、环形吸声板2-2、环形压电元件2-3,其中,环形压电元件2-3的压电材料为PVDF压电薄膜,厚度为 $9\mu\text{m}$,采用外径8mm、内径3mm的圆环结构,主频为50MHz,带宽为80%,灵敏度为-55dB。凸形光学镜片2-1的材质采用光学玻璃镜片材料,凸形光学镜片上设有凸台,凸台的直径为3mm,透光性极好,透光率 $\geq 98\%$,本实施例中凸形光学镜片的透光率为98%。环形吸声板2-2的材质采用玻璃纤维材料,其厚度的范围为1至5mm(本实施例采用4mm),外径12mm,内径为3mm的圆环结构,表面光滑平整,隔声和吸声效果很好,吸声率 $\geq 96\%$,本实施例中环形吸声板的吸声率为96%。

[0039] 环形压电元件2-3、凸形光学镜片2-1及环形吸声板2-2采用光学环氧树脂胶水同轴配置,即环形压电元件2-3的中心线、凸形光学镜片2-1的中心线及环形吸声板2-2的中心线在同一条直线上;环形吸声板及环形压电元件依次套装在凸形光学镜片的凸台上,凸形光学镜片与外壳的内壁相接触,环形吸声板的半径比凸形光学镜片的半径小,环形压电元件的半径比环形吸声板的半径小,环形压电元件和环形吸声板均不与外壳的内壁相接触;

其中,凸形光学镜片2-1的下表面(即凸形光学镜片凸台的下表面)与环形超声换能器2发射接收表面齐平,环形超声换能器的发射接收表面即环形压电元件2-3的下表面,可发射和接收超声波。

[0040] 声阻抗可连续变化的第一透镜部是由甘油-乙醇混合液组成,密度变化范围为 $0.789\sim 1.261\times 10^3\text{kg/m}^3$,声速变化范围为 $1.21\sim 1.94\text{km/s}$,声阻抗变化范围为 $0.955\sim 2.446\times 10^6\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$,透光率 $\geq 96\%$ 。该混合液被注入到下文提到的容腔中,即图1的容腔3。其他合适的混合液也可以当作第一透镜部使用。

[0041] 设有半球形凹槽的第二透镜部4采用PS(聚苯乙烯)材料,具有良好的透光、透声性,其密度为 $1.05\times 10^3\text{kg/m}^3$,声速为 2.39km/s ,声阻抗为 $2.52\times 10^6\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$,所述的半球形凹槽的曲率半径为10mm,透光率 $\geq 96\%$,本实施例中第二透镜部的透光率为96%。第二透镜部安装在外壳上,由于1可见,第二透镜部的上部安装在外壳下部的内壁上。

[0042] 设有半球形凹槽的第二透镜部4的上表面及半球形凹槽面为经过物理抛光处理,所述的设有半球形凹槽的第二透镜部4的侧面为经过物理磨砂处理。第一透镜部和第二透镜部组合在一起称为连续变焦声透镜。

[0043] 外壳1的材质为不锈钢材料,与环形超声换能器2、设有半球形凹槽的第二透镜部4采用光学环氧树脂胶水依次同轴配置,即外壳的中心线、环形超声换能器的中心线、连续变焦声透镜的中心线在同一条直线上,这样可更好地实现聚焦,避免离焦现象。环形超声换能器上设有地线,该地线用焊锡焊接在外壳1的内壁之上,外壳可屏蔽外部噪声干扰。外壳的上端设有外壳上盖,外壳上盖设有中心孔,环形超声换能器设置在外壳的内壁上,环形超声换能器上设有固定槽(图中未示出),外壳的内壁上设有突出的圆台(图中未标出),圆台上设有与固定槽相适应的突起(图中未示出),从而将环形超声换能器放置在外壳的内壁上,也可以采用其他方式将环形超声换能器设置在外壳的内壁上。超声探头内部设有密封容腔3,容腔3由环形超声换能器、外壳的内壁、第二透镜部所围成。容腔3上部是环形超声换能器2的发射接收表面(即环形压电元件2-3的下表面),容腔3的最下端是半球形凹槽的最下端。

[0044] 外壳设有通液孔1-2和1-3,分别与所述连续变焦超声探头的容腔3连通,一个通液孔上安装有进液管5,另一个通液孔上安装有出液管6,可以由进液管5和出液管6向超声探头的容腔3内注入或抽出液体。外壳1设有出线孔1-4,环形超声换能器2的信号线、进液管5及出液管6均从出线孔1-4引出。所述的甘油-乙醇混合液由进液管5注入实施例1的超声探头的容腔3内部,且注满整个容腔3,最终注满的容腔3内无气泡。

[0045] 实施例2

[0046] 运用实施例1的一种光声显微镜超声探头,测试其发射接收信号的性能。

[0047] 用奥林巴斯5073PR超声发射接收器作为触发信号源,其发射强度为 $12.5\mu\text{J}$ 、脉冲重复频率5KHz;泰勒示波器TDS2012B作为回波信号接收;钢块材料板作为试块,厚度为10MM,声速为 5320m/s 。

[0048] 首先将奥林巴斯5073PR超声发射接收器、泰勒示波器TDS2012B、实施例1中的超声探头连接完毕,奥林巴斯5073PR超声发射接收器置于发射接收状态;其次在试块上表面涂上适量的耦合剂,用注射器将甘油-乙醇混合液从实施例1中的超声探头的进液管5注入超声探头的容腔3中,直到容腔3内注满为止,且容腔3内无气泡;然后将实施例1中超声探头的第二透镜部4水平紧贴于涂有耦合剂的试块的上表面,此时泰勒示波器TDS2012B上会显示

出实例1中的超声探头的回波信号图,在试块上表面缓慢移动此超声探头,待泰勒示波器TDS2012B上的回波信号的峰-峰值达到最大值为止,此时采集回波信号的数据,将数据传入计算机系统进行处理,进而可以得到图9,即为实施例1的连续变焦超声探头的回波信号时域图和频域图。

[0049] 采用连续变焦超声探头所实现的连续变焦方法包括如下步骤:

[0050] (1)用高精度自动注射泵从进液管向所述的容腔注满一定比例的甘油-乙醇混合液,其中已知甘油-乙醇混合液的浓度、声速以及声阻抗。

[0051] (2)根据惠更斯原理,利用亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理计算环形超声换能器的发射声场,算出此时超声探头的声焦长、声焦斑直径、声焦深。

[0052] (3)通过计算模拟声场,不断的改变所述的第一透镜部的声速,结果发现所述的第一声透镜部和第二透镜部的声速差异越大,会导致超声探头的声焦长越大,声焦斑直径以及声焦深越小。

[0053] (4)根据实际需求从容腔内抽出一定量的甘油-乙醇混合液,同时连续注入等量的甘油或乙醇,来增大或减小甘油-乙醇混合液浓度,进而增大或减小甘油-乙醇混合液浓度声速和声阻抗,最终改变超声探头的声焦长、声焦斑直径、声焦深。如图3至图8的曲线图。

[0054] 步骤(4)中,所述的采用连续改变容腔内甘油-乙醇混合液的浓度来改变所述的第一透镜部的声速和声阻抗,最终实现对超声探头的连续变焦,实现了超声探头的声焦长的微调范围为10.14~40.88mm、声焦斑直径的微调范围为35~86 μ m及声焦深的微调范围为0.2425~0.9919mm。

[0055] 本发明相对于现有技术具有如下的优点及效果:

[0056] (1)本发明能够实现光声显微成像系统的光声共焦激发探测功能,通过该超声探头的连续变焦,使光焦点只在超声探头的声场焦腰上进行扫描,通过空间微移动光声激发光学焦点,实现在一定范围内高的、均匀的图像分辨率及对比度,提高了探测灵敏度。

[0057] (2)本发明能够通过连续变焦,调节超声探头的声焦长及声焦深的大小,最终能够实现光声显微成像系统的多层次深度成像,通过像差校正到足以获得具有横向分辨率以及深度分辨率的高分辨率成像的程度。

[0058] (3)对于散斑光源,通过连续调节超声探头的声焦斑直径,可以使激光光源的散斑最大化的落在声场焦斑内,使超声探头可以接收更多的光声信号,进而光声成像系统的信噪比会得到很大的提高。

[0059] (4)本发明提供了一种连续变焦超声探头,结构简单,操控方便,能够更好的配合超声、光声成像系统,有利于推广及应用。

[0060] 以上实施例仅用于说明本发明,而并非对本发明的限制,有关技术领域的普通技术人员,在不脱离本发明的精神和范围的情况下,还可以做出各种变化和变型,因此所有等同的技术方案也属于本发明的范畴,本发明的专利保护范围应由权利要求限定。

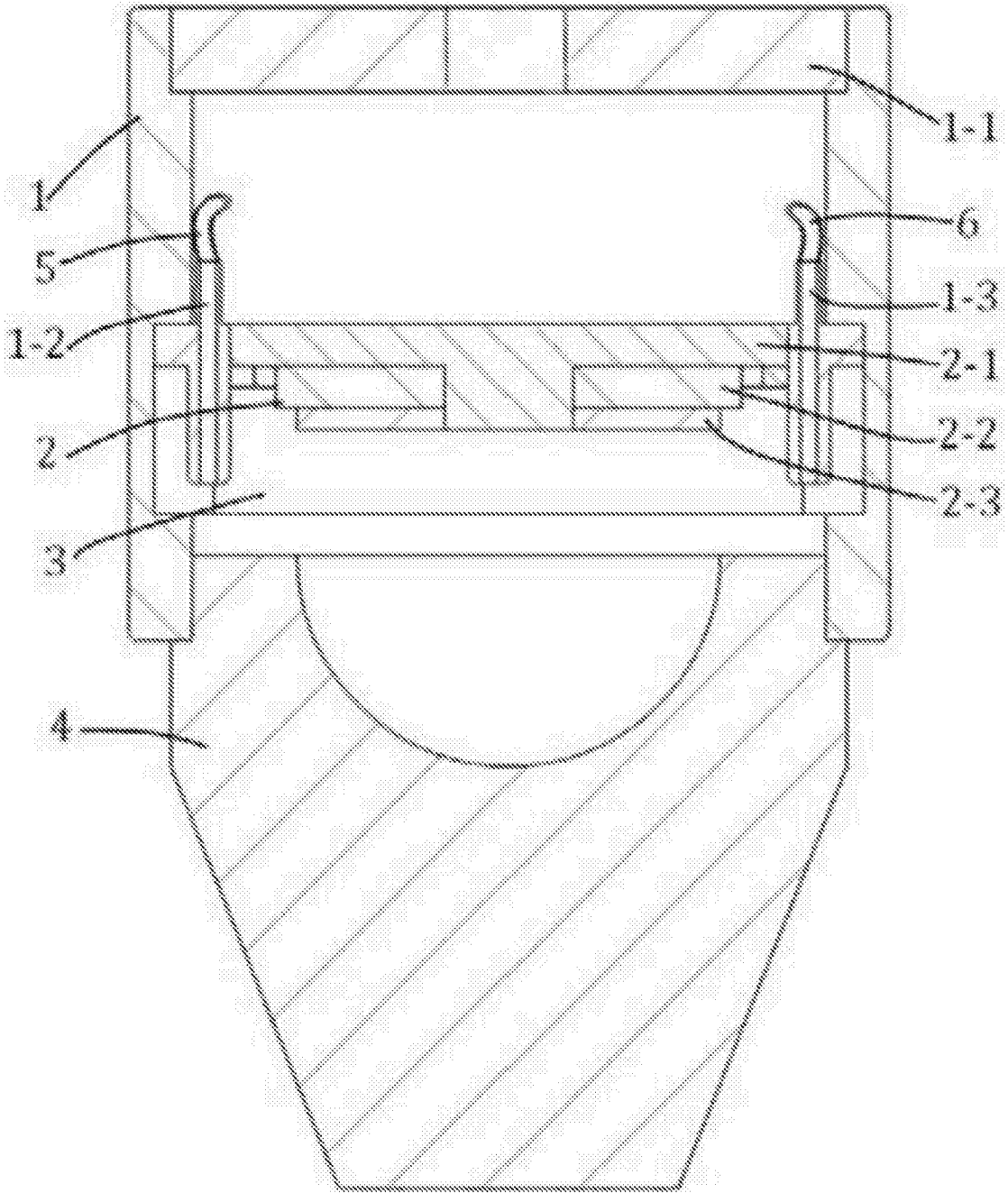


图1

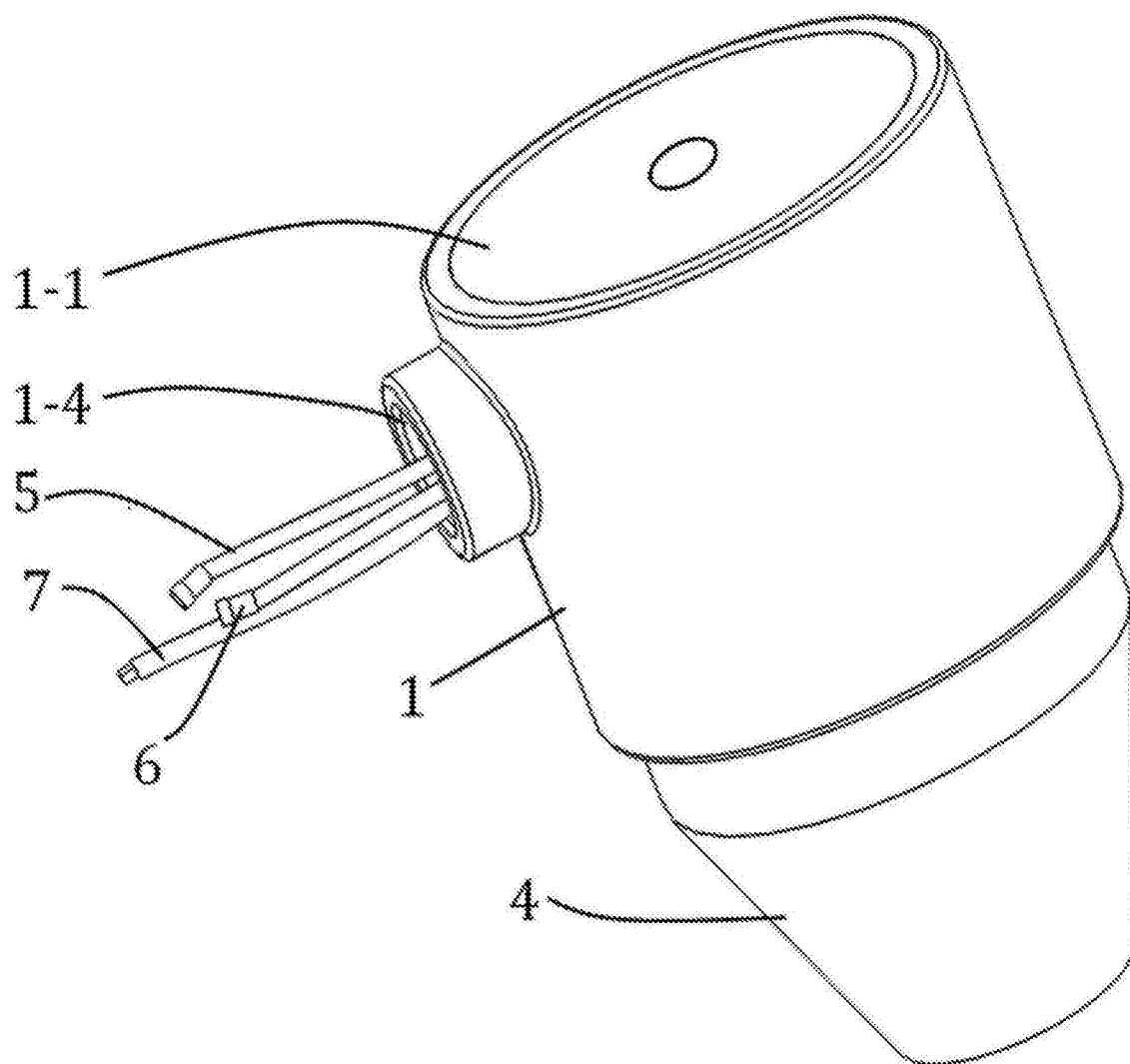


图2

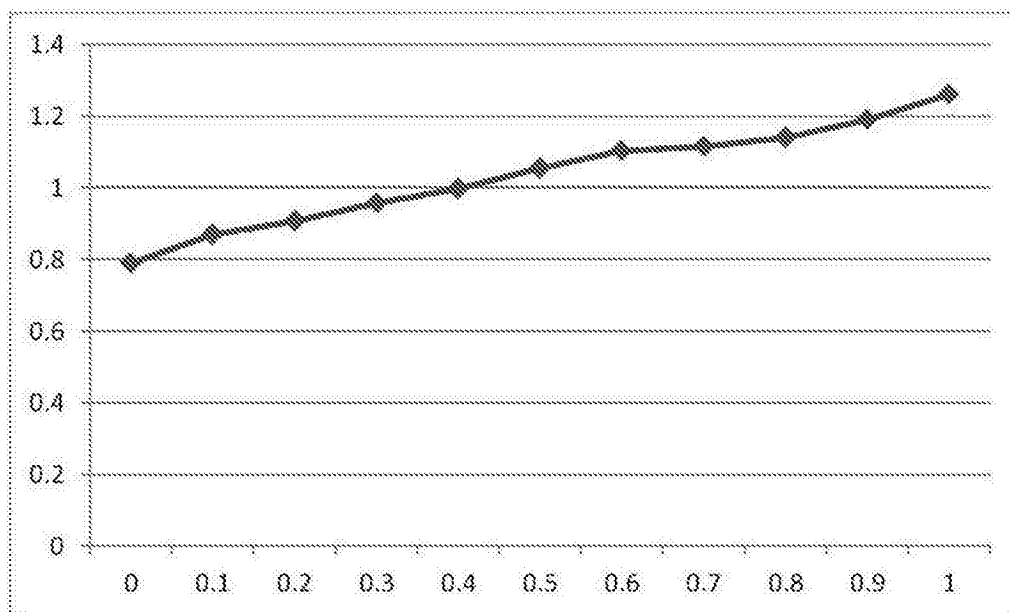


图3

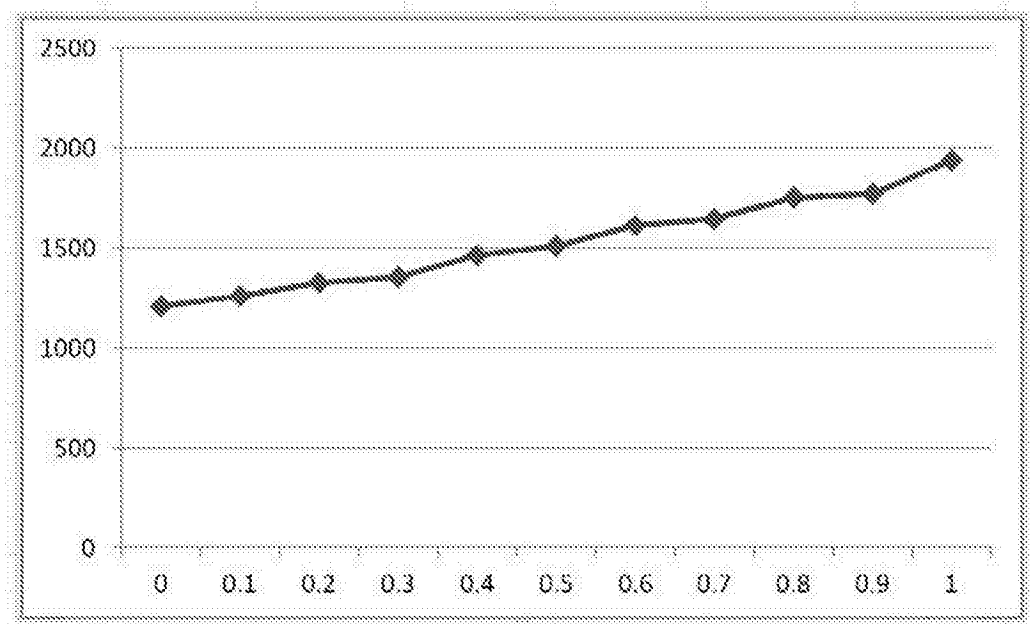


图4

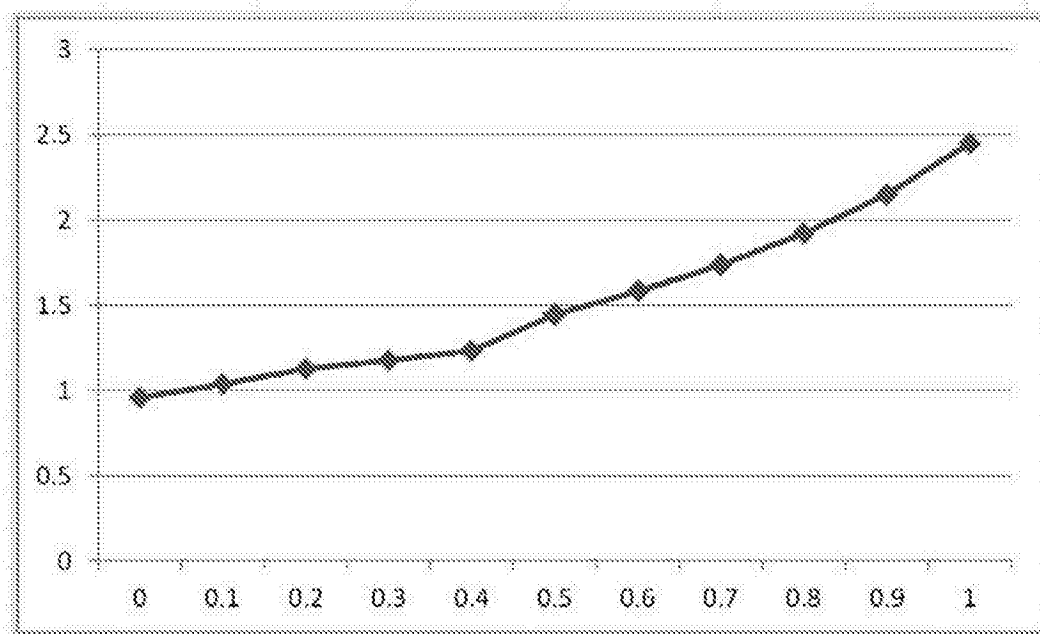


图5

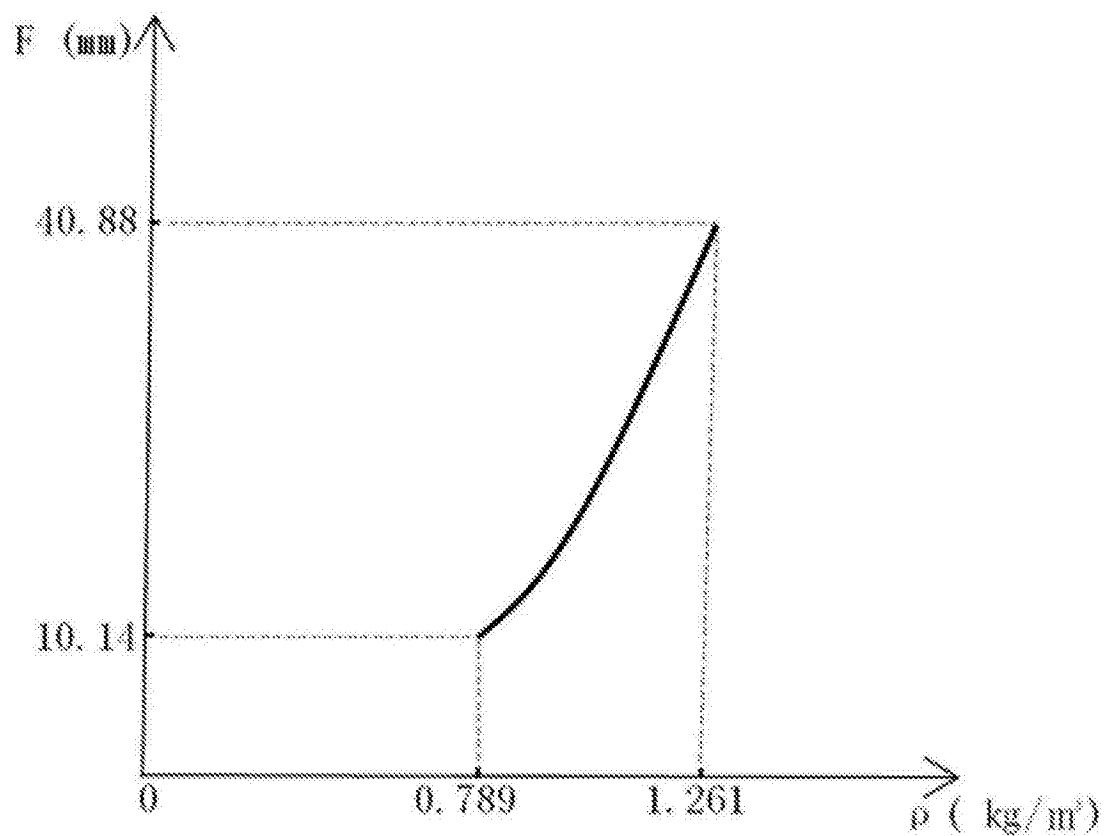


图6

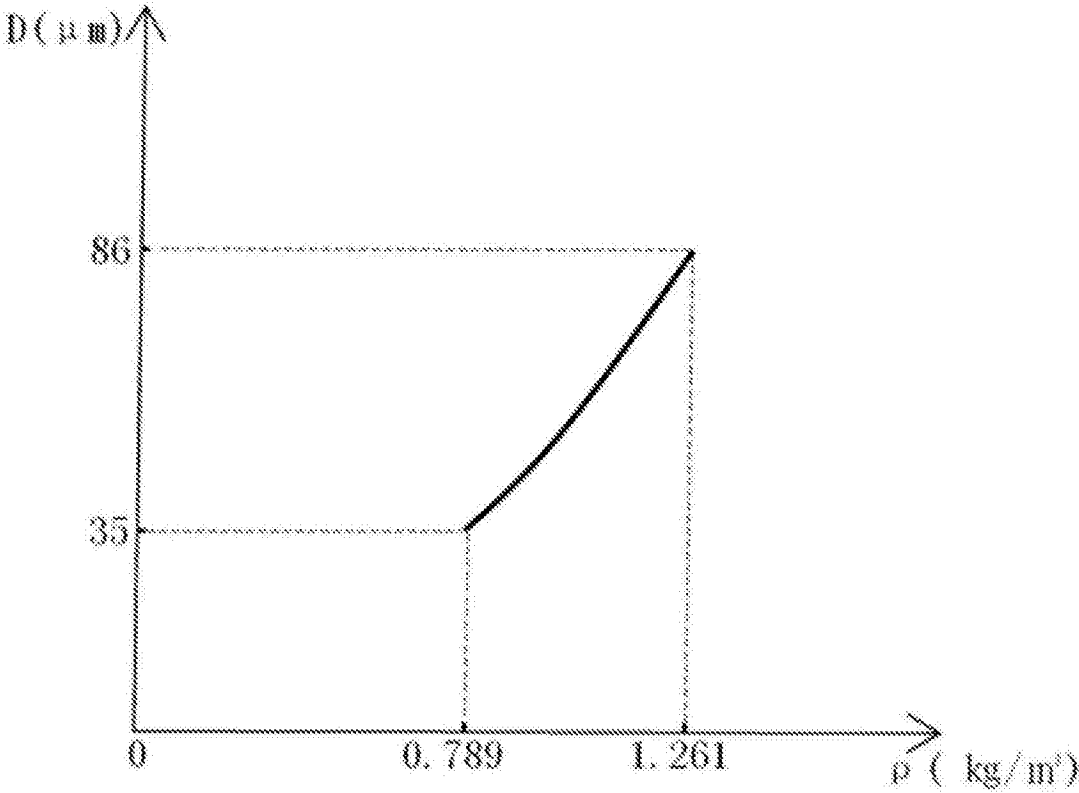


图7

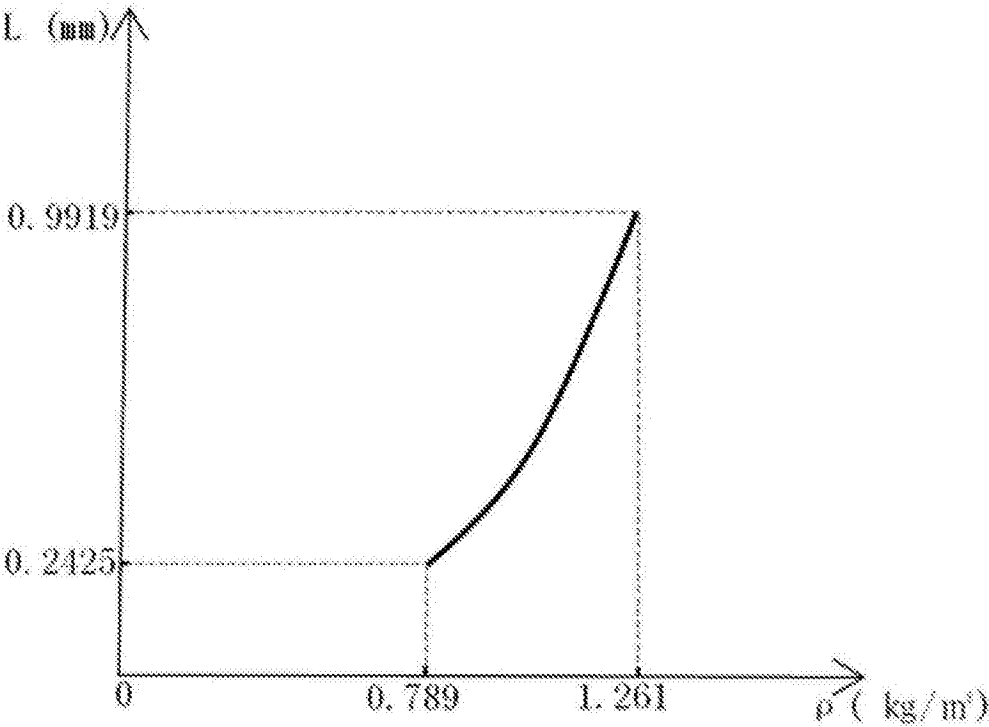


图8

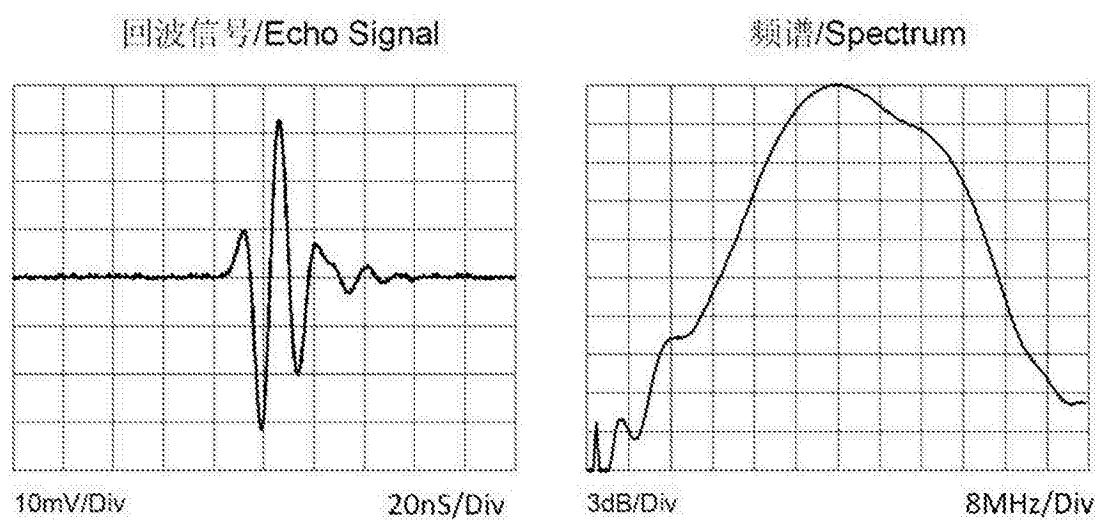


图9

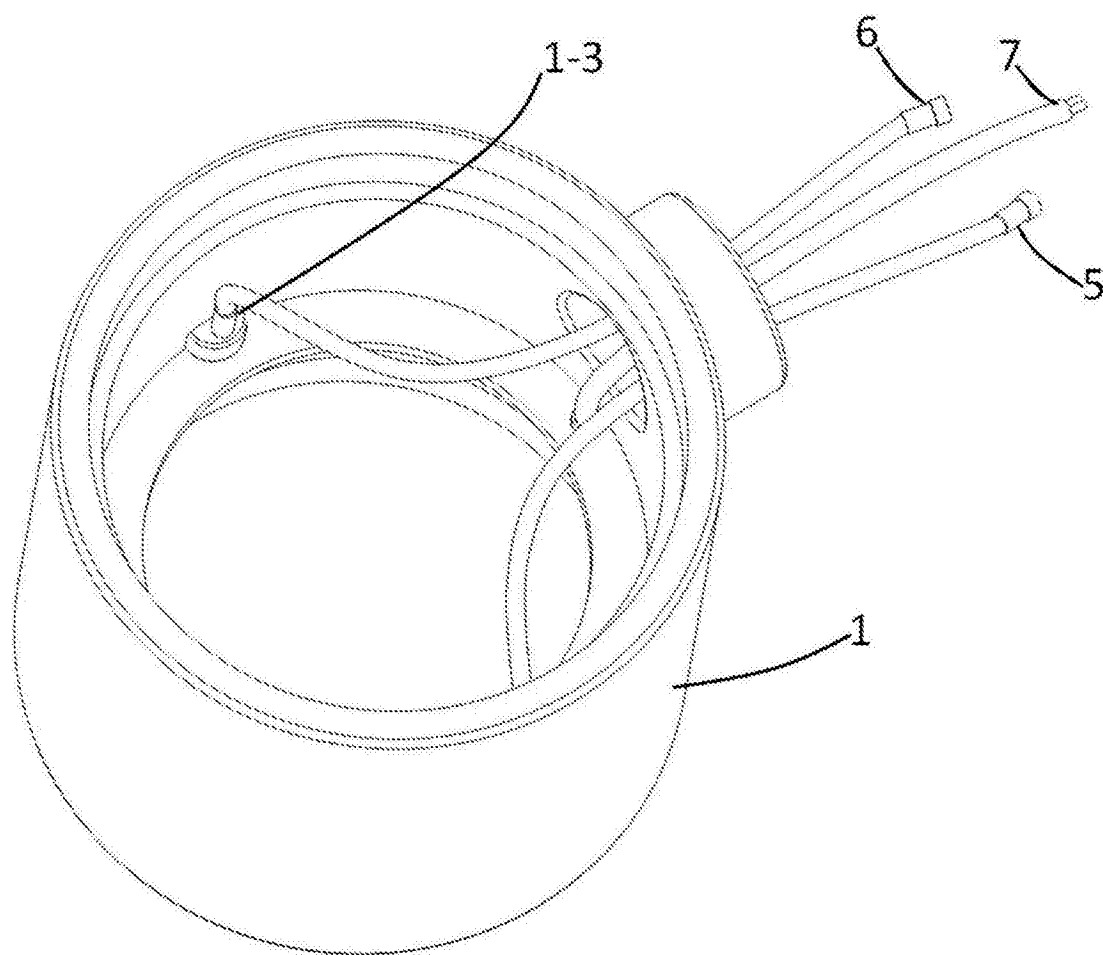


图10

专利名称(译)	一种连续变焦超声探头及其变焦方法		
公开(公告)号	CN106037663A	公开(公告)日	2016-10-26
申请号	CN201610508393.6	申请日	2016-06-29
[标]申请(专利权)人(译)	华南师范大学		
申请(专利权)人(译)	华南师范大学		
当前申请(专利权)人(译)	华南师范大学		
[标]发明人	杨思华 马海钢 邢达		
发明人	杨思华 马海钢 邢达		
IPC分类号	A61B5/00 A61B8/00 A61B8/08		
CPC分类号	A61B5/0059 A61B8/085 A61B8/4272 A61B8/4281 A61B8/4444 A61B8/4483 A61B8/5261		
其他公开文献	CN106037663B		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

一种连续变焦超声探头，包括：外壳；设置在外壳内壁上的环形超声换能器，其具有发射接收超声波的发射接收表面；连续变焦声透镜，其包括声阻抗可连续变化的第一透镜部和设有半球形凹槽的第二透镜部；环形超声换能器、外壳的内壁、第二透镜部围成密封的容腔。本发明还涉及一种连续变焦方法。本发明采用可连续变焦的特殊声透镜，能够实现多层次深度成像，该特殊声透镜的像差校正到足以获得具有横向分辨率以及深度分辨率的高分辨率成像的程度，属于无损检测领域。

