

# 快速单磁通量子伪随机码发生器

赵恩海 程其恒 傅泽禄 刘雷 吉争鸣 单文磊 冯一军 吴培亨

(南京大学电子科学与工程系, 南京 210093. Email: okabe@nju.edu.cn)

**摘要** 讨论了快速单磁通量子(RSFQ)电路的基本原理和特性. 对伪随机码发生器相关的非门、异或门、移位寄存器等 3 个 RSFQ 逻辑门电路进行了设计, 给出了它们的工作原理和特性. 对 RSFQ 伪随机码发生器进行了仿真计算, 并与 MATLAB 建立的数学模型的模拟结果相比较, 表明设计是合理的, 达到了预期的效果.

**关键词** 快速单磁通量子 伪随机码发生器 Josephson 结 超导量子干涉器(SQUID)

快速单磁通量子(rapid single flux quantum, RSFQ)器件是当今世界上超导器件研究的热点之一, 是一种很有发展前景的超导器件<sup>[1, 2]</sup>. 利用 RSFQ 器件制成的数字电路不仅速度快(可达 ps 量级), 而且功耗极低(每个门的功耗仅在  $\mu\text{W}$  量级)<sup>[1, 3]</sup>. 目前在实验中已可做出时钟频率高达 770 GHz 的 T 触发器<sup>[4]</sup>. 美国的 HTMT(hybrid technology multi threading)计划打算用 RSFQ 器件在 10 年内制造出 ps 量级的超级计算机<sup>[2]</sup>. 我国在这方面的工作起步较晚, 目前相关的研究正在积极地进行. 本文介绍采用 RSFQ 电路设计的伪随机码发生器及其相关电路的工作状况.

## 1 基本原理

RSFQ 数字电路基本工作原理基于超导量子干涉器(SQUID)的工作特性, 利用 SQUID 中存储或没有存储单个磁通量子( $F_0 \approx 2.07 \times 10^{-15}$  Wb)这一特性来表示该电路中的“1”或“0”状态. 它可以通过图 1 所示的由 RSFQ 组成的最基本的 RS 触发器电路来描述<sup>[1]</sup>. 由图中可知该器件是由两个 Josephson 结与 1 个超导环组成的闭合回路, 称之为双结 SQUID. SQUID 中的一个结  $J_1$  为逻辑门而另一个结  $J_2$  为复位门. 工作时, 首先向 SQUID 提供一固定的直流偏置  $I_b$ ,  $I_b$  的取值稍小于结的临界电流  $I_c$ . 开始时, 由于 SQUID 中  $I_b$  不是对称输入的, 因此  $I_b$  大部分流入结  $J_1$  中, 使  $J_1$  中电流  $I_1 \approx I_b$ , 而  $J_2$  中的电流  $I_2 \approx 0$ . 此时超导环  $L$  中无电流流过, 因此 SQUID 中不含有磁通量子  $F_0$ , 处于“0”状态. 现在如果在输入端 A 输入一脉冲电流  $I_m$ , 使  $I_1 \approx I_m + I_b > I_c$ , 则  $J_1$  从零电压态跳到电压态, 偏置电流  $I_b$  向结  $J_2$  方向流入. 同时 SQUID 中进入一个磁通量子  $F_0$ .  $J_2$  中的电流  $I_2 \approx I_b < I_c$ .  $I_m$  消失后结  $J_1$  回到零电压态, 但结  $J_2$  中的电流  $I_2 \approx I_b$  保持不变, 仍处于零电压态,  $I_1 \approx 0$ . 因此, 在此过程中 SQUID 中存储了一个  $F_0$ , 成为“1”状态. 此时如果有一复位脉冲电流  $I_{rs}$  输入  $J_2$ , 使  $I_2 \approx I_{rs} + I_b > I_c$ , 则结  $J_2$  跳变成电压态, 输出端 C 输出一个脉冲信号. 偏置电流  $I_b$  流向结  $J_1$ , 使  $I_1 \approx I_b$ . 存储的  $F_0$  被释放了.  $I_{rs}$  消失后,  $J_2$  恢复为零电压态,  $I_2 \approx 0$ . SQUID 恢复到“0”状态, 实现了 RS 触发器的功能. RSFQ 电路中的开关时间和功耗可从已知的有关公式得到<sup>[1, 3]</sup>. 例如对于开关时间,

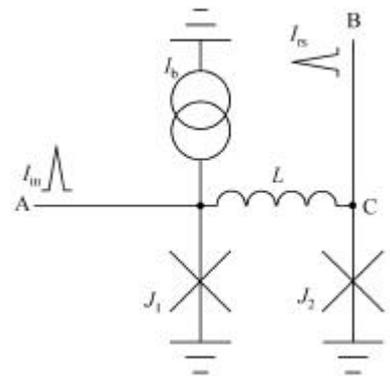


图 1 RSFQ RS 触发器等效电路图  
 $I_{C1}=I_{C2} \approx 175 \mu\text{A}$ ,  $L=0.7 F_0/I_C \approx 11 \text{ pH}$

$$\int V(t)dt = \ddot{O}_0, \tag{1}$$

式中  $V(t)$  为结两端电压, 为便于说明设  $V(t) \approx \text{常数} = 2 \text{ mV}$  (低温超导体  $N_b$  结的能隙电压  $V_C$ ). 由此可得脉冲周期  $t_0 \approx 1 \text{ ps}$ , 可见脉冲速度达 ps 量级, 非常快. 又如功耗

$$P \approx \frac{Ic f_0}{t} \approx 0.1 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-3} \text{ W} \quad 10^{-6} \text{ W}. \tag{2}$$

因此电路中功耗小于  $\mu\text{W}$  量级, 非常低, 有利于大规模集成. 由 RSFQ 基本电路及相应的 Josep- hson 结传输电路可构成各种类型的逻辑器件和门电路. RSFQ 伪随机码发生器<sup>[5]</sup>就是根据这些逻辑器件和门电路设计的.

## 2 RSFQ 伪随机码发生器及其相关的基本逻辑电路

为便于说明问题, 设计了一个 31 位序列的伪随机码发生器, 其原理如图 2 所示. 由图可知它由非门、异或门和移位寄存器 3 种基本逻辑电路组成. 若要得到更长的伪随机序列, 只需在图 2 中加入更多的移位寄存器便可实现. 并且根据反馈点位置的不同可以得到不同的伪随机序列. 本节主要介绍 3 种基本电路的原理及利用计算机仿真计算的设计结果<sup>[3, 6, 7]</sup>.

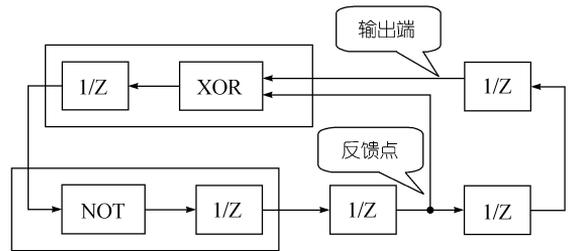


图 2 RSFQ 伪随机码发生器原理图

### 2.1 RSFQ 非门工作原理及设计

图 3 为 RSFQ 非门的等效电路. 图 3 中  $J_1, J_3, L_1, J_5, J_7$  和  $J_2, J_4, L_2, J_5, J_7$  分别组成两个 SQUID(S1 和 S2).  $L_D$  和  $R$  的作用主要是为了把时钟脉冲做短暂延时后输入 A 端. 因此每个时钟脉冲输入后都使 S1 存储一个磁通量子, S1 处于“1”状态. 图 4 为 RSFQ 非门电路中相应的

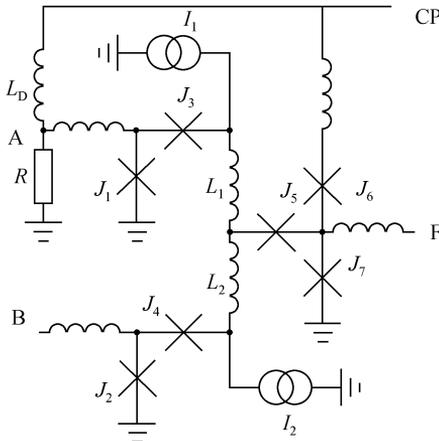


图 3 RSFQ 非门等效电路

$I_{J_1} = I_{J_2} = 1.3 I_C, I_{J_3} = I_{J_4} = I_{J_5} = I_C \approx 125 \mu\text{A}, I_{J_6} = 1.4 I_C, I_{J_7} = 1.6 I_C, L_1 = L_2 = 0.75 F_0/I_C \approx 12 \text{ pH}, I_1 = I_2 = 0.8 I_C$

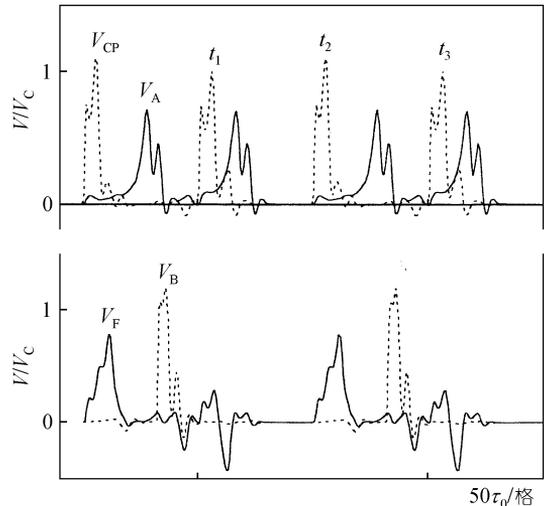


图 4 RSFQ 非门有关信号波形图



从上述3个RSFQ电路可见,RSFQ的组合电路在工作方式上有时序电路的特征.与半导体相应电路相比,RSFQ的门电路从结构上讲相当于1个半导体门电路和1个移位寄存器的组合.因此在伪随机码发生器设计中,所需的移位寄存器数目应扣除RSFQ门电路中所包含的移位寄存器数.

### 3 RSFQ 伪随机码发生器设计的结果

利用上述3个基本电路及其相应参数(参看图1,3,5),结合图2设计了一个31位序列的RSFQ伪随机码发生器.经计算机仿真计算后,得到了图8的结果.与MATLAB所建数学模型的模拟结果(图9)是一致的.表明设计的电路方案和结果是正确的.

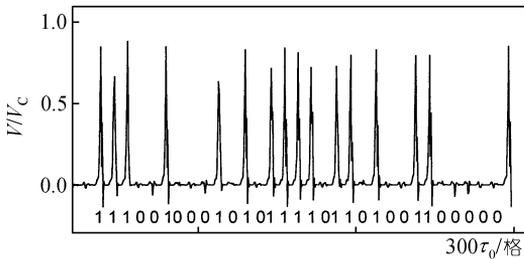


图8 RSFQ伪随机码发生器仿真图

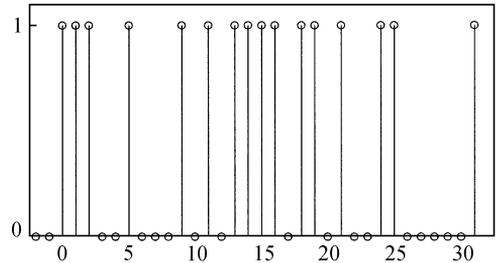


图9 MATLAB数学模型模拟图

### 4 结束语

RSFQ器件是目前国际超导器件研究的热点之一.随着它的不断发展必将在通信、计算机、低温技术等一系列领域产生巨大的影响.我们对RSFQ伪随机码发生器进行了设计和仿真模拟,所得的初步结果表明此设计是可行的.这一工作为RSFQ调制/解调器的设计打下了基础.下一步一方面将进行有关的实验,另一方面将开展有关RSFQ调制/解调器的设计工作,给出器件的原型,以满足通信发展的需要.

致谢 本工作为国家“九七三”和“八六三”(批准号:863-CD060401)、国家杰出青年基金(B)(批准号:69801004)资助项目.

### 参 考 文 献

- 1 程其恒,吴培亨,冯一军,等.快速单磁通量子电路及其应用.低温物理学报,1999,21(增刊):76
- 2 Gaj K, Herr Q P, Adler V, et al. Tools for the computer-aided design of multigigahertz superconducting digital circuits. IEEE Trans on Appl Supercond, 1999, 9: 18
- 3 Likharev K, Semenov V. RSFQ logic/memory family: a new Josephson junction technology for sub-terahertz clock frequency digital systems. IEEE Trans on Appl Supercond, 1991, 1(1): 3
- 4 Chen W, Patel V, Rylyakov A, et al. Rapid single-flux-quantum T flip-flop operating at 770 GHz. IEEE Trans on Appl Supercond, 1999, 9: 3212
- 5 樊昌信,詹道庸,徐炳祥,等.通信原理.北京:国防工业出版社,1995
- 6 Polonsky S, Semenov V, Shevchenko P. PSCAN: Personal superconductor circuit analyzer. Supercond Sci Technol, 1991, 4: 667
- 7 Odintsov A A, Semenov V, Zorin A B. Specific problems of numerical analysis of the Josephson junction circuits. IEEE Trans on MAG, 1987, 23: 763

(2000-03-13 收稿,2000-06-24 收修改稿)