



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107251250 A

(43)申请公布日 2017. 10. 13

(21)申请号 201680011929.1

(22)申请日 2016.02.26

(30)优先权数据

62/126,381 2015.02.27 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.08.24

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2016/019821 2016.02.26

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/138408 EN 2016.09.01

(71)申请人 耶鲁大学

地址 美国康涅狄格州

(72)发明人 拉斯洛·J·索奇

阿尼鲁德·纳尔拉

迈克尔·哈特里奇

卡特里娜·斯利瓦

希亚姆·尚卡尔

路易吉·弗伦齐奥

米歇尔·德沃尔特

(74)专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 唐京桥 董娟

(51)Int.Cl.

H01L 39/22(2006.01)

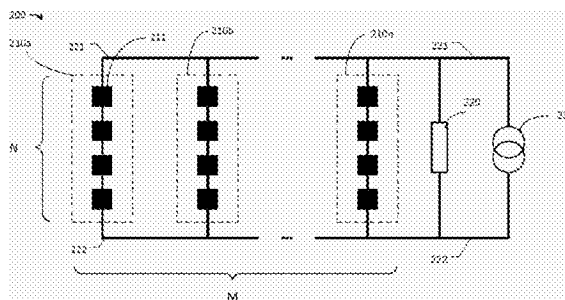
权利要求书1页 说明书9页 附图10页

(54)发明名称

制造量子放大器的技术及相关系统和方法

(57)摘要

根据一些方面,提供了一种量子电路,所述量子电路包括串联和并联耦接在一起的多个非线性电路元件,使得电路元件中的至少两个电路元件串联耦接在一起,并且电路元件中的至少两个电路元件并联耦接在一起,其中,量子电路被配置成用作放大器。



1. 一种量子电路,包括:

多个非线性电路元件,所述多个非线性电路元件串联和并联耦接在一起,使得所述电路元件中的至少两个电路元件串联耦接在一起,并且所述电路元件中的至少两个电路元件并联耦接在一起,

其中,所述量子电路被配置成用作放大器。

2. 根据权利要求1所述的量子电路,其中,所述电路元件是约瑟夫逊结。

3. 根据权利要求1所述的量子电路,其中,在所述量子电路的子电路内N个所述电路元件串联耦接在一起,并且其中,在所述量子电路内多个所述子电路并联M次耦接在一起。

4. 根据权利要求3所述的量子电路,其中,N至少为3,M至少为3。

5. 根据权利要求3所述的量子电路,还包括在所述多个子电路中的每个子电路内的第一电容器。

6. 根据权利要求3所述的量子电路,还包括在所述多个子电路中的每个子电路内的至少一个电感器。

7. 根据权利要求6所述的量子电路,其中,所述至少一个电感器包括一个或更多个所述电路元件。

8. 根据权利要求7所述的量子电路,其中,所述至少一个电感器包括与所述一个或更多个电路元件不同的一个或更多个电感器。

9. 根据权利要求3所述的量子电路,还包括多个第二电容器,每个所述第二电容器耦接在相邻成对的所述子电路之间。

10. 根据权利要求1所述的量子电路,其中,所述多个非线性电路元件基本上彼此相同。

11. 根据权利要求1所述的量子电路,其中,所述量子电路被配置成以混合共模模式来操作所述多个电路元件。

制造量子放大器的技术及相关系统和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请根据35U.S.C.§119(e)要求于2015年2月27日提交的题为“JOSEPHSON ‘FABRIC’ FORIMPROVED AMPLIFIERS”的美国临时专利申请第62/126,381号的权益,其全部内容通过引用并入本文。

技术领域

[0003] 本申请一般涉及量子信息处理。更具体地,本申请涉及用于制造量子放大器的技术。

背景技术

[0004] 放大器是实验物理学中的普遍存在的部件,并且通常用于将来自测量装置的信号的能量提高到足以超过用于读取信号的电子装置的噪声的水平。常规的放大器是耗散的,并且响应于施加到输入端子的输入信号,除了放大的输出信号之外,通常还产生一定量的噪声。

[0005] 量子信息处理利用量子力学现象,例如能量量化、叠加和/或纠缠,以常规信息处理中未利用的方式对信息进行编码和处理。预期使用量子计算而不是经典的经典计算可以更有效地解决某些计算问题。由于在量子电路中利用低能量,所以在以宏观(非量子)量级可以读取之前量子电路的测量需要放大。然而,常规放大器不适合用于量子电路,因为它们为了产生可用的输出信号引入太多的噪声,并且对量子电路的低能量表现出差的敏感性。

发明内容

[0006] 一些方面涉及量子电路,所述量子电路包括串联和并联耦接在一起的多个非线性电路元件,使得电路元件中的至少两个电路元件串联耦接在一起,并且电路元件中至少两个电路元件并联耦接在一起,其中,量子电路被配置成用作放大器。

[0007] 根据一些实施方式,量子电路元件是约瑟夫逊结。

[0008] 根据一些实施方式,在量子电路的子电路内N个电路元件串联耦接在一起,并且在量子电路内多个所述子电路并联M次耦接在一起。

[0009] 根据一些实施方式,N至少为3,M至少为3。

[0010] 根据一些实施方式,量子电路还包括在多个子电路的每个子电路中的第一电容器。

[0011] 根据一些实施方式,量子电路还包括在多个子电路的每个子电路中的至少一个电感器。

[0012] 根据一些实施方式,至少一个电感器包括一个或多个电路元件。

[0013] 根据一些实施方式,所述至少一个电感器包括与所述一个或多个电路元件不同的一个或多个电感器。

[0014] 根据一些实施方式,量子电路还包括多个第二电容器,每个第二电容器耦接在相

邻成对的子电路之间。

[0015] 根据一些实施方式,多个非线性电路元件基本上彼此相同。

[0016] 根据一些实施方式,量子电路被配置成以混合共模模式操作多个电路元件。

附图说明

[0017] 将参考以下附图对各个方面和实施方式进行了描述。应当理解,附图不一定按比例绘制。在附图中,各图中所示的每个相同或几乎相同的部件由相同的附图标记表示。为了清楚起见,并非每个部件都在每个附图中进行了标注。

[0018] 图1是描述示例性量子放大器的性能的图;

[0019] 图2是根据一些实施方式的量子放大器电路的电路图;

[0020] 图3是根据一些实施方式的包括约瑟夫逊结的量子放大器电路的电路图;

[0021] 图4A至图4C示出了根据一些实施方式的图3所示的电路的简化电路表示;

[0022] 图5是示出根据一些实施方式的量子放大器的增益的曲线图;

[0023] 图6是示出根据一些实施方式的量子放大器的增益基于电感和基于串联耦接在一起的量子放大器元件的数目如何变化的三维轮廓图;

[0024] 图7A是根据一些实施方式的对于电路的并行度的两个不同测量的量子放大器的无限增益点相对于放大器的电感的曲线图;

[0025] 图7B是根据一些实施方式的对于电路的并行度的两个不同测量的量子放大器的第一电容相对于放大器的电感的曲线图;

[0026] 图7C是根据一些实施方式的对于电路的并行度的两个不同测量的量子放大器的分流电容相对于放大器的电感的曲线图;

[0027] 图8是根据一些实施方式的示例性量子放大器的一部分的俯视图;以及

[0028] 图9是根据一些实施方式的描绘并联连接在一起的多个子电路的示例性量子放大器的一部分的俯视图。

具体实施方式

[0029] 放大器接收来自实验对象的输入信号,并且增加作为输出的信号的幅度。输入信号通常包括来自一个或更多个噪声源的噪声分量,并且放大器可能增加该分量的幅度,同时在其输出中还引入新的噪声源。高效的放大器将执行增加其输入(来自实验对象的信号)的信息承载部分的能量的任务,而不会引入太多噪声输出以使放大的信号与噪声的分离更加困难。放大器的“增益”是放大器的输出(包括噪声)相对于其输入的幅度增加,并且放大器的“带宽”是放大器可以产生放大的输出的输入频率的范围。

[0030] 量子放大器是使用量子力学技术以信息保存方式来放大量子信号的放大器。在一些情况下,量子信号可能仅包含少量量子激励(例如,光子)。量子放大器通常使用约瑟夫逊结,约瑟夫逊结是非线性和无耗散电路元件。虽然这些元件可以操作为量子放大器,但是这些器件的动态范围可能受到限制。放大器的动态范围是可以被有效放大的最大输入信号与最小输入信号之间的比例,并且对量子放大器而言相对于其增益和带宽具有高的动态范围可能是有益的。例如,具有相对低动态范围的量子放大器可能仅能够放大包括对应于3个光子至5个光子间的能量的输入信号,这将限制这种器件在量子电路中的使用。

[0031] 图1描述了示例性量子放大器的性能。在图1的示例中,图100的横轴101表示输入到放大器的功率,并且纵轴表示从放大器输出的功率。输入功率可以包括测量信号以及一个或多个噪声源。在输入功率 P_{NF} 之下,放大器输出仅由通过噪声基底表示的噪声支配。在量子放大器中,噪声基底是由于量子测量所固有的物理量的不确定性而引起的,并且理想的量子放大器不会产生大于量子噪声基底的噪声。由于量子测量的固有不确定性而仅添加最小量的噪声的量子放大器有时被称为“量子限制”。

[0032] 在图1的示例中,在输入功率 P_{NF} 与 P_C 之间的区域103中,放大器产生输出功率,输出功率与输入功率成线性比例。图100的该区域的斜率是放大器的增益。在高于输入功率 P_C 的情况下,在压缩区域中放大器开始偏离线性增益,并且最后在高于输入功率 P_F 时放大器增益下降到统一(unity)(有时称为“失效”),其中输出功率变得恒定而与输入功率无关。放大器的动态范围如图所示是在放大器产生输出高于噪声基底的点(输入功率 P_{NF})与压缩开始点(输入功率 P_C)之间的功率差。存在各种各样的方式来测量这些点中的每一个点,并且所示出的图不意在限制由任何特定技术对动态范围的定义。例如, P_C 可以是所谓的“1dB压缩点”,在该压缩点处,输出功率降低到1dB,低于如果放大器根据其增益产生输出则所产生的输出功率。然而,这仅仅是确定动态范围的一个边缘的一个示例,并且通常可以使用任何合适的技术。

[0033] 本发明人已经意识到并且认识到,可以通过制造其中布置有串联和并联的多个量子电路元件的电路来实现具有改进的动态范围的量子放大器。当单独使用时量子电路元件可以能够操作为放大器,但是也可以在量子电路中进行组合,以产生与元件单独表现出的动态范围相比具有更大的动态范围的放大。可以对串联和并联的量子电路元件的具体布置进行调节,使得当用作放大器时量子电路可以表现出期望的动态范围,而不损害量子电路的增益或带宽。

[0034] 根据一些实施方式,量子电路元件是非线性电路元件,例如约瑟夫逊结。通常用于产生宏观(非量子)放大器的电路元件(例如电感器和电容器)是线性元件,因此它们在电路中的组合通常可预测并且易于建模。然而,可以被操作为放大器的量子元件通常本质上是非线性的,因此无论将它们串联还是并联地组合在电路中,都不像宏观电路那么简单(straightforward)。

[0035] 根据一些实施方式,量子放大器中的量子电路元件基本上彼此相同。因为器件的每个部分将以与其他部分相同的方式起作用,所以减少元件之间的差异可以改进器件的性能。然而,由于量子电路元件彼此直接耦接,对它们进行杂混(hybridize),所以这防止了器件参数的变化。因此,虽然量子电路元件本身可能表现出轻微的变化,但是电路中的直接耦接可以因此防止性能损失。

[0036] 以下是与用于制造量子放大器的技术相关的各种概念和实施方式的更详细的描述。应当理解,本文描述的各个方面可以以许多方式中的任意一种来实现。本文提供了具体实现方式的示例仅用于说明目的。此外,以下实施方式中描述的各个方面可以单独使用或以任意组合使用,并且不限于本文明确描述的组合。

[0037] 在图2的电路图中所示的示例性电路200中,子电路210a包括串联耦接在一起的多个量子电路元件211。子电路201a可以包括串联耦接的任意数目的量子电路元件211,例如N个量子电路元件。如本文所使用的,“串联”布置的元件是指对元件进行连接以使得仅有一

个路径用于信号流过元件中的每个元件。例如,在图2的示例中,在子电路210a中仅一条路径用于信号在端子221与端子222之间流过所有元件211。在图2的非限制性示例中,示出 $N=4$ 。在图2的示例中,在子电路210a中串联耦接的量子电路元件(例如元件211)基本上彼此相同,尽管在一些实施方式中,每个量子电路元件可以被选择性地调节为具有不同的量子电路特性,以改进量子放大器的性能。

[0038] 尽管未示出,但是除了所示的量子电路元件之外,图2中的子电路210a还可以包括具有表示附加电容、电感和/或电阻的阻抗的任意数目的附加电路元件,其可以与量子电路元件串联和/或并联布置。子电路210a中的附加电路元件可以例如在子电路中以及/或者在子电路与子电路外的元件之间贡献无意的寄生和/或杂散阻抗。在一些实施方式中,可以有意地引入附加电路元件,其中阻抗被选择性地调节成用于改进量子放大器的性能。

[0039] 在图2的示例中的电路200包括源230,其可以包括任意合适的电压源和/或电流源。电路200还包括与子电路201a并联连接的源阻抗220(例如电阻)。如本文所使用的,“并联”布置的元件是指两个连接在相同的两个端子之间的元件。例如,在图2的示例中,子电路201a连接在源230的两个端子221与222之间。

[0040] 电路200可以放大由源230提供的输入源信号。例如,在一些实施方式中,源230可以是电流源,并且可以包括当被施加到电路200的其余部分时被电路200成比例地放大的输入电流信号。源230可以附加地提供任何合适的信号来为诸如210a的子电路中的元件的操作供电。

[0041] 在图2的示例中,多个子电路210a、210b、……210n并联耦接在一起。任意数目的子电路210可以并联耦接在一起,如图2所示的M个子电路。在图2所示的示例中,子电路基本上彼此相同,尽管通常不一定是这种情况。M个子电路中的每一个子电路包括串联连接的N个量子电路元件,使得 $N \times M$ 量子电路元件的二维网络在图2的示例中被杂混在一起。每个子电路还与电流源230和源阻抗220并联耦接,以便放大相同的输入信号以及接收来自源230的任何合适的电源信号。虽然示出了 $N \times M$ 个基本上相同的量子电路元件的二维网络,但是发明人已经认识到,可以将每个串联子电路中的元件调节为具有不同的量子电路特性,并且在每个并联子电路中可以提供不同数目的串联元件,以用于改进量子放大器的性能。

[0042] 图3是根据一些实施方式的包括约瑟夫逊结的量子放大器电路的电路图。图3中所示的电路300是图2所示的电路200的示例,其中,量子电路元件是约瑟夫逊结,并且其中在电路内还包括包含电容器和电感器的许多附加电路元件,其中一些附加电路元件包括在电路300的子电路内。

[0043] 图3中的电路图示出了电路300内的子电路310a的示意性示例。子电路310a包括作为串联连接的量子电路元件的N个相同约瑟夫逊结311的阵列。每个约瑟夫逊结具有约瑟夫逊能量 E_J ,并且在第一自谐振模式中跨每个单独约瑟夫逊结的规范不变的约瑟夫逊相位差为 φ/N ,其中, φ 是跨整个约瑟夫逊结的串联阵列的总约瑟夫逊相位差。约瑟夫逊结311的阵列共同提供电流 $I = I_0 \sin(\frac{\varphi}{N})$ (未示出),其中, I_0 是每个约瑟夫逊结的临界电流。在一些实施方式中,约瑟夫逊结可以是非耗散的。

[0044] 在图3的示例中,子电路310a包括串联耦接到N个约瑟夫逊结的阵列的两端的两个电感L 313。L可以是杂散电感,或者在一些实施方式中可以是具有被选择成调节量子放大

器的性能的值的有效电感。图3中的子电路310a还包括一个分流电容 C_s (314), 其具有被选择成用于分流包括电感 L 、约瑟夫逊结的阵列和第二电感 L 的串联阵列的两端的值, 以便调节约瑟夫逊结的谐振特性从而改进量子放大器的性能。

[0045] 在图3的示例中, 使用两个电容 C_a 315, 每个在包括子电路310a中的电感 L 、约瑟夫逊结的阵列和第二电感 L 的串联阵列的一端上以将子电路并联耦接到电流源 $I(t)$ 和源电阻 R 。电流源 $I(t)$ 包括基于要被放大的输入信号的分量以及泵浦信号 (pump signal) 分量, 以参数地调整子电路210a中的非线性约瑟夫逊结振荡器的放大器增益。

[0046] 在图3的示例中, M 个子电路310a、310b、……310n并联耦接在一起。并联耦接的 M 个子电路中的每一个子电路包括串联连接的 N 个约瑟夫逊结, 使得 $N \times M$ 个约瑟夫逊结的二维网络被杂混在一起。在图3的示例中, 每个子电路经由子电路的每侧上的电容 C_a 与电流源 $I(t)$ 和源电阻 R 并联耦接, 以放大相同的输入信号以及接收来自源 $I(t)$ 的任意合适的泵浦信号。

[0047] 在图3的示例中, 每个子电路经由两个电容 C_c 耦接到相邻的子电路。在一些实施方式中, C_c 可能是空间上彼此接近的子电路之间的无意的寄生电容。在某些情况下, 这种情况是否存在可能取决于子电路的制造方法。在一些实施方式中, 在放大过程中, 当所有其他模式被排斥到较低频率并因此被排除在放大过程之外时, C_c 可以用于从在所有约瑟夫逊结中操作的共模中排斥其他模式。

[0048] 已经描述了图3中本发明的实施方式的示例性电路图, 图4示出了图3中电路图的简化电路表示的序列以便于分析以说明一些实施方式。

[0049] 图4A是表示图3中的电路图的上半部分316中的电路元件的简化电路。图4A包括并联的相同数目的 M 个子电路, 每个子电路包括与仅一个电感 L 串联的 $N/2$ 个约瑟夫逊结、值为 $2C_s$ 的分流电容和仅一个电容 C_a , 电容 C_a 另外使每个子电路的第一端431连接至电流源 $I(t)$ 和源电阻 $R/2$ 的端子421。每个子电路的第二端432表示为接地并且可以与图3中的电路的水平中间平面315相比。在图3的示例中, 由于图3中的电路图关于中间平面315的对称性, 所以用于中间平面上方的部分316中的每个元件的诸如电流和电压的电路参数和与中间平面相对的对应该元件中的那些电路参数相同。因此, 为了分析图3中的全电路的性能特性, 分析图4A中的简化电路中的电路参数可能是足够的, 其基本上包括来自图3中的一半电路的元件或者在 C_s 、 R 和 $I(t)$ 的情况下的等效分割的元件。分析图4A中的包括 $(N/2) \times M$ 个约瑟夫逊结的简化电路可以降低电路分析的复杂性。

[0050] 可以进一步减少图4A中的简化电路表示中的 M 个并联子电路。由于图4A的示例中的 M 个并联子电路中的每一个子电路基本上彼此相同, 所以每个子电路内的电路参数的解决方案也可以基本上相同, 或者换句话说, 每个子电路与子电路的其余部分处于共模。仅一个代表性子电路的分析可以呈现足够的信息来解决图4A或图3中的整个电路。在图4B的示例中, 包括仅 $N/2$ 个串联连接的约瑟夫逊结、电感 L 、分流电容 $2C_s$ 和连接电容 C_a 的简化子电路被示出为连接至等效分割的源阻抗 $MR/2$ 。源阻抗被分割成使得当 M 个源阻抗并联组合时, 将再产生图4A中的 $R/2$ 等量电阻。

[0051] 图4C示出了通过将阻抗 C_a 、 $2C_s$ 和 $MR/2$ 转换成等效阻抗 C' 和 R' 来表示图4B中的单个子电路的另一示例简化电路。图4C中的简化电路包含较少数目的元件, 并且比图3中的示意性示例中的原始电路更易于分析。图4C中仅存在与阻抗 L 、 C' 和 R' 串联的 $(N/2)$ 个串联耦接

约瑟夫逊结。虽然未示出,但是 C' 和 R' 的值取决于布置在图3中的原始电路中的 M 个并联子电路的并行度 M 的测量。为了通过图4C的简化表示来帮助分析图3的电路,在某些情况下,在图4C的电路中包括输入电流源。通过执行在图4C中的简化的单个子电路中的非线性量子电路分析并且结合 M 次结果,可以确定来自如图3中的实施方式所示 N 个串联和 M 个并联合约瑟夫逊结阵列的竞争(competes)量子放大器电路响应。

[0052] 在一些实施方式中,确定用于非线性量子电路的电路哈密顿量(circuit Hamiltonian)可以允许如电路哈密顿量所指示的对以下进行量化:量子电路可以如何作为放大器执行以及关键放大器性质可以如何取决于量子电路的非线性。用于图4C所示的简化量子电路模型的非线性有效电路哈密顿量可以如下结合量子力学使用电路分析得出:

$$[0053] \quad \mathcal{H} = \hbar\omega a^\dagger a - \beta(a + a^\dagger)^4 \quad (\text{式 1})$$

[0054] 其中,非线性因子

$$[0055] \quad \beta = \frac{(\hbar\omega)^2 L_J p^2}{24N^2\phi_0^2 M} \quad (\text{式 2})$$

[0056] 在式1中, \hbar 是简化的普朗克常数; ω 是图4C所示的电路的振荡模式的频率。 a^\dagger, a 分别是创建和湮灭算符。在式2中, N 和 M 是图3的示例中 $N \times M$ 网络的约瑟夫逊结中的串联约瑟夫逊结和并联合约瑟夫逊结的子电路的数目, ϕ_0 是磁通量,且 $L_J = L_J(N/2)$ 是图4C的简化电路图中的串联耦接 $N/2$ 个约瑟夫逊结的总约瑟夫逊结电感,其中,每个约瑟夫逊结具有约瑟夫逊结电感 $L_J = \Phi_0^2/E_J$ 并且 E_J 是可以取决于每个约瑟夫逊结的构造来调节的每个结的约瑟夫逊能量。 p 是图4C中的示例电路图中的来自 $N/2$ 个串联耦接约瑟夫逊结的电感与同一电路中的总电感的参与比率,并且由下式定义:

$$[0057] \quad p = \frac{L_J}{L + L_J} \quad (\text{式 3})$$

[0058] 其中, L 是图4C所示的电感。

[0059] 图4C中的简化电路的振荡器频率为:

$$[0060] \quad \omega = \sqrt{\frac{p}{L_J C'}} \quad (\text{式 4})$$

[0061] 基于电路哈密顿量,其中 C' 是图4C的示例中的等效电容。

[0062] 基于电路哈密顿量的振荡器的质量因子 Q 为:

$$[0063] \quad Q = 1/(\omega R' C') \quad (\text{式 5})$$

[0064] 其中 R' 是图4C的示例中的有效电阻。 ω 和 Q 都是根据式4和式5的 C' 和/或 R' 的函数。由于如图4C所示的 C' 和 R' 两者都是从包含如图4B所示的两个独立变量 C_a 和 $2C_s$ 的电路变换的有效阻抗,所以在构造量子电路(诸如图3的示例中的量子放大器电路)期间调整 C_a 和 $2C_s$ 的每一个值可以使得独立调节量子放大器的 ω 和 Q 到用于改进量子放大器的性能的任意合适的值。

[0065] 如上所述,放大器的动态范围是可以被有效放大的最大输入信号与最小输入信号之间的差异,并且量子放大器相对于其增益和带宽具有高动态范围可能是有益的。在一些实施方式中,到量子放大器的输入信号的功率可以由信号输入源中(例如在图3的示例中的

电流源I(t)中的泵浦信号中的光子数 n_p 表示。

[0066] 在一些实施方式中,来自非线性参数放大器的增益可以取决于输入信号的功率。图5中的曲线501示出了在示例性非线性约瑟夫逊结量子放大器中作为输入功率 n_p 的函数的增益。如图5所示,非线性量子放大器增益随着 n_p 的增加而超线性地增加,直到 n_p 接近无限增益点 n_∞ ,为止,此后增益- n_p 关系不再适用。光子数的无限增益点 n_∞ 表示在图5的示例中在一定的增益下可由量子放大器有效放大的输入信号功率的最高量。因此,从0到 n_∞ 的输入信号功率表示量子放大器的动态范围,并且 n_∞ 可用作表示动态范围的品质因数(figure of merit)。因此,一般而言,为了具有大的动态范围,对量子放大器而言可能理想的是具有大的 n_∞ ,尽管如下所述可以存在以下 n_∞ 的值(下面讨论的 n_c),在所述 n_∞ 的值以上某些有害的影响可能超过益处。

[0067] 在一些实施方式中,当振荡器共振频率 ω 中的偏移等于线宽时,可以定义 n_∞ 的值。对于具有式1形式的电路哈密顿量的非线性量子放大器,当满足以下条件时产生 n_∞ :

$$[0068] \quad 1 - \frac{\partial_n E_n |_{n_\infty}}{\hbar\omega} = \frac{1}{4Q} \quad (\text{式 } 6)$$

[0069] 其中, E_n 是以光子数 n 作为输入信号能量进行泵浦的单谐波振荡器本征态的共振能量,而 $\hbar\omega_0$ 是振荡器基本模式的能量。

[0070] 使用式1中的电路哈密顿量解决式6产生:

$$[0071] \quad n_\infty = \frac{MN^2\phi_0^2}{Q\hbar\omega_L J_p^2} - \frac{1}{2} \quad (\text{式 } 7)$$

[0072] 因此,根据式7可以选择串联结数 N 和并行度 M 的测量值以及诸如 L 、 C_a 和 $2C_s$ 的其他电路参数,以调节 n_∞ 的值以改进量子放大器的动态范围。如上所述,尽管最终目的是为图3的电路300选择合适的 L 、 C_a 、 C_c 和 C_s 值,但是如本文所述的,图4A至图4C所示的简化表示有助于简化分析。

[0073] 在一些实施方式中,可以存在由光子数 n_c 表示的具体输入功率值,超过此值非线性量子放大器可能进入双稳态并且变得不适合于有效放大。在图5的示例中,输入功率 n_p 大于 n_c 的信号将不再稳定地放大。当 $n_\infty < n_c$ 时,动态范围等于 n_∞ ;当 $n_\infty > n_c$ 时,动态范围限于 n_c 。因此,如本文所述调节电路可以包括最大化由 n_∞ 表示的动态范围,同时还确保 n_∞ 不上升到高于 n_c 。

[0074] 在图4C的示例电路中,当跨 $N/2$ 个串联约瑟夫逊结阵列中的每一个的约瑟夫逊相位变化的平均值为 $\langle \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \rangle = \pi/2$ 时,达到 n_c ,其中, Φ 是跨整个串联约瑟夫逊结的阵列的总磁通量。解决图4C中的简化电路图产生:

$$[0075] \quad n_c = \frac{(N\pi\phi_0)^2 M}{32\hbar\omega_L J_p^2} \quad (\text{式 } 8)$$

[0076] 因此,根据式8可以选择串联结数 N 和并行度 M 的测量值以及诸如 L 、 C_a 和 $2C_s$ 的其他电路参数来调节 n_c 的值。在一些实施方式中,为了改进量子放大器的动态范围,可以共同地调节电路参数 N 、 M 、 L 、 C_a 、 C_c 和/或 C_s 使得 n_∞ 的值最大化而不超过 n_c 的值。

[0077] 对于 $M=1$ 和每个约瑟夫逊结的临界电流 $I_0=5\mu\text{A}$ 的实施方式,图6示出了如图4C中

的示例电路图中所示的 n_{∞} 作为电路电感 L 和串联结数 N 二者的函数的所计算的三维轮廓图。对于每个给定的 N 个串联约瑟夫逊结的阵列,由于式3和式7的结果,增加的 L 引起 n_{∞} 的增加。另一方面,在电感 L 固定的情况下,当 L 接近零时随着 N 的增加, n_{∞} 增加并且从而动态范围增加。然而,对于 L 的其他值,当在图6的示例中在 n_{∞} 随着 N 增加而逐渐增加之前,当 N 从1增加时, n_{∞} 首先降低。例如结果示出了常规的线性放大器的串联耦接和诸如单个约瑟夫逊结的非线性量子放大器的串联耦接的区别。在具有施加在 N 个串联耦接的相同的线性放大器上的总负载电压 V 的常规电路中,每个线性放大器接收减小的负载部分 V/N 。如果每个单独的线性放大器具有从0到 V_t 的动态范围,则对于 N 个串联耦接的线性放大器的动态范围将为 NV_t ,并且将随着添加的 N 数目的升高而增加。另一方面,在 N 个串联耦接的非线性约瑟夫逊结放大器阵列的阵列中,尽管跨每个单独约瑟夫逊结的约瑟夫逊相位差为 ϕ/N ,总相位差 ϕ 的一部分,由于量子约瑟夫逊结电感 L_J 和电路电感 L (如由式7中的归纳参与比率 p 表示)之间的相互作用,如在图6的示例中的前述分析所示,阵列的动态范围可以随着 N 而增加或减少,这在经典线性电路中不适用。

[0078] 图7A中的 $M=1$ 曲线701对应于图6中的轮廓图的截面图。在该示例中, N 固定为5个串联结。可以基于图7A中所示的 n_{∞} 对 L 的关系来选择适合于电感 L 的值。在一些实施方式中,串联连接的约瑟夫逊结的多个子电路可以并联耦接以提供更高范围的 n_{∞} 的值。在图7A的示例中, $M=5$ 曲线702示出了通过将并行度 M 的测量值增加到5并且并联耦接5个阵列,形成 5×5 网络的约瑟夫逊结放大器,动态范围或 n_{∞} 可以对于 $L=2.0\text{nH}$ 的电感调节至高达 3.1×10^3 ,高于当仅使用1个串联的约瑟夫逊结的阵列时在 $L=2.0\text{nH}$ 时 $n_{\infty}=0.6$ 。因此,调节 M 和/或 N 的值可以导致改进的动态范围,而 n_{∞} 不超过值 n_c 。

[0079] 在图7B的示例中,在品质因子 $Q=100$ 下振荡器基频选择成在 $\omega_0 = 10$ GHz处,其对应图4C中的示例电路图的如式4和式5中定义的 C' 和 R' 的值设置具体约束,并且因此对如图4B中所示的电容 C_a 和 $2C_s$ 的值的设置具体约束。图7B的示例中的 $M=1$ 曲线721示出了对于具有5个串联结和并联的1个这样的串联结的约瑟夫逊结放大器的阵列在 C_a 和 L 的选择之间的关系。图7B的示例中的 $M=5$ 曲线722示出了扩展并行度的测量以包括 $M=5$ 并联阵列将对于给定 L 产生较小的 C_a 值。因此,在一些实施方式中,当构造附加并联子电路时可以选择较小的电容器 C_a 值。本发明人已经认识到,在包括量子电路元件的器件中,可能更难以制造具有电容值较小例如 20fF (如图7B的示例中的阴影区域所示)的小电容器。尽管可以使用任意合适的半导体制造技术来制造具有被调节成用于改进量子放大器的性能的电容器值的结构。

[0080] 类似于图7B的示例,图7C的示例示出了具有基频 $\omega_0 = 10$ GHz和品质因数 $Q=100$ 的振荡器的电感 L 与分流电容 C_s 的值之间的关系。在图7C的示例中的 $M=1$ 曲线741和 $M=5$ 曲线742示出了对于给定 L 的 C_s 的选择对并联结 M 的数目不如对如图7B的示例中所示的 C_a 敏感。由于根据图7C在 L 变大时可以使用较小的 C_s ,所以在一些实施方式中可以通过使用具有附加电感的约瑟夫逊结的阵列来消除包括氮化硅的分流电容器的使用。

[0081] 尽管未示出,但是在图4C的电路图中对于每个约瑟夫逊结添加本征结电容 C_J 对图7C中的计算结果产生非常小的变化。因此,包括本征阵列电容 C_J 只对分流电容 C_s 的选择有较小影响。

[0082] 图8示出了 $N=5$ 、 $M=1$ 的非线性约瑟夫逊结放大器800的示例性阵列的顶视图。根据图8的示例,在串联约瑟夫逊结阵列810中的5个约瑟夫逊结811中的每一个可以具有临界电流 $I_0=6\mu\text{A}$ 。图8中的串联约瑟夫逊结放大器800还包括设置在电感L上方和下方的两个弯曲线电感器813。分流电容器 C_s 814与串联阵列和电感器并联放置。两个分流电容器 C_a 815将串联结阵列810和电感器813连接到被设置在图8中电路800的两端处的两个接触焊盘816。虽然对于电容器 C_a 示出了 $700\mu\text{m}$ 的长度,但也可以使用合适的尺寸来构成电容 C_a 和 C_s 。

[0083] 图9示出了具有 $M=3$ 的非线性约瑟夫逊结放大器900的示例性阵列的顶视图。根据图9的示例,相邻子电路诸如910a和910b以固定的距离彼此间隔开。虽然使用了 $50\mu\text{m}$,但是可以使用任何合适的间隔来构造耦接电容 C_c 以消除共模以外的模式。

[0084] 已经描述了本发明的至少一个实施方式的几个方面,应当理解,本领域技术人员将容易想到各种改变、修改和改进。

[0085] 这样的改变、修改和改进旨在成为本公开内容的一部分,并且旨在在本发明的精神和范围内。此外,尽管指出了本发明的优点,但是应当理解,并不是本文描述的技术的每个实施方式将包括所有所述的优点。一些实施方式可能不实现本文中描述为有利的任意特征,并且在一些情况下,可以实现一个或更多个所描述的特征以实现另外的实施方式。因此,上述描述和附图仅作为示例。

[0086] 本发明的各个方面可以单独使用、组合使用或以前面所述的实施方式中没有具体讨论的多种布置方式使用,并且因此在其应用中不限于在前面的描述中所阐述或在附图中示出的部件的细节和布置。例如,在一个实施方式中描述的方面可以以任意方式与其他实施方式中描述的方面组合。

[0087] 此外,本发明可以被实施为一种方法,已经提供了方法的示例。作为方法的一部分执行的动作可以以任意合适的方式排序。因此,可以构造其中以与所示的顺序不同的顺序执行动作的实施方式,其可以包括同时执行某些动作,即使在示例性实施方式中被示出为顺序动作。

[0088] 在权利要求中使用诸如“第一”、“第二”、“第三”等的顺序术语来修改权利要求元素本身并不意味着一个权利要求要素相对于另一个权利要求要素的任何优先、优先级或顺序,或者执行方法的动作的时间顺序,而仅仅被用作区分具有某个名称的一个权利要求要素与具有相同名称的另一元素的标签(因此使用序数术语)以区分权利要求要素。

[0089] 此外,本文使用的措辞和术语是为了描述的目的,而不应被认为是限制性的。本文中的“包括”、“包含”或“具有”、“含有”、“涉及”及其变型的使用是指包括其后列出的项和其等同内容以及附加项。

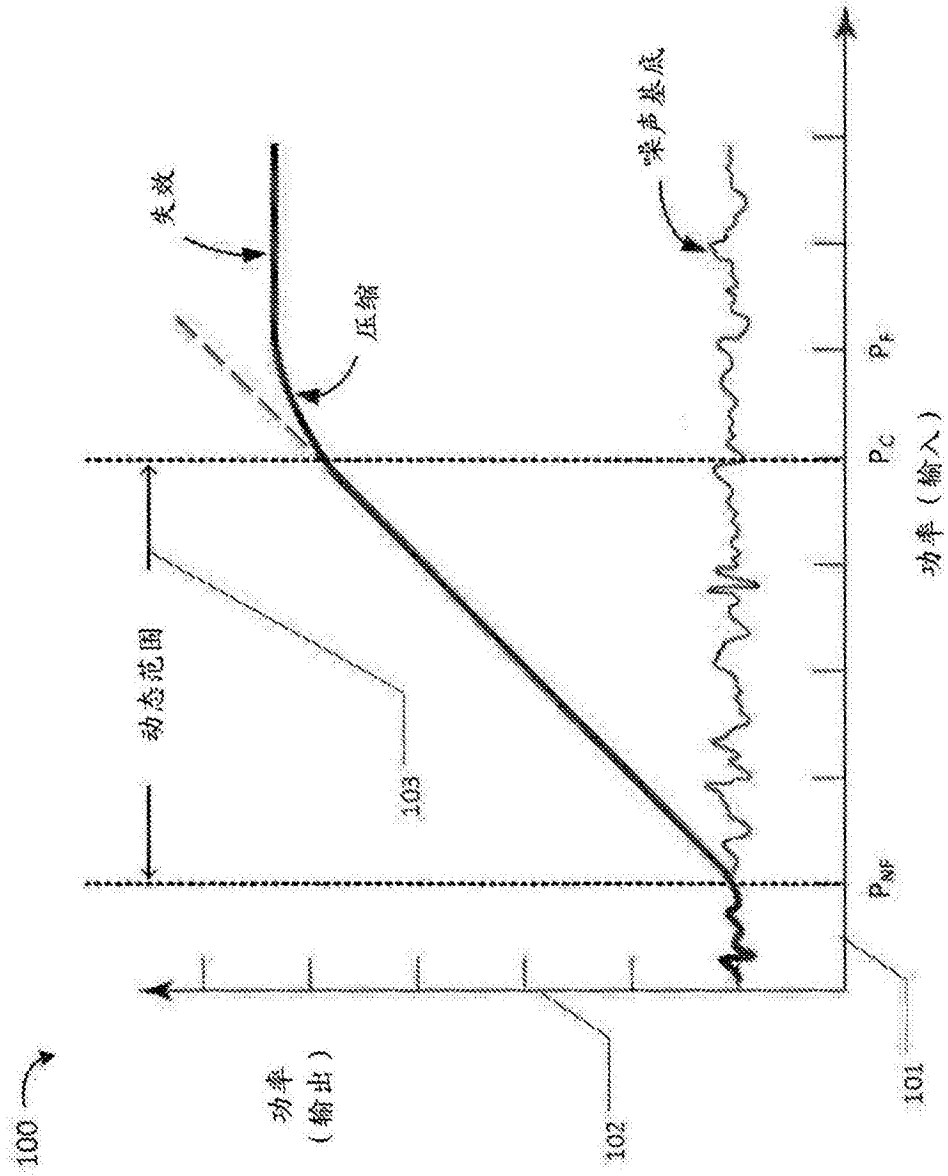


图1

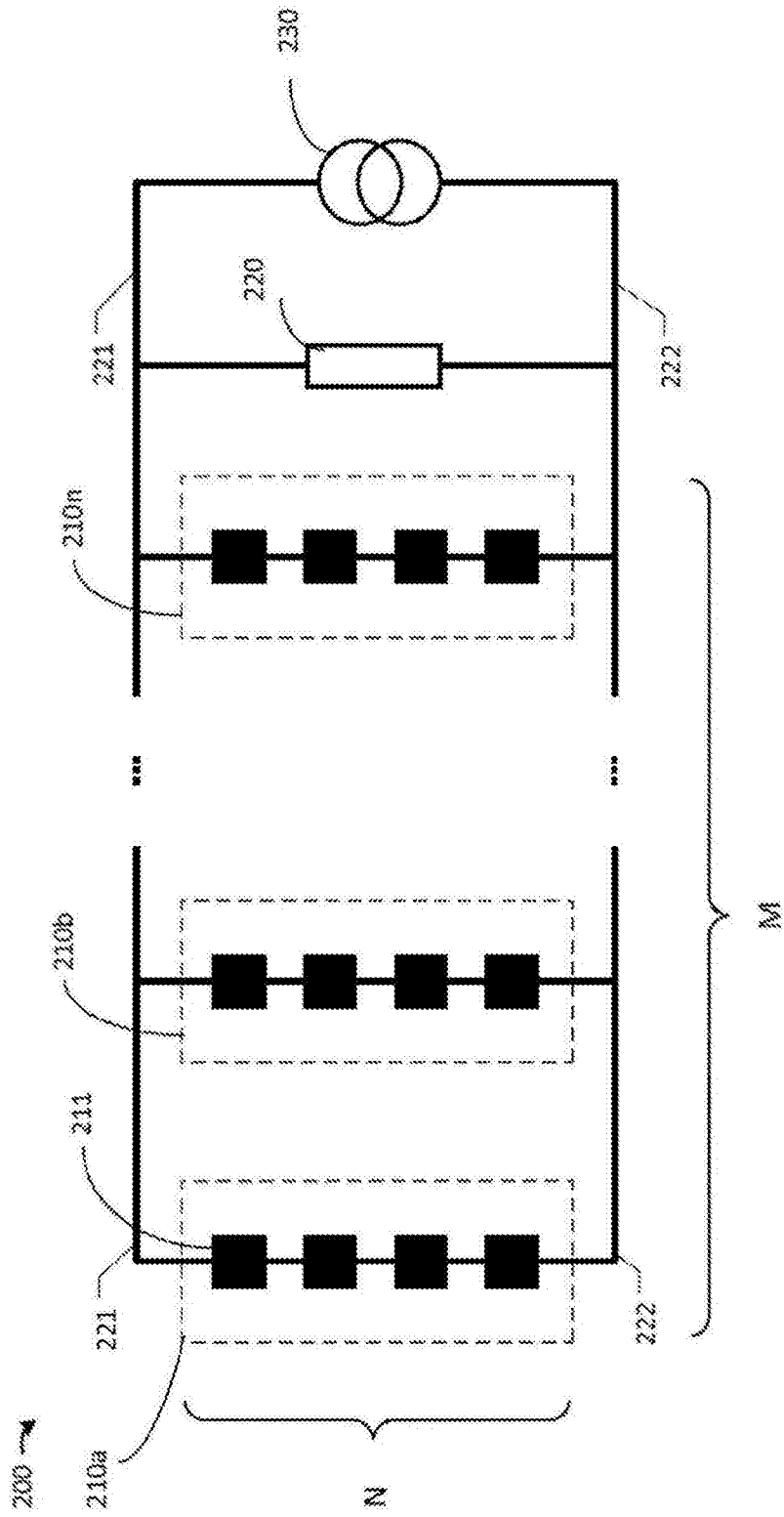


图2

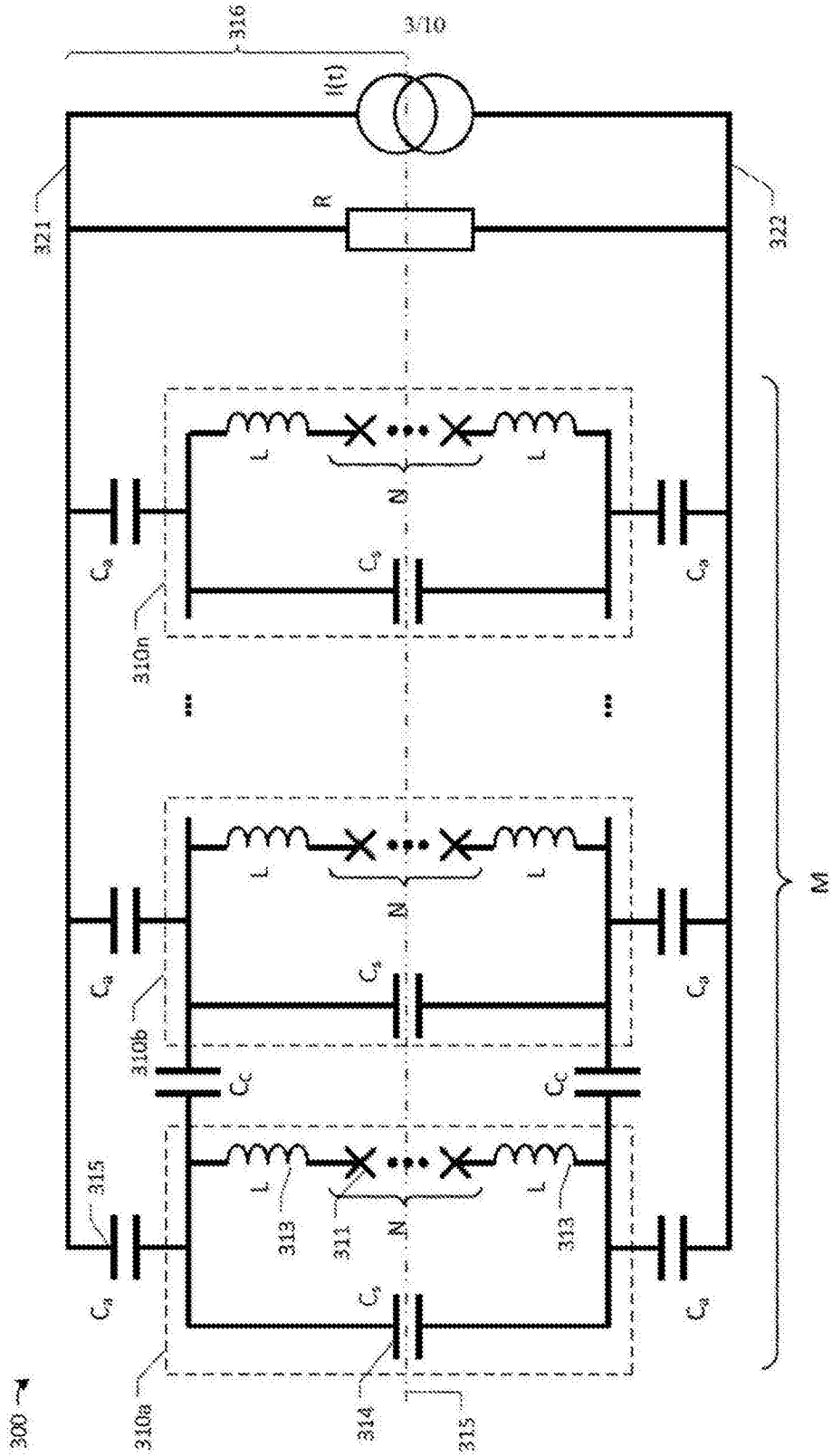


图3

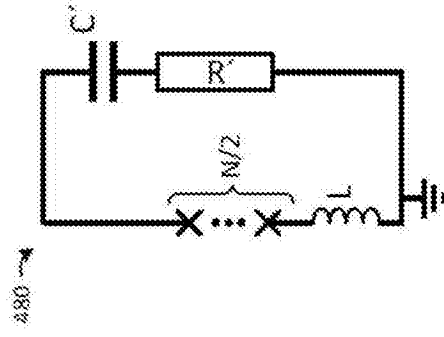
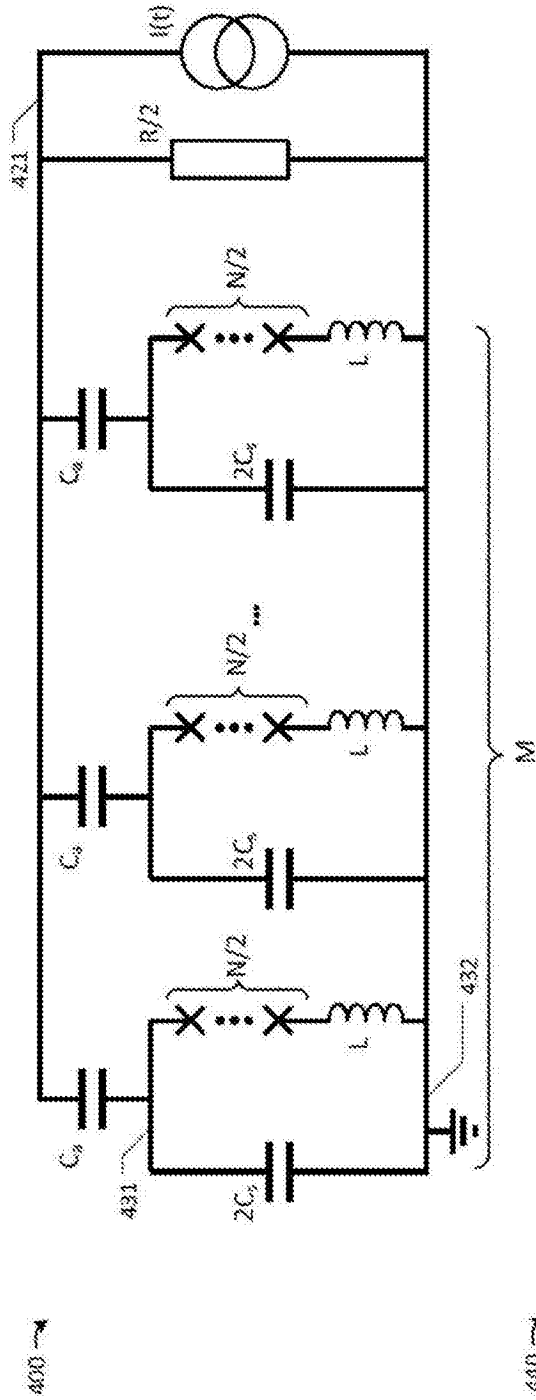


图 4A

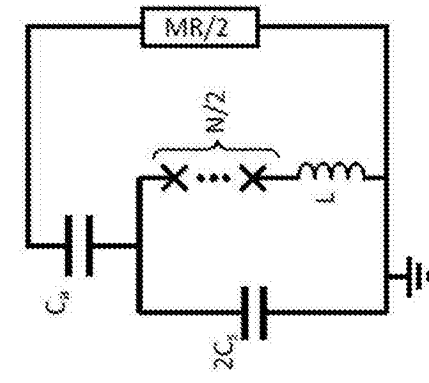


图 4B

图 4C

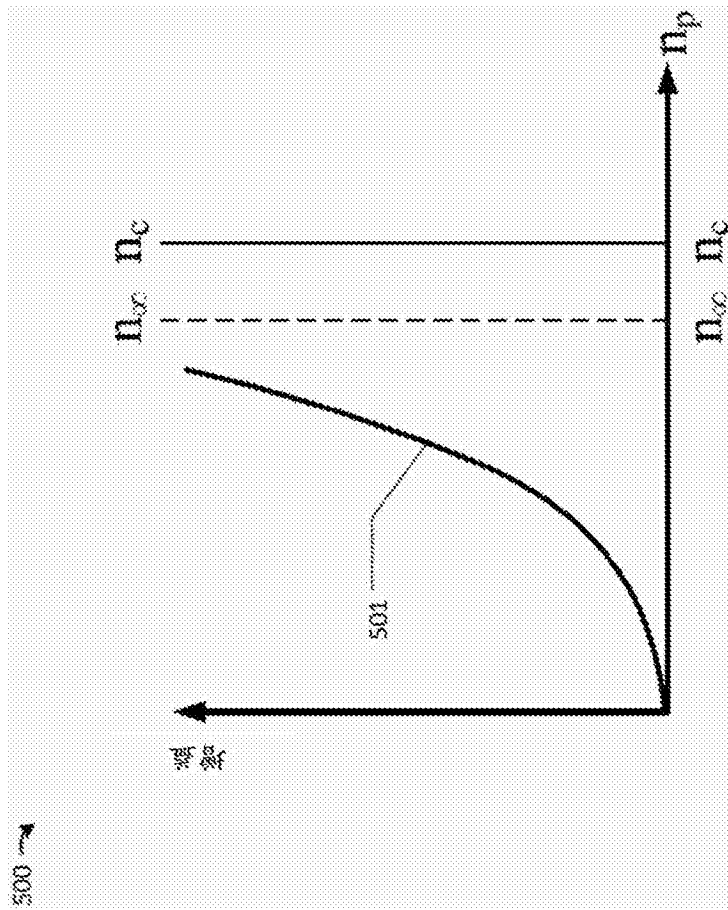


图5

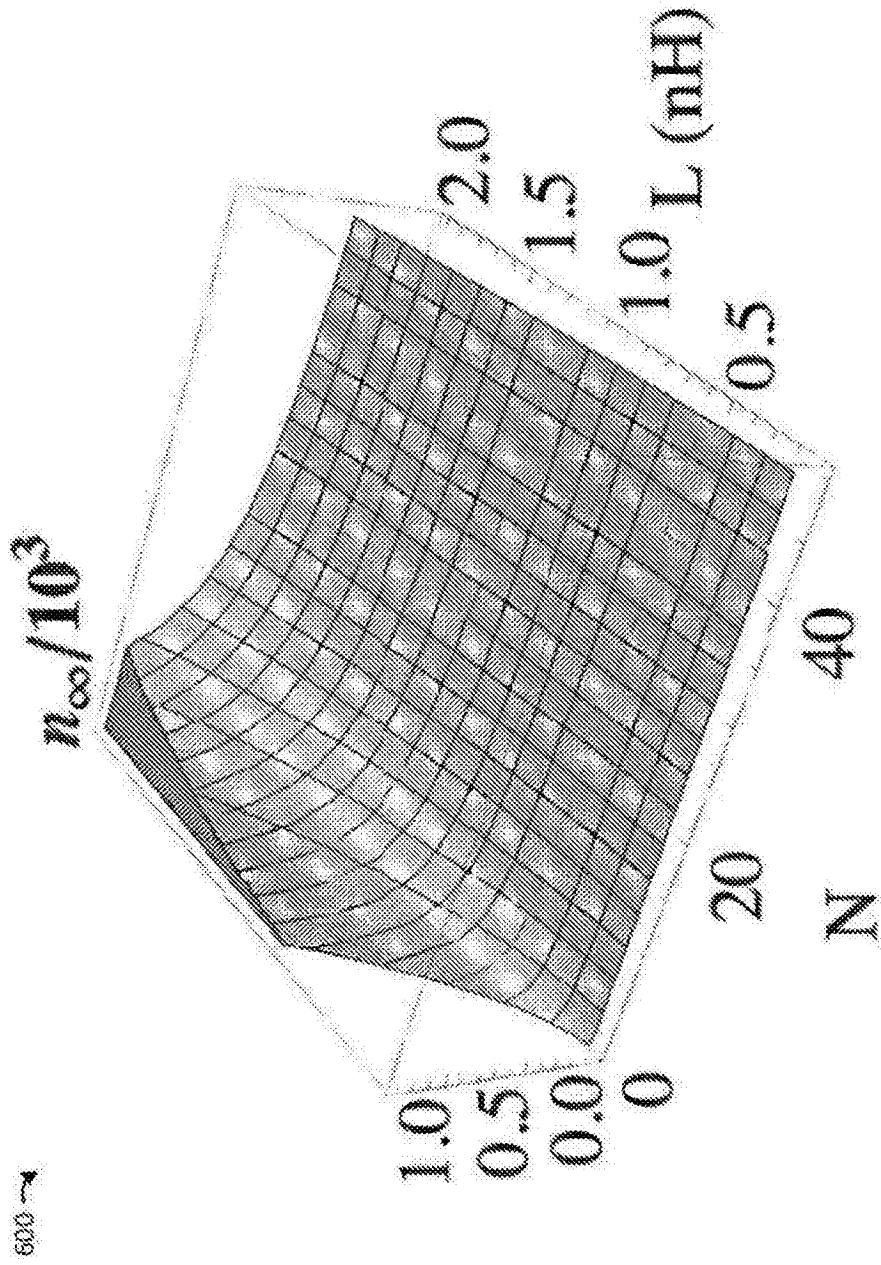


图6

700 ↘

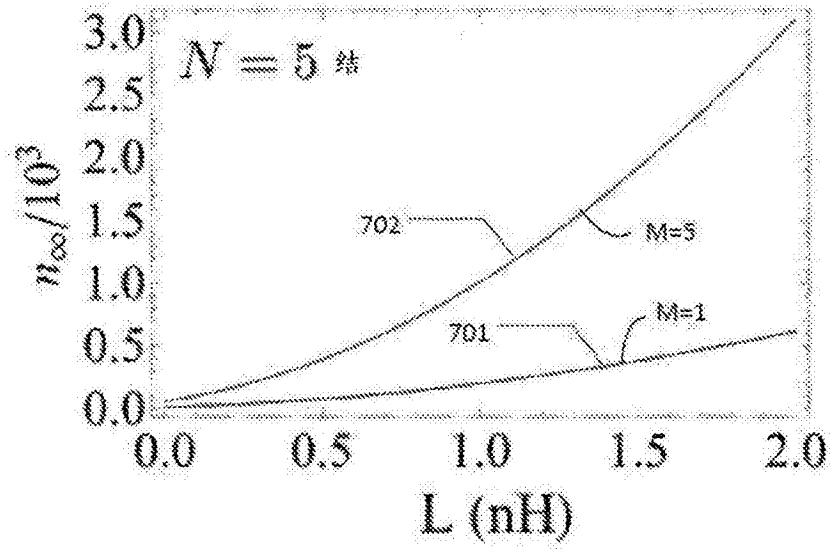


图7A

720 ↘

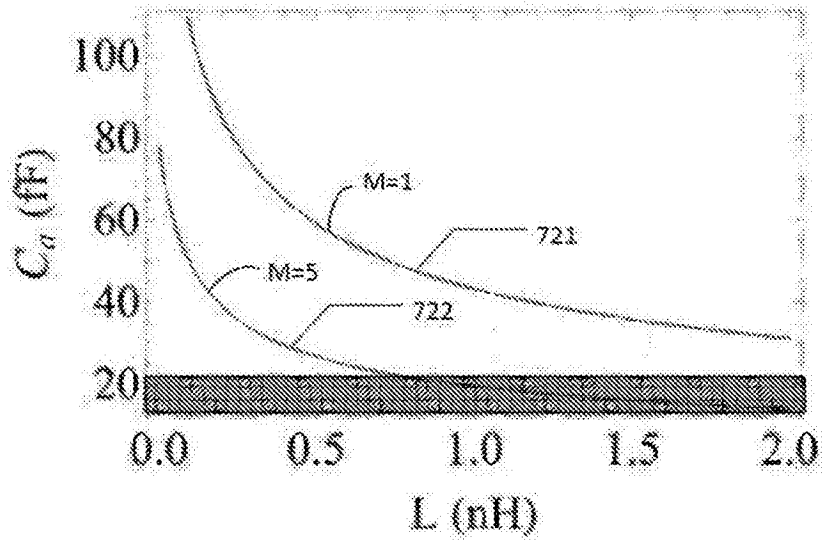


图7B

740 →

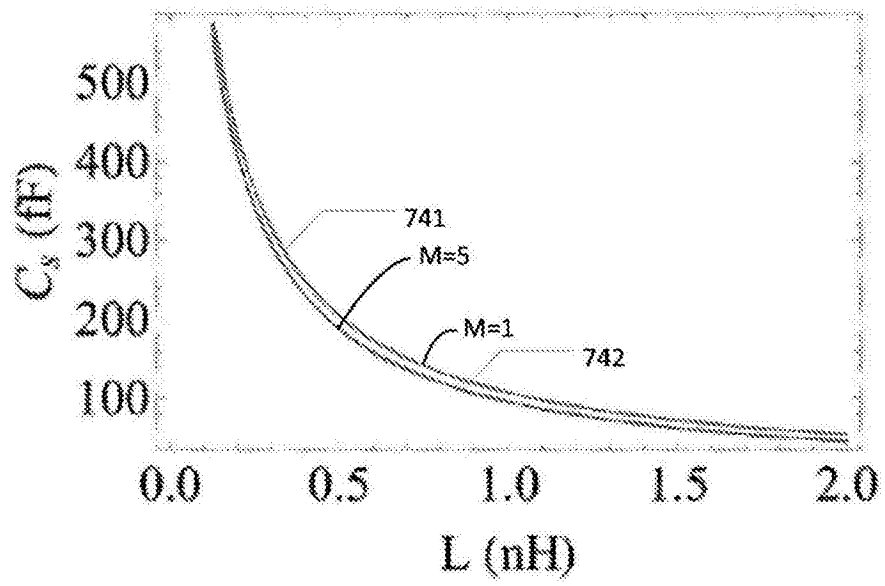


图7C

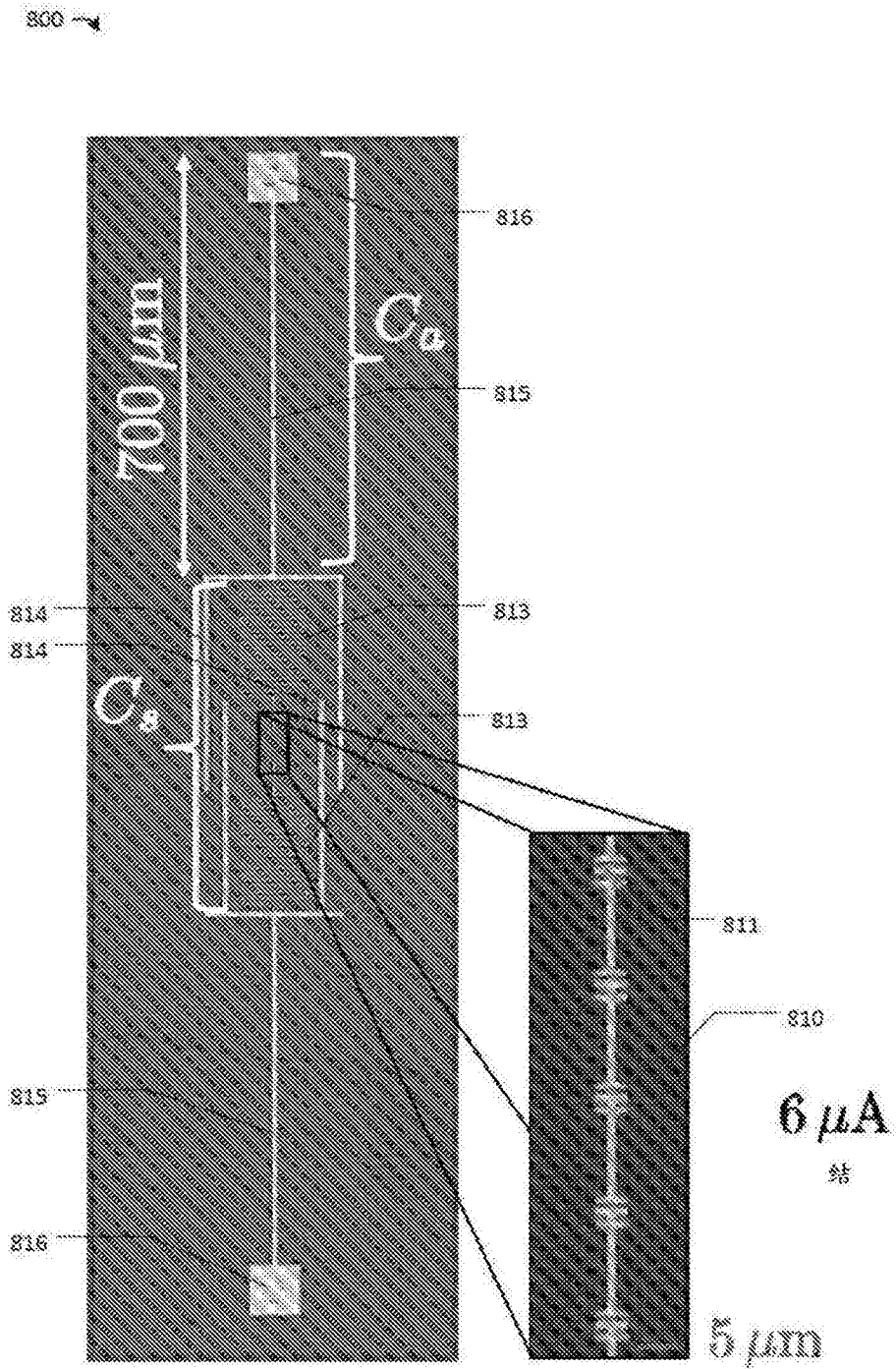


图8

900 →

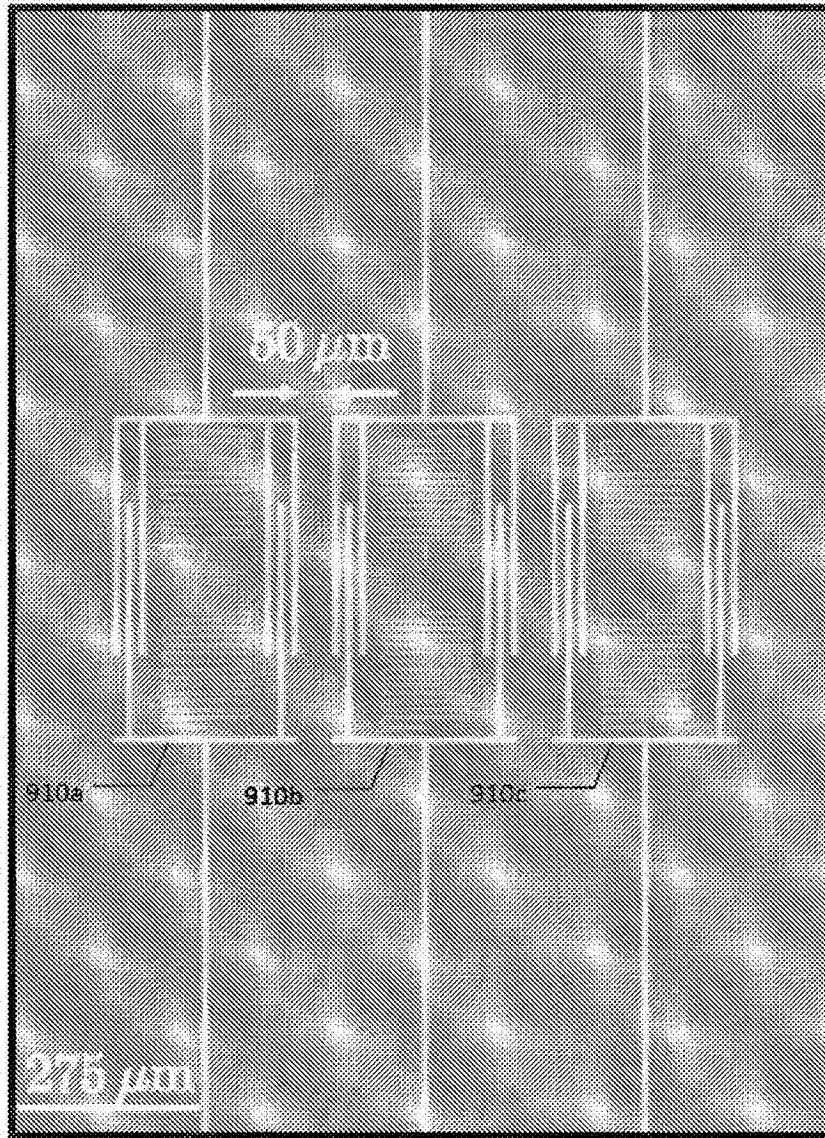


图9