



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109167177 B

(45) 授权公告日 2020.09.29

(21) 申请号 201810861606.2

CN 107221753 A, 2017.09.29

(22) 申请日 2018.08.01

CN 101459270 A, 2009.06.17

(65) 同一申请的已公布的文献号

EP 2750246 A1, 2014.07.02

申请公布号 CN 109167177 A

US 4987418 A, 1991.01.22

US 2002/0167456 A1, 2002.11.14

(43) 申请公布日 2019.01.08

刘海霞.可重构人工电磁媒质理论与应用关键技术.《中国博士学位论文电子期刊网》.2016,

(73) 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

李翔等.BST/YIC复合材料的相结构、介电性能和磁性能的研究.《无机材料学报》.2009,

(72) 发明人 赵乾 刘井泉 彭瑞光 孟永钢

Qian Zhao, ET AL. Mie resonance-based dielectric metamaterials.

(74) 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

《materialstoday》.2009,

代理人 赵天月

Thomas Lepetit, ET AL. All-dielectric metamaterial: A ferroelectric-based scheme in the microwave range.

(51) Int. Cl.

H01Q 15/14 (2006.01)

《ResearchGate》.2015,

(56) 对比文件

CN 202057292 U, 2011.11.30

审查员 范巧音

CN 102544693 A, 2012.07.04

权利要求书1页 说明书6页 附图3页

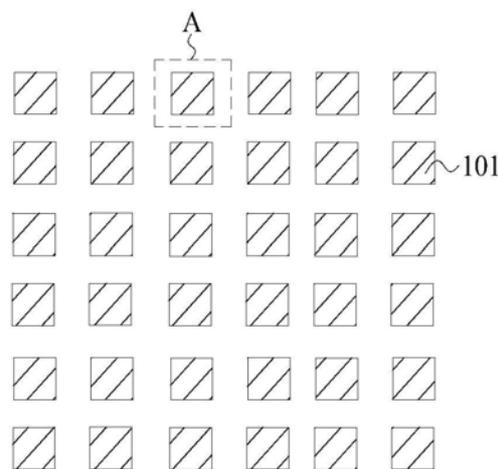
(54) 发明名称

可调谐全介质人工电磁材料及其应用

(57) 摘要

本发明提出了可调谐的全介质人工电磁材料及其应用。该可调谐的全介质人工电磁材料包括介质颗粒阵列，其包括多个呈点阵分布的介质颗粒，且介质颗粒由铁电材料形成；并且，介质颗粒的电磁谐振频率随着环境温度变化。本发明所提出的全介质人工电磁材料，利用其中的介质颗粒的电磁谐振特性，不仅在理论上可以实现任意频段下的人工电导体和人工磁导体，并可通过温度控制可对介质颗粒的介电常数进行调节，从而实现人工电/磁导体工作频率的调谐，或者在同一工作频率下实现介质颗粒阵列在人工电导体与人工磁导体之间的切换。另外，通过将包含单个介质颗粒的晶格单元的几何尺寸等比放大或缩小，能够使人工电/磁导体工作频率缩小或放大相同的倍数。

100



1. 一种基于可调谐的全介质人工电磁材料的器件,其特征在于,包括:

全介质人工电磁材料,包括介质颗粒阵列,所述介质颗粒阵列包括多个呈点阵分布的介质颗粒,且所述介质颗粒由铁电材料形成,所述介质颗粒在工作频率的范围内的介电常数大于50,并且,所述介质颗粒的电磁谐振频率随着环境温度变化;

温度控制组件,所述温度控制组件的内部设置有所述全介质人工电磁材料,且所述温度控制组件用于控制所述环境温度,并用于调谐所述全介质人工电磁材料的工作频率,或者,所述温度控制组件通过控制所述全介质人工电磁导体的环境温度,使所述器件在同一工作频率下在人工电导体和人工磁导体之间转换;

其中,当所述工作频率为所述介质颗粒的电谐振频率时,所述器件等效为人工电导体;当所述工作频率为所述介质颗粒的磁谐振频率时,所述器件等效为人工磁导体。

2. 根据权利要求1所述的器件,其特征在于,所述多个呈点阵分布的介质颗粒的间隙构成框架,且形成所述框架的绝缘材料的介电常数为0.8~1.2、磁导率为1。

3. 根据权利要求1所述的器件,其特征在于,所述全介质人工电磁材料的晶格单元的周期小于工作频率的电磁波波长的 $1/3$ 。

4. 根据权利要求1所述的器件,其特征在于,所述环境温度为-10~100摄氏度。

5. 根据权利要求1所述的器件,其特征在于,所述介质颗粒的电谐振频率和磁谐振频率,都与所述人工电磁材料的晶格单元的几何尺寸成反比;将所述晶格单元的几何尺寸等比放大或缩小,所述人工电/磁导体在工作频率相应地缩小或放大相同的倍数。

可调谐全介质人工电磁材料及其应用

技术领域

[0001] 本发明涉及人工电磁介质技术领域,具体的,本发明涉及可调谐的全介质人工电磁材料及其应用。更具体的,本发明涉及可调谐的全介质人工电磁材料、基于可调谐的人工电磁材料的器件。

背景技术

[0002] 由于具有独特的电磁特性,完美电导体和完美磁导体在信号传输、天线及军事方面具有或潜在具有很大的应用价值。具体的,在太赫兹及其以下的频段下,如金、银等导电性能良好的金属导体的电磁特性近乎完美等效于完美电导体,而通过人工构造全反射介质颗粒阵列的方式来模拟完美电导体,被称作“人工电导体”。不同的是,自然界中没有电磁特性接近于完美磁导体的天然材料,因此,通常采用金属微结构单元或介质颗粒构造高阻抗表面的方式来模拟完美磁导体,所以高阻抗表面也被称作“人工磁导体”。

[0003] 目前,人工磁导体存在一些缺陷与不足:例如基于金属微结构单元的人工磁导体的工作频段被限制在红外波段以下,而可见光波段的人工磁导体难以实现;基于介质颗粒的人工磁导体的工作频率是固定的,一经设计与制造其工作频率就无法被改变。

发明内容

[0004] 本发明是基于发明人的下列发现而完成的:

[0005] 本发明的发明人经过深入研究,设计出一种全介质人工电磁材料的结构,通过介质颗粒的Mie谐振效应控制入射电磁波的反射系数的幅值与相位,当介质颗粒处于电谐振或磁谐振态时,介质颗粒阵列对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1,相位为180度或0度,等效为人工电导体或人工磁导体;通过调节环境温度使介质颗粒的反射频率特性曲线发生移动,可以实现对人工电导体或人工磁导体的工作频率的调谐,或者在同一工作频率下实现介质颗粒阵列在人工电导体与人工磁导体之间的切换;另外,通过对包含单个介质颗粒的晶格单元的几何尺寸进行等比放大或等比缩小,能够相应地使人工电导体或人工磁导体的工作频率缩小或放大相同的倍数,如此,在理论上可实现任意工作频段的人工电导体和人工磁导体,本发明具有很高的工程应用价值。

[0006] 有鉴于此,本发明的一个目的在于提出一种工作频率具有可调谐性、对温度具有敏感性或理论上可实现任意频率的电磁谐振频率的全介质人工电磁材料。

[0007] 在本发明的第一方面,本发明提出了一种可调谐的全介质人工电磁材料。

[0008] 根据本发明的实施例,所述全介质人工电磁材料包括介质颗粒阵列,所述介质颗粒阵列包括多个呈点阵分布的介质颗粒,且所述介质颗粒由铁电材料形成;并且,所述介质颗粒的电磁谐振频率随着环境温度变化。

[0009] 发明人经过研究发现,本发明实施例的全介质人工电磁材料,利用其中的介质颗粒的电磁谐振特性,不仅在理论上可以实现任意频段下的人工电导体和人工磁导体,并可通过温度控制可对介质颗粒的介电常数进行调节,从而对电谐振频率和磁谐振频率进行调

谐,进而实现器件在人工电导体与人工磁导体之间的切换。

[0010] 另外,根据本发明上述实施例的全介质人工电磁材料,还可以具有如下附加的技术特征:

[0011] 根据本发明的实施例,所述多个呈点阵分布的介质颗粒的间隙构成框架,且形成所述框架的绝缘材料的介电常数为0.8~1.2、磁导率为1。

[0012] 根据本发明的实施例,所述介质颗粒在工作频率的范围内的介电常数值大于50。

[0013] 根据本发明的实施例,所述全介质人工电磁材料的晶格单元的周期小于工作频率的电磁波波长的1/3。

[0014] 在本发明的第二方面,本发明提出了一种基于可调谐的人工电磁材料的器件。

[0015] 根据本发明的实施例,所述器件包括:温度控制组件,所述温度控制组件的内部设置有上述的全介质人工电磁材料,且所述温度控制组件用于控制所述全介质人工电磁材料的环境温度。

[0016] 发明人经过研究发现,本发明实施例的基于可调谐的全介质人工电磁材料的器件,通过温度控制系统控制介质颗粒阵列所处的环境温度,从而对介质颗粒的电谐振频率和磁谐振频率进行调谐,在理论上可等效出任意频段下的人工电导体和人工磁导体。本领域技术人员能够理解的是,前面针对可调谐的人工电磁材料所描述的特征和优点,仍适用于该基于可调谐的人工电磁材料的器件,在此不再赘述。

[0017] 另外,根据本发明上述实施例的器件,还可以具有如下附加的技术特征:

[0018] 根据本发明的实施例,所述工作频率为所述介质颗粒的电谐振频率时,所述器件等效为人工电导体;所述工作频率为所述介质颗粒的磁谐振频率时,所述器件等效为人工磁导体。

[0019] 根据本发明的实施例,所述环境温度为-10~100摄氏度。

[0020] 根据本发明的实施例,温度控制组件用于调谐所述人工电磁导体的工作频率。

[0021] 根据本发明的实施例,所述温度控制组件通过控制所述全介质人工电磁导体的环境温度,使所述器件在同一工作频率下在人工电导体和人工磁导体之间转换。

[0022] 根据本发明的实施例,所述介质颗粒的电谐振频率和磁谐振频率,都与所述人工电磁材料的晶格单元的几何尺寸成反比;将所述晶格单元的几何尺寸等比放大或缩小,所述人工电/磁导体的工作频率相应地缩小或放大相同的倍数。

[0023] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0024] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0025] 图1是本发明一个实施例的可调谐的人工电磁材料的横截面结构示意图;

[0026] 图2是本发明另一个实施例的可调谐的人工电磁材料的横截面结构示意图;

[0027] 图3是本发明一个实施例的晶格单元的斜视结构示意图;

[0028] 图4是本发明一个实施例的基于可调谐的人工电磁材料的器件的横截面结构示意图;

- [0029] 图5是本发明另一个实施例的基于可调谐的人工电磁材料的器件的纵截面结构示意图；
- [0030] 图6是本发明一个实施例的人工电磁材料对入射波的反射系数关系图，其中，
- [0031] (a) 介电常数分别为108和116的介质颗粒，其反射系数的幅值与入射波的关系图，
- [0032] (b) 介电常数分别为108和116的介质颗粒，其反射系数的相位与入射波的关系图；
- [0033] 图7是本发明另一个实施例的人工电磁材料对入射波的反射系数关系图，其中，
- [0034] (a) 介电常数分别为108和116的介质颗粒，其反射系数的幅值与入射波的关系图，
- [0035] (b) 介电常数分别为108和116的介质颗粒，其反射系数的相位与入射波的关系图。
- [0036] 附图标记
- [0037] 100 介质颗粒阵列
- [0038] 101 介质颗粒
- [0039] 200 框架
- [0040] A 晶格单元
- [0041] 300 温度控制组件

具体实施方式

[0042] 下面详细描述本发明的实施例，本技术领域人员会理解，下面实施例旨在用于解释本发明，而不应视为对本发明的限制。除非特别说明，在下面实施例中没有明确描述具体技术或条件的，本领域技术人员可以按照本领域内的常用的技术或条件或按照产品说明书进行。

[0043] 在本发明的一个方面，本发明提出了一种可调谐的全介质人工电磁材料。

[0044] 根据本发明的实施例，参考图1，全介质人工电磁材料包括介质颗粒阵列100，该介质颗粒阵列100包括多个呈点阵分布的介质颗粒101，且介质颗粒101由铁电材料形成；并且，介质颗粒101的电磁谐振频率随着环境温度变化。需要说明的是，本文中“点阵分布”具体是指多个介质颗粒101间隔分布且沿着几个固定的方向呈周期性排列。

[0045] 本发明的发明人经过深入研究，设计出一种全介质人工电磁材料的结构，通过介质颗粒101的Mie谐振效应控制入射电磁波的反射系数的幅值与相位，当介质颗粒处于电谐振或磁谐振态时，介质颗粒阵列100对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1，相位为180度或0度，可等效为人工电导体或人工磁导体；并通过调节环境温度使介质颗粒101的反射频率特性曲线发生移动，可实现对人工电导体或人工磁导体工作频率的调谐，或者在同一工作频率下调节环境温度，从而实现介质颗粒阵列100在人工电导体与人工磁导体之间的切换。如此，在理论上可实现任意工作频段的人工电导体和人工磁导体，本发明具有很高的工程应用价值。

[0046] 根据本发明的实施例，参考图2，多个呈点阵分布的介质颗粒101的间隙构成框架200，且形成框架200的绝缘材料的介电常数为0.8~1.2、磁导率为1，如此，框架200不仅能支撑介质颗粒101并维持介质颗粒阵列100的周期性空间阵列结构，其低介电常数不会影响到介质颗粒阵列100的电磁谐振特性。

[0047] 根据本发明的实施例，形成介质颗粒101的铁电材料的具体种类不受特别的限制，只要该种类的铁电材料能使介质颗粒101的电磁谐振频率能随着环境温度变化即可，具体

例如铁电陶瓷材料等,本领域技术人员可根据所需的电磁谐振频率的范围进行相应地选择,在此不再赘述。

[0048] 在本发明的一些实施例中,介质颗粒101在工作频率的范围内的介电常数值可大于50,如此,低介电常数的绝缘材料形成的框架200不会影响到高介电常数的介质颗粒101的电磁谐振特性。需要说明的是,本文中的“工作频率”具体是指介质颗粒阵列100具有电磁谐振特性的频率范围。

[0049] 根据本发明的实施例,介质颗粒101的具体形状可为长方体或者圆柱体等,本领域技术人员根据不同横截面形状的介质颗粒阵列100的实际电磁谐振特性进行相应地设计和选择。在本发明的一些实施例中,参考图3,介质颗粒101可为长方体且其横截面形状为正方形,其中,正方形的边长为 a ,长方体的高为 H ,如此,能够使介质颗粒101的电谐振频率和磁谐振频率较为接近,从而方便对介质颗粒阵列100所处的环境温度进行调控,在较小的温度变化范围内即可实现介质颗粒阵列100在人工电导体与人工磁导体之间的切换。

[0050] 根据本发明的实施例,参考图3,全介质人工电磁材料的晶格单元 A 的周期 P 小于工作频率的电磁波波长的 $1/3$,如此,宏观的多个晶格单元 A 周期性排列,对相应工作频段内的电磁波有显著的电磁响应。

[0051] 根据本发明的实施例,介质颗粒阵列100的点阵分布的具体类型不受特别的限制,具体例如正方形点阵分布、六方形点阵分布等,本领域技术人员可根据介质颗粒阵列100的实际电磁谐振特性进行相应地选择,在此不再赘述。根据本发明的实施例,介质颗粒阵列100中介质颗粒101的具体个数不受特别的限制,图1、图2和图4中仅以36个介质颗粒101为示例,本领域技术人员可根据所需等效出的人工电导体和人工磁导体的电磁性能要求进行相应地选择,在此不再赘述。

[0052] 综上所述,根据本发明的实施例,本发明提出了一种全介质人工电磁材料,利用其中的介质颗粒的电磁谐振特性,不仅在理论上可以实现任意频段下的人工电导体和人工磁导体,并可通过温度控制可对介质颗粒的介电常数进行调节,还能对电谐振频率和磁谐振频率进行调谐,从而实现器件在人工电导体与人工磁导体之间的切换。

[0053] 在本发明的另一个方面,本发明提出了一种基于可调谐的全介质人工电磁材料的器件。

[0054] 根据本发明的实施例,参考图4和图5,该器件包括温度控制组件300,其中,温度控制组件300的内部设置有上述的全介质人工电磁材料100,且温度控制组件300用于控制全介质人工电磁材料100的环境温度。

[0055] 根据本发明的实施例,环境温度的具体范围不受特别的限制,本领域技术人员可根据形成介质颗粒101的铁电材料的具体种类材料进行相应地选择。在本发明的一些实施例中,对于铁电陶瓷材料等铁电材料,环境温度可为 $-10\sim 100$ 摄氏度,如此,根据不同铁电材料对温度的灵敏性不同,可选择合适的环境温度范围去调谐介质颗粒101的电谐振频率和磁谐振频率。

[0056] 根据本发明的实施例,温度控制组件300用于控制全介质人工电磁材料100的环境温度,如此,可调谐介质颗粒101的电谐振频率和磁谐振频率。在本发明的一些实施例中,在某一固定的环境温度(例如25摄氏度)下,工作频率为介质颗粒101的电谐振频率时,器件等效为人工电导体,如此,通过对环境温度的控制,可以调谐人工电导体在工作频率。在本发

明的另一些实施例中,在某一固定的环境温度(例如25摄氏度)下,工作频率为介质颗粒101的磁谐振频率时,所述器件等效为人工磁导体,如此,通过对环境温度的控制,还可以调谐人工磁导体的工作频率。

[0057] 根据本发明的实施例,温度控制组件300也可用于调谐全介质人工电磁导体的工作频率,如此,将工作频率固定再调整环境温度也可以实现器件在人工电导体和人工磁导体之间转换。在本发明的一些实施例中,在某一固定的工作频率下,通过温度控制组件300控制全介质人工电磁材料100的环境温度,可使介质颗粒101的电谐振频率或磁谐振频率与工作频率相等,从而实现器件在人工电导体和人工磁导体之间转换。

[0058] 根据本发明的实施例,介质颗粒101的电谐振频率和磁谐振频率,都与人工电磁材料的晶格单元A的几何尺寸成反比。如此,通过对包含单个介质颗粒101的晶格单元A的几何尺寸进行等比放大或等比缩小,能够相应地使人工电导体或人工磁导体的工作频率缩小或放大相同的倍数。

[0059] 在本发明的一些实施例中,参考图6,通过电磁仿真模拟可计算出,晶格单元A的几何尺寸为 $a=120\mu\text{m}$ 、 $H=200\mu\text{m}$ 、 $P=240\mu\text{m}$ 时,当介质颗粒101的介电常数被设置为108时(图6中的实线),在327.5GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为180度,此时的器件等效于人工电导体,而在340.0GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为0度,此时的器件等效于人工磁导体;当介质颗粒101的介电常数被设置为116时(图6中的虚线),在316.0GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为180度,此时的器件等效于人工电导体,而在327.5GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为0度,此时的器件等效于人工磁导体。如此,通过调节人工电磁材料中介质颗粒101的介电常数,能对人工电磁材料工作频率进行调谐,还能实现在同一环境温度下器件性能在人工电导体与人工磁导体之间切换。

[0060] 在本发明的另一些实施例中,参考图7,通过电磁仿真模拟可计算出,晶格单元A的几何尺寸被等比放大30倍后为 $a=3.6\text{mm}$ 、 $H=6\text{mm}$ 、 $P=7.2\text{mm}$,当介质颗粒101的介电常数被设置为108时(图7中的实线),在10.9GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为180度,此时的器件等效于人工电导体,而在11.3GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为0度,此时的器件等效于人工磁导体;当介质颗粒101的介电常数被设置为116时(图7中的虚线),在10.5GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为180度,此时的器件等效于人工电导体,而在10.9GHz附近的人工电磁材料对入射电磁波的反射系数的幅值接近于1且反射相位为0度,此时的器件等效于人工磁导体。如此,将晶格单元A的几何尺寸等比放大30倍后,人工电磁材料的工作频率也相应地缩小了30倍,人工电磁材料的工作频率与晶格单元A的几何尺寸成反比,将晶格单元A的几何尺寸等比放大或缩小,人工电磁材料的工作频率也会相应地缩小或放大相同的倍数。

[0061] 根据本发明的实施例,器件的具体类型不受特别的限制,本领域技术人员可根据人工电磁材料的具体电磁性能进行相应地设计和选择,在此不再赘述。

[0062] 综上所述,根据本发明的实施例,本发明提出了一种基于可调谐的全介质人工电磁材料的器件,通过温度控制系统控制介质颗粒阵列所处的环境温度,从而对介质颗粒的

电谐振频率和磁谐振频率进行调谐,在理论上可等效出任意频段下的人工电导体和人工磁导体。本领域技术人员能够理解的是,前面针对可调谐的人工电磁材料所描述的特征和优点,仍适用于该基于可调谐的人工电磁材料的器件,在此不再赘述。

[0063] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0064] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0065] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

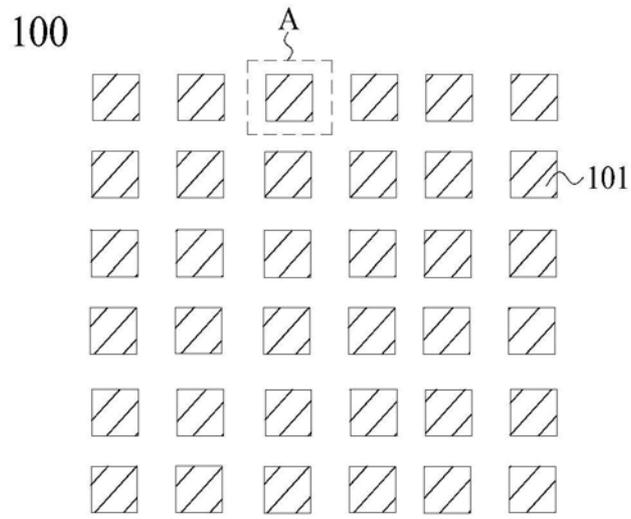


图1

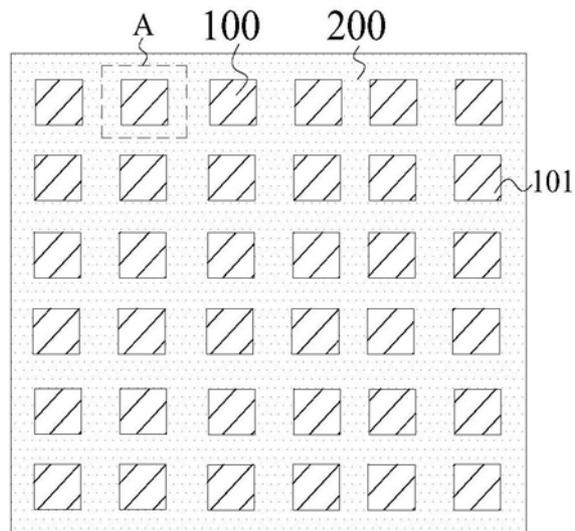


图2

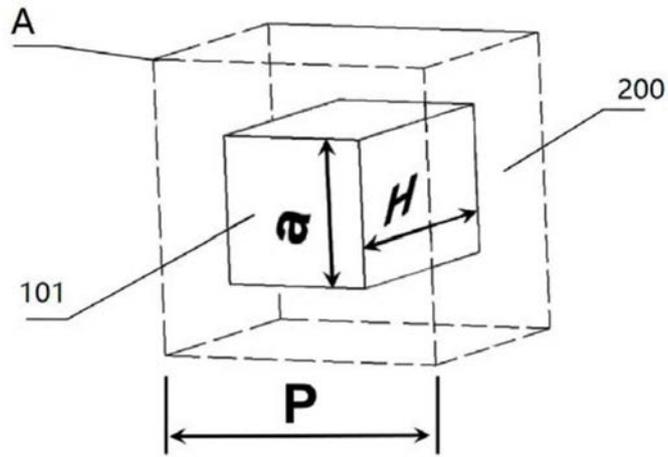


图3

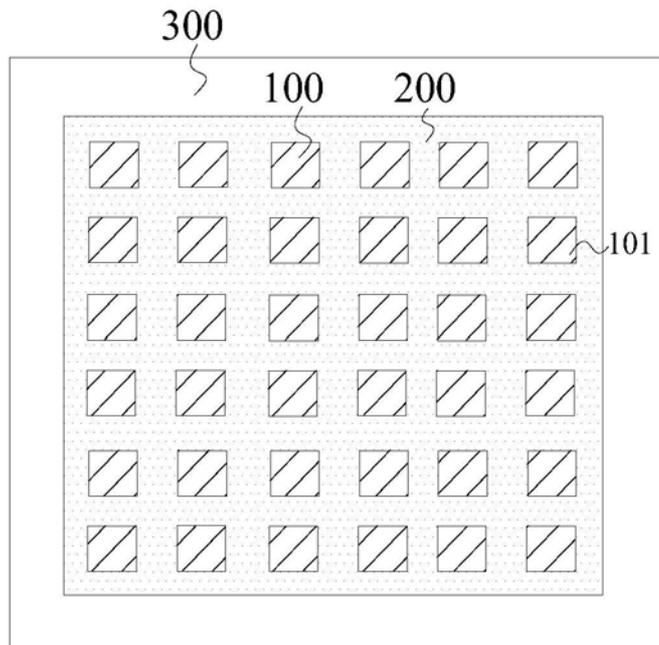


图4

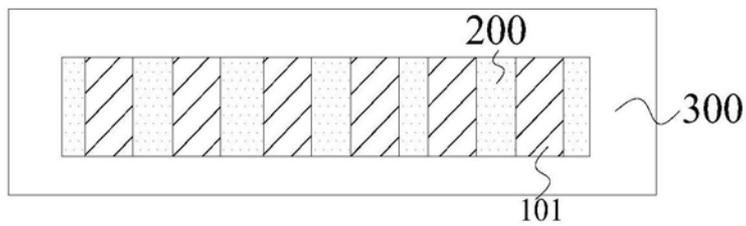


图5

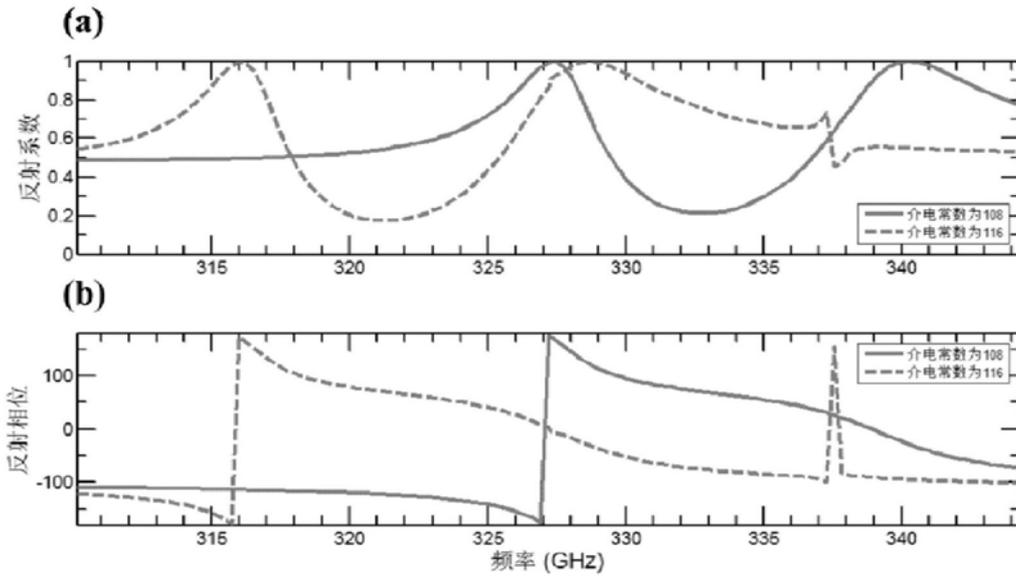


图6

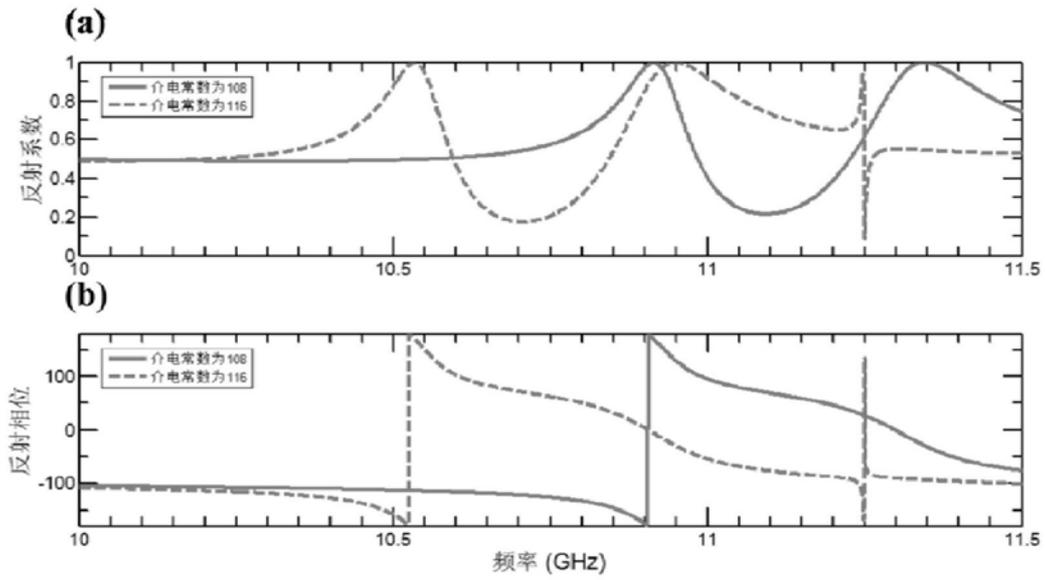


图7