

RF SET 超灵敏静电计*

张志勇 王太宏[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 单电子晶体管(SET)作为灵敏静电计的灵敏度受到噪声的限制,其中散粒噪声(shot noise)是本征噪声,决定着单电子晶体管灵敏度的极限.利用射频(radio frequency, RF)单电子晶体管的极高的工作频率,可以消除SET的1/f噪声,从而达到极限灵敏度.利用一级低温低噪声放大器和一级室温放大器放大工作在反射模式的射频单电子晶体管的输出信号,使用LC共振电路,抬高了SET右边的整个微波系统的阻抗,使之与单电子的输出阻抗匹配,从而提高了RF SET静电计的灵敏度.

关键词 散粒噪声,库仑阻塞,RF单电子晶体管

RF single-electron transistor for ultra-sensitive electrometer

ZHANG Zhi-Yong WANG Tai-Hong[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A single-electron transistor(SET) can be used as a sensitive electrometer whose sensitivity is limited by noise. Shot noise is the intrinsic noise which determines the limit of sensitivity of the SET. Since an RF SET works at a very high frequency, its 1/f noise can be eliminated and thus the limit of sensitivity can be reached. An LC resonant circuit is used to increase the characteristic impedance of the microwave system to couple with the output impedance of the SET, and so the sensitivity of the RF SET electrometer is improved.

Key words shot noise, Coulomb blockade, RF single-electron transistor

1 引言

超灵敏的电测量技术对物理和工程技术的发展有着非常重要的作用.通常提高测量精度的方法有两种:一是改进传统的器件,二是根据不同的物理原理发展新的器件.基于单电子晶体管的超灵敏静电计就属于后者.单电子晶体管出现以来,就在超灵敏静电探测方面引起了人们极大的兴趣^[1].

单电子晶体管作为超灵敏静电计是以库仑阻塞为基础,发生库仑阻塞有两个条件:一是温度 T 必须足够低,满足 $T < E_c/k_B$;二是隧道结的电阻必须足够大,满足 $R_T > R_K = h/e^2 = 25.8k\Omega$.单电子晶体管由两个隧道结和一个库仑岛以及与该库仑岛耦

合的控制栅组成,如图1所示,其中 R_{J1} , R_{J2} , C_{J1} , C_{J2} 分别是两个隧道结的电阻和电容, C_g 是栅电容, $C_\Sigma = C_{J1} + C_{J2} + C_g$,库仑能量 $E = e^2/C_\Sigma$.我们都知道,单电子晶体管控制栅上的微小的电荷变化 ΔQ ,会引起电压的变化为 $\Delta V_g = \Delta Q/C_g$.单电子晶体管的电导 G_d 随着栅压 V_g 呈现周期性的振荡,如果栅电容 C_g 非常小,那么栅上极其微小的电荷变化(远小于一个电子电量 e)都会引起栅电压的较大的改变,从而引起SET的电导的较大改变.因此,单电子晶体管可以作为超灵敏静电计和量子计算机中量子点

* 国家重点基础研究专项经费(批准号:G2001CB3095)、国家自然科学基金(批准号:69925410,60236010)资助课题

2002-10-17收到初稿,2003-03-04修回

[†] 通讯联系人, E-mail: thwang@aphy.iphy.ac.cn

的读出部件^[1-4].

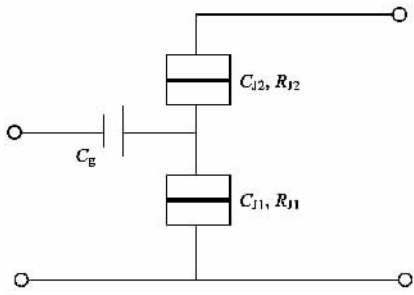


图1 单电子晶体管

2 单电子晶体管的极限灵敏度

单电子晶体管静电计的灵敏度受到噪声的限制,晶体管的噪声来源一般有三种:热噪声、散粒噪声(shot noise)和 $1/f$ 噪声^[2,3,5]。 $1/f$ 噪声也叫闪烁噪声(flicker noise),来自背景电荷的运动,可能是由于晶体管的介质层中电荷陷阱中心随机捕获电子或者电子逃离出陷阱产生的。由于 $1/f$ 噪声能谱密度与工作频率成反比,让单电子晶体管工作在极高的频率下, $1/f$ 噪声可以被忽略。所以,单电子晶体管的本征噪声是热噪声和散粒噪声^[6-9]。

我们都知道,热噪声与温度成正比,如果将晶体管放在极低的温度(mK量级)环境中,那么热噪声就可以被忽略,晶体管灵敏度的极限就完全由散粒噪声来决定。散粒噪声是在晶体管加有电压偏置(即具有背景散射电流)时由载流子之间的颗粒特性产生的。在低频情况下($eV \gg \hbar\omega$),散粒噪声的能谱密度频率无关,即也是白噪声。

单电子晶体管也可以等效成一个放大器。放大器包括三个部分:一个输入电阻为无穷大的理想运算放大器,其电压增益为 G ,输入阻抗 Z_{in} ,输出阻抗 Z_{out} 。SET的噪声等效成一个电压源 V_N ,如图2所示。 $S_V(\omega)$ 是噪声源 V_N 的谱密度函数,即电压源 $V_N(t)$ 的自相关函数的傅里叶变换形式。

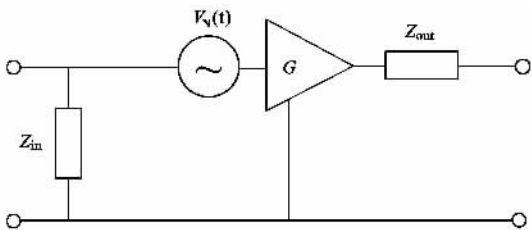


图2 放大器的等效电路图

单电子晶体管的灵敏度主要由两个参数来描

述,它们分别是电荷灵敏度 δQ 和能量灵敏度 ε 。所谓电荷灵敏度,就是单电子晶体管能够检测到的最小的电荷变化量。能量灵敏度则是指其能够检测到的最小的能量的变化量,就是说当电荷变化量或者能量变化量小于其灵敏度值时,这种变化就会被噪声湮没,以至于无法被检测出来。

通过计算可以得出单电子晶体管的 δQ 和 ε 的解析表达式(如果读者对推导过程有兴趣,请参考文献[2]),优化 SET 的参数,可以得到 SET 的极限灵敏度:

$$\delta Q \leq 1.1 \times 10^{-6} e / \sqrt{\text{Hz}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon \leq \hbar. \quad (2)$$

可见 SET 超灵敏静电计的电荷灵敏度可以达到 $1.1 \times 10^{-6} e / \sqrt{\text{Hz}}$,就是说在 1s 的时间内可以检测到百万分之一的一个基本电荷的微小变化,可以检测到 \hbar 的能量变化(已经接近了测不准原理)!

3 射频单电子晶体管

传统的 SET 静电计的运行速度低,一般小于 1kHz,而且由于在工艺上不容易消除 SET 的隧道介质中的电荷陷阱,因此工作在这么低的频率下,其灵敏度主要受到 $1/f$ 噪声的限制。为了达到极限灵敏度和更快的速度,人们采用 RF 单电子器件。RF 单电子器件的主要特点是输出电阻 R 较低,这样其时间常数 RC 就较小,所以速度快。RF SET 分为传输型和反射型两种,其中反射型用得更为普遍,如图3所示。图中, $V_i e^{i\omega t}$ 为输入的载波信号, $V_r e^{i\omega t}$ 为被 SET 反射后的信号。

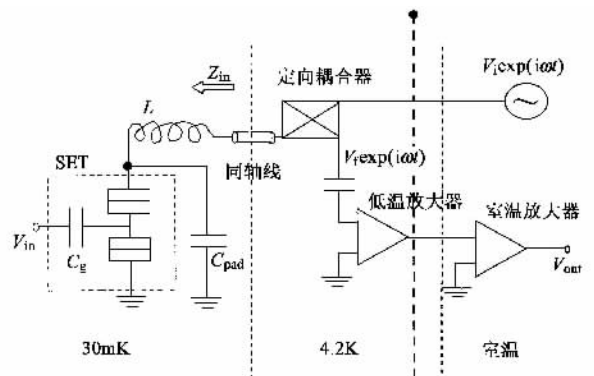


图3 RF SET 组成的反射型超高灵敏度测量系统

和普通的 SET 静电计不同,RF SET 不是通过测量 SET 的电流或者电压变化来测量 SET 的栅上电荷变化,而是通过测量载波功率变化来达到测量

栅上电荷变化的目的. 其优点包括: 通过利用一个 50Ω 低阻抗高频放大器, 放大器和 SET 之间的电缆电容就变得不重要了; 单电子器件和放大器之间实现了热隔离, 这样在优化放大器的参数时就不必考虑其对 SET 会有热影响; 另外, 整个系统工作在很高的频率(射频段, 一般为几百 MHz 到几 GHz), 所以就不必考虑 1/f 噪声.

SET 的漏端接一个在片集成电感 L , 电感 L 与压焊点电容 C_{pad} 在频率 ω 形成共振, 即满足 $\omega = 1/\sqrt{LC_{\text{pad}}}$, 其中 ω 是载波频率. 电感通过阻抗为 50Ω 的同轴电缆线接在一个位于 4.2K 温度环境中的定向耦合器的副线正方向端口上. 定向耦合器的一个主线端口接着高频载波信号 $v_i e^{i\omega t}$, 副线反方向端口通过一个隔直电容接在一个 HEMT 低噪声放大器上, 然后再经过一级放大, 最后用能谱仪进行分析. 整个系统中, 待测部分、SET 和电感 L 工作在极低温下, 这既能使 SET 满足库仑阻塞条件, 又消除了热噪声的干扰; 定向耦合器、低温放大器工作在一个稍微高一些的温度下, 这两个环境通过 50Ω 的同轴电缆线连接, 载波发生器和后端部分工作在室温下.

4 RF SET 的工作原理

RF SET 的工作原理与无线通信中的调幅技术是比较相似的. 待测的信号通过栅电容影响与其耦合的单电子晶体管的源漏电导, 而源漏电导的大小直接对载波幅度进行调制, 这样通过测量输出的载波功率就可以知道单电子晶体管的源漏电导, 从而就知道了待测的电荷变化量. 其调幅原理如图 4 所示.

电子晶体管的源漏电导发生变化, 从而引起了载波输出功率的变化. 我们通过测量载波的输出功率变化, 就可以知道 SET 栅上的微小电荷变化.

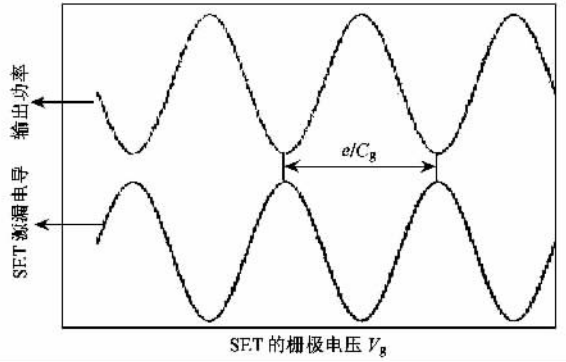


图 5 RF SET 超灵敏静电计的调幅结果

5 LC 电路对系统的影响

在一个微波系统中, 信号在从源向负载的传输过程中, 有一部分被吸收, 同时会有一部分被反射回去, 就是说, 既具有行波成分, 同时也具有驻波成分. 微波系统中的任何一部分都可以等效成一个负载 Z_1 和阻抗为 Z_c 的传输线, 如图 6 所示. 我们根据电磁场理论可以算出电压反射系数为

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \right| \quad (3)$$

只有当 $Z_1 = Z_c$ 时, 才能使反射系数为零, 这样防止了产生驻波, 使能量完全传送到负载, 这就叫做阻抗匹配. 在工业上, 为了各公司生产的微波器件之间的兼容, 将这个匹配阻抗定在 50Ω, 也就是 Smith 阻抗圆图的中点, 这就是微波电路中常说的 50Ω 匹配. 本系统的各部分之间都实现 50Ω 匹配.

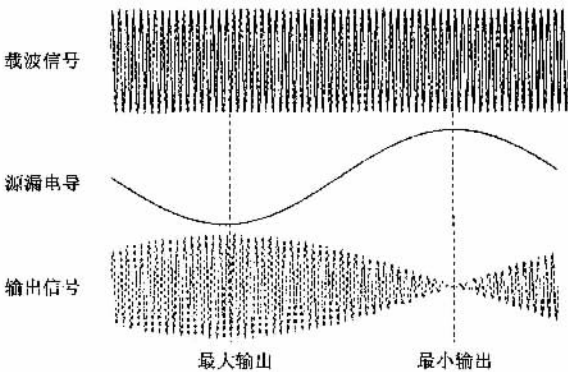


图 4 RF SET 超灵敏静电计的调幅原理

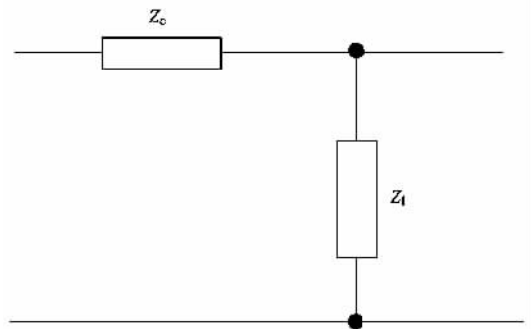


图 6 微波系统中的阻抗匹配

图 5 给出了该超灵敏静电计的调幅结果, 可见随着单电子晶体管的栅压(即外部电荷)的变化, 单

定向耦合器将载波功率的一部分(或者全部)耦合到副线正方向端口, 这部分功率就加在一个等效负载 Z_{in} 上.

由于 SET 的阻抗相对于整个微波系统的阻抗来说是非常大的,因此在系统中增加的 LC 共振电路是非常重要的.它的作用相当于抬高了 SET 右边的整个微波系统的阻抗,如果没有 LC 共振电路,那么定向耦合器右边的部分可以等效成图 7 中的电路,

$$Z_{in} = Z_T = R_T. \quad (4)$$

由于 R_T 的最小值都大于 $R_K(25.8\Omega)$,而且实际上的典型值为 $100k\Omega$ 左右,远大于 $Z_c(50\Omega)$,为了衡量反射 RF SET 超灵敏静电计的分辨率,人们常常用功率调幅深度(the depth of modulation)来对它进行表征.所谓功率调幅深度,就是指单电子晶体管对载波功率调制的大小程度,以后简称为调幅深度.显然,调幅深度 D 越大,就越容易观察到信号的变化情况.当 SET 的源漏电阻的最大值和最小值之间差距最大时, D 取得最大值.我们取 R_T 的最大值 R_{Tmax} 为无穷大,最小值 R_{Tmin} 为 $26k\Omega$,可以得到 D 的最大值 $D_{max} = \frac{1}{65}$.

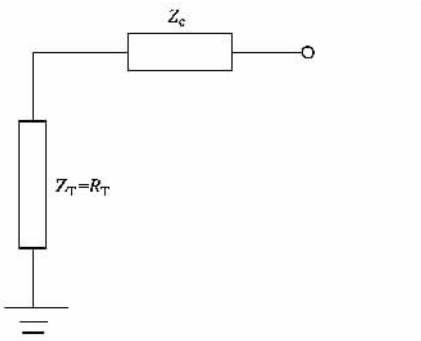


图 7 没有 LC 共振网络的等效电路

实际上的单电子晶体管的 R_T 都很大,一般都在几百 $k\Omega$ 以上,所以调幅深度 D 可能比 D_{max} 还要小得多,只有 10^{-3} 数量级.在这样小的调幅深度下,即使电荷变化不会被噪声湮没,我们也无法观测到,因此会大大影响系统的灵敏度.

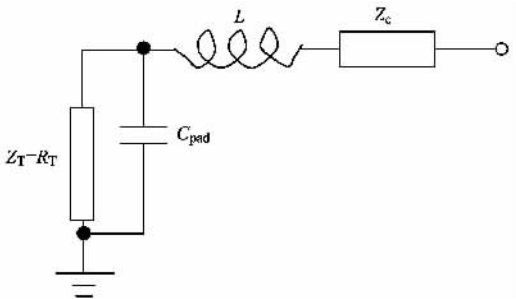


图 8 有 LC 共振网络的等效电路

当系统中有 LC 共振电路时,其等效电路如图 8 所示.可以算出

$$Z_{in} = L/R_T C_{pad}. \quad (5)$$

由于功率反射系数

$$|\Gamma_p| = \left| \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \right|^2 = \left| \frac{L/R_T C_{pad} - 50}{L/R_T C_{pad} + 50} \right|^2, \quad (6)$$

其中 $Z_c = 50\Omega$ 是同轴电缆线的阻抗.当 SET 的栅电容 C_g 足够小时,极小的电荷变化都可能会引起较大的 V_g ,从而使漏端电阻 R_d 改变,使得功率反射系数发生改变,最后改变了系统的输出功率.这就相当于 SET 的栅电压对载波进行调幅.

假设定向耦合器的耦合度为 C ,输入定向耦合器的功率为 P_i ,当 SET 发生库仑阻塞时, R_d 为无穷大 $Z_{in} = 0$ 此时功率反射系数 $\Gamma_p = 1$,即功率全部被反射回去,那么从定向耦合器的副线反方向输出的功率达到最大 $P_{rmax} = P_i C \Gamma_p = P_i C$.假设 SET 的最小导通电阻为 R_{d0} ,功率反射系数最小,同样,从定向耦合器的副线反方向输出的功率最小,可以算出此时的最小输出功率

$$P_{rmin} = P_i C \Gamma_p = P_i C \left| \frac{L/R_{Tmin} C_{pad} - 50}{L/R_{Tmin} C_{pad} + 50} \right|^2, \quad (7)$$

反射功率的调幅深度

$$D = \frac{P_{rmax} - P_{rmin}}{P_{rmax}} = 1 - \left| \frac{L/R_{Tmin} C_{pad} - 50}{L/R_{Tmin} C_{pad} + 50} \right|^2. \quad (8)$$

如果我们能减小 R_{d0} 使得 $L/R_{d0} C_{pad}$ 越接近 50Ω ,那么调幅深度 D 就越接近 100% ,从而达到最好的效果.

实际上,SET 的最大电阻(即发生库仑阻塞时的电阻)并不是无穷大,从上面的分析可以看出,调幅深度 D 主要受 SET 的最大电阻 R_{Tmax} 和最小电阻 R_{Tmin} 的影响,最大电阻越大,最小电阻越小,那么调幅深度 D 就越大.而 SET 的最大电阻与其库仑能量 E_C 有关,库仑能量 E_C 越大 R_{Tmax} 也就越大.可见,在实现 RF SET 时,需要优化的两个参数就是库仑能量 E_C 和最小电阻 R_{Tmin} .目前,优化参数之后的 RF SET 超灵敏静电计的最高水平为:电荷灵敏度 $3.2 \times 10^{-6} e/\sqrt{HZ}^{[4]}$.

6 结论

单电子器件作为超灵敏静电计,其极限灵敏度受到了散粒噪声的限制,理论计算表明,电荷灵敏度的极限是 $1.1 \times 10^{-6} e/\sqrt{HZ}$.利用工作在射频段的单

电子器件作为超灵敏静电计,可以消除系统 $1/f$ 噪声的影响,在系统中采用 LC 匹配电路,可以大大提高系统的灵敏度,有望达到量子极限。

参 考 文 献

- [1] 王太宏等. 物理 2002 31 4 [Wang T H *et al.* Wuli(Physics), 2002 , 31 4(in Chinese)]
 [2] Devoret M H , Choelkopf R J. Nature(London) , 2000 , 406 : 1039
 [3] Fujisawa Toshimasa , Hirayama Yoshiro. Appl. Phys. Lett. , 2000 , 77 : 543

- [4] Aassime A , Gunnarsson D , Bladh K *et al.* Appl. Phys. Lett. 2001 79 , 4031
 [5] Schoelkopf R J , Wahlgren P , Kozhevnikov A A *et al.* Science , 1998 280 : 1238
 [6] Zimmerli G , Eiles T M , Kautz R L *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1992 , 61 237
 [7] Korotkok A N. Phys. Rev. B , 1994 , 49 : 10381
 [8] Hanke Ulrik , Galperin Y M , Chao K A *et al.* Phys. Rev. B , 1993 , 48 : 17209
 [9] Birk H , Jong M J M de , Schonenberger C. Phys. Rev. Lett. , 1995 , 21 : 1610

· 物理新闻与动态 ·

正电子偶素寿命之谜得到解答

电子偶素是由一个电子和一个正电子组成的短寿命类原子体系. 如果其中的电子和正电子的自旋平行 称为正电子偶素, 如反平行则称为仲电子偶素. 由于电子与正电子相互吸引, 发生湮灭, 正电子偶素衰变成三个光子, 仲电子偶素衰变成两个光子. 测量电子偶素的衰变率, 可以对量子电动力学进行检验.

量子电动力学预言, 正电子偶素的寿命约为 142ns, 然而以前的实验测量结果要比这一理论值低 0.1% 以上, 这就是所谓的正电子偶素寿命之谜. 为说明这种分歧, 理论家们不得不采用一些奇特的解释, 比如, 假设存在轴子、C - odd 玻色子、电荷少于千分之一单位电荷的粒子、 γ 射线的禁戒数, 甚至镜像宇宙等等. 有意思的是对于仲电子偶素的寿命值, 实验和理论却符合得很好.

美国密歇根大学的 Richard Vallery 和他的同事们将低能正电子束注入到 $1\mu\text{m}$ 厚的多孔二氧化硅薄膜中, 孔的直径只有几个纳米. 正电子被薄膜减速后俘获电子而形成正电子偶素. 研究人员使用闪烁计数器探测湮灭辐射的 γ 射线来测定正电子偶素的寿命. 这项实验克服了 1990 年在密歇根所进行的实验中存在的问题, 例如, 1990 年的实验没有正确处理反散射电子偶素的影响. 新的实验所测得的正电子偶素的寿命与当前量子电动力学的计算符合得非常好. 衰变率与理论值仅相差约 0.014%. 该研究组正在获取更多的数据以进一步减小系统误差和统计误差, 争取使衰变率的测量误差达到 0.01%.

(树华 编译自 Physical Review Letters , 2003 , 90 203402)

· 书评与书讯 ·

《Nature 百年物理学经典论文选》出版

Nature (《自然》) 是国际上最负盛名的综合性科技期刊之一. 2000 年该刊出版了一期物理学论文专集, 收集了 100 年以来 Nature 刊登的经典物理学论文 21 篇, 涉及对现代人类生活产生根本性影响的重要发现, 包括伦琴 X 射线、爱因斯坦的相对论、DNA 结构、激光的发现、高温超导材料的发现等. 论文作者中有一半以上是诺贝尔奖获得者. 这些论文不仅是记录了科学发现的珍贵文献, 极具收藏价值, 同时, 对今后物理学的发展也将起到重要的指导作用.

经 Nature 授权, 北京大学已获得该论文集的独家专有中文版版权, 并以《北京大学学报(自然科学版)》增刊《Nature 百年物理学经典论文选》的形式于 2002 年年底出版, 内容不仅有英文原文, 还包括由北京大学和其他院校相关领域的教授、专家所写的中文译文和评述.

该增刊定价 20 元, 欢迎物理学及各界人士购买, 请汇款到《物理》编辑部: 100080, 北京 603 信箱, 《物理》编辑部收, 并请写明订户的详细通讯地址.