

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G01R 33/02

G01R 33/035



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03804675.X

[43] 公开日 2005 年 7 月 13 日

[11] 公开号 CN 1639582A

[22] 申请日 2003.2.26 [21] 申请号 03804675.X

[30] 优先权

[32] 2002.2.26 [33] US [31] 60/360,090

[86] 国际申请 PCT/US2003/005752 2003.2.26

[87] 国际公布 WO2003/073117 英 2003.9.4

[85] 进入国家阶段日期 2004.8.26

[71] 申请人 心脏磁力成像公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 N·特拉尔沙瓦拉 A·巴克哈雷夫

Y·波利亚科夫

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

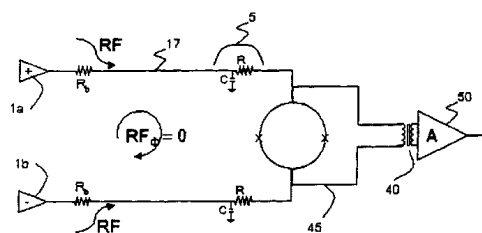
代理人 杨生平 叶恺东

权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 12 页

[54] 发明名称 次-皮可特斯拉磁场检测器

[57] 摘要

一种通过使用被感应性地耦合到未被屏蔽的梯度计的超导量子干扰设备(SQUID)而用于测量次-皮可特斯拉磁场的仪器包括一滤波器,所述滤波器用于将从磁和电上被耦合的射频干扰(RFI)滤出SQUID。这个 RFI 经由未被屏蔽的梯度计被大体上耦合到 SQUID。此外,屏蔽密封被用来从电磁上将滤波器电路屏蔽于 SQUID,并且采用一方法来增加输入线圈与 SQUID 之间的阻抗而不减少仪器的总灵敏度。



ISSN 1008-4274

1. 在用于测量磁场的包括被感应耦合到梯度计的超导量子干扰设备 (SQUID) 的装置中, 一种用于将 SQUID 屏蔽于通过梯度计而捡拾的射频干扰 (RFI) 的设备, 所述设备包括:

5 滤波器电路, 其具有被互连到第一和第二端子的电阻器-电容器 (RC) 组合, 以便于滤波器电路从电气上平行于 SQUID 的输入线圈及梯度计两者, 其中滤波器电路有效地将在梯度计中所产生的被磁感应以及被电感应的 RFI 分量从输入线圈中旁路掉。

2. 根据权利要求 1 的装置, 其中所述滤波器电路包括:
10 连接在第一端子与第三端子之间的第一旁路电阻器 R_s ;
连接在第二端子和第三端子之间的第二旁路电阻器 R_s ; 以及
连接在第三端子和系统地之间的接地电容器 C_g 。

3. 根据权利要求 1 的装置, 其中所述滤波器电路包括:
连接在第一端子和第二端子之间的第一旁路电阻器 R_s ;
15 第一串联接地电路, 包括连接在所述第一端子和系统地之间的第一接地电阻器 R_g 和第一接地电容器 C_g ; 以及
第二串联接地电路, 包括被连接在所述第二端子和系统地之间的第二接地电阻器 R_g 和第二接地电容器 C_g 。

4. 根据权利要求 1 的装置, 其中所述滤波器电路包括:
20 第一串联旁路电路, 包括被连接在所述第一端子和第三端子之间的第一旁路电阻器 R_s 和第一旁路电容器 C_s ; 以及
第二串联旁路电路, 包括被连接在所述第三端子和第二端子之间的第二旁路电阻器 R_s 和第二旁路电容器 C_s ; 以及
被连接在第三端子和系统地之间的接地电容 C_g 。

25 5. 根据权利要求 1 的装置, 其中所述滤波器电路包括:
第一串联旁路电路, 包括被连接在所述第一端子和第二端子之间的第一旁路电阻器 R_s 和第一旁路电容器 C_s ; 以及
第一串联接地电路, 包括被连接在第一端子和系统地之间的第一接地电阻器 R_g 和第一接地电容器 C_g ; 以及
30 第二串联接地电路, 包括被连接在所述第二端子和系统地之间的第二接地电阻器 R_g 和第二接地电容器 C_g 。

6. 根据权利要求 1 的装置, 其中所述滤波器电路包括:

被连接在第一端子与第三端子之间的第一旁路电阻器 R_s ;
被连接在第二端子和第三端子之间的第二旁路电阻器 R_s ;
被连接在第一端子和第二端子之间的第三旁路电阻器 R ; 以及
被连接在第三端子和系统地之间的接地电容器 C_g .

- 5 7. 在用于测量磁场的包括被电耦合到梯度计的超导量子干扰设备 (SQUID) 的装置中, 其中所述 SQUID 包括将 SQUID 垫圈与输入线圈分离开预定距离 t 的隔离器, 所述输入线圈被互连到梯度计, 通过增加输入线圈和 SQUID 垫圈之间的电容性阻抗 Z_{CI} , 一种方法用于降低通过梯度计而将射频干扰 (RFI) 耦合进 SQUID, 所述方法包括下述步骤:
- 10 减少输入线圈中的导体宽度, 以为了减少线圈的电容 C_i ; 以及
提供具有若干匝数 N 的线圈, 以便于输入线圈 L_{strip} 的带状线电感同 $N^2 * L_{SQ}$ 相比较可被忽略, 其中 L_{SQ} 是 SQUID 垫圈的电感, 这样输入线圈的电感 L_i 约等于 $N^2 * L_{SQ}$;
这样 C_i 得到减少, 并且 Z_{CI} 得到增加, 并且装置的灵敏度 S 未被
15 改变, 其中 S 反比于梯度计电感 L_g 和输入线圈电感 L_i 之和.
8. 根据权利要求 7 的方法, 其中 N 超过 20.
9. 根据权利要求 9 的方法, 其中 N 超过 100.
10. 根据权利要求 1 的装置, 进一步包括用于容纳 SQUID 和 RC 电路的屏蔽, 以便于 RC 电路与 SQUID 从电磁上被隔离.
- 20 11. 根据权利要求 10 的装置, 其中所述屏蔽包括两个从电磁上被隔离的室, 每个室用于容纳 SQUID 和 RC 电路中的一个, 其中所述两个从电磁上被隔离的室由具有直径为 d 的第三室互连.
12. 根据权利要求 11 的装置, 其中所述直径 d 小于屏蔽总直径 d_{SH} 的 $1/10$.
- 25 13. 根据权利要求 11 的装置, 其中用于容纳 RC 电路的一个被电磁隔离的室包括接地端子.

次-皮可特斯拉磁场检测器

相关申请的交叉引用

- 5 本申请要求于 2002 年 2 月 26 日由至少一个与本申请相同的发明人提交的 U.S.60/360, 090 的优先权, 该申请在此被引入作为参考。

技术领域

- 10 本发明总体上涉及测量磁场的领域。更具体而言, 本发明涉及通过
在非屏蔽环境中使用超导量子干涉设备 (SQUID), 利用梯度计和磁强计来测量低电平磁场。

背景技术

- 15 超导量子干涉设备 (SQUID) 磁传感器是旨在测量低于约 10^{-12} 特斯拉 (T) 的许多灵敏磁强计的核心。这个水平在例如由活性有机体所产生的磁场 (经常被称为生物磁场) 范围内。

SQUID 对磁通量 ϕ_B 敏感。磁通量 ϕ_B 可被定义为沿着正交于给定面积而被定位的矢量 z 穿过所述给定面积的平均磁场的投影, 或从数学上:

$$\phi_B = B_z * A \quad (1)$$

- 20 低特斯拉直流 (DC) SQUID 典型地由两个额定相同的 Josephson 结组成, 所述结串连在典型直径为 10^{-14} 至 10^{-2} mm 数量级的超导、电连续的回路中。基于 SQUID 的磁强计及梯度计是目前使用当中的最灵敏的磁场检测器。

- 25 SQUID 典型地通过使用铌-铝-氧化铝-铌 (Nb-Al-AIO_x-Nb) 结技术被制造在芯片上, 其中相关的结以及 SQUID 环路由薄膜形成。所述设备的微米级特征可通过使用照相平版印刷技术而形成。SQUID 芯片被典型地密封在超导屏蔽中用于将设备屏蔽于环境磁通量。要被测量的磁通量典型地被显著较大直径的环路或线圈 (例如, 10-20 mm) 截断, 所述环路或线圈经由输入线圈被感性耦合到 SQUID。这些较大的线圈通常由
30 在绝缘圆柱形支撑上面所缠绕的薄绝缘超导线 (例如, 铌) 构成。具有单个线圈或环路的设备可被称为磁强计, 具有多于一个线圈或环路的组合的设备可被称为梯度计。这样的设备被示意性地示例于例如图 4 中。

不幸地，基于 SQUID 的梯度计的这一史无前例的灵敏度的取得要付出很大代价，因为灵敏度可以致使设备被周围噪声所淹没并且当被暴露于射频干扰 (RFI) 时则停止工作。结果是，这些设备经常仅可以操作在高度屏蔽的密封内，这对所有现实生活的应用是不实际的。因而，如果基于 SQUID 的设备无需这种屏蔽而能够操作，则将是非常有益的。如果我们能够做到于此，则我们便拥有了实用的灵敏磁场测量仪器。本申请公开了用于取得这个目标的方法和装置。

在 RFI 存在时，SQUID 可失去灵敏度，或甚至停止发挥作用。强的 RFI 源包括，例如在医院中的超声波机器、AM 及 FM 无线电信号、电视和蜂窝通信传输。在低于 RF 带的频率下，SQUID 电子装置可以被用来测量噪声，并且已知的软件技术可以被用来消除这个噪声（例如，Bick 等人的“SQUID Gradiometry for Magnetocardiography Using Different Noise Cancellation Techniques”）。

在现有技术系统中用来消除 RFI 的简单但经常不实用的方案一直是将系统环绕几层精细的铜网并且对操作区域进行绝缘。铜网显著地降低了 RFI，但并不消除它，因为难以削减通过连接电缆的传输。虽然 SQUID 本身可被适宜地屏蔽在小的 Nb 管内部，但是拾拾测量信号且将它馈送到 SQUID 的未被屏蔽的梯度计仍然要将 RFI 耦合进入 SQUID，因为梯度计本身不能够被屏蔽（否则它不可能拾拾要被测量的信号）。因此，存在对如此技术的需要，即其允许梯度计将感兴趣的信号耦合进 SQUID，而无需附加地将 RFI 耦合进入 SQUID。

下述参考提供了对现有技术的 SQUID 系统的总体说明，但是它们未能提供有效手段用来将 SQUID 屏蔽于射频干扰。

Fujimaki 的日本专利 (JP 4212079) 提供了 SQUID 磁场传感器，其中阻尼电阻器 R1 和 R2 被用来仅消除 RFI 的磁部分。

Ishikawa 等人的题为“Effect of RF Interference on Characteristics of DC SQUID System”以及 Koch 等人 (Appl. Phys. Lett., vol 65, pp.100-102) 的题为“Effects of radio frequency radiation on the dc SQUID”的非专利文献提供有关 SQUID 系统中 RFI 干扰的背景信息。

Bick 等人 (“SQUID Gradiometry for Magnetocardiography Using Different Noise Cancellation Techniques”) 及 Tarasov 等人 (“Optimization of Input Impedance and Mechanism of Noise Suppression in a DC SQUID

RF Amplifier”) 的非专利文献总体上示例 SQUID 设备使用噪声消除技术。

5 Simmonds 的 U.S.专利 (5,319,307) 涵盖了改善 SQUID 的性能。对超导屏蔽层的参考文献指向使 SQUID 芯片屏蔽于 RFI, 并且应该注意到总体上所有的 SQUID, 甚至是用在被屏蔽的密封内的那些 SQUID, 均被保持在超导 Nb 管内部, 使梯度计经过 Nb 管中的小孔从外部被连接。

Colclough 的 U.S.专利 (5,532,592) 涵盖了在多通道系统中的电子装置 (通量被锁定的环路)。应该注意到对黄铜密封的参考是在电子装置中用来屏蔽于 RFI 的常规程序; 但是这个程序不适合于阻止通过穿过密封的线而传输的 RFI。

15 Seppä 的 U.S.专利 (6,066,948) 公开了 SQUID 的阻尼独立结。应该注意到这是公用的程序且有关这个程序的更多信息可见于由 Weinstock 所著的题为 “Applications of Superconductivity” (Kluwer, Netherlands, 2000) 的书籍。还应该进一步注意到这个程序允许对影响 SQUID 操作的结的内部振荡进行阻尼并且并不降低被耦合到 SQUID 本身的 RFI。

Steinbach 等人的 U.S.专利说明一种阻尼 SQUID 的内部谐振的方法。所述阻尼有助于使 SQUID 屏蔽于 RFI 的磁部分并且类似于 Goto (JP 4160380) 的日本专利, 所述日本专利提供如在现有技术 SQUID 系统中所实施的噪声抑制技术中的总体背景。

20 此外, Kawai (JP 7198815) 的日本专利显然讲授沿着与 Steinbach 等人的专利相同的线路。

发明内容

25 本发明提供了一种装置和方法, 用于防止 RFI 被耦合进 SQUID 而无需牺牲系统的信噪比, 同时在未被屏蔽的真实情形下操作系统。

在优选实施例中, 滤波器电路以新颖的方式被结合以将 RFI 从 SQUID 中去除而无需屏蔽梯度计环路。滤波器电路采用电阻器和电容器的组合 (RC 电路) 而形成, 其中电阻器从 SQUID 的输入线圈中将被磁耦合的 RFI 旁路, 并且电容器从 SQUID 中将被电耦合的 RFI 旁路。应该注意, 尽管描述的是采用传统电阻器和电容器的各种 RC 电路, 但是
30 可以使用具有类似特性 (例如, 就截止频率和清晰度) 的任何形式的滤波器电路。例如, 可有效地使用由超导带状线制成的滤波器, 所述超导

带状线切断 RFI 分量以免其从未被屏蔽的梯度计被耦合进被屏蔽的 SQUID.

本发明还设想用于从电磁上将滤波器电路与 SQUID 隔离以用于改善的 RFI 屏蔽的密封罩, 以及设想一种用于将经改善的 RFI 从 SQUID 中去耦合的方法, 其使输入线圈与 SQUID 之间的阻抗 Z_{c1} 能够得到增加而无需损失装置的灵敏度。

本发明允许在未受屏蔽的环境中广泛使用 SQUID 系统, 甚至在存在强的 RFI 时。这提供了在各种生物医疗和无损评估应用中无需牺牲性能而采用 SQUID 的可能性。事实上, 本发明使能对实用的次-皮可特斯拉检测器的制造。

附图说明

通过阅读本发明具体示例性实施例的下述说明并结合所附附图, 可获得对本发明更全面的理解, 其中:

图 1 示出对称式 SQUID 偏置电子装置的示意图, 其中绞合线对 (绞合未被示出) 防止磁通量穿过环路;

图 2 示出对称式 SQUID 加热器电子装置的示意图, 其中绞合线对 (绞合未被示出) 防止磁通量穿过环路;

图 3 示出被耦合到 SQUID 的反馈/调制线圈的示意图;

图 4 示出本发明的第一实施例;

图 5 示出本发明的第二实施例;

图 6 示出在低频情况下图 4 实施例的等效电路图;

图 7 示出在高频情况下图 4 实施例的等效电路图;

图 8 示出图 4 实施例的第一变型;

图 9 示出图 5 实施例的第一变型;

图 10 示出图 4 实施例的第二变型;

图 11 (a) -11 (d) 示出根据本发明原理的 SQUID 设计, 其使能减少 RFI 被耦合进 SQUID。传统设计被示于图 11 (a) 和 11 (c), 并且发明性设计被示于图 11 (b) 和 11 (d); 以及

图 12 示出为将 SQUID 容纳在腔中而设计的铌屏蔽, 所述室从电磁上隔离于图 4-10 的滤波器电路。

在各种附图中, 同样的参考数字指定同样的或相似的本发明元件。

具体实施方式

本公开内容被视为对本发明原理的示范以及对其结构的相关功能性技术说明，并且并不旨在意味着限制本发明超出具体要求的范围。本领域5 5 域中那些普通的技术人员可预想到超出在此所示范的、属于所提出权利要求的本发明范围之内的其它可能的变型。

图 4 呈现根据本发明第一实施例而构建的基于 SQUID 的梯度计的电路图。传统地，装置 100 包括经由输入线圈 30（由电感 L_1 表示且相对于 SQUID 垫圈 20 具有互感 M_1 和电容 C_1 ）被耦合到 SQUID 20（具有垫圈10 10 电感 L_{SQ} ）的梯度计 10（在图 4 中由电感 L_g 表示）。

RFI 可以电和磁两种方法被耦合进 SQUID 20。例如，参考图 4，借助于充当像电磁天线的连接线（如经由输入线圈耦合梯度计 10 的传输线14, 14a 和/或经由变压器 40 耦合放大器 50 的连接线 45，和/或参考图 3，经由反馈/调制线圈 33 耦合 RFI 的传输线 15）RFI 可耦合进 SQUID 垫15 圈 20。RFI 还可以经由穿过由传输线 14, 14a 和 45 所形成的各种环路的磁通量被耦合进 SQUID 垫圈 20。此外，在一些情形下，RFI 可在 SQUID 垫圈 24 上产生大的 DC 场。由于 SQUID 是非常低阻抗的设备，所以它们通常最受被磁耦合的 RFI 的影响。然而被磁耦合的 RFI 还可是大量的，特别地在接近及超出 FM 无线电带频率时，在此时 SQUID 连接线可以20 20 充当传输线。

从根本上，RFI 和其它形式的电磁干扰（EMI）可经由任何电子连接被耦合进 SQUID。正如已经理解到的，通过采用允许人们去除到 SQUID 的地连接的对称电子装置，RFI 可被降低或消除。电子装置的对称性使25 25 被耦合进 SQUID 的经传输的 RF 能量得到降低。例如，参考图 3，通过传输线 15 被捡拾的 RFI，包括通过反馈/调制线圈 33 和到 SQUID 垫圈 20 的剩余电连接可被耦合的残余能量，根据本发明的原理通过使用特殊的对称滤波器电路可被消除。

对称的 SQUID 电子装置消除了接地环路问题。图 1 和 2 分别示出对称的 SQUID 偏置和加热器电子装置。在图 2 中，加热出现在电阻器 7（被30 30 描述为 R_H ）上。对称性确保如果连接线充当天线，则在它们上所感应的 RFI 电压可在 SQUID 位置处被抵消。

如由例如图 1-3 所示，对称信号源 1、2 和 3 将信号放置到传输线 17、

16 和 15 上面。在进行此的同时，RFI 和其它周围的噪声还经由线 15-17 被传输。这在传输线 15-17 上感应出 RF 电场，以及在由这些传输线 15-17 所形成环路上的磁通量 Φ 以及被磁耦合的干扰 RF_{Φ} 。

如图 1 和 3 所示，对称的 RC 滤波器 5 (f_c : 1-10 兆赫) 和电容器 6 防止驻波在谐振频率被建立: (a) 在传输线 15-17 以及 45 上, 在接近 10-100 兆赫, 以及 (b) 在 SQUID 垫圈以及或者输入线圈和/或者反馈/调制线圈 33 之间, 处于几千兆赫。附加地, 如果传输线 15-17 和 45 被配置成牢固的绞合线对, 实际上没有磁通量 Φ 穿过相联系的电路环路。电路对称性确保例如, 如果图 1 的传输线 17 充当天线, 则在它们上面所感应的 RFI 电压在 SQUID 垫圈 20 处被抵消。

图 3 示例反馈/调制线圈 33, 其共享 SQUID 反馈和调制电路。通过环路的磁干扰被形成传输线 15 的牢固的绞合线对消除 (这样 Φ 实际上为 0)。应该注意到 RFI 天线般的捡拾还可以通过反馈线圈 33 和 SQUID 垫圈 20 之间的电容耦合被耦合到 SQUID。调制线圈 33 的电容 C_f 可典型地为约 10 皮法拉 (pF)。调制信号具有最大达 1 兆赫 (MHz) 的分量。因此, RC 滤波器 5 被如此选择以便于它具有大于 10 MHz 的有效带宽, 并且电容 C 足够大 (与 C_f 相比较) 以缩小来自 SQUID 垫圈 20 的大多数 RFI。RC 滤波器 5 的代表值是 $R=100$ 欧姆 (Ω) 以及 $C=1$ 毫微法拉 (nF)。

图 4 示例作为测量装置 100 部件的本发明的第一实施例。RC 滤波器 5 (也被示例于图 3 中) 可以被用来减低经天线耦合的 RFI, 但是梯度计 10 还引入穿过由传输线 14 所形成环路的磁通量。结果是, 为了消除经天线耦合的 RFI 以及磁通量 RF_{Φ} , 图 4 的本发明将电阻性旁路器 60 耦合到接地电容器 70 以为了将这个磁通量从分量环路 14a 和输入线圈 30 中短路掉 (short out)。作为选择地, 单个电阻性旁路器 60 可随着如图 5 中所示用于测量装置的对称 RC 滤波器 5 被耦合。

为了更好地理解本发明是如何工作的, 适用于工作系统的参数被示例如下。应该注意到这些具体的实例被提供仅用于示例性和说明性的目的, 并且因此不应该被推断为对所提出权利要求的本发明范围的限制。

针对图 4 中的电路 100, 在各种操作频率下的阻抗值被列表于表 1 中。各种参数的值是: $C_i=140$ pF (测量的), $L_i=300$ 毫微亨利 (nH), $C_g=10000$ nF, $R_s=1.5\Omega$ 。

表 1 图 4 中第一实施例的阻抗计算

F(MHz)	Z_{Ci}	Z_{Li}	$2 \cdot R_s$	Z_{Cg}	$Z_{Cg} + R_s$	$\sim dZ_{Ci}$	$\sim dZ_{Li}$
1	113 Ω	1.8	3	16 m Ω	1.5		
5	22.6	9	3	3.2	1.5		
100	1.13	180	3	0.16	1.5	11.3	18
500	0.226	900	3	0.032	1.5	11.3	18

图 5 中电路 200 的阻抗值被提供在图 2 中。除 $R_s=3\Omega$ 和 $R_g=1.5\Omega$ 以外，所有的值与表 1 中的相同。图 5 中的电路 200 因此基本上等效于图 4 中的电路 100。

表 2 图 5 中实施例的阻抗计算

F(MHz)	Z_{Ci}	Z_{Li}	R_s	Z_{Cg}	$Z_{Cg} + R_g$	$\sim dZ_{Ci}$	$\sim dZ_{Li}$
1	113 Ω	1.8	3	16 m Ω	1.5		
5	22.6	9	3	3.2	1.5		
100	1.13	180	3	0.16	1.5	11.3	18
500	0.226	900	3	0.032	1.5	11.3	18

对于被表示为图 6 中等效电路 300 的图 4 中的电路 100，在较低的频率（即低于 5 MHz）下，输入线圈阻抗 Z_{Li} 足够低并且伴随 RFI 的波长足够长。正如可从表 1 和 2 以及图 4 和 5 中所观察到，接地抽头电容器 70（被表示为 C_g ）能够有效地旁路出从 SQUID 中所捡拾的 RFI 电分量，因为输入线圈 30 和 SQUID 垫圈 20 之间的电容性阻抗 Z_{Ci} 远远大于 $Z_{Cg}+R_g$ （或表 2 中的 $Z_{Cg}+R_g$ ）。

在较高频率下，图 4 中的电路 100 根据图 7 中所示的等效电路 400 工作，其具有分布式的 L-C 电路元件：经由分布式电容性阻抗 21 和互感 22 被耦合的分布式的输入线圈元件 30 和分布式的感应 SQUID 垫圈元件 20。在这种情况下元件 dZ_{Ci} 、 dZ_{Li} 的表示性近似值被列表于表 1 和 2 中的最后两列。通过考虑在相同的长度段上，一旦某一长度反馈线圈 30 的部分电感性阻抗（其中 dZ_{Li} 与输入线圈 30 的长度成比例）开始变成大于反馈线圈 30 和 SQUID 垫圈 20 之间的电容性阻抗 21（其中 dZ_{Ci} 与输入线圈 30 的长度成反比，因为对于 L 和 C 两者线圈宽度被固定）时，这些近似值被加以估算，然后可以有效地被视为作为分布式 LC 网络而工作。例如对于针对 Z_{Li} 和 Z_{Ci} 约为 10-20 Ω 的值这可发生。在那些频率

下这些数字仍然高出 $Z_{c_g} + R_g$ (或表 2 中的 $Z_{c_g} + R_g$) 约 10 这样的因子, 这样由 RC 电路 60、70 进行的旁路仍然有效。在超出 1 GHz 的频率下, 图 7 中的系统 30-21-22-20 表现为被耦合到得到良好阻尼(具有 R_s 或 R_g) 的输入环路电路的横向磁 (TM) 模式谐振器, 因此仍然避免了操作的非稳定性。

如例如由图 4 所示, 通过对由传输线 14 所限定的梯度计环路进行短路, 旁路电阻器 60 有效地去除穿过由传输线 14a 所限定的输入环路的 RF 磁通量以防止影响 SQUID。对于高于约 5 MHz 的频率 Z_L 远远大于 R_s (例如, 如表 1 和 2 中所示)。对于较低的频率, 通过将部分 RF 通量从 SQUID 垫圈 20 中旁路, 旁路电阻器 R_s 仍然有所帮助。原则上, 这个效应可进一步通过降低 R_s 的值而得到改善。不幸地, 在较小的 R_s 和通量噪声之间存在平衡, 根据下述关系式它 (从通过输入线圈 30 被耦合的 Johnson 电流噪声中) 添加进 SQUID 中:

$$\Rightarrow \langle i_n \rangle = \sqrt{4k_B T / R} \Rightarrow \langle \phi_n \rangle = M_i \langle i_n \rangle \quad (2)$$

其中 K_B 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数且 T 是电阻器 R 的温度, i_n 是 Johnson 电流噪声且 Φ_n 是在 SQUID 中所感应的通量噪声。

因此我们可以得出结论: 对于图 4 和 5 中的装置 100、200, R_s 的最佳值是 3Ω (在表 1 中是 $2 \cdot R_s$ 或在表 2 中是 R_s)。然而, 应该注意到这个最佳值可基于与本发明系统电路相联系的其它参数而变化。

鉴于前面的讨论, 清楚地是它可证明消除被磁耦合的低频 RFI (低于 5 MHz) 是非常困难的。在这种情况下, 我们想要指出通过在 5 MHz 或更高下使用传统的 SQUID 通量锁定环路 (FLL) (例如, 见由 H.Weinstock 所著题为 "Applications of Superconductivity", Kluwer, Netherlands, 2000) 我们可以被更好地加以服务。在这种情况下, 棘手的低频 RFI 可以被 FLL 作废, 因为现在它将足够快以在这个频率范围跟踪 RFI。从增加 FLL 频率将取得的另一优点是回转速率也将变快, 并且因此对来自附近的主功率源和大气中的电发光的快速切换噪声更加具有免疫力。

图 4、5 的创造性实施例的附加变化包括: 特色性的与旁路电阻器 60 串联 (见, 例如图 8 和 9 的电路 500 和 600) 的旁路电容器 71 (由 C_s 表

示), 以及占主要位置的与由旁路电阻器 60 和接地电容器 70 所限定的电路(见, 例如图 10 的电路 700) 并联的附加旁路电阻器 61 (由 R 表示)。旁路电容器 71 被如此选择, 以便于它形成阻挡低频通量噪声 RF 进入 SQUID 垫圈 20 的高通电路(具有 R_s 和 L_i)。然而 C_s 的引入可在一些情况下导致 SQUID 操作的不稳定性。这个问题可以由图 10 的电路 700 加以避免, 其中可以致使并联的电路旁路电阻器 61 具有非常小的电阻。这有助于在低于 5 MHz 的频率下降低 RFI。

在图 4 和 10 中所示的实施例简单且紧凑, 并且因此较图 5、8 和 9 中所示的实施例对寄生效应具有更高的抵抗力。另一方面, 在图 5 中所示的实施例具有这样的优点, 即可以使 R_g 更小, 因此使 $Z_{C_g} + R_g$ 远远小于 Z_{C_i} 。由于电路 200 的对称性, 这个方案将改善 RF 的电压滤波而没有将附加的通量噪声引入进 SQUID。同样, 如图 9 中的电路 600 所示, R_s 可以单独地被降低用于对 RF 磁拾拾进行滤波, 并且仅一个附加的旁路电容器 71 需要被添加。在图 8 的电路 500 中, R_s 可以得到降低, 因此使 $Z_{C_g} + R_s$ 远远小于 Z_{C_i} , 并且因此使能 RF 电压滤波得到改善。但是, 在这种情况下, 需要两个附加的旁路电容器 71。

虽然在本说明中仅示例了几个具体的电阻式和电容式滤波器, 但是本领域中的技术人员将容易地意识到可使用具有类型特性(截止频率和清晰度特征以及消除干扰的电及磁分量)的任何其它形式的滤波器电路。作为实例, 一个实施例可以包括由超导带状线组成的超导滤波器, 所述超导带状线切断所有 RFI 分量以防从未经屏蔽的梯度计被耦合进经屏蔽的 SQUID。

表 1 和 2 建议如果 SQUID 被如此重新设计, 以便于输入线圈 30 和 SQUID 垫圈 20 (由 C_i 所表示) 之间的电容得到降低, 则 Z_{C_i} 将变得较大。这个增加的阻抗使 SQUID 20 更加免疫于 RFI 的电分量。

图 11 (a) -11 (d) 示出包括 SQUID 垫圈 20 和螺旋输入线圈 30、31 的 SQUID。线圈 30、31 通过提供间隔厚度 t 的隔离器 29 与 SQUID 垫圈 20 分开。为了清楚起见输入线圈 30、31 的仅 $N=5$ 匝数被示出, 但是在实际的设计中 N 可接近 100 (对于包括后面的感应计算和公式的详细讨论, 请参见由 H. Weinstock 所著题为 “Applications of Superconductivity” Kluwer, Netherlands, 2000 的书籍中的章节 1 和 2)。图 11 (c) 和 11 (d) 示出 SQUID 的顶视图, 以及图 11 (a) 和 11 (b)

示出通过虚线“e-e”所取的横断面视图。与输入线圈 30 相比较,降低输入线圈 31 的线宽度 w 将以 $C \propto N.w/t$ 的比例来减少电容 (比较图 11c 和 11d)。

输入线圈 30、31 与 SQUID 垫圈 20 之间的互感 M_i 被给出如下:

$$5 \quad M_i \approx N.L_{SQ} \quad (3)$$

其中 L_{SQ} 是 SQUID 垫圈的电感。因而,通过降低线宽度 w , M_i 没有被改变。输入线圈的电感 L_i 被给出如下:

$$L_i = N^2.L_{SQ} + L_{strip} \quad (4)$$

其中 L_{strip} 是组成输入线圈 30 的线的带状线电感。虽然对于足够大的 N (对于额定的 SQUID 设计,这对应于 N 大于 20) 当 w 被减少时 $L_{strip} \approx \mu_0.t/(w+2t)$ 增加,但是 L_{strip} 可以被忽略且 $L_i \approx N^2.L_{SQ}$ 。在此 μ_0 是自由空间的介电常数。因此,对于实用设计, L_i 也独立于 w 。

因此,概括地,输入线圈线的线宽度的降低 (如由图 11(c)和 11(d)中的输入线圈 30 和输入线圈 31 所示) 导致 C_i 的减小,但是当 M_i 和 L_i 未发生变化时,并不导致任何灵敏度 $S \propto M_i \phi / (L_i + L_g)$ 的损失 (在此 L_g 是梯度计的电感且独立于 SQUID 的设计)。 C_i 的减小导致 Z_{Ci} 的增加从而使它远远大于 Z_{Cg} , 并且这反过来进一步降低进入 SQUID 垫圈 20 的电 RFI (请参见表 1 和 2 以及图 6 和 7)。

如果滤波器线靠近 SQUID 垫圈 20, 则流经滤波器电路线的 RF 电流还可以被耦合进 SQUID。为了防止这 (见, 例如图 12(a)-12(c)), 包括两个被电磁隔离室 91、92 的 SQUID 屏蔽 90 可被用来单独地容纳 SQUID 91a (被示出在室 91 中) 和滤波器电路 92a (被示出在室 92 中)。现有技术 SQUID 屏蔽仅具有一个室。虽然附加室的使用增添了制造过程的难度,但是它被需要以实现 SQUID 仪器非屏蔽操作所需要的 RF 免疫水平。

图 12(a)-12(c)示例了包括外壳 96 的示范性 SQUID 屏蔽 90, 所述外壳带有孔 97 用于接收具有突出部分 98、99 的插件 93。当插件 93 被插入进孔 97 时, 每个突出部分 98、99 密封地装配在孔 97 内以分别地限定被电磁密封的室 91、92。

在插件 93 中的第二孔 94 (例如, 小于屏蔽直径的十分之一) 允许在室 91 中的 SQUID 91a 与室 92 中的滤波器电路 92a 之间连接的电线通路, 而没有任何泄漏。为室 92 中的滤波器电路 92a 提供接地连接 95,

这样现在接地环路电流屏蔽于 SQUID。除了对称性电子装置以外，这个隔离完全消除了在装置中的任何接地问题。

概括地，用于有效实施对 RFI 不灵敏的实用次-皮可特斯拉磁场检测器的一种系统和方法被公开。虽然已经示出和说明了各种实施例，
5 但是要理解到这种公开内容并不旨在限制本发明，而是它旨在涵盖如所附权利要求所限定的属于本发明的实质和范围之内的许多修改和可选择的结构。例如，本发明不应该被限制于具体的硬件或滤波器电路类型。因此，本领域中的一个技术人员可以通过使用具有类似特性（例如，截止频率和特征的清晰度）的任何形式的滤波器电路（仅作为一
10 实例，同超导带状线所构成的滤波器）来加以设想。

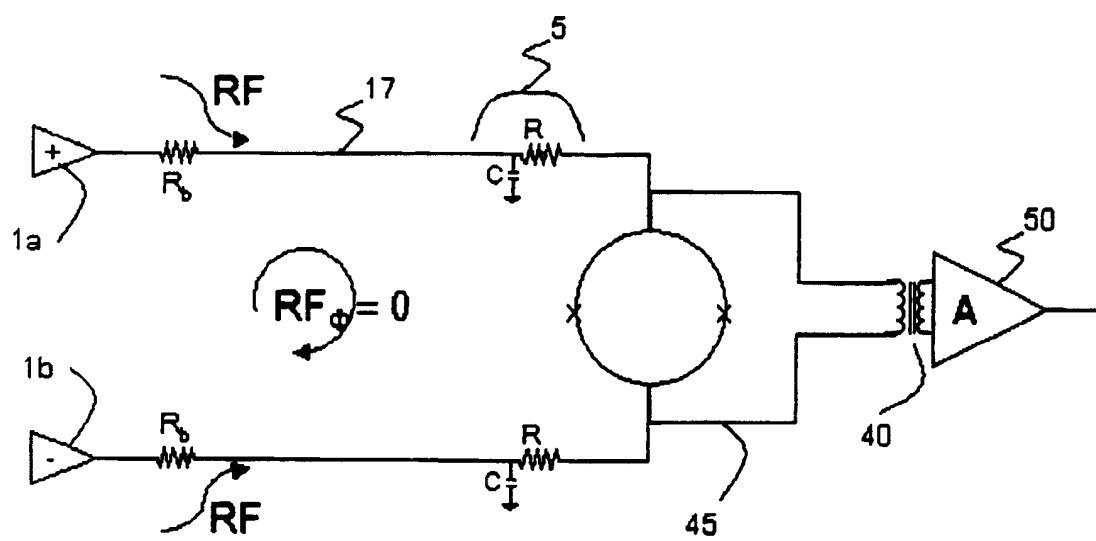


图 1

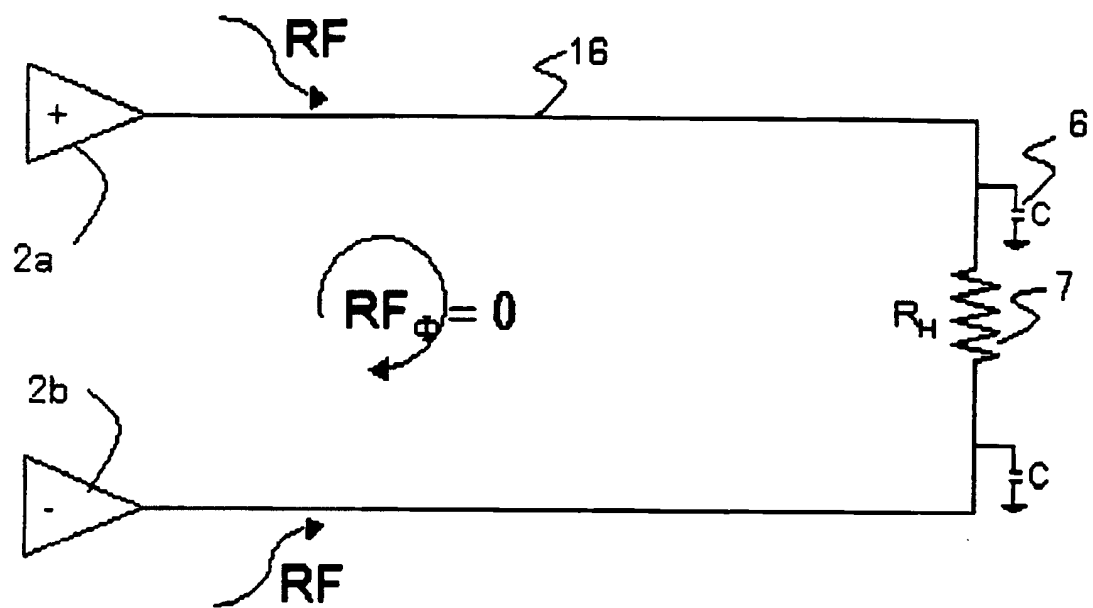


图 2

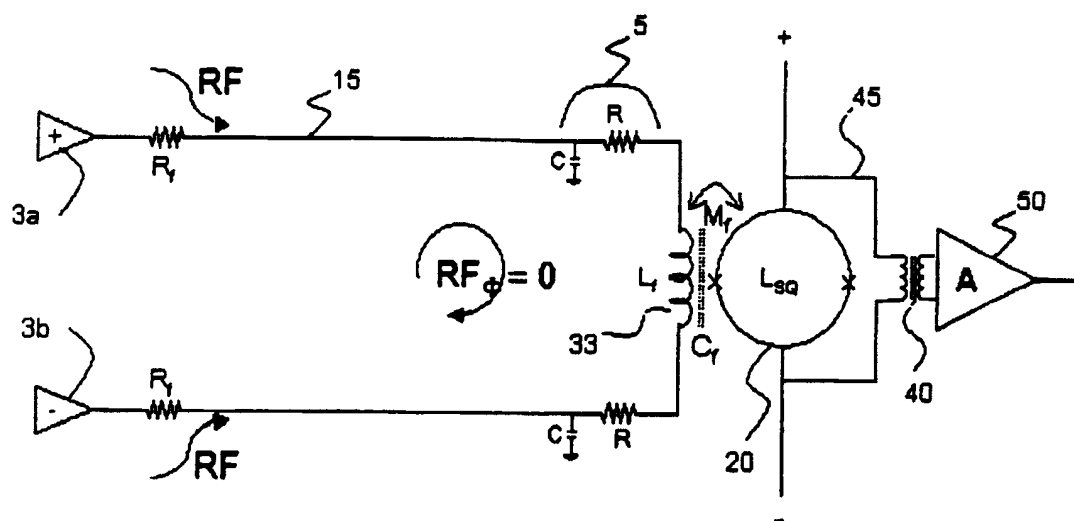


图 3

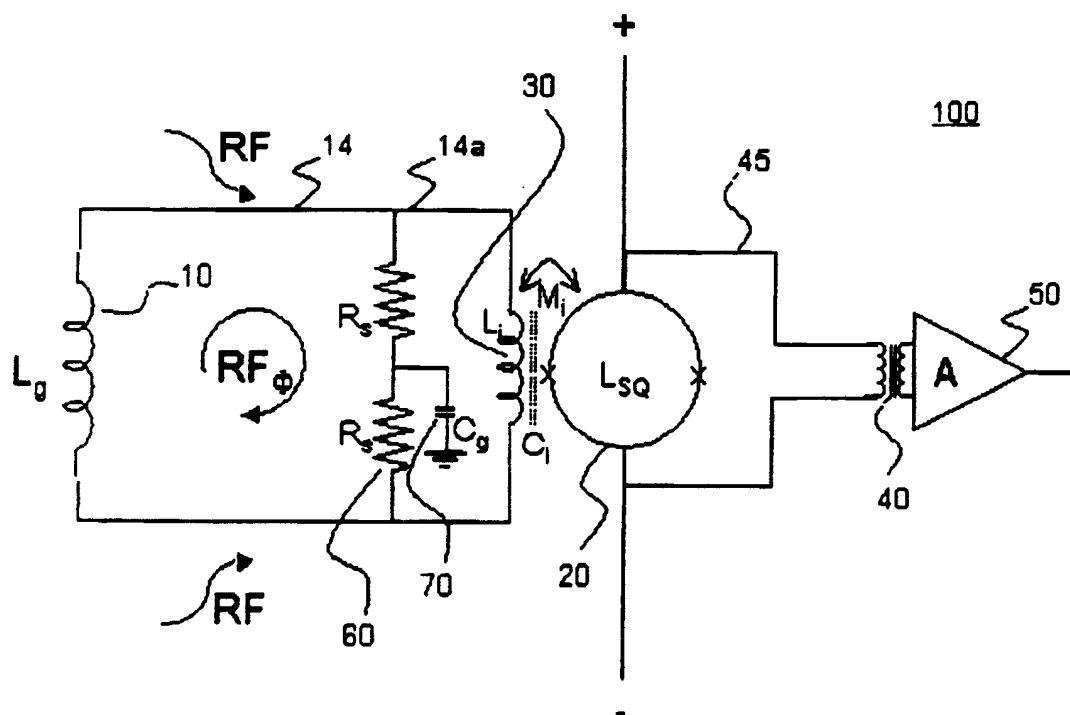


图 4

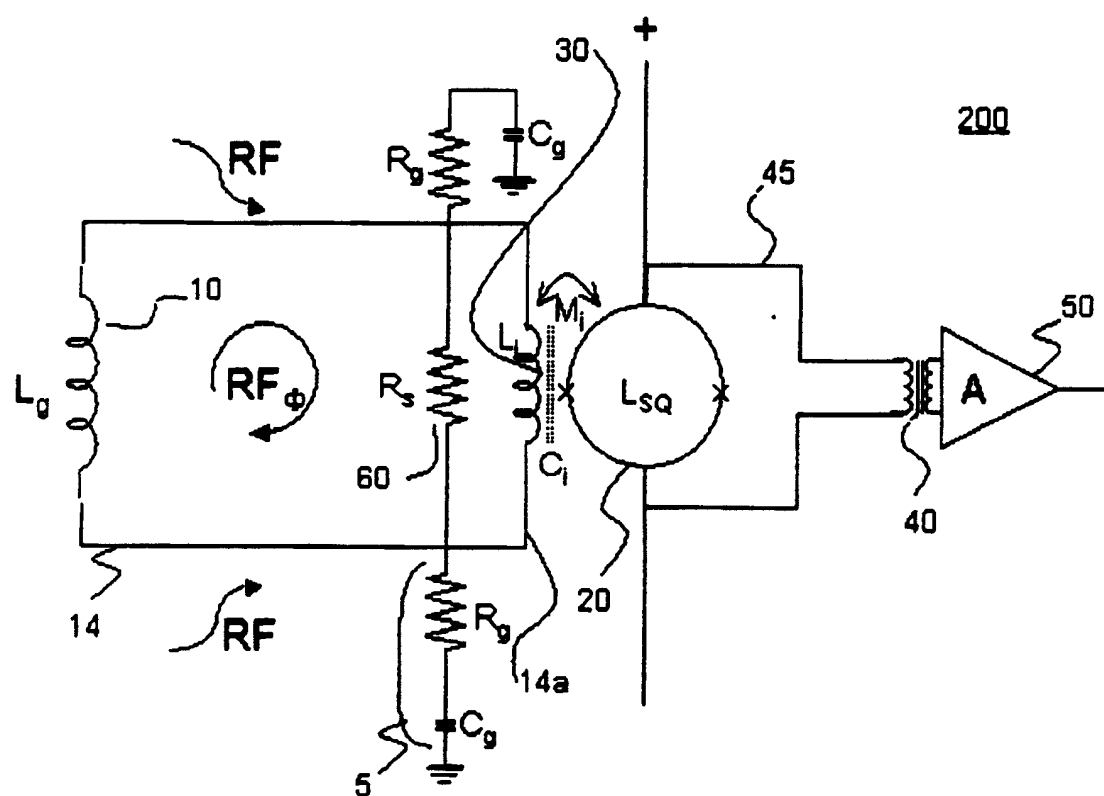


图 5

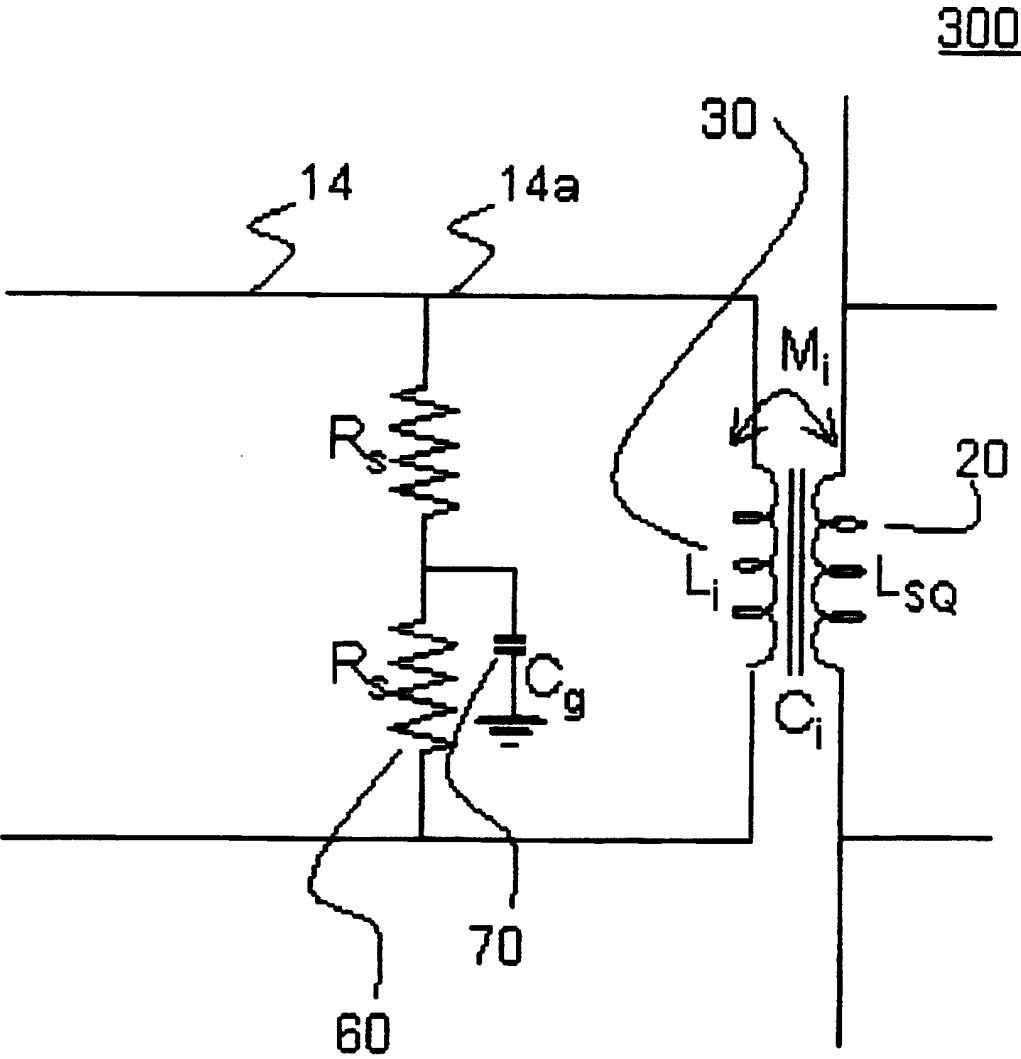


图 6

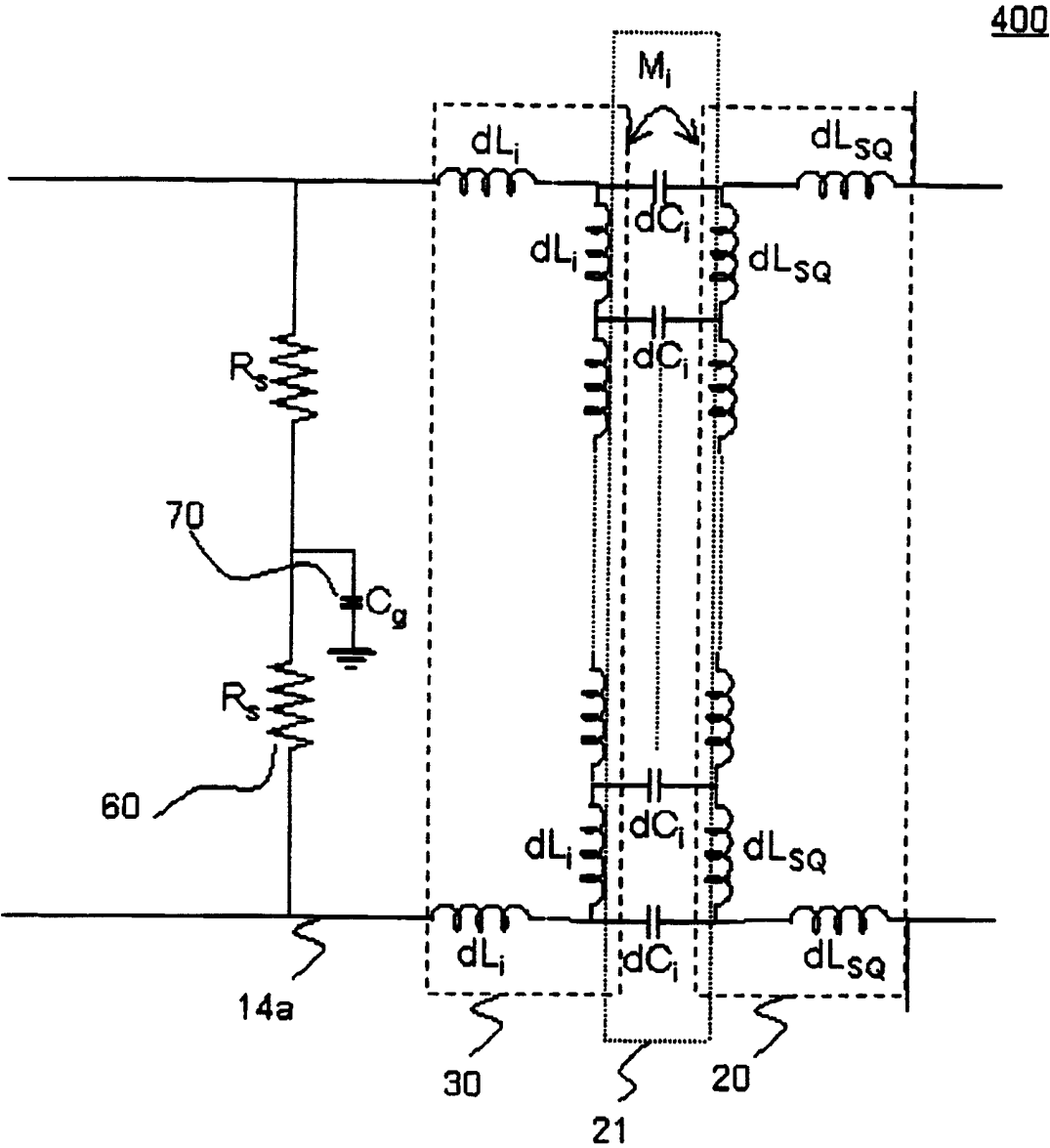


图 7

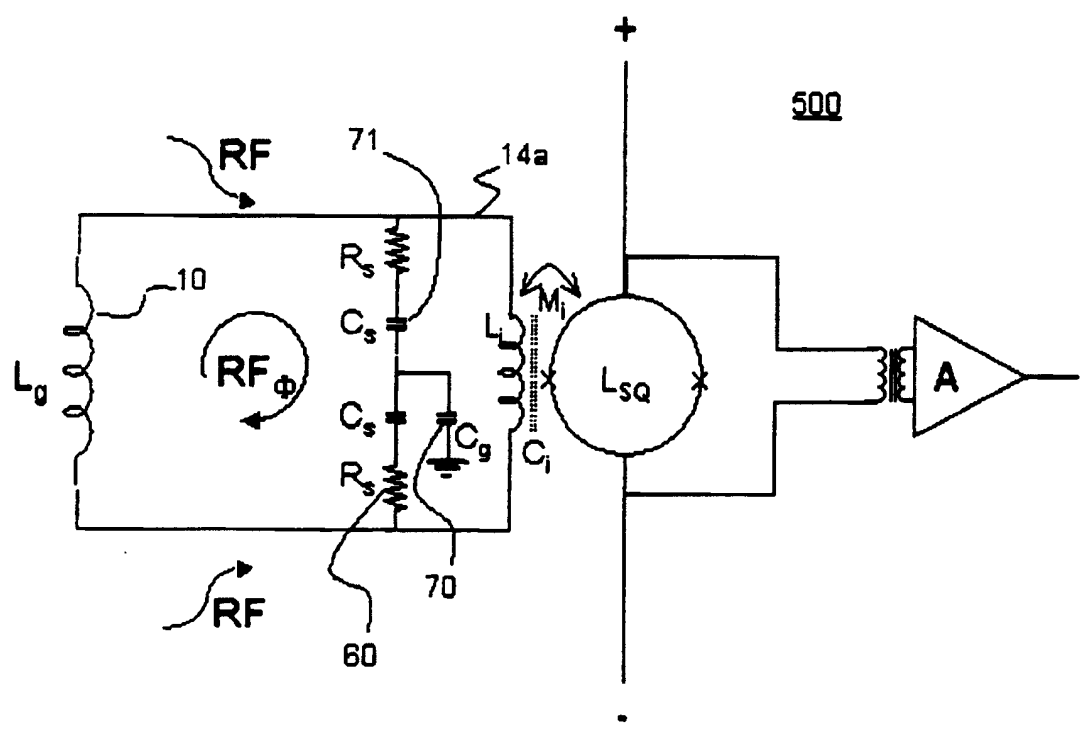


图 8

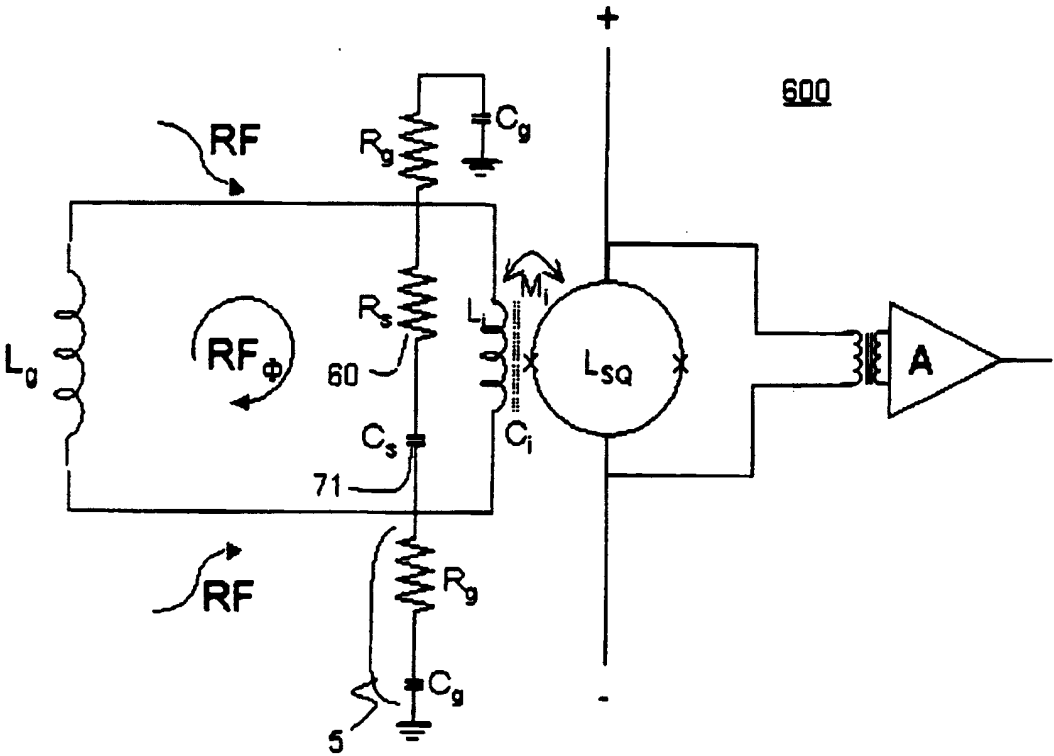


图 9

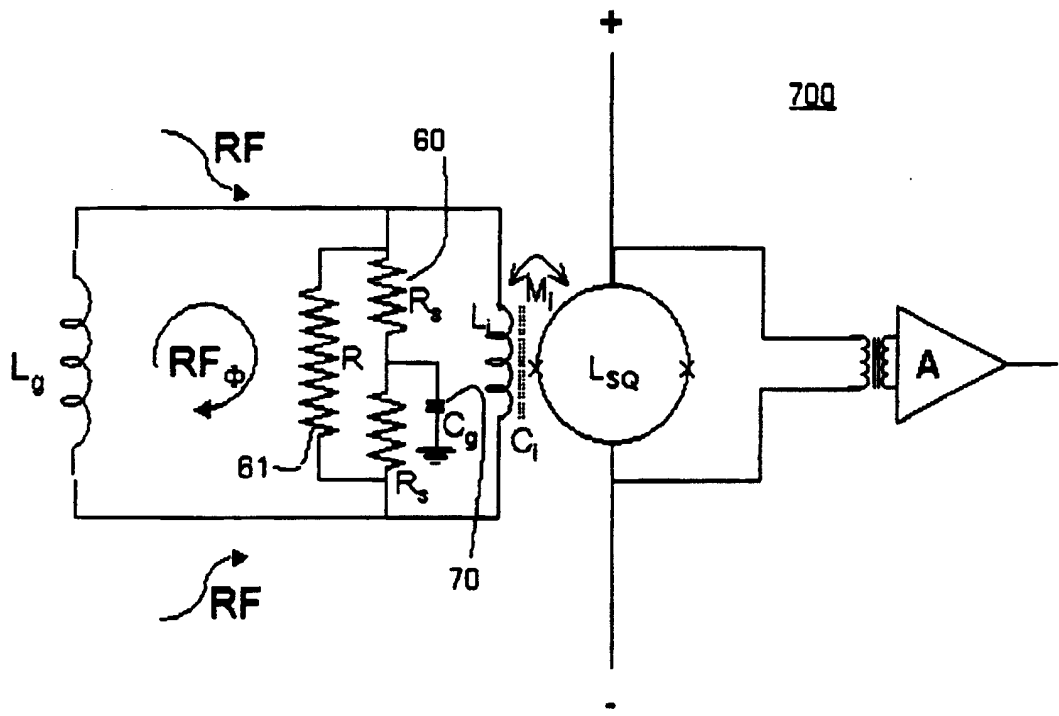


图 10

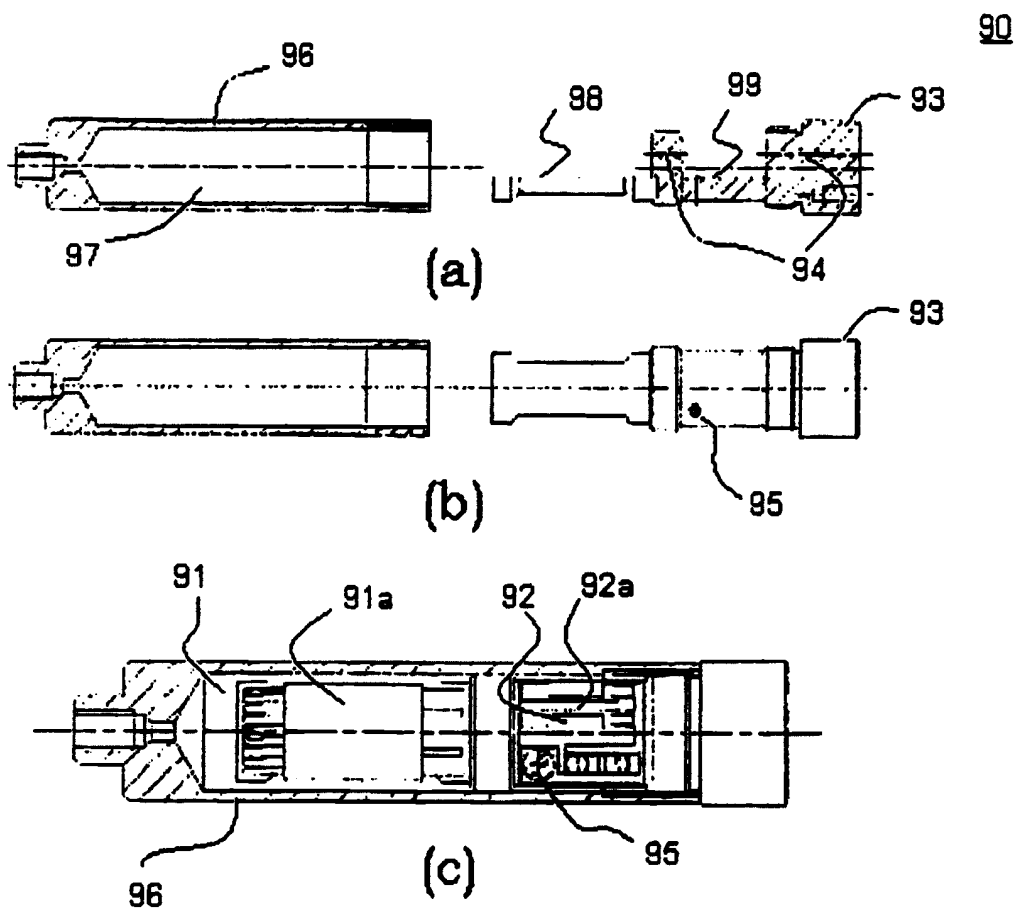


图 12