



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109906552 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 06

(21) 申请号 201780066974.1

(22) 申请日 2017.10.05

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109906552 A

(43) 申请公布日 2019.06.18

(30) 优先权数据
15/336,935 2016.10.28 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.04.28

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/IB2017/056153 2017.10.05

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/078472 EN 2018.05.03

(73) 专利权人 国际商业机器公司
地址 美国纽约

(72) 发明人 B·阿卜杜

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所
有限公司 11038
专利代理师 邹丹

(51) Int.Cl.
H03H 7/01 (2006.01)
H03H 3/00 (2006.01)

(56) 对比文件
US 2013120217 A1, 2013.05.16
US 2009160575 A1, 2009.06.25
US 2005253667 A1, 2005.11.17
US 2015349780 A1, 2015.12.03
CN 101507043 A, 2009.08.12
CN 1604385 A, 2005.04.06
CN 1260911 A, 2000.07.19

审查员 朱壹

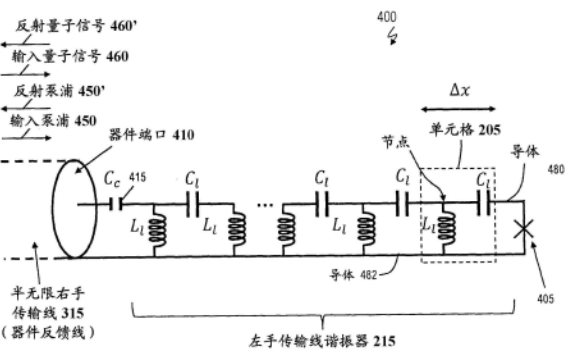
权利要求书2页 说明书7页 附图10页

(54) 发明名称

产生微波器件中微波场的压缩状态

(57) 摘要

提供超导微波器件(400)。左手谐振器(215)包括至少一个单元格(205)。非线性色散介质(405)连接到所述左手谐振器(215),使得所述左手谐振器(215)的一端连接到所述非线性色散介质(405)并且所述左手谐振器(215)的另一端连接到端口(410)。所述左手谐振器(215)和所述非线性色散介质(405)被配置为输出压缩状态下的量子信号。



1. 一种微波器件,包括:
包括至少一个单元格的左手谐振器;以及
连接到所述左手谐振器的非线性色散介质,使得所述左手谐振器的一端连接到所述非线性色散介质并且所述左手谐振器的另一端连接到端口以从所述端口接收量子信号并输出压缩状态下的量子信号,其中所述压缩状态下的量子信号是通过耦合到所述非线性色散介质的微波泵浦信号而被压缩的。
2. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述至少一个单元格连接到第一导体和第二导体。
3. 如权利要求2所述的微波器件,其中所述第一导体连接到所述非线性色散介质的第一端,并且所述第二导体连接到所述非线性色散介质的第二端。
4. 如权利要求2所述的微波器件,其中:
所述至少一个单元格包括在所述第一导体的节点处连接在一起的电容器和电感器;以及
所述电感器的另一端连接到所述第二导体。
5. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述左手谐振器被配置为在一微波频率范围内具有多个谐振模式,并且所述多个谐振模式在频域中不等间隔。
6. 如权利要求5所述的微波器件,其中所述多个谐振模式在4-20GHz的微波频率范围内。
7. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述非线性色散介质是约瑟夫森结。
8. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述非线性色散介质是约瑟夫森结阵列。
9. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述非线性色散介质是DC-SQUID。
10. 如权利要求1所述的微波器件,其中所述非线性色散介质是DC-SQUID阵列。
11. 一种形成微波器件的方法,所述方法包括:
提供包括至少一个单元格的左手谐振器;以及
提供连接到所述左手谐振器的非线性色散介质,使得所述左手谐振器的一端连接到非线性色散介质并且所述左手谐振器的另一端连接到端口以从所述端口接收量子信号并输出压缩状态下的量子信号,其中所述压缩状态下的量子信号是通过耦合到所述非线性色散介质的微波泵浦信号而被压缩的。
12. 如权利要求11所述的方法,其中所述至少一个单元格连接到第一导体和第二导体。
13. 如权利要求12所述的方法,其中所述第一导体连接到所述非线性色散介质的第一端,并且所述第二导体连接到所述非线性色散介质的第二端。
14. 如权利要求12所述的方法,其中所述至少一个单元格包括在所述第一导体的节点处连接在一起的电容器和电感器;以及其中所述电感器的另一端连接到所述第二导体。
15. 如权利要求11所述的方法,其中所述左手谐振器被配置为在一微波频率范围内具有多个谐振模式,并且所述多个谐振模式在频域中不等间隔。
16. 如权利要求15所述的方法,其中所述多个谐振模式在4-20GHz的微波频率范围内。
17. 如权利要求11所述的方法,其中所述非线性色散介质是约瑟夫森结。
18. 如权利要求11所述的方法,其中所述非线性色散介质是约瑟夫森结阵列。
19. 如权利要求11所述的方法,其中所述非线性色散介质是DC-SQUID。

20. 如权利要求11所述的方法,其中所述非线性色散介质是DC-SQUID阵列。

21. 一种使用微波器件产生压缩状态的方法,所述方法包括:

由具有多个谐振模式的左手谐振器的所述微波器件接收泵浦信号和量子信号,所述泵浦信号和所述量子信号处于所述多个谐振模式中的第一个;以及

由所述微波器件输出处于压缩状态的反射量子信号。

22. 如权利要求21的方法,还包括:

由所述微波器件在所述多个谐振模式中的第二个谐振模式下接收所述泵浦信号和所述量子信号,而不需要调谐所述左手谐振器的所述多个谐振模式中的任何一个;以及

在所述压缩状态下输出所述反射量子信号。

23. 如权利要求21所述的方法,还包括通过非线性色散介质接收磁通量,以便移动所述左手谐振器的所述多个谐振模式。

24. 一种使用微波器件产生压缩状态的方法,所述方法包括:

由具有多个谐振模式的左手谐振器的所述微波器件接收泵浦信号和量子信号,所述量子信号是所述多个谐振模式中的第一个谐振模式并且所述泵浦信号是所述多个谐振模式中的第一个谐振模式的两倍;以及

由所述微波器件输出压缩状态的反射量子信号。

25. 根据权利要求24所述的方法,其中通过磁通线输入所述泵浦信号,并且通过连接到所述微波器件的端口输入所述量子信号。

产生微波器件中微波场的压缩状态

背景技术

[0001] 本发明涉及超导电子器件,更具体地,涉及在超导左手传输线谐振器中产生微波场的压缩状态。

[0002] 光可以被压缩。特别是,光的量子噪声可以被压缩。这种被压缩的光是光的压缩状态,是在量子光学领域研究的一种特殊形式的光。光的量子噪声是光子存在的直接结果,光子是光的最小量子。当用理想的光电二极管检测到光时,每个光子都被转换成光电子。对于压缩光,所产生的光电流表现出令人惊讶的低噪声。噪声低于独立光子存在所预期的最小噪声及其统计到达时间。具有独立(不相关)光子的光的量子噪声通常被称为散粒噪声。然后,光本身处于所谓的相干状态或Glauber状态。可以预期散粒噪声是可能的最小噪声。然而,压缩光甚至可以显示出比Glauber状态更少的噪声。压缩状态的光属于非典型光状态的类别。

发明内容

[0003] 根据一个或多个实施例,提供了一种微波器件。所述微波器件包括:包括至少一个单元格(unit cell)的左手谐振器;以及连接到所述左手谐振器的非线性色散介质,使得所述左手谐振器的一端连接到所述非线性色散介质并且左手谐振器的另一端连接到端口。所述左手谐振器和所述非线性色散介质被配置为输出压缩状态下的量子信号。

[0004] 根据一个或多个实施例,提供了一种形成微波器件的方法。该方法包括提供包括至少一个单元格的左手谐振器并且提供连接到所述左手谐振器的非线性色散介质,使得所述左手谐振器的一端连接到所述非线性色散介质并且所述左手谐振器的另一端连接到端口。所述左手谐振器和所述非线性色散介质被配置为输出压缩状态下的量子信号。

[0005] 根据一个或多个实施例,提供了一种使用微波器件产生压缩状态的方法。所述方法包括由具有多个谐振模式的左手谐振器的所述微波器件接收泵浦信号和量子信号。所述泵浦信号和所述量子信号处于所述多个谐振模式中的第一个谐振模式。而且,该方法包括由所述微波器件输出处于压缩状态的反射量子信号。

[0006] 根据一个或多个实施例,提供了一种使用微波装置产生压缩状态的方法。所述方法包括由具有多个谐振模式的左手谐振器的微波装置接收泵浦信号和量子信号。所述量子信号处于多个谐振模式中的第一个,并且所述泵浦信号是多个谐振模式中的第一个的两倍。而且,所述方法包括由所述微波器件输出压缩状态下的反射量子信号。

附图说明

[0007] 现在将参考附图仅通过示例的方式描述本发明的实施例,其中:

[0008] 图1A是I-Q平面中的真空状态噪声的示例。

[0009] 图1B是I-Q平面中的相干态噪声的示例。

[0010] 图1C是I-Q平面中的压缩真空噪声的示例。

[0011] 图2是根据一个或多个实施例的用于产生压缩光状态的微波装置中使用的半无限

无损左手传输线的电路。

[0012] 图3A是I-Q平面中的压缩光的示例。

[0013] 图3B是I-Q平面中的压缩光的示例。

[0014] 图4是根据一个或多个实施例的用于产生压缩光状态的微波器件的电路的示意图。

[0015] 图5是根据一个或多个实施例的用于产生压缩光状态的微波器件的电路的示意图。

[0016] 图6是根据一个或多个实施例的用于产生压缩光状态的微波器件的电路的示意图。

[0017] 图7是根据一个或多个实施例的形成微波器件的方法的流程图。

[0018] 图8是根据一个或多个实施例的使用微波器件产生压缩状态的方法的流程图。

[0019] 图9是根据一个或多个实施例的使用微波器件产生压缩状态的方法的流程图。

具体实施方式

[0020] 这里参考相关附图描述了各种实施例。在不脱离本文件的范围的情况下,可以设计替代实施例。注意,在以下描述和附图中,阐述了元件之间的各种连接和位置关系(例如,上方、下方、相邻等)。除非另有说明,否则这些连接和/或位置关系可以是直接的或间接的,并且不旨在限制这方面。因此,实体的耦合可以指直接耦合或间接耦合,并且实体之间的位置关系可以是直接位置关系或间接位置关系。作为间接位置关系的示例,对在层“B”上形成层“A”的引用包括其中一个或多个中间层(例如层“C”)在层“A”和层“B”之间的情况。只要层“A”和层“B”的相关特性和功能基本上不被中间层改变。

[0021] 压缩光是电磁场的特殊状态,其中场的一个正交的量子噪声方差(例如,幅度或相位)低于标准量子极限(SQL)(由海森堡不确定性原理设定),而另一个正交(例如幅度或相位)的量子噪声方差超过SQL。这种非典型光状态可以在各种物理领域中找到应用,例如1)增强可以使用光探测的物理量的测量精度,2)提高量子成像的质量和分辨率,3)通过压缩真空噪声(原子经历的)来抑制原子相干的辐射衰减,以及4)增强某些微波量子门的保真度。

[0022] 一个或多个实施例包括具有左手传输线谐振器的微波器件,该左手传输线谐振器在微波器件的不同本征模的射频电流的反节点位置处耦合到色散非线性介质。微波器件可以直接连接到馈线或电容耦合到馈线。泵浦音调可以使用与量子信号相同的端口注入,或者通过片上通量线路电感耦合到形成微波器件的非线性色散介质的直流(DC)超导量子干涉装置(SQUID)。泵浦音调(pump tone)的频率可以设定为微波器件的本征模的共振频率,该共振频率用于产生真空的挤压状态或者在该共振频率的两倍时用于通过片上通量线路注入泵浦的情况。微波器件提供了使用相同微波器件在不同频率立即产生按需压缩状态的能力,而不依赖于器件的通量可调谐振频率。

[0023] 图1A,图1B,图1C,图3A和图3B描绘了IQ平面(其中I和Q表示电磁场的两个正交)中的光的真空状态,光的相干状态和光的压缩状态(真空和相干)的示例。Q轴表示一个正交或正交分量,I轴表示与Q轴正交的另一个正交(即,另一个正交分量)。值得注意的是,在这张IQ平面的图片中,表示光状态的圆盘/圆或椭圆的中心表示光状态的平均I分量和Q分量,而

中心周围的圆盘/圆或椭圆的宽度/表示与该状态相关的噪声的标准偏差。

[0024] 图1A是I-Q平面中的真空状态噪声的示例。I正交的不确定性(I的标准偏差)和Q正交的不确定性(Q的标准偏差)的乘积产生真空状态的不确定性关系105,其等于量子力学允许的最小量(称为标准量子限制SQL)。

[0025] 图1B是I-Q平面中的相干态噪声的示例。I和Q正交分量中的不确定性的乘积说明了相干光的不确定关系110,其类似于真空状态情况。值得注意的是,在IQ图像中,圆盘/椭圆中心距原点的距离表示信号的幅度 $\sqrt{I_c^2 + Q_c^2}$,其中 (I_c, Q_c) 表示IQ平面中的信号的均值坐标。或者,信号的幅度可以表示为 \sqrt{n} ,其中n是相干光中的平均光子数,并且 $\theta = \tan(Q_c/I_c)$ 表示相干光的相位。

[0026] 图1C是I-Q平面中的压缩真空状态的示例。I正交分量和Q正交分量的不确定性的乘积说明了压缩真空状态的不确定性关系115,其等于量子力学(SQL)允许的最小量,类似于图1A的真空状态。压缩真空图1C和真空状态图1A之间的主要区别在于在真空状态下两个正交的不确定性相等,而在压缩真空中,一个正交(例如Q)的不确定性(正交压缩)比正交膨胀(例如I)中的不确定性小。在此示例中,Q正交中的噪声降低到低于真空水平。

[0027] 图3A是I-Q平面中的压缩光的示例。I正交分量和Q正交分量的不确定性的乘积说明了压缩相干光的不确定性关系120,其中信号的相位正交中的噪声(不确定性)被压缩,而信号的幅度正交中的噪声(不确定性)增加。

[0028] 图3B是I-Q平面中的压缩光的示例。I正交分量和Q正交分量的不确定性的乘积说明了压缩光的不确定性关系125,其中幅度中的噪声(不确定性)被压缩而相位正交中的噪声(不确定性)增加。

[0029] 现在转向本发明的各方面。图2是根据一个或多个实施例的超导半无限无损左手传输线谐振器215的电路,其可用于构造微波器件400(下面讨论)以产生压缩光状态。

[0030] 单元格(unit cell)205包括连接到电感器 L_1 的电容器 C_1 ,其中“1”表示左手传输线。电感器 L_1 的另一端接地。单元格205连接到另一个单元格,该另一个单元格连接到另一个单元格,依此类推。对于微波器件400,单元格205重复N次。

[0031] 左手传输线的色散关系读取

$$[0032] \quad \omega_l(k_l) = \frac{1}{2\sqrt{L_l C_l} \sin\left(\frac{k_l \Delta x}{2}\right)}$$

[0033] 其中 Δx 是单元格的大小, k_l 是波矢量。色散关系意味着左手传输线的谐振模式在频域中不是均匀分散或间隔开的。

[0034] 左手传输线的相位和群速度具有相反的方向 $\frac{\partial \omega_l(k)}{\partial k} < 0$,其中k是 k_l 。这意味着波在一个方向上传播,而能量在另一个方向上传播。这种关系的一个结果是在左手传输线中,低频对应于短波长。相反,在色散关系随波矢量增加的右手传输线中,低频对应于长波长。

[0035] 对于每个单元格,左手传输线的特征阻抗是 $Z_l = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}}$ 。

[0036] 左手传输线的低频界限是 $\omega_{lr} = \frac{1}{2\sqrt{L_l C_l}}$ 。低频界限是左手传输线谐振器215的最低

谐振频率,并且诸如第二、第三、第四等的其他谐振模式高于(大于)低频界限。

[0037] 图4是根据一个或多个实施例的超导微波器件400的电路示意图。微波器件400包括连接到非线性色散介质405的左手传输线谐振器215。在一个实现中,非线性色散介质405可以是约瑟夫森结(JJ)或约瑟夫森结(JJ)阵列。微波器件400包括串联连接在一起的一个或多个单元格205。

[0038] 左手传输线谐振器215的另一端连接到器件端口410。左手传输线谐振器215可以由耦合电容器415耦合到器件端口410。在一个实现中,器件端口410可以是混合耦合器,例如 90° 或 180° 混合耦合器。

[0039] 器件端口410可以连接到器件馈线。器件馈线可以是半无限右手传输线315。右手传输线315可以实现为具有中心导体和外导体的同轴电缆、微带、带状线等。左手传输线谐振器215由分立的单元格构成,并使用如图2所示的集总元件实现。

[0040] 微波器件400和/或左手传输线谐振器215是在感兴趣的频率范围(例如,3-20GHz)具有多个谐振模式(即,高密度谐振模式)的多模谐振器。与多模谐振器的谐振模式相关联的射频电流在JJ 405的位置处最大。因此,JJ强耦合到不同的谐振模式。换句话说,左手传输线谐振器215可以具有多个谐振模式。

[0041] 现在讨论转向微波器件400的操作。微波泵浦信号450通过器件端口410以谐振方式输入。如本文所讨论的,左手传输线谐振器215在感兴趣的微波频率范围具有高密度的谐振模式,且微波泵浦信号450以这些谐振模式之一输入。同时或几乎同时,量子信号460经由器件端口410以微波频率输入。量子信号460以与微波泵浦信号450相同或几乎相同的频率输入。量子信号460是将被压缩的信号/光。

[0042] 微波泵浦信号450强耦合到非线性色散介质405,在该示例中,非线性色散介质405是JJ或JJ阵列。微波泵浦信号450和量子信号460传播/行进通过单元格205并与非线性色散介质405相互作用。泵浦信号450使量子信号460被压缩。根据输入微波泵浦信号450和输入微波量子信号460之间的相位差量子信号460的一个正交被压缩并且另一个正交被放大。这样,反射量子信号460' 呈现出压缩状态。反射量子信号460' 以输入量子信号460的微波频率反射(与实现中的输入泵浦信号450相同),其对应于左手传输线谐振器215的谐振模式之一。假设在感兴趣的微波频率中,左手传输线谐振器215在 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 处具有谐振频率/模式,其中N是左手谐振器215的谐振模式的最后一个。例如,泵浦信号450和量子信号460以频率 f_1 (例如4GHz)输入,并且反射量子信号460' 根据泵浦信号450和量子信号460之间的相位差被压缩。反射量子信号460' 以频率 f_1 (例如4GHz)输出。通过类推,通过以频率 f_2 (例如4.5GHz)施加泵浦信号450和量子信号460,可以利用相同的微波器件400以频率 f_2 (例如4.5GHz)压缩量子信号460,从而产生被压缩的反射量子信号460'。继续通过频率 f_N (例如8.2GHz),通过以频率 f_N (例如8.2GHz)施加泵浦信号450和量子信号460,可以利用相同的微波器件400以频率 f_N (例如8.2GHz)压缩量子信号460,从而产生被压缩的反射量子信号460' (频率 f_N)。应当理解,微波器件400被配置为在谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ (使用匹配泵浦和量子频率)产生压缩状态,而不需要调谐左手传输线谐振器215的谐振频率。即,不必调整左手传输线谐振器215以用于不同的谐振模式,因为左手传输线谐振器215在感兴趣的微波频率范围内(例如4-20GHz)具有例如20个谐振模式。

[0043] 为了完整起见,应注意,反射的泵浦信号450' 也被反射回器件端口410。包括电容

器(电容器中的介电材料除外),传输线/导体480,482,约瑟夫森结/DC SQUID(除了薄绝缘材料)和谐振器215,315的微波器件400由超导材料制成。另外,端口410和/或磁通线605(下面讨论)由低损耗的普通金属制成或者可以由超导材料制成。超导材料的示例(在低温下,例如约10-100毫开尔文(mK)或约4K)包括铌、铝、钽等。

[0044] 当输入量子信号460与输入泵浦信号450同相时,这导致反射量子信号460'被放大(该正交中的信号和噪声)。然而,当输入量子信号460与输入泵浦信号450异相(正交)90°时,这导致反射量子信号460'被压缩(该正交中的信号和噪声)。本领域技术人员理解,设计哪个正交被压缩以及哪个正交被放大是基于量子信号460和泵浦信号450之间的相位差(其可以是90°异相或同相,即没有相位差)。

[0045] 作为图4中电路的变型,图5是根据一个或多个实施例的超导微波器件400的电路的示意图。微波器件400包括连接到非线性色散介质405的左手传输线谐振器215。然而,在这种情况下,非线性色散介质405是JJ的阵列和/或DC SQUID。微波器件400的操作在图4和图5中是相同的,不再重复操作。

[0046] 如图5所示,可以通过施加外部磁通 Φ_{EXT} 来调谐非线性色散介质405。磁通量可以用于在 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 周围的特定频率范围内向上或向下移动谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$,例如几兆赫兹,十几兆赫兹,或一千兆赫兹。

[0047] 换句话说,如果在没有施加磁通量的情况下左手传输线谐振器215的谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 被设计为例如5, 5.15, 5.25, 6, 6.5, 7, ..., 20GHz,磁通量 Φ_{EXT} 可以被施加到非线性色散介质405(例如,DC SQUID)以将谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 向下移位1-100MHz。每个谐振频率的精确频移量可以根据由于所施加的磁通量非线性色散介质405(例如,DC SQUID)的电感变化对于每种共振模式的该器件的总电感的影响而变化。

[0048] 图6是根据一个或多个实施例的具有修改的微波器件400的电路示意图。图6所示的泵浦信号现在包括片上通量线605。先前,泵浦信号通过图4和图5中的器件端口410驱动,正如量子信号460那样。然而,在图6中,通过片上通量线605泵浦信号450以谐振频率两倍的泵浦频率 f_p 被驱动。如上讨论的,左手传输线谐振器215具有谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$,并且先前量子信号460和泵浦信号450都在相同(或几乎)相同的谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ (即一次一个)被输入。

[0049] 但是,在图6中,输入泵浦信号450在片上通量线605上传输,以通过互感驱动非线性色散介质405,并且非线性色散介质405是DC-SQUID或DC-SQUID阵列。而且,输入泵浦信号450的频率是微波器件400的共振频率/模式的2x倍。因此,对于给定的共振频率 f_1 (例如6GHz),则泵浦频率 f_p 是 $2f_1$ (例如12Hz),并且量子信号频率 f_q 是 f_1 (例如6GHz)。因此,反射量子信号460'是在量子信号频率 f_q 处的压缩信号/光,其中量子信号频率 f_q 是 f_1 (例如6GHz)。这类似于谐振频率/模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 中的每一个,使得当泵浦频率 f_p 是 $2f_2$ 时,则量子信号频率 f_q 是 f_2 并且反射量子信号460'也在 $f_q = f_2$,通过泵浦频率 f_p 是 $2f_N$ 时,则量子信号频率 f_q 为 f_N ,并且反射量子信号460'也在 $f_q = f_N$ 。

[0050] 图6允许量子信号460和反射量子信号460'具有它们自己的器件端口410,从而与泵浦信号450分离。微波器件400被配置为相对于量子信号460和反射量子信号460'进行反射操作。然而,由于片上通量线605通过互感耦合到非线性色散介质405,微波器件400被配置为相对于微波泵浦信号450进行传输操作。

[0051] 图7是根据一个或多个实施例形成微波器件400的方法的流程图700。在块705,左手谐振器215包括至少一个单元格205。在块710,非线性色散介质405连接到左手谐振器215,使得左手谐振器215的一端连接到非线性色散介质405,并且左手谐振器215的另一端连接到端口410。左手谐振器215和非线性色散介质405被配置为输出(反射的)压缩状态下的量子信号460'。

[0052] 至少一个单元格205连接到第一导体480和第二导体482。第一导体480连接到非线性色散介质405的第一端,并且第二导体482连接到非线性色散介质405的第二端。至少一个单元格205包括在第一导体480的节点处连接在一起的电容器 C_1 和电感器 L_1 ,并且电感器 L_1 的另一端连接到第二导体482。

[0053] 左手谐振器215被配置为在感兴趣的微波范围内具有多个谐振模式 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$,并且多个谐振模式不是等间隔的。多种谐振模式在4-20GHz之间。

[0054] 非线性色散介质405是如图4所示的约瑟夫森结。非线性色散介质405是约瑟夫森结的阵列,如图4和图5所示。非线性色散介质405是DC-SQUID,如图5和图6所示。非线性色散介质405是DC-SQUID的阵列,如图5和图6所示。

[0055] 图8是根据一个或多个实施例的使用微波器件400产生压缩状态的方法的流程图800。在框805,具有多个谐振模式的左手谐振器215的微波器件400被配置为接收泵浦信号450和量子信号460,其中泵浦信号450和量子信号460处于多个谐振模式中的第一个谐振模式(例如,在频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 中的任何一个处)。

[0056] 在框810处,微波器件400被配置输出压缩状态下的反射量子信号460'。在图1C、图1D和图1E中描绘了一些示例状态。但是应该理解,如本领域技术人员所理解的,可以将正交I和Q压缩到不同程度。

[0057] 微波器件400被配置为在多个谐振模式中的第二个(例如,频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 中的另一个)接收泵浦信号450和量子信号460,而不需要调谐左手谐振器215的多个谐振模式中的任何一个,并输出压缩状态下的反射量子信号460'。(微波器件400的)非线性色散介质405被配置为接收磁通量 Φ_{EXT} ,以便移动左手谐振器215的多个谐振模式。

[0058] 图9是根据一个或多个实施例使用微波器件400产生压缩状态的方法的流程图900。在框905,具有多个谐振模式的左手传输线谐振器215的微波器件400被配置为接收泵浦信号450和量子信号460,其中量子信号460处于多个谐振模式中的第一个模式(例如,在频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 中的任何一个处)并且泵浦信号是多个谐振模式中的第一个的两倍(例如,和量子信号460相同的频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ 中之一的2倍)。在框910,微波器件400被配置输出在压缩状态下的反射量子信号460'。

[0059] 泵浦信号450通过通量线605输入,并且量子信号460通过连接到微波器件400的端口410输入,如图6所示。

[0060] 实施例的技术益处不同地包括微波器件和用于操作微波器件的技术。能够在由微波器件的本征模式和所施加的泵浦音调的频率设定的某些频率下产生反射微波场的压缩状态,其可以与所需压缩模式的共振频率一致或者具有该频率的两倍。在最先进的约瑟夫森参量放大器(JPA)中缺乏这种能力,因为它们通常被设计成具有单个本征模式。此外,技术优势包括由有限长度的左手传输线形成的微波谐振器,其可被设计为在感兴趣的频率范围(即3-20GHz)具有高密度模式(与由右手传输线或集总元件构成的谐振器相比)并且强耦

合到JJ/DC-SQUID(即,色散非线性介质)。由于这种多模特性,微波器件可用于产生不同频率(对应于其谐振频率)的微波场的按需压缩状态。这可以通过以期望的共振频率(或者在通量泵送的情况下以共振频率的两倍)施加泵浦驱动来实现。作为进一步的技术益处和优点,使用相同的微波器件微波器件可以在不同频率下产生微波场的按需压缩状态,而不需要使用磁通量来调谐器件的谐振频率。

[0061] 术语“约”及其变形旨在包括与基于提交申请时可用的器件的特定量的测量相关联的误差程度。例如,“约”可以包括给定值的 $\pm 8\%$ 或 5% 或 2% 的范围。

[0062] 这里参考根据本发明实施例的方法、装置(系统)和计算机程序产品的流程图和/或框图来描述本发明的各方面。应该理解,流程图图示和/或框图的每个框以及流程图图示和/或框图中的框的组合可以由计算机可读程序指令实现。

[0063] 附图中的流程图和框图说明了根据本发明的各种实施例的系统,方法和计算机程序产品的可能实现的体系结构,功能和操作。在这方面,流程图或框图中的每个框可以表示模块、段或指令的一部分,其包括用于实现指定的逻辑功能的一个或多个可执行指令。在一些替代实施方式中,框中提及的功能可以不按图中所示的顺序发生。例如,连续示出的两个方框实际上可以基本上同时执行,或者这些方框有时可以以相反的顺序执行,这取决于所涉及的功能。还应注意,框图和/或流程图图示的每个框以及框图和/或流程图图示中的框的组合可以由执行特定功能或动作的专用基于硬件的系统来实现。执行专用硬件和计算机指令的组合。

[0064] 已经出于说明的目的给出了对本发明的各种实施例的描述,但是并不旨在穷举或限制于本文所讨论的实施例。在不脱离所描述的实施例的范围和精神的情况下,许多修改和变化对于本领域普通技术人员来说是显而易见的。选择这里使用的术语是为了最好地解释实施例的原理,实际应用或对市场中发现的技术的技术改进,或者使本领域普通技术人员能够理解这里讨论的实施例。

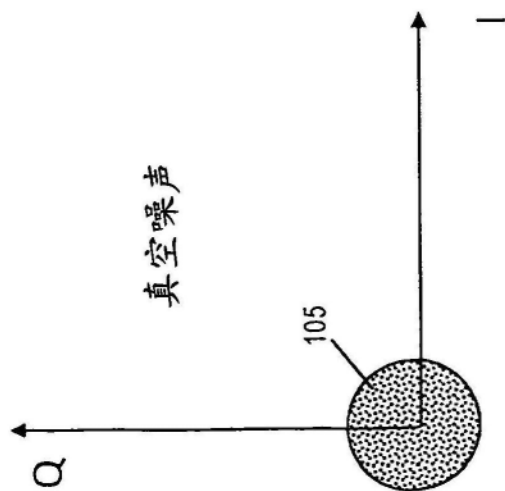


图1A

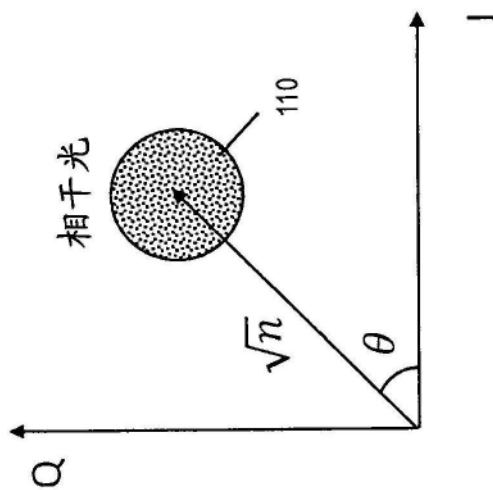


图1B

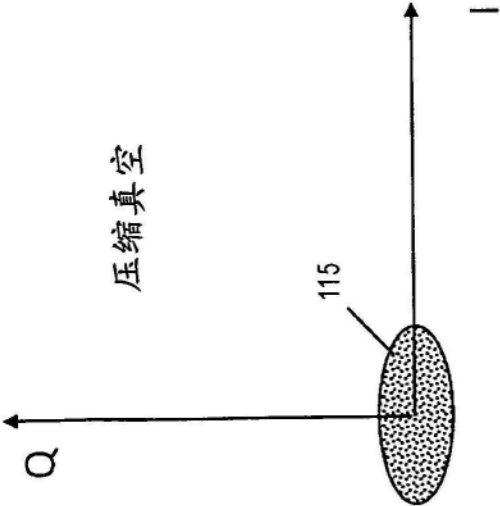


图1C

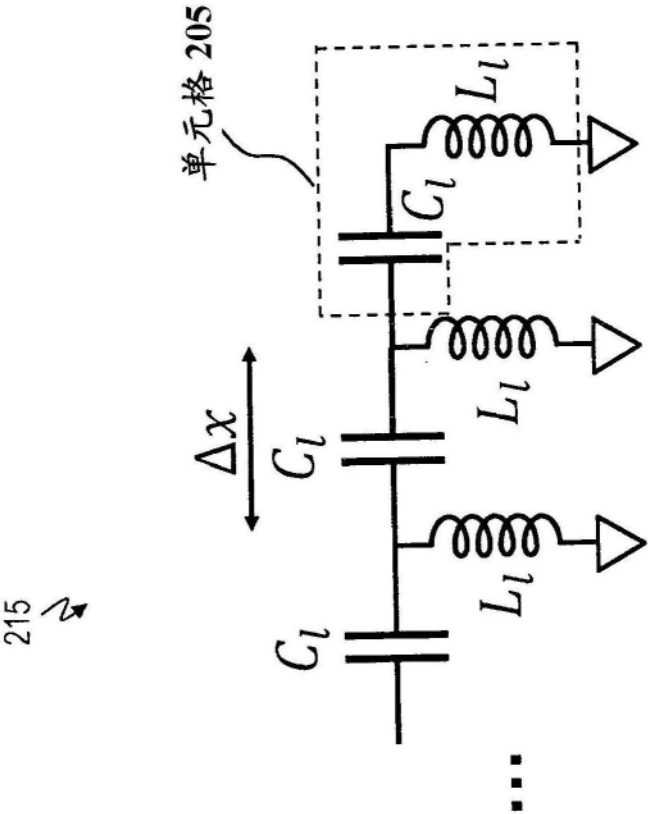


图2

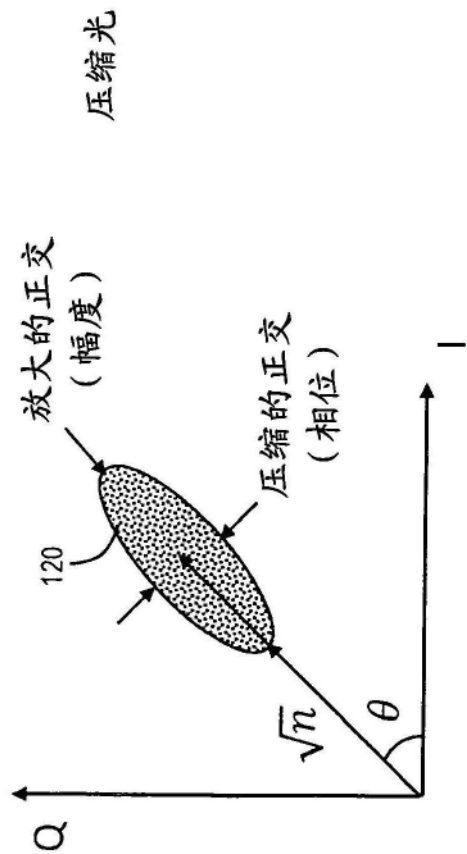


图3A

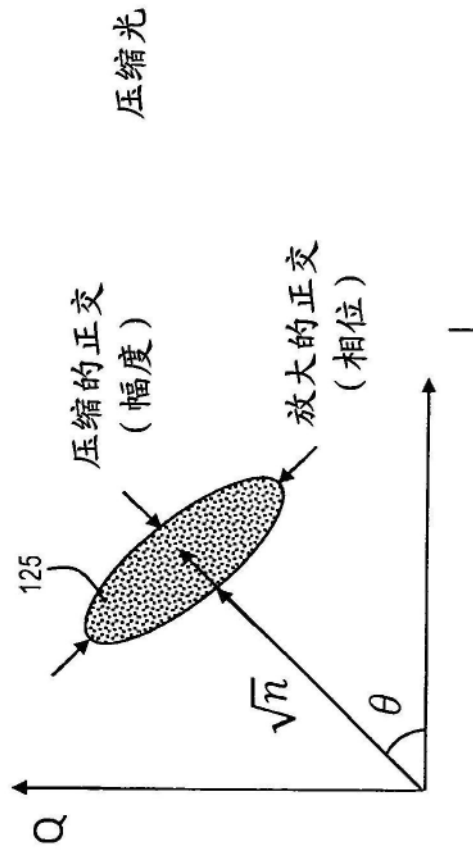


图3B

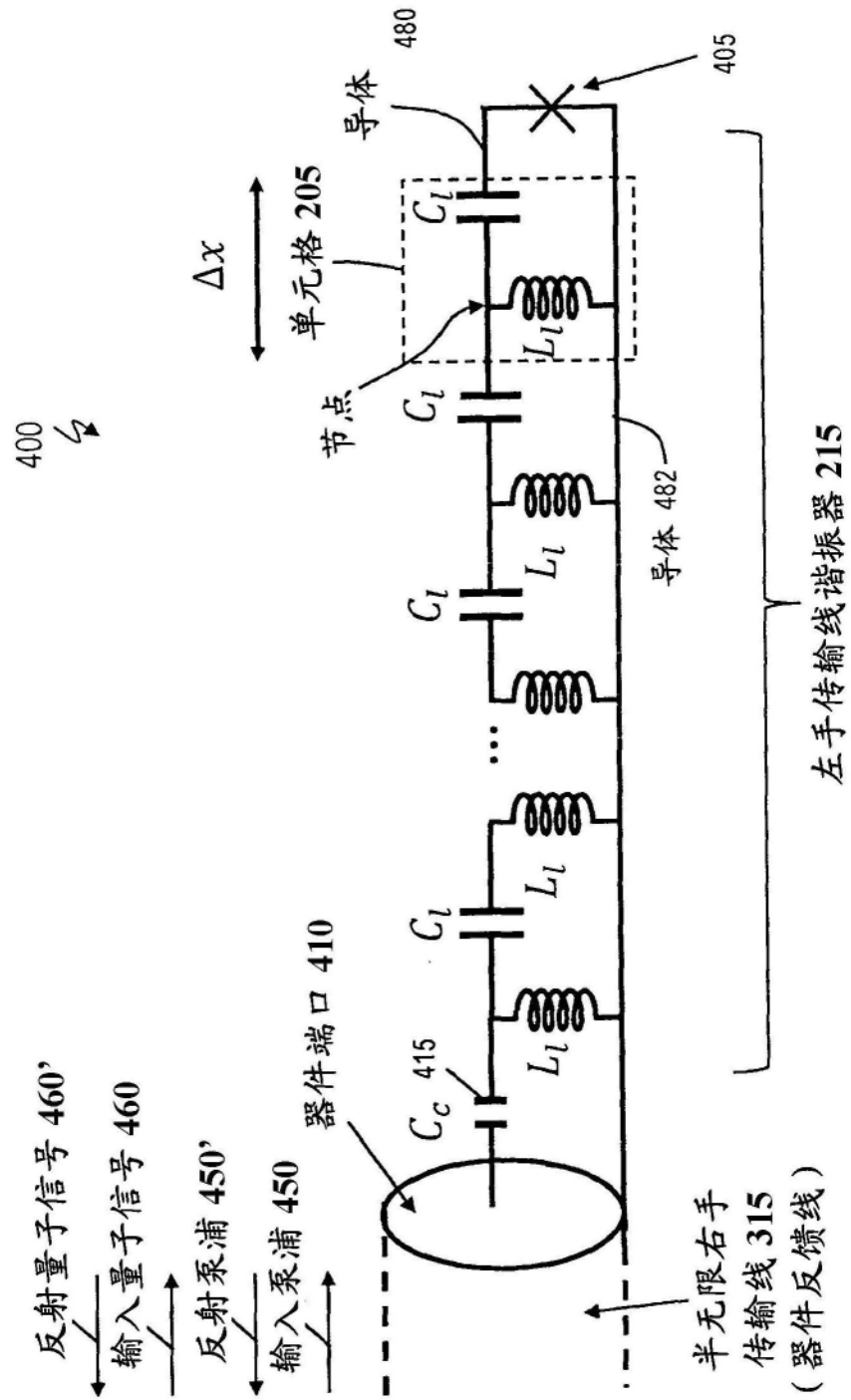


图4

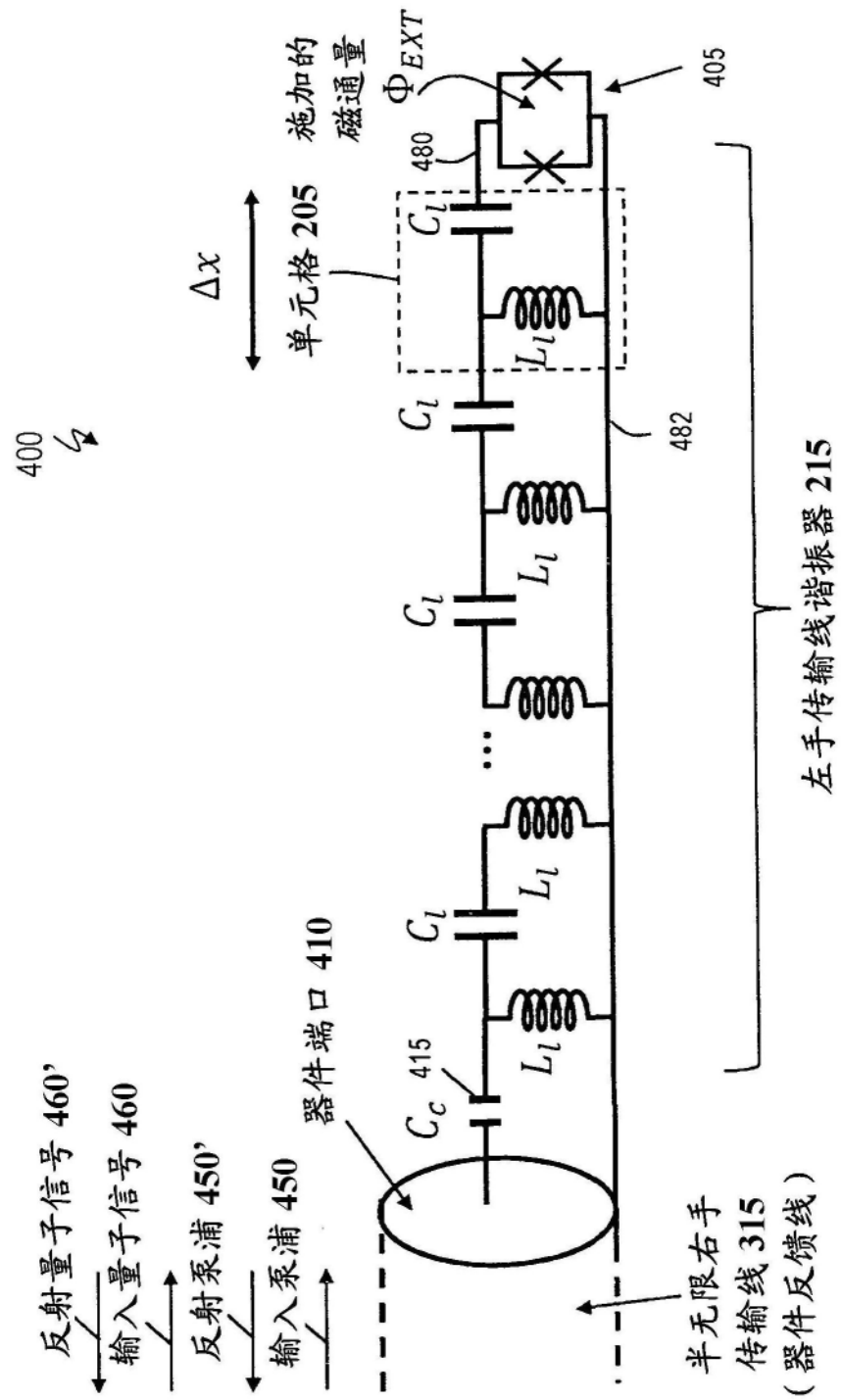


图5

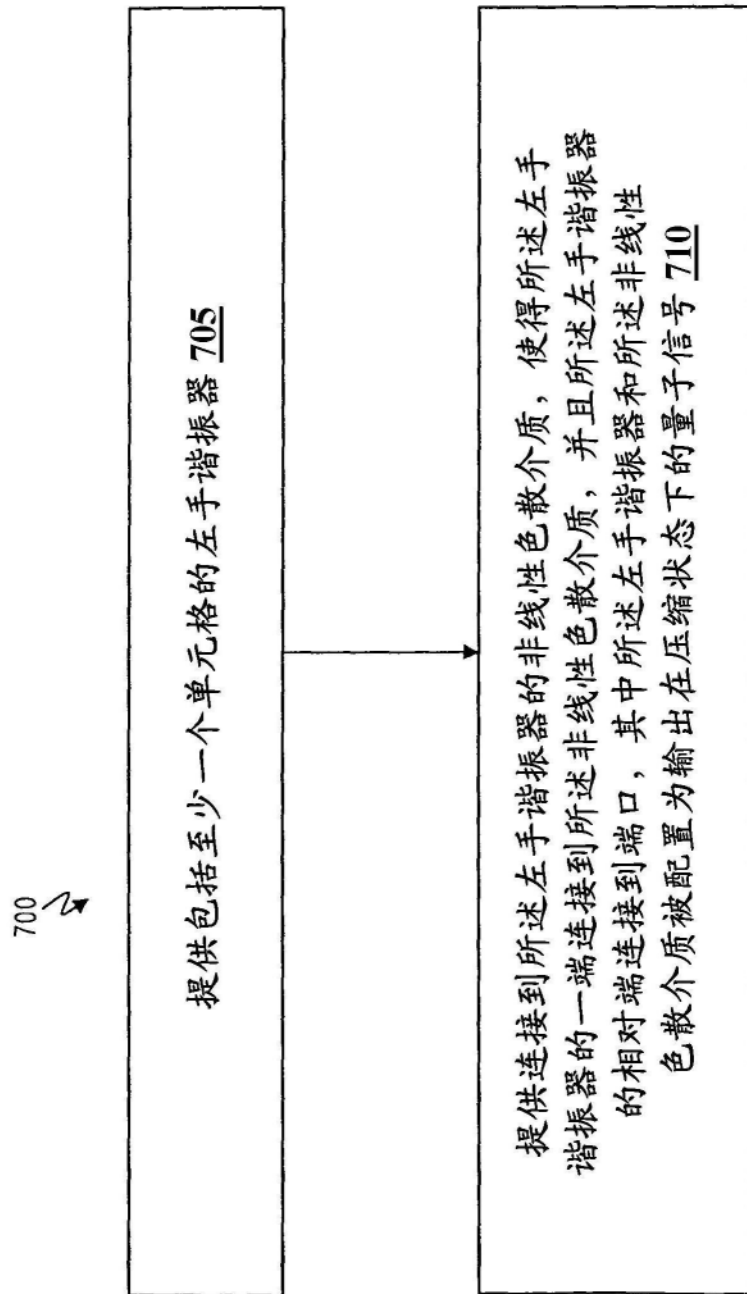


图7

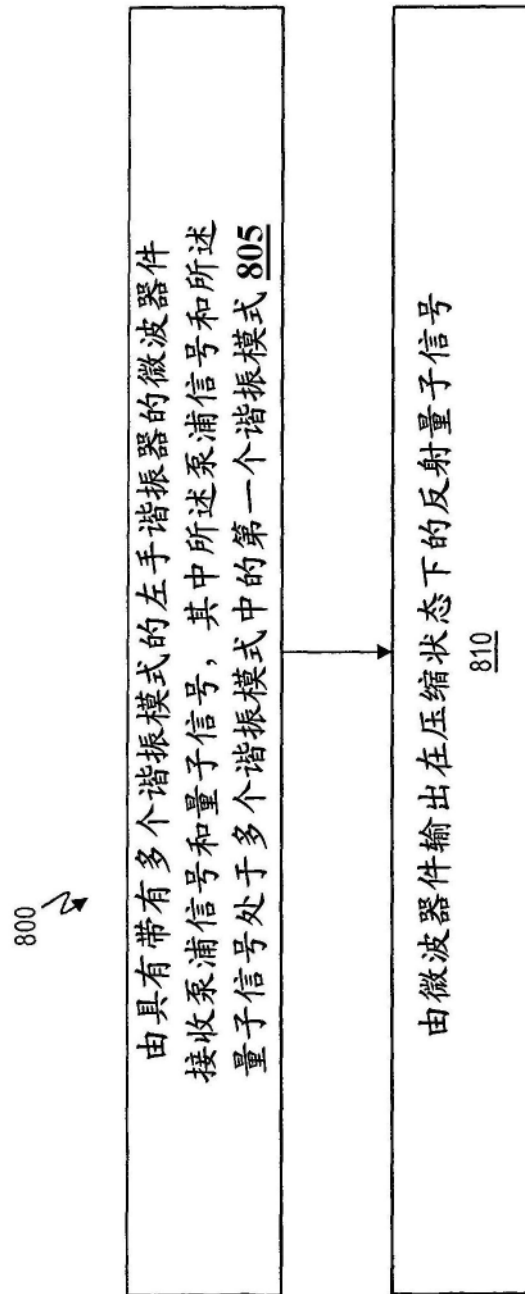


图8

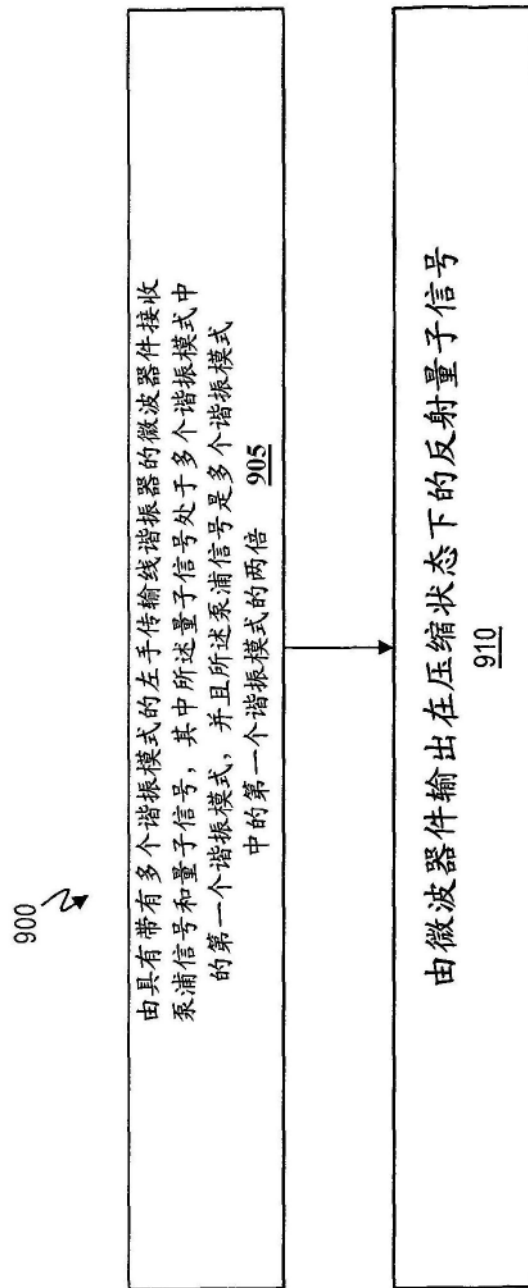


图9