



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120445787 A

(43) 申请公布日 2025. 08. 08

(21) 申请号 202510500111.7

(22) 申请日 2025.04.21

(71) 申请人 南京航空航天大学

地址 213300 江苏省常州市溧阳市滨河东路29号

(72) 发明人 芦小龙 朱哲泉 魏莹 姚仁逸  
赵彬程 曹龙 徐晋

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

专利代理师 张弛 吴多多

(51) Int.Cl.

G01N 1/40 (2006.01)

B01L 3/00 (2006.01)

G01N 21/71 (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01)

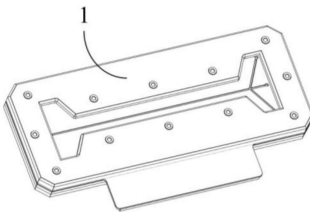
权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54) 发明名称

一种基于声操控的油液磨粒富集芯片、LIBS检测系统及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于声操控的油液磨粒富集芯片、LIBS检测系统及方法,富集芯片内设有富集流道,通过声场驱动实现油液磨粒的富集;检测系统包括驱动装置、富集芯片、检测芯片、脉冲泵、LIBS光谱分析模块,驱动装置用于发出预设频率的电信号以激励压电陶瓷在富集流道中形成预设声场,油液磨粒经声场作用实现定向聚集;脉冲泵用于将经富集芯片富集后的油液泵入检测芯片;检测芯片用于将富集后的油液二次分散,LIBS光谱分析模块用于对经检测芯片分散的油液进行击穿检测以获得油液光谱数据。本发明通过声场动态富集-脉冲泵时序输送-LIBS高频检测的闭环系统,实现油液磨粒成分的实时连续分析,突破传统静态采样模式的局限性。



1. 一种基于声操控的油液磨粒富集芯片, 其特征在于, 包括外壳、安装于外壳内的富集层(104)、安装于富集层(104)上的压电陶瓷(109), 所述压电陶瓷(109)通过电信号驱动; 所述富集层(104)上设有富集流道(1041), 所述富集流道(1041)包括富集段和若干分流段, 所述若干分流段均以富集段终点为起点, 其中一个分流段与富集段位于同一直线上; 富集段起点设有进液孔, 分流段终点设有出液孔。

2. 如权利要求1所述的基于声操控的油液磨粒富集芯片, 其特征在于, 所述外壳包括从下至上依次层叠的下压板(101)、下支撑板(102)、下密封层(103)、上密封层(105)、上支撑板(106)、上压板(107), 所述富集层(104)位于下密封层(103)与上密封层(105)之间; 所述下压板(101)、下支撑板(102)、下密封层(103)上均开有与进液孔、出液孔位置对应的开孔。

3. 如权利要求1所述的基于声操控的油液磨粒富集芯片, 其特征在于, 所述下密封层(103)、上密封层(105)采用PDMS材质制成。

4. 一种包括权利要求1-3任一项所述基于声操控的油液磨粒富集芯片的检测系统, 其特征在于, 还包括驱动装置、检测芯片(2)、脉冲泵(4)、LIBS光谱分析模块(5), 所述驱动装置用于发出预设频率的电信号以激励压电陶瓷(109)在富集流道(1041)中形成预设声场, 油液磨粒经声场作用实现定向聚集, 并经相应出液孔流出; 所述脉冲泵(4)用于将经富集芯片富集后的油液泵入检测芯片(2); 所述检测芯片(2)用于将富集后的油液二次分散, 所述LIBS光谱分析模块(5)用于对经检测芯片(2)分散的油液进行击穿检测以获得油液光谱数据。

5. 如权利要求4所述的检测系统, 其特征在于, 所述检测芯片(2)内设有检测层(210), 所述检测层(210)上设有检测流道(2101), 检测流道(2101)包括呈S型的分散段和呈直线型的击穿段, 击穿段起点为分散段终点, 所述分散段的起点设有进液孔, 击穿段的终点设有出液孔。

6. 如权利要求4所述的检测系统, 其特征在于, 还包括储液池(3), 所述富集芯片、检测芯片(2)均通过管道与储液池(3)连接, 脉冲泵(4)设置于检测芯片(2)与储液池(3)连接的管道上, 所述储液池(3)具有加热装置和搅拌装置。

7. 如权利要求4所述的检测系统, 其特征在于, 还包括用于夹持富集芯片和检测芯片(2)的芯片夹具, 所述芯片夹具包括芯片支座、设置于芯片支座上的芯片槽(603)、设置于芯片槽(603)内的鲁尔接头(602), 所述芯片槽(603)用于放置芯片, 所述鲁尔接头(602)与进液口、出液口位置对应以实现连通。

8. 一种如权利要求4-7任一项所述检测系统的检测方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

步骤1、开启驱动装置发出预设频率的电信号, 将待测油液输入富集芯片, 通过压电陶瓷(109)在富集流道(1041)内产生的预设声场完成油液磨粒富集;

步骤2、将经过富集的油液通过脉冲泵(4)以频率 $f_1$ 泵入检测芯片(2);

步骤3、经富集的待测油液在检测芯片(2)中二次分散, 并通过LIBS光谱分析模块(5)进行击穿检测, 击穿检测频率为 $f_2$ ,  $f_1 = f_2$ , 且脉冲泵(4)与LIBS光谱分析模块(5)的工作过程相差半个周期。

9. 如权利要求8所述的检测方法, 其特征在于, 所述驱动装置发出1.44MHz的电信号, 经富集后的油液从与富集段位于同一直线上的分流段流出, 该分流段终点与检测芯片(2)连接。

10. 如权利要求8所述的检测方法,其特征在于,所述驱动装置发出2.88MHz的电信号,经富集后的油液从不与富集段位于同一直线上的分流段流出,该分流段终点与检测芯片(2)连接。

## 一种基于声操控的油液磨粒富集芯片、LIBS检测系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及超声驱动技术及分析化学技术领域,尤其涉及一种基于声操控的油液磨粒富集芯片、LIBS检测系统及方法。

### 背景技术

[0002] 在机械设备的运行状态监测中,油液磨粒的检测是评估设备磨损与故障的核心手段。传统油液检测技术如光谱法、铁谱法和电感法存在显著局限性:光谱法受限于颗粒尺寸(通常仅能检测 $<10\mu\text{m}$ 的颗粒),铁谱法依赖人工判读且主观性强,而电感法则难以捕捉亚微米级的关键磨损颗粒。激光诱导击穿光谱(Laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)技术凭借其无需样品预处理、多元素同步检测及快速分析的优势,成为新兴的油液磨粒检测方法,但仍面临技术瓶颈,主要有以下几点:第一,油液中磨粒分布稀疏且浓度低,传统LIBS技术因等离子体激发效率不足,导致检测灵敏度受限;第二,油液复杂基质易引发光谱信号失真,影响定量分析的准确性;第三,现有LIBS光谱分析模块多采用静态采样模式,缺乏动态富集能力,难以实现连续工况下的实时监测。声操控技术(如超声驻波场)基于声辐射力原理,通过调节声波的频率、相位和强度,可在流体中形成稳定的声压节点,驱动微米/纳米级颗粒定向迁移并富集至特定区域。该技术具有非接触的特性,在油液等高黏度、复杂基质环境中,超声驻波可突破布朗运动限制,克服油液黏滞阻力,实现磨粒的高效动态富集,为解决传统LIBS技术中磨粒分布稀疏、磨粒浓度低、基质效应等大量影响检测精度的痛点提供了解决方案。

[0003] 检索现有相关文献发现,公开号为CN105911028A的中国发明专利所述的基于微流控芯片和压电陶瓷元件的液滴产生装置及实现对液体样品进行LIBS检测的方法,通过压电陶瓷驱动液体经过微流道形成微液滴,从而使用LIBS进行聚焦击穿检测,但其无法实现连续进样,导致检测效率较低。公开号为CN117074389A的中国发明专利所述的一种水体中无机有害微量元素在线检测系统及检测方法,通过市售的微流控芯片产生液滴后利用传送带进行连续检测,但其无法实现待检测样品的富集,无法避免因等离子体激发效率有限而导致的检测准确性降低等问题。

### 发明内容

[0004] 发明目的:针对在油液磨粒检测背景下LIBS检测系统存在的因磨粒分布稀疏、磨粒浓度低引发的检测精度不足以及无法连续自动进样的问题,本发明提供一种基于声操控的油液磨粒富集芯片、LIBS检测系统及方法。

[0005] 技术方案:为解决上述问题,本发明采用一种基于声操控的油液磨粒富集芯片,包括外壳、安装于外壳内的富集层、安装于富集层上的压电陶瓷,所述压电陶瓷通过电信号驱动;所述富集层上设有富集流道,所述富集流道包括富集段和若干分流段,所述若干分流段均以富集段终点为起点,其中一个分流段与富集段位于同一直线上;富集段起点设有进液孔,分流段终点设有出液孔。

[0006] 进一步的,所述外壳包括从下至上依次层叠的下压板、下支撑板、下密封层、上密封层、上支撑板、上压板,所述富集层位于下密封层与上密封层之间;所述下压板、下支撑板、下密封层上均开有与进液孔、出液孔位置对应的开孔。

[0007] 进一步的,所述下密封层、上密封层采用PDMS材质制成。

[0008] 本发明还提供包括上述基于声操控的油液磨粒富集芯片的检测系统,还包括驱动装置、检测芯片、脉冲泵、LIBS光谱分析模块,所述驱动装置用于发出预设频率的电信号以激励压电陶瓷在富集流道中形成预设声场,油液磨粒经声场作用实现定向聚集,并经相应出液孔流出;所述脉冲泵用于将经富集芯片富集后的油液泵入检测芯片;所述检测芯片用于将富集后的油液二次分散,所述LIBS光谱分析模块用于对经检测芯片分散的油液进行击穿检测以获得油液光谱数据。

[0009] 进一步的,所述检测芯片内设有检测层,所述检测层上设有检测流道,检测流道包括呈S型的分散段和呈直线型的击穿段,击穿段起点为分散段终点,所述分散段的起点设有进液孔,击穿段的终点设有出液孔。

[0010] 进一步的,还包括储液池,所述富集芯片、检测芯片均通过管道与储液池连接,脉冲泵设置于检测芯片与储液池连接的管道上,所述储液池具有加热装置和搅拌装置。

[0011] 进一步的,还包括用于夹持富集芯片和检测芯片的芯片夹具,所述芯片夹具包括芯片支座、设置于芯片支座上的芯片槽、设置于芯片槽内的鲁尔接头,所述芯片槽用于放置芯片,所述鲁尔接头与进液口、出液口位置对应以实现连通。

[0012] 本发明还提供应用上述检测系统的检测方法,包括以下步骤:

[0013] 步骤1、开启驱动装置发出预设频率的电信号,将待测油液输入富集芯片,通过压电陶瓷在富集流道内产生的声场完成油液磨粒富集;

[0014] 步骤2、将经过富集的油液通过脉冲泵以频率 $f_1$ 泵入检测芯片;

[0015] 步骤3、经富集的待测油液在检测芯片中二次分散,并通过LIBS光谱分析模块进行击穿检测,击穿检测频率为 $f_2$ , $f_1=f_2$ ,且脉冲泵与LIBS光谱分析模块的工作过程相差半个周期。

[0016] 进一步的,所述驱动装置发出1.44MHz的电信号,经富集后的油液从与富集段位于同一直线上的分流段流出,该分流段终点与检测芯片连接。

[0017] 进一步的,所述驱动装置发出2.88MHz的电信号,经富集后的油液从不与富集段位于同一直线上的分流段流出,该分流段终点与检测芯片连接。

[0018] 有益效果:本发明相对于现有技术,其显著优点是(1)通过富集芯片对油液中的磨粒进行富集,提高待测油液磨粒浓度,为提高后续LIBS检测精度奠定基础;(2)通过声场动态富集-脉冲泵时序输送-LIBS高频检测的闭环系统,实现油液磨粒成分的实时连续分析,突破传统静态采样模式的局限性,富集芯片与检测芯片的模块化设计支持不同流量与场景需求,适配航空发动机、航天器润滑系统等复杂工况环境;(3)采用脉冲泵与LIBS光谱分析模块时序错步协同控制,在油液流动间歇期完成激光击穿检测,实现连续进样检测,并避免流动湍流对光谱稳定性的影响,提高检测系统整体抗干扰性;(4)搅拌储液池的加热与搅拌功能进一步消除油液黏度波动及磨粒团聚现象,配合微流控芯片的蛇形流道惯性分散设计,大幅降磨粒堆叠等因素对光谱分析的干扰。

## 附图说明

- [0019] 图1为本发明富集芯片的整体结构示意图；  
[0020] 图2为本发明富集芯片结构爆炸图；  
[0021] 图3为本发明富集层主视图；  
[0022] 图4为本发明检测芯片的整体结构示意图；  
[0023] 图5为本发明检测层主视图；  
[0024] 图6为本发明芯片夹具结构爆炸图；  
[0025] 图7为本发明检测原理示意图；  
[0026] 图8为本发明检测流程示意图；  
[0027] 图9为实施例一富集过程示意图；  
[0028] 图10为实施例一检测过程示意图；  
[0029] 图11为实施例二富集过程示意图；  
[0030] 图12为实施三大尺寸富集芯片整体结构示意图；  
[0031] 图13为实施三大尺寸富集芯片结构爆炸图。

## 具体实施方式

### [0032] 实施例一

[0033] 如图1和图2所示,本实施例中的一种基于声操控的油液磨粒富集芯片,包括外壳和安装于外壳内的富集层104,外壳包括从下至上依次层叠的下压板101、下支撑板102、下密封层103、上密封层105、上支撑板106、上压板107,富集层104位于下密封层103与上密封层105之间,富集芯片各层上均设有螺钉孔1011,通过紧定螺钉108将各层固定连接。

[0034] 如图3所示,富集层104上设有富集流道1041,富集流道1041包括富集段AB和三条分流段,三条分流段由富集段终点B分叉形成,其中中间的分流段与富集段位于同一直线上,另两条分流段分别对称设置于两侧。富集段起点A处设有进液孔2',分流段终点设有出液孔4'、5'、6',芯片外壳位于富集层104下方的各层也设有位置对应的开孔,以连通形成进液和出液通道。富集层104下部延伸出一突出侧缘,使用导电银浆将压电陶瓷109粘贴于该突出侧缘上。

[0035] 本实施例中下压板101和上压板107由6061铝合金经数控机加工技术制成;下支撑板102和上支撑板106由PC板材经数控激光切割技术制成;下密封层103和上密封层105由PDMS材料制成;上密封层105、上支撑板106均为透明材质;富集层104由201不锈钢板材经数控激光切割技术制成;压电陶瓷109为市售条形PZT-8锆钛酸铅压电陶瓷。

[0036] 本发明富集芯片的富集原理如下:使用一特定频率的电信号激励压电陶瓷109,使其在富集流道1041内形成特定声场。将油液从进液口输入富集流道1041,该特定声场将驱动油液中的磨粒定向运动,根据施加的电信号频率不同,磨粒可以向中间或两侧运动,最终,含有不同浓度磨粒的油液经过不同分叉段分别流出,经富集的油液及废液被分别收集储存。本发明富集芯片1通过声操控技术(超声驻波场)主动富集油液中稀疏分布的磨粒,以克服传统LIBS因磨粒浓度低导致的等离子体激发效率不足和检测精度降低问题。

[0037] 本实施例还提供一种包括上述富集芯片1的检测系统,还包括驱动装置、检测芯片2、芯片夹具、储液池3、脉冲泵4和LIBS光谱分析模块5。驱动装置用于发出预设频率的电信

号以激励压电陶瓷109在富集流道1041中形成预设声场,本实施例中的驱动装置为信号发生器。

[0038] 如图4所示,检测芯片2用于将富集后的油液二次分散,具体的,检测芯片2包括外壳和设置于外壳内的检测层210,外壳与富集芯片外壳结构相同。如图5所示,检测层210上设有检测流道2101,检测流道2101包括呈S型的分散段CD和呈直线型的击穿段DE,击穿段起点为分散段终点,分散段的起点C处设有进液孔2",击穿段的终点E设有出液孔5"。油液从进液孔2"流入后经过S型流道,利用惯性力再次将富集后的油液中的磨粒均匀分散,尽可能降低因磨粒在空间上的重叠造成的检测误差,之后再流入击穿段等待击穿检测,最终从出液孔5"流出。通过检测芯片2对油液磨粒进行二次分散后进行击穿检测,提高了LIBS光谱分析模块检测结果的置信度,有效解决了因油液环境下光谱信号弱、背景噪声高等问题导致的检测结果不稳定、不准确的问题。

[0039] 富集芯片1、检测芯片2各由一个芯片夹具进行夹持,如图6所示,芯片夹具包括芯片夹具XY平面滑台610、安装于XY平面滑台610上的Z轴滑台609、安装于Z轴滑台609上的Z轴滑台滑块607、安装于Z轴滑台滑块607上的芯片夹具下支座605、安装于Z轴滑台609顶部的芯片夹具上盖601,芯片夹具下支座605上设有背光灯604,Z轴滑台609上设有束线板608。芯片夹具下支座605上还设有芯片槽603,芯片槽603内设有多个与芯片进液口、出液口位置对应的通孔,通孔内安装有鲁尔接头602。进行芯片夹持时,首先将Z轴滑台滑块607向下滑动,使其远离芯片夹具上盖601,再将芯片放置于芯片槽603内,随后将Z轴滑台滑块607向上滑动使其压紧芯片夹具上盖601,此时鲁尔接头602与芯片下侧压紧密封并与进液口、出液口连通。

[0040] 储液池3用于存储经富集芯片1富集后的油液,富集芯片1、检测芯片2均通过管道与储液池3连接,脉冲泵4设置于检测芯片2与储液池3连接的管道上,储液池3具有加热装置和搅拌装置,有效保证磨粒在油液中的均一分散。脉冲泵4用于将经富集芯片1富集后的油液泵入检测芯片2。LIBS光谱分析模块5用于对经检测芯片2分散的油液进行击穿检测以获得油液光谱数据。

[0041] 如图7和图8所示,本实施例还提供上述检测系统的检测方法,包括以下步骤:

[0042] 步骤1、如图9所示,开启驱动装置发出1.44MHz的电信号,将待测油液从进液口2'输入富集芯片,通过压电陶瓷109和富集流道1041完成油液磨粒富集。1.44MHz的电信号驱动压电陶瓷109产生预设声场将驱动油液磨粒向富集流道1041中部定向运动,经过富集段AB后,油液磨粒浓度高的富集油液流入中间分流段,并从出液口5'流出,经管道收集至储液池3;油液磨粒浓度低的废液流入两侧分流段,并从出液口4'、6'流出并另外收集。

[0043] 步骤2、将经过富集的油液收集于储液池3中,并通过脉冲泵4以频率 $f_1$ 泵入检测芯片2。

[0044] 步骤3、如图10所示,经富集的待测油液在检测芯片2中二次分散,并通过LIBS光谱分析模块5进行击穿检测,LIBS设备激光器应聚焦在微流道中心位置,且激光光斑大小应小于微流道直径。击穿检测频率为 $f_2$ , $f_1=f_2$ ,且脉冲泵4与LIBS光谱分析模块5的工作过程相差半个周期,这样的频率设置能够实现当脉冲泵4泵送液体时,LIBS光谱分析模块5停止检测,而当脉冲泵4停止时LIBS光谱分析模块5开始检测,基于此交替工作,降低检测误差的同时,可实现连续进样检测,在一段时间内得到大量检测数据,经处理后可得到基于多次检测

结果的平均检测结果,增加检测准确性。此外,在油液流动间歇期完成激光击穿检测,还可避免流动湍流对光谱稳定性的影响。

[0045] 本发明的检测系统及检测方法通过声场动态富集-脉冲泵时序输送-LIBS高频检测的闭环系统,实现油液磨粒成分的实时连续分析,突破传统静态采样模式的局限性,富集芯片与检测芯片的模块化设计支持不同流量与场景需求,适配航空发动机、航天器润滑系统等复杂工况环境。

[0046] 实施例二

[0047] 本实施例提供另一种检测方法,所使用的检测系统与实施例一的不同点在于储液池3与富集芯片1的出液口4'、6' 连接,其余结构相同。包括以下步骤:

[0048] 步骤1、如图11所示,开启驱动装置发出2.88MHz的电信号,将待测油液从进液口2' 输入富集芯片,通过压电陶瓷109和富集流道1041完成油液磨粒富集。2.88MHz的电信号驱动压电陶瓷109产生预设声场将驱动油液磨粒向富集流道1041两侧定向运动,经过富集段AB后,油液磨粒浓度高的富集油液流入两侧分流段,并从出液口4'、6' 流出,经管道收集至储液池3;油液磨粒浓度低的废液流入中间分流段,并从出液口5' 流出并另外收集。

[0049] 步骤2、3与实施例一相同。

[0050] 实施例三

[0051] 如图12和图13所示,本实施例提供一种大尺寸富集芯片结构,通过修改流道的尺寸,来获得更高的处理通量,所述大尺寸富集芯片7包括从下至上依次层叠的大尺寸芯片下压板701、大尺寸芯片下支撑板702、下硅橡胶密封层703、大尺寸富集层704、上硅橡胶密封层707、大尺寸芯片上支撑板708、大尺寸芯片上压板709,各层上均设有螺钉孔,通过紧定螺栓710将各层固定连接。大尺寸富集层704上设有大尺寸富集流道7041,该流道形状与实施例一相同,包括富集段和三个分流段,富集段起点设有进液口,分流段终点设有出液口,大尺寸富集层704侧面开有分别与进液口、出液口连通的开孔,该开孔内安装有液体快拆接头706,液体快拆接头706用于与液体管道连接。大尺寸富集层704上还对称设有两个大尺寸压电陶瓷705。

[0052] 装配大尺寸富集芯片7时,将各芯片结构按图13所示顺序叠放后上紧紧定螺栓即完成装配,整体安装完成后使用环氧树脂胶将两块大尺寸压电陶瓷705分别粘贴在大尺寸富集流道7041左右外侧即可,在此处成对的大尺寸压电陶瓷705能够更好的在芯片内产生驻波,以克服因流道尺寸变大而产生的声场作用减弱等影响。

[0053] 本实施例中大尺寸芯片下压板701和大尺寸芯片上压板709由6061铝合金经数控机床加工技术制成;大尺寸芯片下支撑板702和大尺寸芯片上支撑板708由PC经数控激光切割技术制成;下硅橡胶密封层703和上硅橡胶密封层707由硅橡胶切割制成;大尺寸富集层704由6061铝合金经数控机床加工技术制成,其侧边开有螺纹孔,可旋入液体快拆接头706用于向流道内供液;大尺寸压电陶瓷705为市售条形PZT-8锆钛酸铅压电陶瓷。

[0054] 本实施例的大尺寸富集芯片7的富集原理与实施例一富集芯片1相同,且可使用实施例一、二中的检测方法进行检测。

[0055] 综上,本发明基于声操控油液磨粒富集芯片的LIBS检测系统将声操控微流体技术与LIBS技术相结合,能够实现对油液中磨粒高效富集的同时进行连续进样检测,相较于传统的检测方法提高了检测精度并降低了操作难度,使得能够方便快捷的监测机械设备的健



康状况以及其寿命预测。

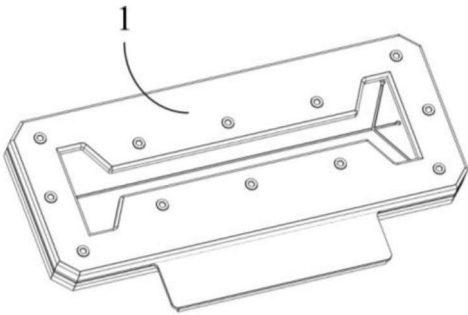


图1

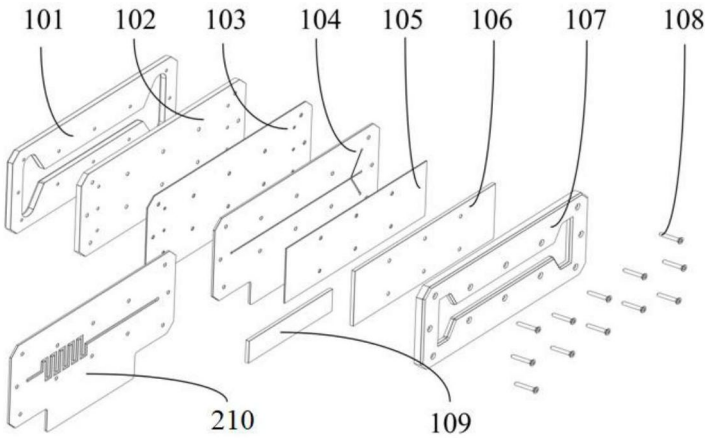


图2

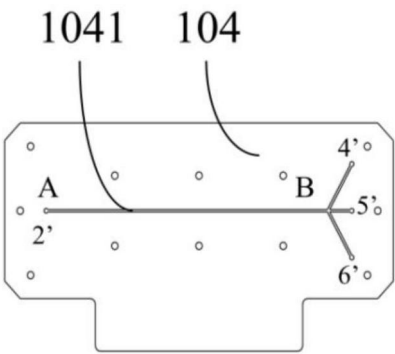


图3

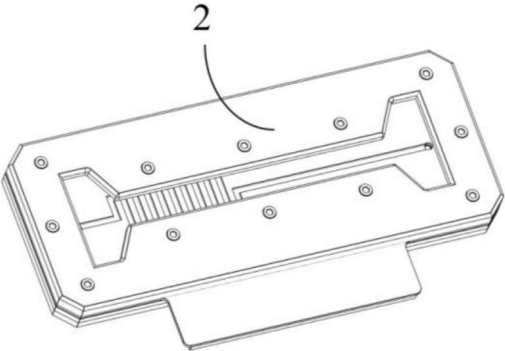


图4

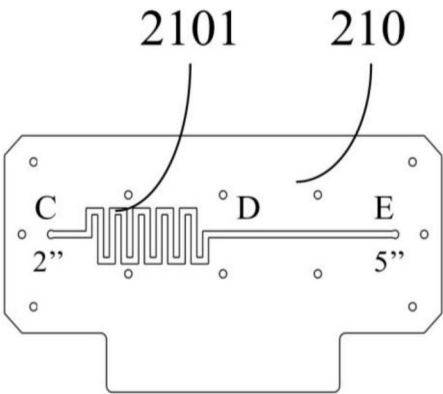


图5

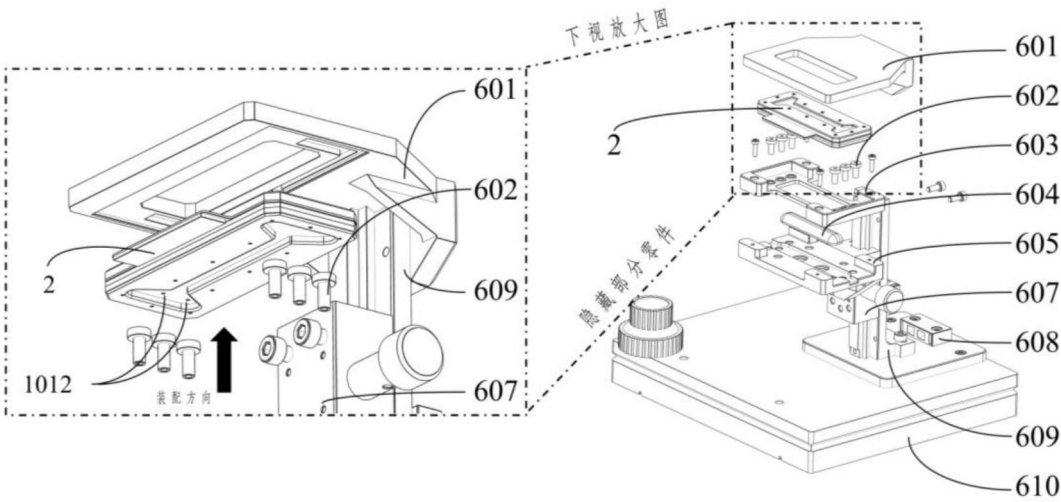


图6

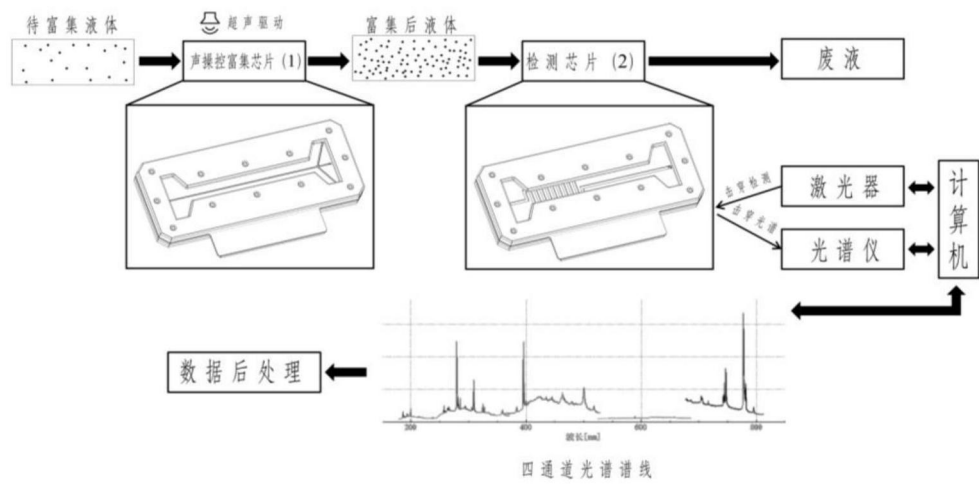


图7

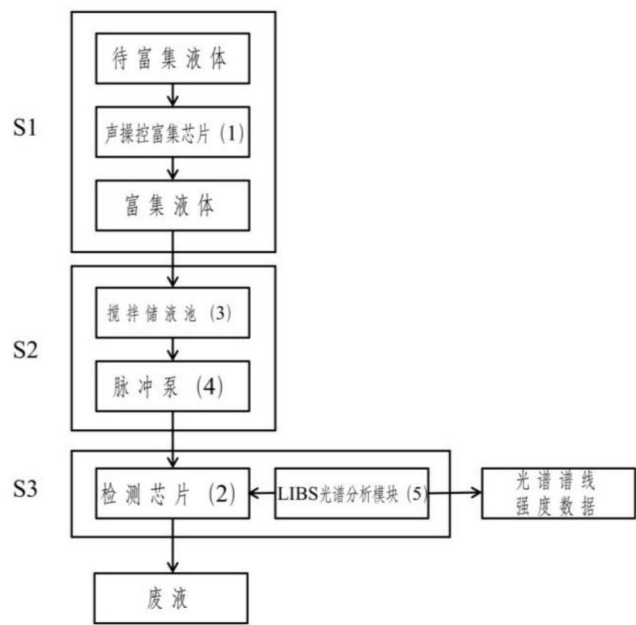


图8

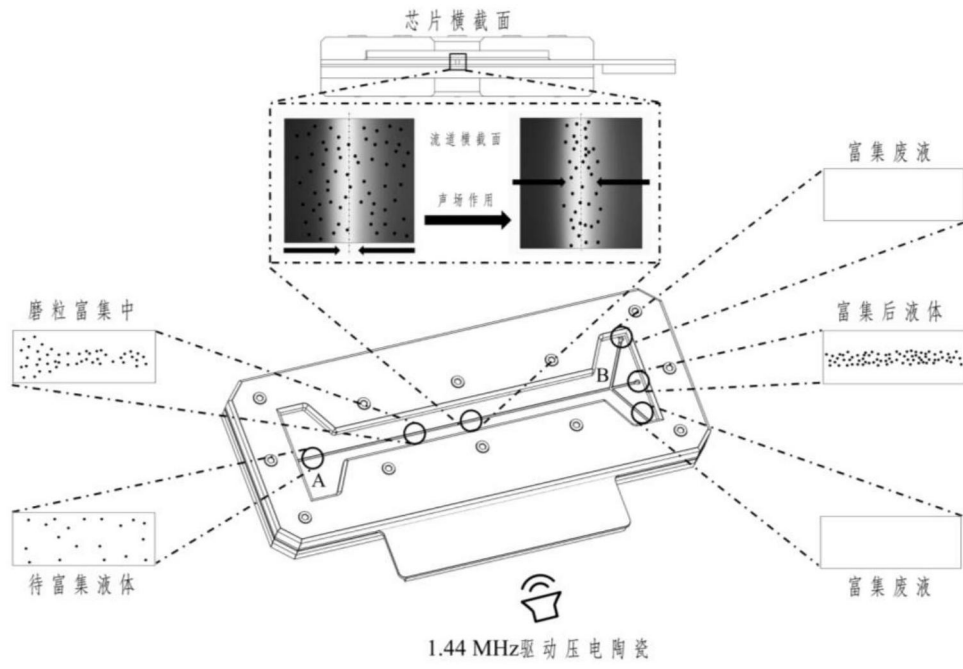


图9

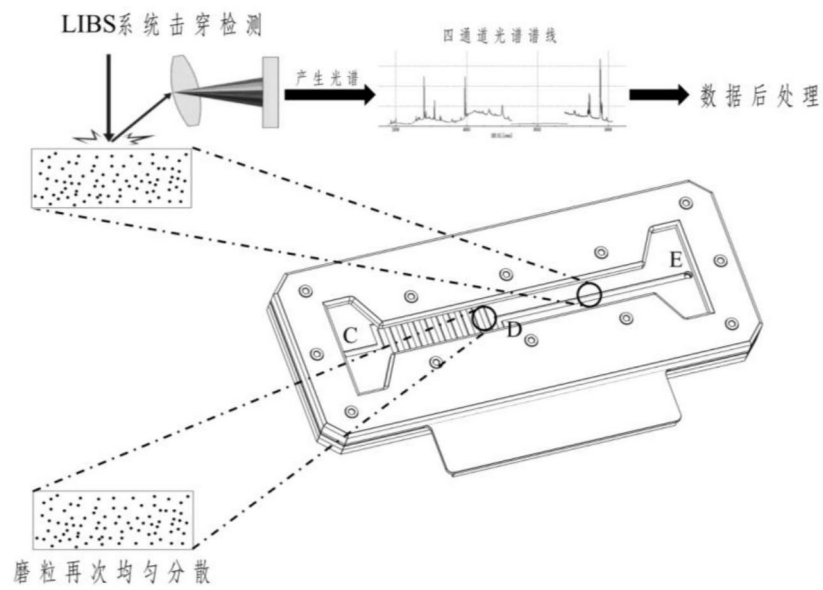


图10

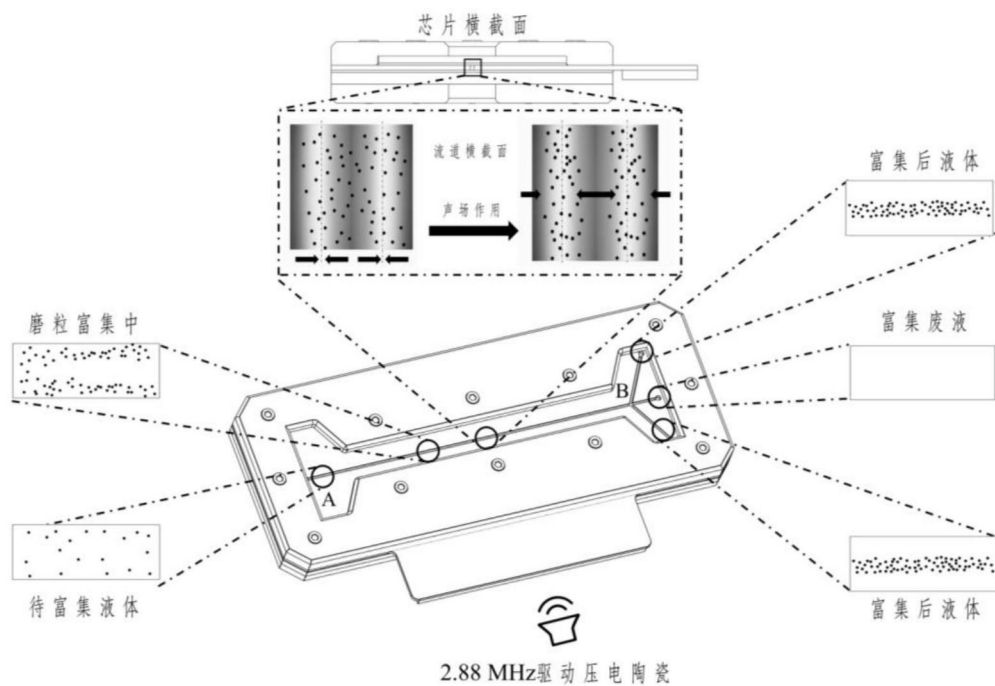


图11

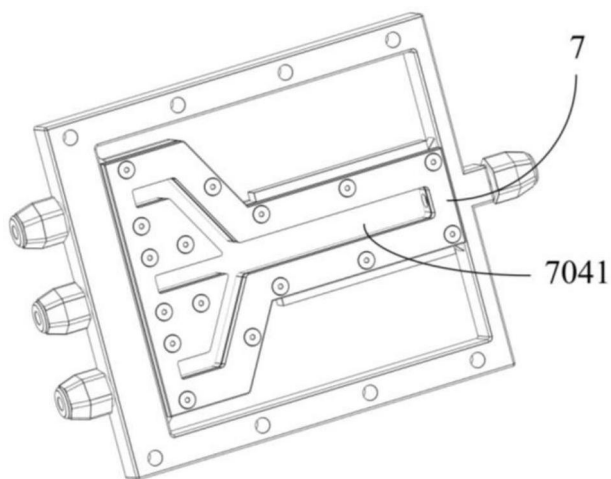


图12

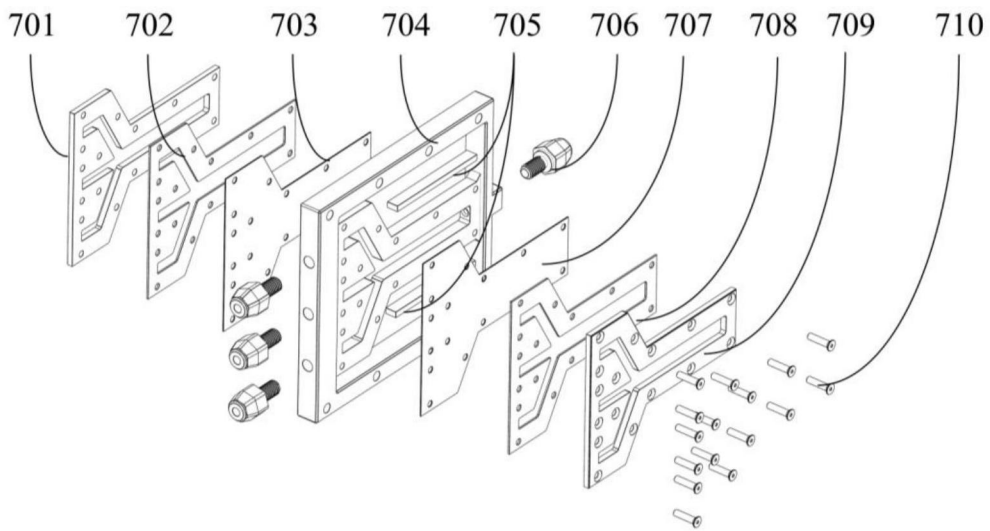


图13