



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114609888 B

(45) 授权公告日 2022. 10. 25

(21) 申请号 202210223881.8

审查员 沈骧一

(22) 申请日 2022.03.07

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114609888 A

(43) 申请公布日 2022.06.10

(73) 专利权人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)

西源大道2006号

(72) 发明人 黄勇军 陈鼎威 郑翔 闫兴

文光俊 李建

(74) 专利代理机构 成都虹盛汇泉专利代理有限

公司 51268

专利代理师 王伟

(51) Int. Cl.

G04F 5/14 (2006.01)

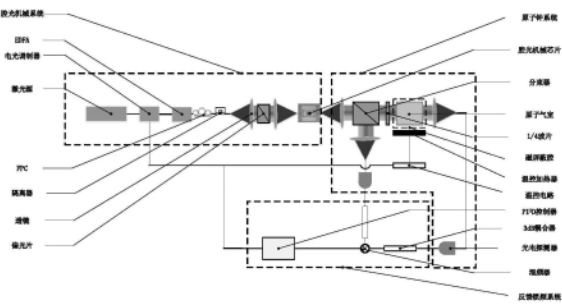
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源

(57) 摘要

本发明公开了一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源,具体基于腔光机械系统的高效光机械振荡、光弹性效应以及全光链路特性,利用腔光机械振荡器代替CSAC架构中的MEMS振荡器,具有超高稳定度,可以有效弥补CSAC架构的缺陷,减小对电子电路及器件的依赖,进一步改善CSAC的短时间稳定性,降低CSAC的功耗;同时利用CSAC架构中铯/铷原子的超高稳定度射频信号输出,可以有效解决光机械振荡器输出信号稳定度差的技术问题,具有尺寸小,功耗低,系统简单,输出信号有超高稳定度的特点。



1. 一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源,具体包括:依次连接的腔光机械系统、原子钟系统及反馈锁频系统;其中,

所述的腔光机械系统包括:依次连接的激光源、电光调制器、掺铒光纤放大器、偏振控制器、隔离器、透镜、偏光片及腔光机械芯片;

所述的原子钟系统包括:依次连接的分束器、1/4玻片、原子气室、磁屏蔽腔、温控加热器、温控电路及光电探测器;

所述的反馈锁频系统包括:依次连接的3dB耦合器、混频器及PI<sup>2</sup>D控制器;

所述的反馈锁频系统将原子气室输出的超高稳定度微波信号与腔光机械系统的机械振荡谐波信号混频产生差频容错信号,差频容错信号在通过PI<sup>2</sup>D控制电路后控制电光调制器和温控电路,最终输出所需的超高稳定度射频信号。

2. 根据权利要求1所述的一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源,其特征在于,所述的腔光机械芯片具体为:纳米悬梁臂微腔、光子晶体微腔、微盘、微环或微球型腔光机械系统芯片。

3. 根据权利要求1所述的一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源,其特征在于,所述的原子气室填充气体具体为铷、铯、钠、钾、碘或氢蒸汽。

## 一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源

### 技术领域

[0001] 本发明属于光生微波技术领域,具体涉及一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源。

### 背景技术

[0002] 微波源尤其是基于腔光机械振荡器实现的低相噪、多谐波芯片级微波源在军事和民用领域有重要的应用价值,可用于高精度授时、导航与定位及通信、雷达探测等领域。

[0003] 目前唯一被提出且实现的芯片级微波源是美国提出的芯片级原子钟(Chip-Scale Atomic Clock,CSAC)架构,该架构基于利用MEMS振荡器产生的微波信号以及铯/铷原子的超精细分裂原子能级跃迁频率与入射双色散激光的差频相近时产生相互作用(相干布居囚禁,CPT)实现了芯片级原子钟的制备,但是该方案仍然存在功耗大,系统复杂,可靠性低等问题。

[0004] 腔光机械(Cavity Optomechanics)系统是一种在微纳尺度上同时存在光学腔体模式和机械振荡模式,且这两种模式之间具有强耦合相互作用效应的新型微腔系统。基于微纳腔光机械系统中光-物质相互作用效应,可实现机械振子的量子基态冷却、多模腔光机械系统的量子纠缠、光学电磁诱导透明及慢光传播等独特物理现象,在经典物理、量子物理等基础研究领域科学意义重大,在精密测量等技术领域应用前景广泛。同时,腔光机械系统中具有异常丰富的非线性动力学特性,在一定功率激光作用下能产生参数光机械振荡,以及多模式/多谐振相互作用并形成混沌、频率同步等现象,从而输出稳定的机械振荡信号,这为设计实现芯片级低功耗高性能射频信号源提供了一种崭新的技术解决方案。

[0005] 基于腔光机械系统实现微波源主要有注入锁频和反馈锁频两种实现方式。采用注入锁频方式输出信号的低频相位噪声特性和频率稳定度可以实现大幅度改善( $-87\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{Hz}$ );且输出信号的频率将跟随外部参考信号源产生频偏,其频偏的范围(即锁频范围)随着外部参考信号源的调制强度的增加而变大,同时当光机械信号基模被锁定时,其高阶谐波模式均可被锁定,能输出众多稳定的谐波信号谱。

[0006] 采用反馈锁频技术能极大改善光机械振荡信号的频率稳定度( $-95\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{Hz}$ ),达到稳定光机械振荡信号的目的。采用注入锁频和反馈锁频技术均能较大程度改善光机械振荡信号的相位噪声特性,但是常规外部电学参考信号源设备庞大,难以实现芯片级集成。而小型化的石英晶振、压控振荡器等与光机械振荡输出信号稳定度相当或更差,基于此类外部参考信号的锁频技术无法从本质上改善光机械振荡射频信号的频率稳定度。

### 发明内容

[0007] 为解决现有的芯片级微波源中存在的加工工艺复杂、尺寸大、可靠性差,频率稳定度低等关键技术难题,本发明提出了一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源。

[0008] 本发明具体的技术方案为:一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源,具体包括:依次连接的腔光机械系统、原子钟系统及反馈锁频系统;其中,

[0009] 所述的腔光机械系统包括：依次连接的激光源、电光调制器、掺铒光纤放大器(EDFA)、偏振控制器(FPC)、隔离器、透镜、偏光片及腔光机械芯片；

[0010] 所述的原子钟系统包括：依次连接的分束器、1/4玻片、原子气室、磁屏蔽腔、温控加热器、温控电路及光电探测器；

[0011] 所述的反馈锁频系统包括：依次连接的3dB耦合器、混频器及PI<sup>2</sup>D控制器；

[0012] 所述的反馈锁频系统将原子气室输出的超高稳定度微波信号与腔光机械系统的机械振荡谐波信号混频产生差频容错信号，差频容错信号在通过PI<sup>2</sup>D控制电路后控制电光调制器和温控电路，最终输出所需的超高稳定度射频信号。

[0013] 进一步的，所述的腔光机械芯片具体为：纳米悬梁臂微腔、光子晶体微腔、微盘、微环或微球型腔光机械系统芯片。

[0014] 进一步的，所述的原子气室填充气体具体为铷、铯、钠、钾、碘或氢蒸汽。

[0015] 本发明的有益效果：本发明的光生微波源基于腔光机械系统的高效光机械振荡、光弹性效应以及全光链路特性，利用腔光机械振荡器代替CSAC架构中的MEMS振荡器，具有超高稳定度，可以有效弥补CSAC架构的缺陷，减小对电子电路及器件的依赖，进一步改善CSAC的短时间稳定性，降低CSAC的功耗；同时利用CSAC架构中铷/铯原子的超高稳定度射频信号输出，可以有效解决光机械振荡器输出信号稳定度差的技术问题，具有尺寸小，功耗低，系统简单，输出信号有超高稳定度的特点。

## 附图说明

[0016] 图1是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源整体结构示意图；

[0017] 图2是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源工作原理示意图；

[0018] 图3是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源腔光机械系统谐振腔部分结构示意图；

[0019] 图4是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源的腔光机械结构示意图；

[0020] 图5是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源的光学谐振模式示意图；

[0021] 图6是本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源腔光机械结构机械振子的水平方向的机械谐振模式示意图。

## 具体实施方式

[0022] 以下结合附图对本发明的优选实施例进行说明，应当理解，此处所描述的优选实施例仅用于说明和解释本发明，并不用于限定本发明。

[0023] 本发明提供的基于原子钟-腔光机械系统的互锁型光生微波源整体结构如图1所示，一种原子钟-腔光机械系统互锁型光生微波源，具体包括：依次连接的腔光机械系统、原子钟系统及反馈锁频系统；其中，所述的腔光机械系统包括：依次连接的激光源、电光调制器、掺铒光纤放大器(EDFA)、偏振控制器(fpc)、隔离器、透镜、偏光片及腔光机械芯片；所述

的原子钟系统包括：依次连接的分束器、1/4玻片、原子气室、磁屏蔽腔、温控加热器及光电探测器；所述的反馈锁频系统包括：依次连接的3dB耦合器、混频器及PI<sup>2</sup>D控制器；所述的反馈锁频系统将原子气室输出的超高稳定度微波信号与腔光机械系统的机械振荡谐波信号混频产生的差频容错信号，差频容错信号在通过PI<sup>2</sup>D控制电路后控制电光调制器和温控电路，最终输出所需的超高稳定度射频信号。

[0024] 这里的腔光机械芯片具体为：纳米悬梁臂微腔、光子晶体微腔、微盘、微环或微球型腔光机械系统芯片。

[0025] 这里的所述的原子气室填充气体具体为铷、铯、钠、钾、碘或氢蒸汽。

[0026] 如图2所示是基于原子钟-腔光机械系统的互锁型超高稳定度光生微波源工作原理示意图。

[0027] 麦克斯韦方程可以转化为时域有限差分法方程的迭代形式：

$$[0028] \quad \mathbf{H}_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) = \mathbf{H}_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j+1/2)\Delta y} \cdot [\mathbf{E}_x^n(i+1/2, j+1) - \mathbf{E}_x^n(i+1/2, j)] - \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j+1/2)\Delta x} \times [\mathbf{E}_y^n(i, j+1/2) - \mathbf{E}_y^n(i+1, j+1/2)] \quad (1)$$

$$[0029] \quad \mathbf{E}_x^{n+1}(i+1/2, j) = \mathbf{E}_x^n(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+1/2, j)\Delta y} [\mathbf{H}_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) - \mathbf{H}_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2)] \quad (2)$$

$$[0030] \quad \mathbf{E}_y^{n+1}(i, j+1/2) = \mathbf{E}_y^n(i, j+1/2) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+1/2)\Delta x} [\mathbf{H}_z^{n+1/2}(i-1/2, j+1/2) - \mathbf{H}_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2)] \quad (3)$$

[0031] 其中， $E_x$ 、 $E_y$ 分别为TE模式光子晶体x和y方向的电场强度， $H_z$ 为光子晶体z方向的磁场强度， $\mu(r)$ 为布洛赫函数， $\varepsilon(r)$ 为电介质函数i、j分别为网格中x、y方向的节点数。

[0032] 对于TM模式，也可以得到 $H_x$ 、 $H_y$ 和 $E_z$ 的类似计算公式。根据离散FDTD时间离散步长公式(1)、(2)和(3)可以得到电磁场的时间演化规律。为了保证迭代收敛得到稳定的解，x方向最小步长 $\Delta x$ 、y方向最小步长 $\Delta y$ 、时间最小间隔 $\Delta t$ 的选择必须满足Courant条件：

$$[0033] \quad c\Delta t = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad (4)$$

[0034] 结合上述公式与FDTD仿真软件可以计算得到铌酸锂基二维光子晶体谐振腔的光学谐振模式，并可通过对结构的调整控制其光学谐振波长，使其与铷原子的吸收峰波长相同。

[0035] 由腔体光机械基本理论知，光机械腔体中光学谐振和机械振荡两种系统的联合方程

$$[0036] \quad \dot{a}(t) = (j(\Delta - g_0 x(t)) - \kappa/2)a(t) + \sqrt{\eta_c \kappa} \bar{s}_{in}(t) \quad (5)$$

$$[0037] \quad \ddot{x}(t) + \Gamma_m \dot{x}(t) + \Omega_m^2 x(t) = \frac{F_o(t)}{m_x} + \frac{F_T(t)}{m_x} - \frac{g_0 |a|^2}{\omega_0 m_x} + \frac{F_T(t)}{m_x} \quad (6)$$

[0038] 其中， $a(t)$ 为微腔内的光场， $\Delta = \omega_1 - \omega_0$ 为光学失谐率，是输入激光频率与腔体谐振频率的差， $g_0$ 为光机械耦合率、 $\kappa$ 为光学谐振模式衰减率， $\eta_c = \tau_0 / (\tau_0 - \tau_{ex})$ 为泵浦光传输媒介与腔体之间的耦合率， $\kappa_{ex} = \kappa - \kappa_{in}$ 为外部衰减率， $s_{in}(t)$ 激励激光强度； $x(t)$ 为机械位移量， $\Gamma_m$ 为机械谐振衰减率， $\Omega_m$ 为机械谐振频率， $m_x$ 为机械振子的有效质量， $F_o(t)$ 和 $F_T(t)$ 分别为光学力和热噪声力。

[0039] 采用微扰理论、准静态近似法等研究获得铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的光机械耦合率特性：

$$[0040] \quad g_{om} \approx \frac{\omega_0}{2} \frac{\int dA \cdot \hat{n} (\Delta \varepsilon |E_{||}|^2 - \Delta \varepsilon^{-1} |D_{\perp}|^2)}{\int dV \cdot \varepsilon |E|^2} \chi_{zpf} + \frac{\omega_0}{2} \frac{\langle E | \delta \varepsilon | E \rangle}{\int dV \cdot \varepsilon |E|^2} \chi_{zpf} \quad (7)$$

[0041] 其中,  $\hat{n}$  为分界面外法向单位向量,  $E_{||}$  为平行于界面的电场分量,  $D_{\perp}$  为垂直于界面的电位移场分量,  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{LN} - \varepsilon_0$  为铌酸锂介质与空气介质介电常数之差,  $x_{zpf}$  为机械振子的零点波动振幅。

[0042] 利用COMSOL和FDTD仿真软件结合进行仿真可以计算得到铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的机械谐振频率与光机耦合率, 光机耦合率在不同机械模式和光学模式下的变化特性以及光机耦合率随光学谐振腔结构改变的性能变化规律。

[0043] 根据已获得的铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构的各关键参数, 以及结合式(6)推导得到腔光机械结构中的光场特性:

$$[0044] \quad \tilde{a}(t) = \hat{a}(t) e^{-i\omega_l t} = \sqrt{\frac{\eta_c}{\tau}} s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{(-i)^n J_n(\beta)}{-i(\omega_l + n\Omega_m - \omega_c + g_{om} x_s) + 1/(2\tau)} e^{-i(\omega_l + n\Omega_m)t + i\beta \cos(\Omega_m t)} \quad (8)$$

[0045] 和简化的光学弹性效应理论关系式:

$$[0046] \quad \Omega'_m \approx \sqrt{\Omega_m^2 + \left( \frac{2|\hat{a}|^2 g_{om}^2}{((\omega_l - \omega_c)^2 + (1/(2\tau))^2) \omega_c m_x} \right) (\omega_l - \omega_c)}, \quad (9)$$

[0047] 便可理论计算出机械振荡频率 ( $\Omega'_m$ ) 与腔光机械结构的光机械耦合率 ( $g_{om}$ )、激光-腔体失谐率、光学谐振Q值、腔体内能量之间的关系, 进而逆向指导、优化设计整个铌酸锂基二维光子晶体腔光机械结构, 实现机械振荡频率的有效控制。

[0048] 机械振子在激光激励下可产生参数光机械振荡通过调整结构参数使其机械本征频率的谐波与铷 ( $^{87}\text{Rb}$ ) 原子的超精细分裂能级跃迁频率相近, 即可产生相干布局囚禁输出超稳定的射频信号, 然后将该信号与机械振荡的谐波信号进行混频获取差频容错信号, 差频容错信号通过  $\text{PI}^2\text{D}$  控制器后同时用于控制电光调制器的幅度和铷原子气室的温度, 最终达到超高稳定度的参数光机械振荡信号输出。

[0049] 如图3所示光子晶体谐振腔结构及渐变波导示意图, 其是在铌酸锂上规则的排列光子晶体孔, 光子晶体的间距为335nm, 光子晶体孔直径为105nm, 光子晶体平板厚度为184nm, 中间线缺陷宽度为696nm, 中间空气槽宽度为80nm, 同时空气槽中间两侧的光子晶体孔分别位移5nm、10nm、15nm形成光子晶体谐振腔, 该光子晶体谐振腔具有很高的光学谐振Q值。

[0050] 如图4所示光子晶体腔光机械结构示意图, 其是在铌酸锂上规则的排列光子晶体孔, 中心为图2所示的光子晶体谐振腔和空气槽。光子晶体平板长10.48 $\mu\text{m}$ , 宽7.98 $\mu\text{m}$ , 上下两处长方形缺陷缺陷长2 $\mu\text{m}$ , 宽1.75 $\mu\text{m}$ 。

[0051] 如图5所示是通过COMSOL软件仿真得到的光子晶体谐振腔的光学谐振模式以及相应的谐振频率, 光学谐振频率为  $\omega_c = 377.09\text{THz}$ 。

[0052] 如图6所示是通过COMSOL软件仿真得到的机械振子的水平谐振模式以及相应的谐振频率, 其水平振型的谐振频率为  $\omega_m = 170\text{MHz}$ 。

[0053] 本发明的光生微波源将二维光子晶体腔光机械系统作为参考信号源, 与铷/铯原子气室结合, 并使用反馈锁频技术, 最终输出有超高稳定度的微波信号, 构成微波源。

[0054] 本领域的普通技术人员将会意识到, 这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的原理, 应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。本领域的

普通技术人员可以根据本发明公开的这些技术启示做出各种不脱离本发明实质的其它各种具体变形和组合,这些变形和组合仍然在本发明的保护范围内。

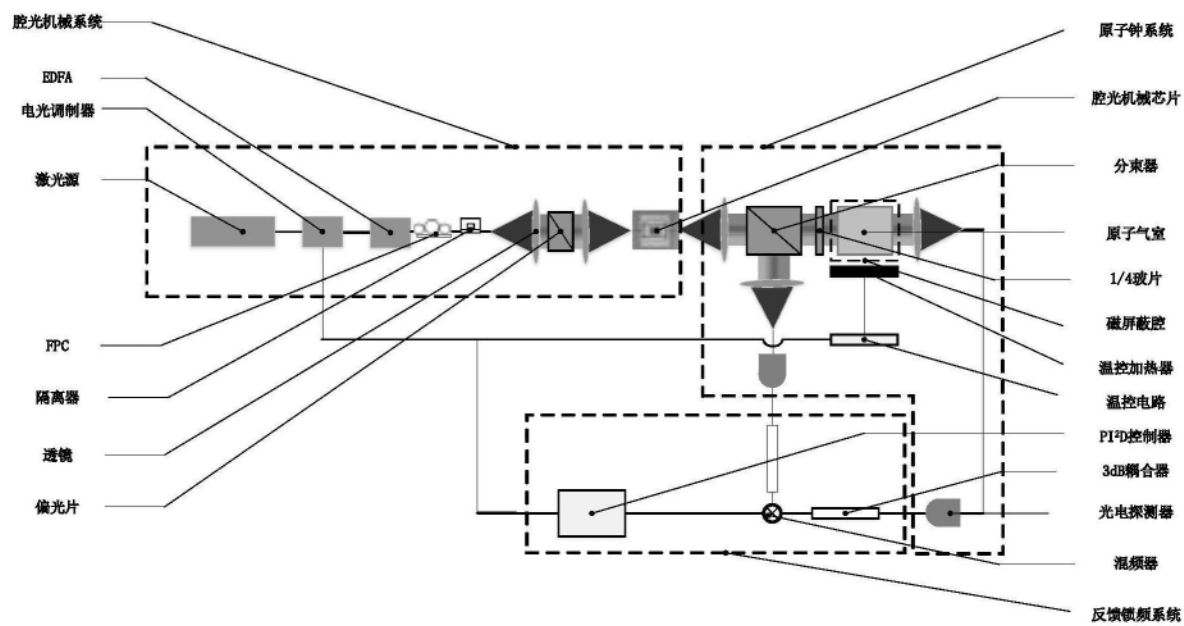


图1

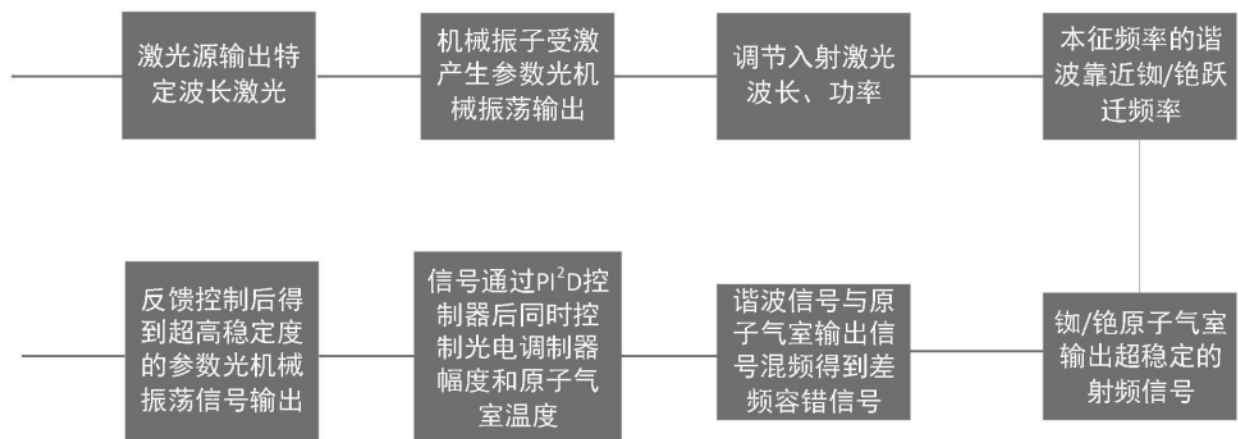


图2



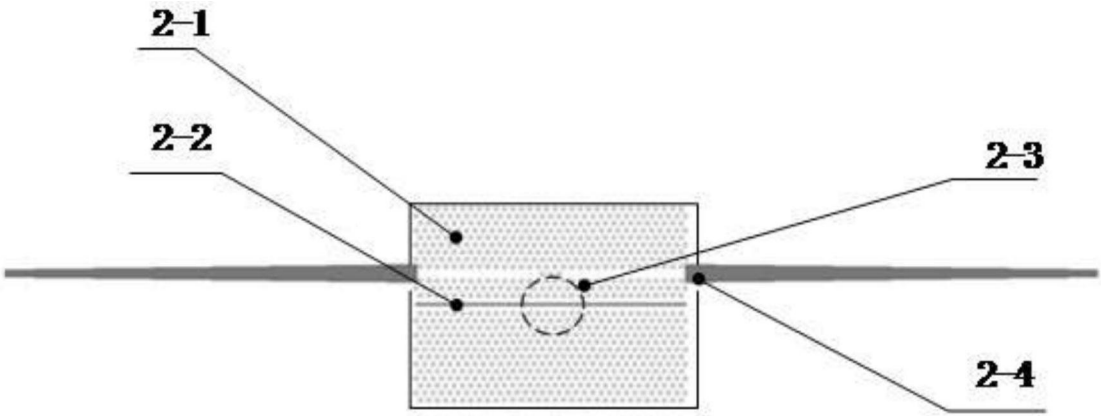


图3

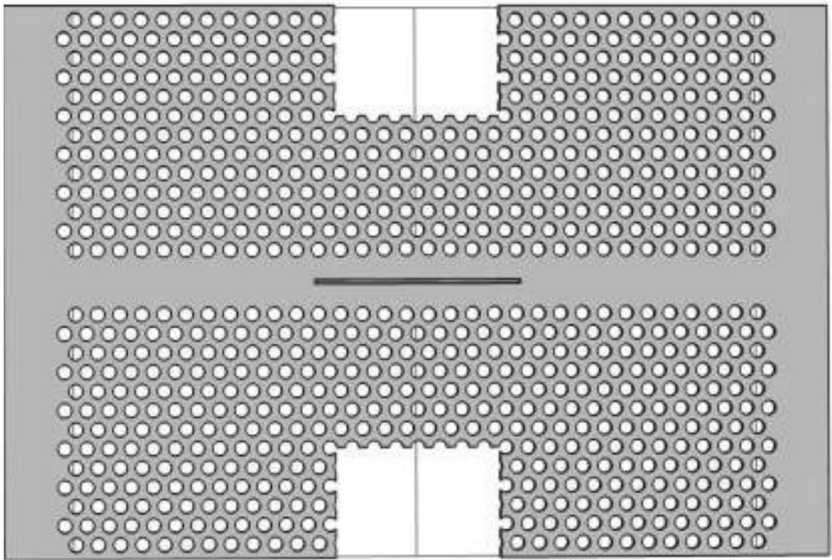


图4

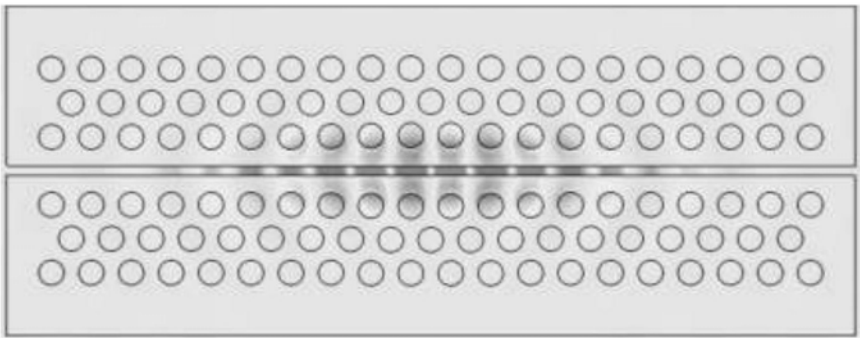


图5

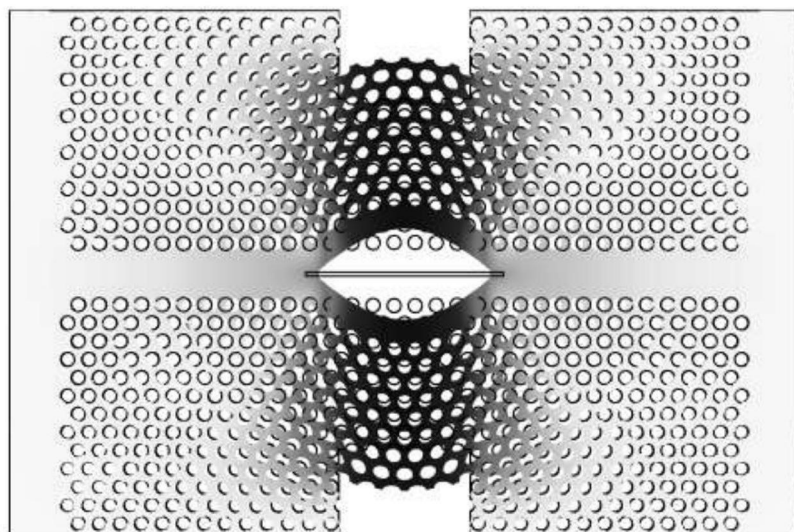


图6