



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106646278 B

(45)授权公告日 2019.05.24

(21)申请号 201611128681.5

(22)申请日 2016.12.09

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106646278 A

(43)申请公布日 2017.05.10

(73)专利权人 中国人民解放军国防科学技术大学

地址 410073 湖南省长沙市砚瓦池正街47号  
中国人民解放军国防科学技术大学  
机电工程与自动化学院

(72)发明人 潘孟春 潘龙 胡佳飞 田武刚  
于洋 陈棣湘 李裴森 胡靖华  
杜青法 胡悦国

(74)专利代理机构 湖南兆弘专利事务所(普通合伙) 43008

代理人 赵洪 谭武艺

(51)Int.Cl.

G01R 33/00(2006.01)

G01R 33/09(2006.01)

(56)对比文件

CN 102323554 A,2012.01.18,

CN 102353913 A,2012.02.15,

CN 102279373 A,2011.12.14,

CN 103323794 A,2013.09.25,

CN 201608927 U,2010.10.13,

US 2009066326 A1,2009.03.12,

田武刚等.MEMS磁力线聚集和垂动调制磁场传感器.《国防科技大学学报》.2014,第36卷(第4期),第129-133、168页.

审查员 郑李仁

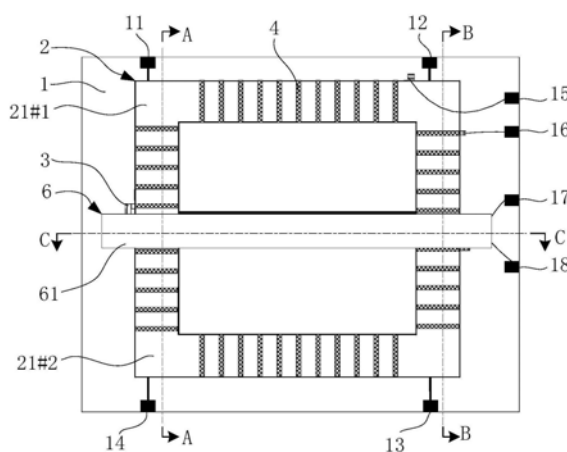
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件

(57)摘要

本发明公开了一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,包括绝缘基底和磁力线聚集器,所述磁力线聚集器的底面上绕设有底层线圈,所述磁力线聚集器的顶面上绕设有顶层线圈,所述底层线圈和顶层线圈一起形成绕设于磁力线聚集器上的电流线圈,所述磁力线聚集器呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底上形成的高导磁部件呈轴对称布置构成,两个高导磁部件之间设有间隙,所述绝缘基底上位于所述间隙内设有磁场敏感元件,所述绝缘基底上位于磁场敏感元件的上方设有微压电桥调制组件。本发明能够实现亚纳伏级别的低噪声放大,具有磁场聚集放大效果好、抗外磁场干扰性能好、体积小、电-磁信号转化效率高的优点。



1. 一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,其特征在于:包括绝缘基底(1)和磁力线聚集器(2),所述磁力线聚集器(2)的底面上绕设有底层线圈(3),所述磁力线聚集器(2)的顶面上绕设有顶层线圈(4),所述底层线圈(3)和顶层线圈(4)一起形成绕设于磁力线聚集器(2)上的电流线圈,所述磁力线聚集器(2)呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底(1)上形成的高导磁部件(21)呈轴对称布置构成,两个高导磁部件(21)之间设有间隙,所述绝缘基底(1)上位于所述间隙内设有磁场敏感元件(5),所述绝缘基底(1)上位于磁场敏感元件(5)的上方设有微压电桥调制组件(6)。

2. 根据权利要求1所述的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,其特征在于:所述磁场敏感元件(5)为由第一TMR敏感元件(51)、第二TMR敏感元件(52)、第三TMR敏感元件(53)、第四TMR敏感元件(54)四者组成的惠斯通电桥,所述第一TMR敏感元件(51)、第二TMR敏感元件(52)、第三TMR敏感元件(53)、第四TMR敏感元件(54)四者的敏感磁场的方向一致,所述两个高导磁部件(21)之间的间隙包括第一间隙(211)和第二间隙(212),所述第一TMR敏感元件(51)和第三TMR敏感元件(53)布置于第一间隙(211)中,所述第二TMR敏感元件(52)和第四TMR敏感元件(54)布置于第二间隙(212)中。

3. 根据权利要求1所述的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,其特征在于:所述微压电桥调制组件(6)包括微压悬臂梁(61),所述微压悬臂梁(61)分别和设于绝缘基底(1)上的第七连接电极(17)和第八连接电极(18)相连,所述微压悬臂梁(61)的两端分别设有微压电桥基座(62),所述微压悬臂梁(61)通过微压电桥基座(62)固定于绝缘基底(1)上,所述微压悬臂梁(61)的底面上位于第一间隙(211)和第二间隙(212)的位置均设有调制膜(63)。

4. 根据权利要求3所述的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,其特征在于:所述微压悬臂梁(61)采用压电晶体材料制成。

## 一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件

### 技术领域

[0001] 本发明涉及微弱信号检测技术领域,具体涉及一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,用于微弱电信号极低频低噪声的前置放大。

### 背景技术

[0002] 低噪声前置放大器通常作为第一级放大电路,目前已经被广泛地应用于各类无线电接收机和高灵敏电子探测设备中,其噪声水平很大程度上决定了整个放大电路乃至整个仪器设备的噪声相关性能。传统的低噪声放大器一般由于受到硅基半导体内在物理机制的限制,存在明显的 $1/f$ 噪声特性,频率越低,噪声越大,导致用于极低频( $<1\text{Hz}$ )信号的低噪声放大器其噪声水平很难达到亚 $\text{nV}$ 量级。在很多需要检测极低频微弱信号的情况下,难以达到要求。例如:海洋电场检测可应用于海洋地质勘探、水下目标探测、腐蚀检测等方面,但是由于海水导电,海洋电场频域越高,衰减越快,一般海洋电场检测的是极低频微弱信号,传统放大器难以满足海洋电场检测的需要。

[0003] 目前,在科研实验领域广为使用的是美国Stanford Research公司的SR560型低噪声前置电压放大器,该低噪声前置电压放大器存在明显的 $1/f$ 噪声特性,其拐点频率在 $100\text{Hz}$ 左右,典型低频本底噪声为 $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}@100\text{Hz}$ 、 $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}@10\text{Hz}$ 、 $40\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ 。此外,TI公司优秀的低噪声放大芯片opa211高频处噪声密度为 $1.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,其拐点频率在 $100\text{Hz}$ 左右,在 $1\text{Hz}$ 处的噪声密度为 $6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。为了减小低频 $1/f$ 噪声,国内外研究人员普遍采用斩波调制的方法。国内邱贺等人设计并研制了斩波前置放大器并进行了测试,在频带范围 $0.001\text{Hz}\sim 10\text{kHz}$ ,等效输入噪声密度为 $3.75\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。德国D.Drung等人设计并研制了一款斩波低噪声放大器,等效输入噪声密度达到 $0.73\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , $1/f$ 噪声的拐点频率为 $3\text{mHz}$ 。为了实现低频低噪声放大,国内外的专利也主要是通过斩波调制实现,尚未见其它基于新原理的极低频低噪声放大器的研究。但是,斩波放大器由于时钟馈通、电荷注入等非理性特性,输出会存在一定的残余失调,从而影响了它的性能。可见,传统低噪声放大器的噪声达到 $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右难以继续降低,且在极低频处的噪声可能更大,难以满足某些极低频微弱信号测量的需求。亟待开展基于新原理的极低频低噪声前置放大器研究。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题:针对现有技术的上述问题,提供一种能够实现亚纳伏级别的低噪声放大,磁场聚集放大效果好、抗外磁场干扰性能好、体积小、电-磁信号转化效率高的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件。

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明采用的技术方案为:

[0006] 一种利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件,包括绝缘基底和磁力线聚集器,所述磁力线聚集器的底面上绕设有底层线圈,所述磁力线聚集器的顶面上绕设有顶层线圈,所述磁力线聚集器呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底上形成的高导磁部件呈轴对称布置构成,两个高导磁部件之间设有间隙,所述绝缘基底上位于所

述间隙内设有磁场敏感元件,所述绝缘基底上位于磁场敏感元件的上方设有微压电桥调制组件。

[0007] 优选地,所述磁场敏感元件为由第一TMR敏感元件、第二TMR敏感元件、第三TMR敏感元件、第四TMR敏感元件四者组成的惠斯通电桥,所述第一TMR敏感元件、第二TMR敏感元件、第三TMR敏感元件、第四TMR敏感元件四者的敏感磁场的方向一致,所述两个高导磁部件之间的间隙包括第一间隙和第二间隙,所述第一TMR敏感元件和第三TMR敏感元件布置于第一间隙中,所述第二TMR敏感元件和第四TMR敏感元件布置于第二间隙中。

[0008] 优选地,所述微压电桥调制组件包括微压悬臂梁,所述微压悬臂梁分别和设于绝缘基底上的第七连接电极和第八连接电极相连,所述微压悬臂梁的两端分别设有微压电桥基座,所述微压悬臂梁通过微压电桥基座固定于绝缘基底上,所述微压悬臂梁的底面上位于第一间隙和第二间隙的位置均设有调制膜。

[0009] 优选地,所述微压悬臂梁采用压电晶体材料制成。

[0010] 本发明利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件具有下述优点:

[0011] 1、近年来高分辨力磁场传感器的性能指标不断提升,现已能够探测到pT量级的极微弱磁场。根据毕奥-萨伐尔定理,利用高分辨力磁场传感器探测通电线圈感生的磁场信号,可实现对微弱电信号的间接测量和放大,其极低频噪声有望突破至亚nV量级,相比传统低噪声放大电路优势明显,本发明包括绝缘基底和磁力线聚集器,磁力线聚集器的底面上绕设有底层线圈,磁力线聚集器的顶面上绕设有顶层线圈,磁力线聚集器呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底上形成的高导磁部件呈轴对称布置构成,两个高导磁部件之间设有间隙,绝缘基底上位于间隙内设有磁场敏感元件,绝缘基底上位于磁场敏感元件的上方设有微压电桥调制组件,利用高分辨力磁场传感器技术来实现低噪声前置放大,通过电流线圈和磁力线聚集器等结构把电信号高效地转化为磁信号,再用磁场敏感元件使得该器件对极低频电信号具有亚纳伏级别(nV级)的低噪声放大功能。

[0012] 2、本发明磁力线聚集器呈回形结构,使得磁场形成回路,能够提高磁场聚集放大效果。

[0013] 3、本发明的磁力线聚集器呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底上形成的高导磁部件呈轴对称布置构成,两个高导磁部件之间设有间隙,采用具有两个间隙的对称结构,外磁场对输出的影响被抵消,降低了外磁场对磁场探测的影响。

[0014] 4、本发明构成磁力线聚集器的高导磁部件采用高导磁材料生长在绝缘基底上,采用了采用MEMS工艺制备,减小了器件的尺寸,同时减小了被测磁场位置与电流线圈的距离,提高了电-磁信号转化效率。

## 附图说明

[0015] 图1为本发明实施例的主视结构示意图。

[0016] 图2为本发明实施例不含微压电桥调制组件部分的主视结构示意图。

[0017] 图3为本发明实施例的线圈原理结构示意图。

[0018] 图4为本发明实施例的惠斯通电桥结构示意图。

[0019] 图5为图1中A-A剖视结构示意图。

[0020] 图6为图1中B-B剖视结构示意图。

[0021] 图7为图1中C-C剖面结构示意图。

[0022] 图例说明:1、绝缘基底;11、第一连接电极;14、第一连接电极(11)~第四连接电极;15、第五连接电极;16、第六连接电极;17、第七连接电极;18、第八连接电极;2、磁力线聚集器;21、高导磁部件;211、第一间隙;212、第二间隙;3、底层线圈;4、顶层线圈;5、磁场敏感元件;51、第一TMR敏感元件;52、第二TMR敏感元件;53、第三TMR敏感元件;54、第四TMR敏感元件;6、微压电桥调制组件;61、微压悬臂梁;62、微压电桥基座;63、调制膜。

### 具体实施方式

[0023] 如图1、图2和图3所示,本实施例的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器包括绝缘基底1和磁力线聚集器2,磁力线聚集器2的底面上绕设有底层线圈3,磁力线聚集器2的顶面上绕设有顶层线圈4,底层线圈3和顶层线圈4一起形成绕设于磁力线聚集器2上的电流线圈,磁力线聚集器2呈回形结构且由两个采用高导磁材料生长在绝缘基底1上形成的高导磁部件21(21#1和21#2)呈轴对称布置构成,两个高导磁部件21(21#1和21#2)之间设有间隙,绝缘基底1上位于间隙内设有磁场敏感元件5,绝缘基底1上位于磁场敏感元件5的上方设有微压电桥调制组件6。本实施例中,磁力线聚集器2的两个高导磁部件21采用高导磁材料生长在绝缘基底1上,且两个高导磁部件21之间设有间隙,使得磁力线聚集器2构成具有间隙的回形结构,该结构有利于提高磁力线聚集器的磁场聚集效果。用于放置磁场敏感元件5的间隙可以布置在磁力线聚集器2的任意位置,都可以实现磁场聚集的功能。

[0024] 本实施例中,底层线圈3和顶层线圈4均包括不连续的线圈金属层,且底层线圈3的线圈金属层、顶层线圈4的线圈金属层之间依次通过高导磁部件21侧面的金属连接层(图中未绘制出)首尾相连,形成绕制在磁力线聚集器2上的电流线圈,电流线圈在激励信号的作用下会产生磁场,该磁场通过磁力线聚集器2聚集放大,在间隙处被磁场敏感元件5探测。

[0025] 参见如图1、图2和图3,底层线圈3和顶层线圈4构成的电流线圈与设于绝缘基底1上的第五连接电极15和第六连接电极16相连,微压电桥调制组件6和设于绝缘基底1上的第七连接电极17和第八连接电极18相连。

[0026] 如图4所示,磁场敏感元件5为由第一TMR敏感元件51、第二TMR敏感元件52、第三TMR敏感元件53、第四TMR敏感元件54四者组成的惠斯通电桥,第一TMR敏感元件51、第二TMR敏感元件52、第三TMR敏感元件53、第四TMR敏感元件54四者的敏感磁场的方向一致,两个高导磁部件21之间的间隙包括第一间隙211和第二间隙212,第一TMR敏感元件51和第三TMR敏感元件53布置于第一间隙211中,第二TMR敏感元件52和第四TMR敏感元件54布置于第二间隙212中。磁场敏感元件5采用由四个TMR(Tunnel Magneto Resistance,穿隧磁阻效应)敏感元件组成的惠斯通电桥,每一个TMR敏感元件都能够完成磁场探测,四个TMR敏感元件敏感磁场的方向一致,则该惠斯通电桥只对电流线圈产生的磁场敏感,不敏感外磁场,从而降低了外磁场对磁场探测的影响,与传统的检测元件相比,提高了磁场探测灵敏度。需要说明的是,磁场敏感元件5不限于TMR敏感元件构成惠斯通电桥,只要能够放入第一间隙211和第二间隙212中并能用于探测磁场的器件均可实现,只是在检测灵敏度上可能会有所不同。参见图4,本实施例中惠斯通电桥分别与设于绝缘基底1上的第一连接电极11、第二连接电极12、第三连接电极13、第四连接电极14相连。

[0027] 如图5、图6和图7所示,微压电桥调制组件6包括微压悬臂梁61,微压悬臂梁61分别

和设于绝缘基底1上的第七连接电极17和第八连接电极18相连,微压悬臂梁61的两端分别设有微压电桥基座62,微压悬臂梁61通过微压电桥基座62固定于绝缘基底1上,微压悬臂梁61的底面上位于第一间隙211和第二间隙212的位置均设有调制膜63。本实施例中,微压电桥调制组件6采用微压悬臂梁的形式,微压电桥基座62通过激光等手段键合在绝缘基底1上,微压悬臂梁61两端位于微压电桥基座62上,调制膜63位于微压悬臂梁61的下表面,并正对间隙(第一间隙211和第二间隙212)所处位置。在外部电源的激励下,微压悬臂梁61带动调制膜63上下振动,使得间隙(第一间隙211和第二间隙212)处的磁场被调制,通过调制膜63的调制使微弱极低频磁场在磁场敏感元件处为高频交变磁场,有效克服了极低频域内1/f噪声的不利影响,提高了磁场分辨力,提高了前置放大器件的低噪声性能。

[0028] 本实施例中,微压悬臂梁61采用压电晶体材料制成,压电晶体材料在外部电源的激励下能够使得微压悬臂梁61上下振动。此外,微压悬臂梁61也可以采用其他可以驱动微压悬臂梁61上下振动的材料制备。

[0029] 本实施例的利用高分辨力磁场探测的低噪声MEMS前置放大器件通过高分辨力、低噪声的磁场敏感元件5测量通电线圈产生的磁场,实现对微弱电信号的间接测量和放大,信号经过了输入电压 $V_i$ →输入电流 $I_i$ →被测磁场 $B$ →输出电压 $V_o$ 的几个过程。输出电压 $V_o$ 的表达式如式(1)所示:

$$[0030] \quad V_o = \frac{V_i}{R_i} KS \quad (1)$$

[0031] 式(1)中, $R_i$ 为输入电阻(即电流线圈的电阻), $V_i$ 为输入电压, $K$ 为输入电流的磁场转化率, $S$ 为磁敏感单元的灵敏度,输入电流的磁场转化率 $K$ 的表达式为 $K=B/I_i$ ,磁敏感单元的灵敏度 $S$ 表达式为 $S=V_o/B$ , $B$ 为被测磁场, $I_i$ 为输入电流。因此本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的电压放大倍数 $A$ 的表达式如式(2)所示:

$$[0032] \quad A = \frac{KS}{R_i} \quad (2)$$

[0033] 式(2)中, $K$ 为输入电流的磁场转化率, $S$ 为磁敏感单元的灵敏度, $R_i$ 为输入电阻(即电流线圈的电阻)。

[0034] 同时,本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的噪声主要来源与两部分:输入端的电流线圈热噪声 $e_{Ni}$ 和输出端的磁敏感元件输出噪声 $e_{No}$ ,此时本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的输出噪声 $e_o$ 的表达式如式(3)所示:

$$[0035] \quad e_o = \sqrt{(Ae_{Ni})^2 + e_{No}^2} \quad (3)$$

[0036] 式(3)中, $A$ 为本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的电压放大倍数, $e_{Ni}$ 为输入端的电流线圈热噪声, $e_{No}$ 为输出端的磁敏感元件输出噪声。因此,本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的等效输入噪声 $e_i$ 的表达式如式(4)所示:

$$[0037] \quad e_i = \frac{e_o}{A} = \sqrt{e_{Ni}^2 + \left(\frac{e_{No}}{A}\right)^2} = \sqrt{4kTR_i + \left(\frac{R_i e_{No}}{KS}\right)^2} \quad (4)$$

[0038] 式(4)中, $e_o$ 为本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的输出噪声, $A$ 为本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的电压放大倍数, $e_{Ni}$ 为输入端的电流线圈热噪声, $e_{No}$ 为输出端的磁敏感元件输出噪声, $K$ 为输入电流的磁场转化率, $S$ 为磁敏感单元的灵敏度, $R_i$ 为输入电阻

(即电流线圈的电阻), $k$ 为玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ , $T$ 为绝对温度。所以,若要降低本实施例的低噪声MEMS前置放大器件的等效输入噪声,需要降低电流线圈的电阻 $R_i$ ,增大输入电流磁场转化率 $K$ 、敏感元件输出噪声 $e_{No}$ 、磁敏感单元的灵敏度 $S$ 。在实际操作中,通过控制电流线圈的厚度,电流线圈的电阻 $R_i$ 可达到10欧姆以下;通过合理设计磁力线聚集器2的结构,输入电流磁场转化率可达到 $1 \text{nT/nA}$ 左右;且目前由TMR敏感元件制备的磁场敏感元件5的磁场灵敏度可达到 $200\text{--}400 \text{mV/mT}$ ,输出噪声达到 $4\text{--}10 \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右,可计算得等效输出噪声为 $0.4\text{--}0.7 \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右。同时,随着MEMS工艺和磁测量技术的高速发展,可继续提高该器件的噪声性能。

[0039] 综上所述,本实施例的低噪声MEMS前置放大器件通过采用高灵敏度的TMR敏感元件与磁力线聚集器2等软磁微结构,使得本实施例对极低频电信号具有亚纳伏级别的低噪声放大功能;而且本实施例采用高灵敏度、低噪声的TMR敏感元件探测电流产生的磁场,通过调制膜63的调制使微弱极低频磁场在磁场敏感元件5处为高频交变磁场,使得极低频信号在放大过程中被调制为高频信号,有效克服了极低频域内 $1/f$ 噪声的不利影响;本实施例的磁力线聚集器2采用对称结构,提高了灵敏度又降低了外磁场对电流探测的影响。

[0040] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,本发明的保护范围并不仅限于上述实施例,凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出,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前提下的若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

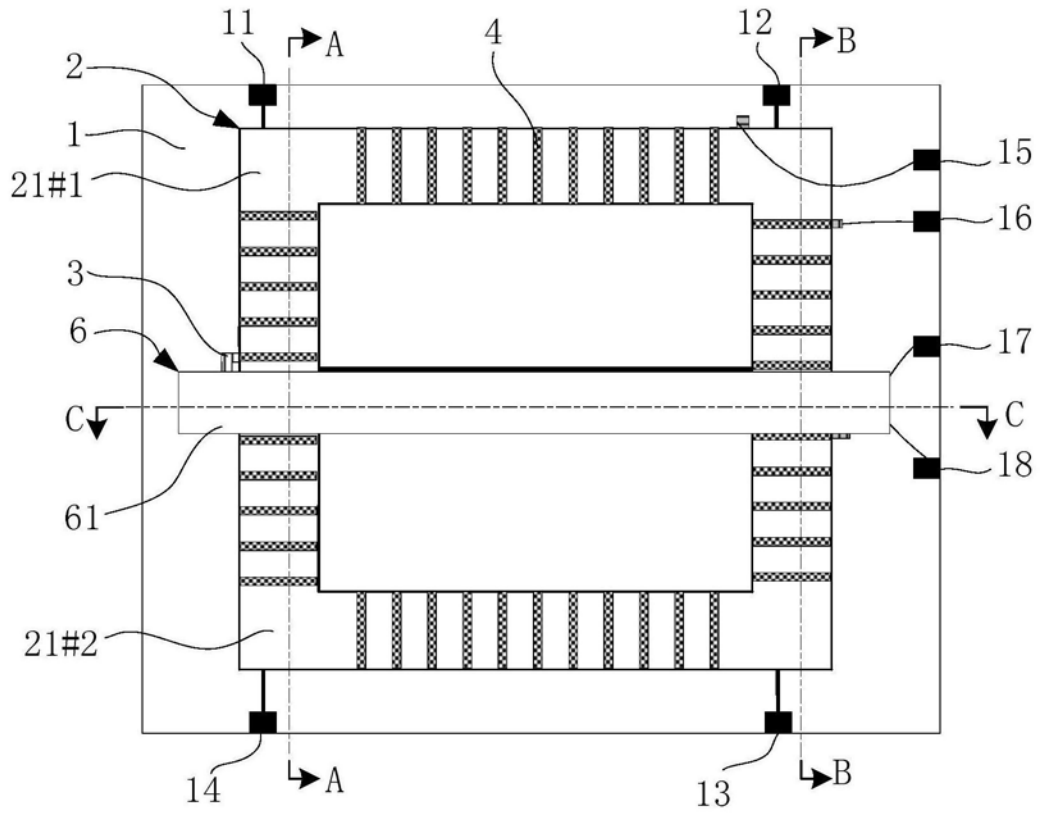


图1



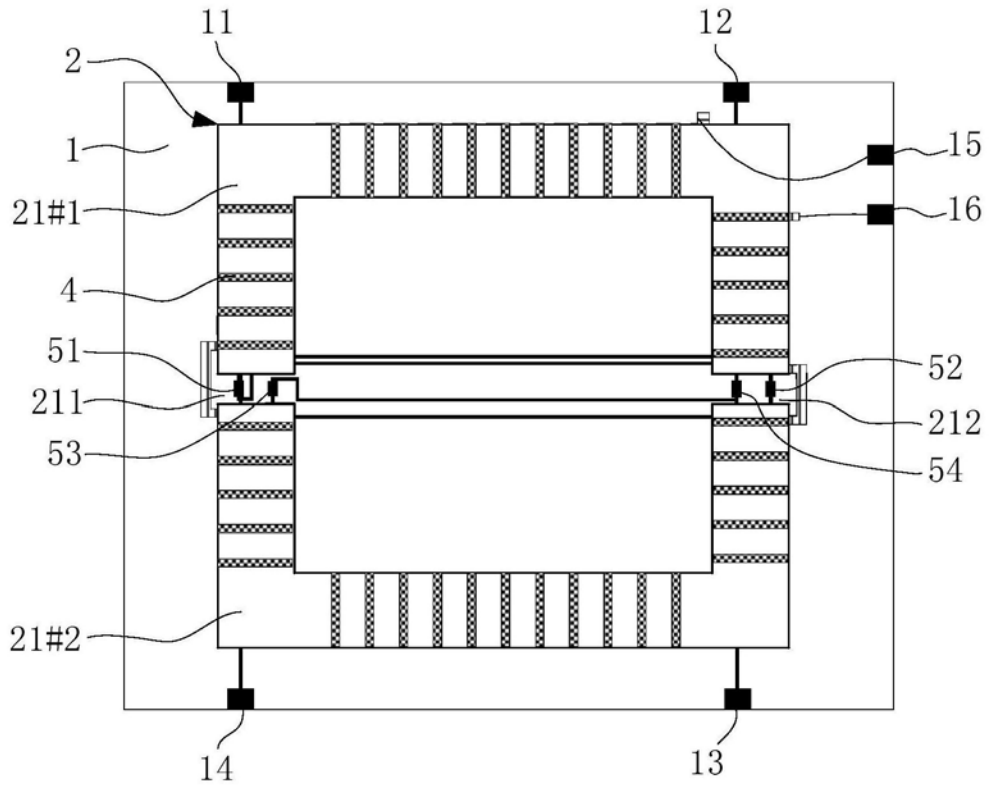


图2

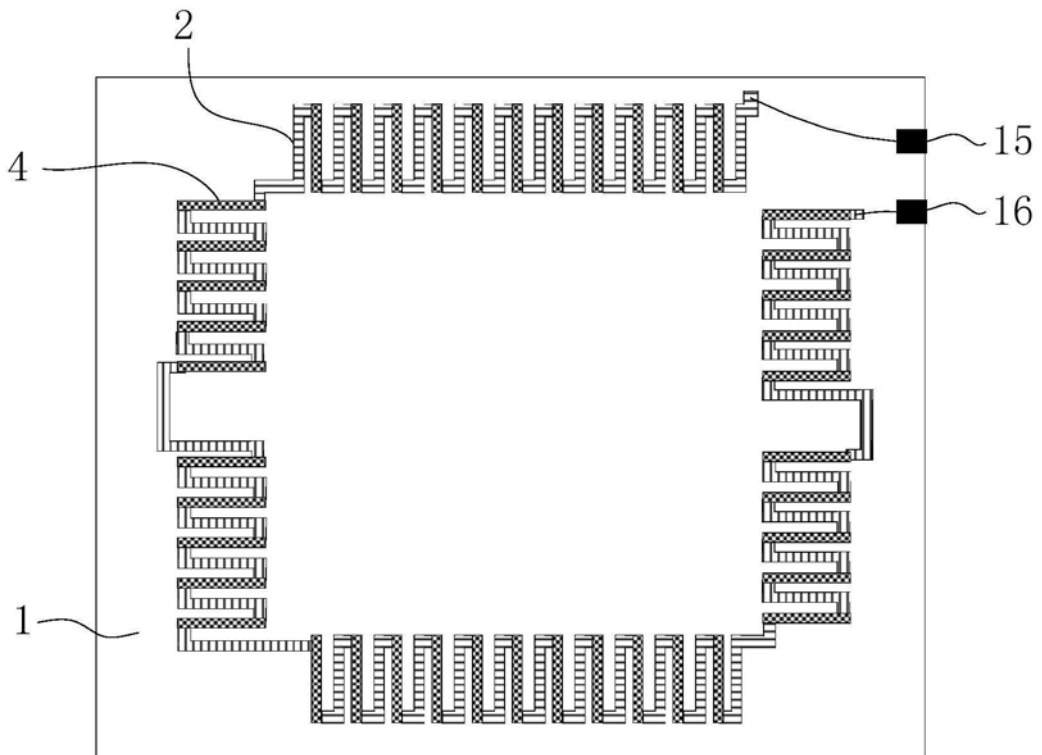


图3

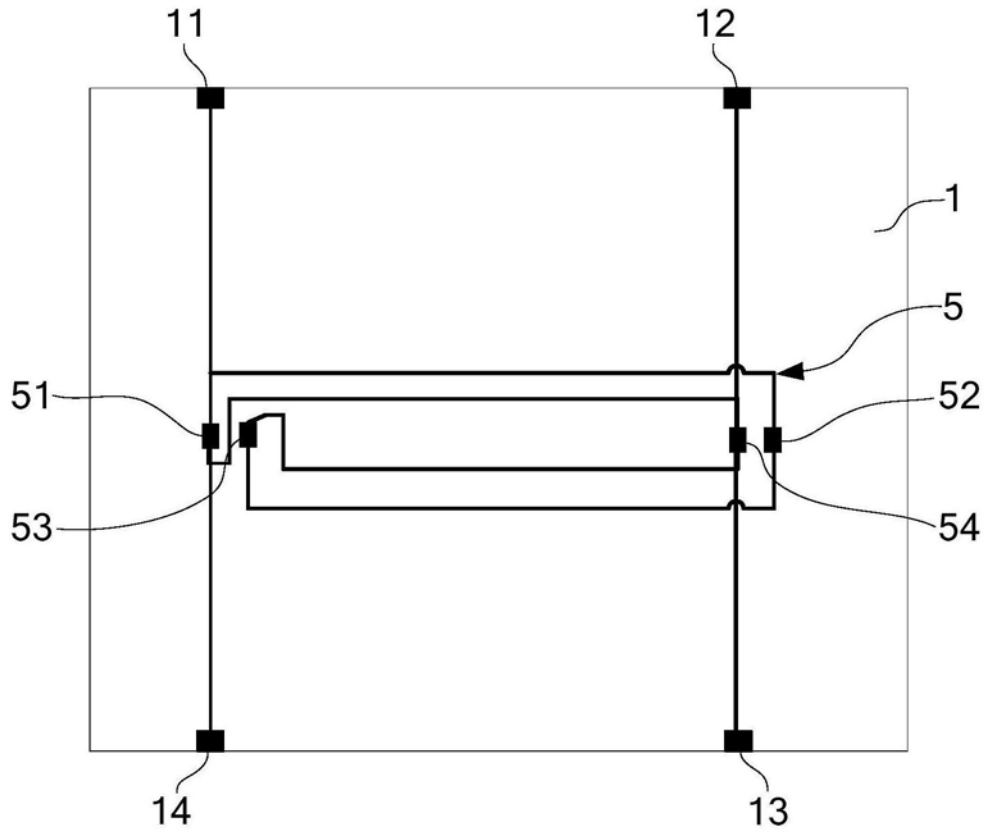


图4

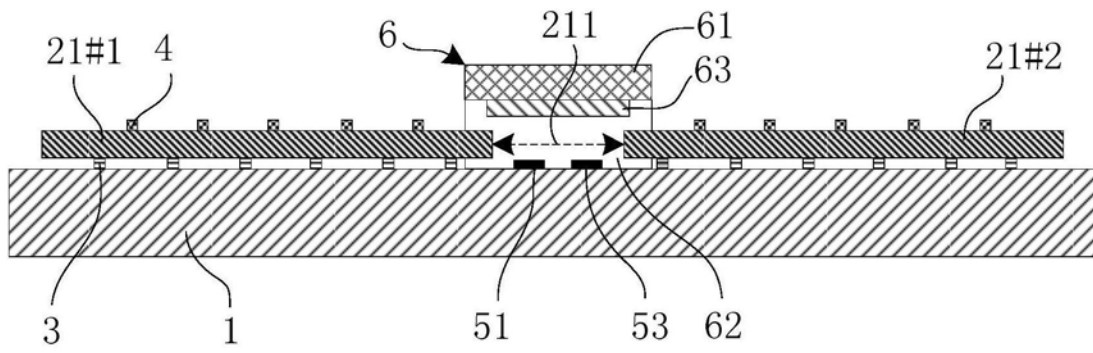


图5

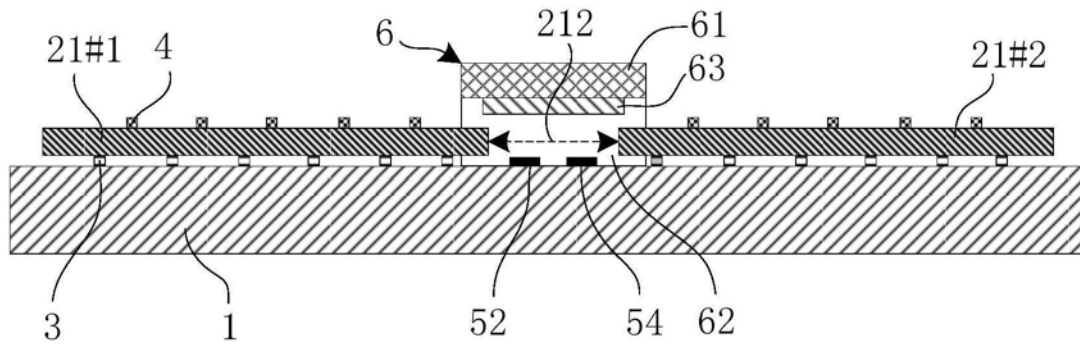


图6

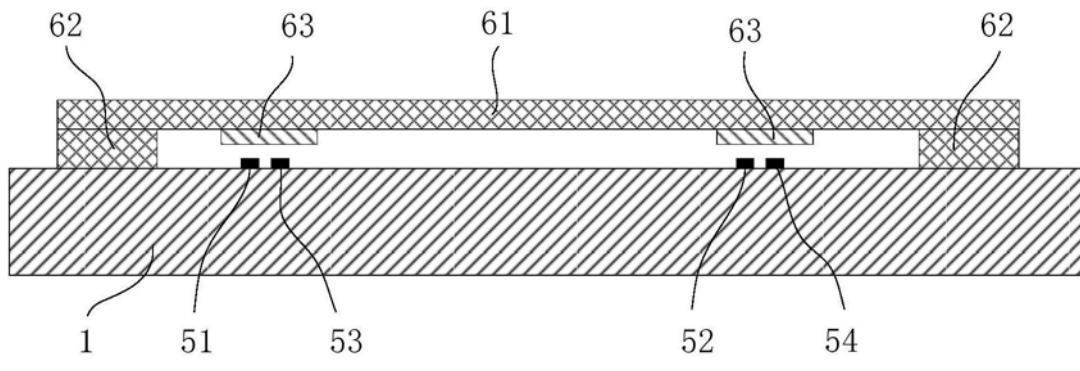


图7