

# 一种新型的单电子 A/D 转换器<sup>\*</sup>

张志勇 王太宏

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2002 年 10 月 25 日收到 2002 年 11 月 30 日收到修改稿)

传统的 A/D 转换器结构复杂, 利用一种改进的 V-PADOX 工艺可以制成性能均匀的互补的单电子晶体管, 工艺重复性好, 用互补 SET 对结构实现了多阈值周期性传输功能, 这可以用来简化 A/D 转换电路, 提出了一种利用该互补 SET 对结构实现的新型 3 位 A/D 转换器, 具有结构简单、速度快、功耗低等优点.

关键词: 库仑振荡, A/D 转换器, 互补单电子晶体管结构

PACC: 7340Q

换器<sup>[3]</sup>.

## 1. 引 言

高速高性能模/数(A/D)转换器在信号处理、通信等系统中有着不可替代的作用, 但是在适时信号处理中, A/D 转换器性能(主要是转换速度)对系统的限制起着主要的作用. 人们常常用 Flash A/D 转换器来得到较高的转换速度, 但是, Flash A/D 转换器包含一系列的比较器, 这些比较器将各级的输入电压与参考电压进行比较, 从而得到数字信号. 对于一个  $N$  位的 Flash A/D 转换器, 往往需要  $2^N - 1$  个比较器和  $2^N - 1$  个参考电平, 而且还包括复杂的编码电路, 这样整个电路就非常复杂, 这不仅增加了工艺和设计的难度, 同时也会影响其工作速度. 因此电路设计者利用折叠技术来减少比较器的数目, 而且如果利用本身具有折叠  $I-V$  特性的器件, A/D 转换器的结构就会得到大大简化<sup>[1,2]</sup>. 共振隧穿二极管(RTD)具有负微分电阻(NDR)特性, 多个 RTD 串联则呈现多峰值的 NDR 特性, 这就有可能出现折叠的  $I-V$  特性, 所以人们利用串连 RTD 器件实现了简单的 A/D 转换器<sup>[1,2]</sup>, 但是 RTD 具有明显的缺陷, 即其峰值数目受串连的 RTD 数目的限制.

单电子器件具有非常理想的多峰值负微分电阻特性, 并且在原理上它的峰值数目是无限的. 因此可以利用单电子器件来实现具有折叠  $I-V$  的器件(即库仑振荡特性), 从而制作简单的高速 Flash A/D 转

## 2. 互补 SET 传输结构

单电子的 A/D 转换器电路对器件的要求也很高, 要求所有的 SET 晶体管具有相同的参数, 这对工艺的均匀性提出了很高的要求. 利用目前最成熟的硅基的微细加工技术, 才有可能实现如此高的均匀性. 在 SOI 衬底上, 利用垂直图形依赖氧化(V-PADOX)可以形成双 SET 岛<sup>[4]</sup>. 这两个 SET 具有几乎相同的参数, 并且共用源、漏和控制栅三个电极, 但是却拥有不同的侧栅电极 4 和 5(图 1). 通过调节侧栅的电压, 可以分别使对应的 SET  $I_D - V_g$  特性沿着  $V_g$  轴发生偏移, 适当设置各个侧栅电压, 就能使两个 SET 工作在互补状态.

对 V-PADOX 工艺进行改进, 如图 1(a) 所示, 将其中一个原来共用的电极分成两部分, 形成 T 型的薄硅区(水平间断横线填充部分), 斜线填充部分的硅膜较厚. 图 1(b) 是它的立体示意图, 为了简单, 我们没有画出两个侧栅(如图 1(a) 中的 4 和 5), 空白部分的硅膜全部被刻蚀掉了, 露出  $\text{SiO}_2$  埋层. 然后对该结构进行氧化.

在氧化过程中, 靠近空白区 A, B 两点处的薄硅膜区, 由于聚集的压力比较大, 因此氧化的速度就较慢. 这样, 通过控制氧化时间, 就可以使在这些区域的硅膜不被完全氧化, 而其它薄硅膜区的硅膜则

\* 国家重点基础研究专项基金(批准号: G2001CB3095) 和国家自然科学基金(批准号: 69925410) 资助的课题.

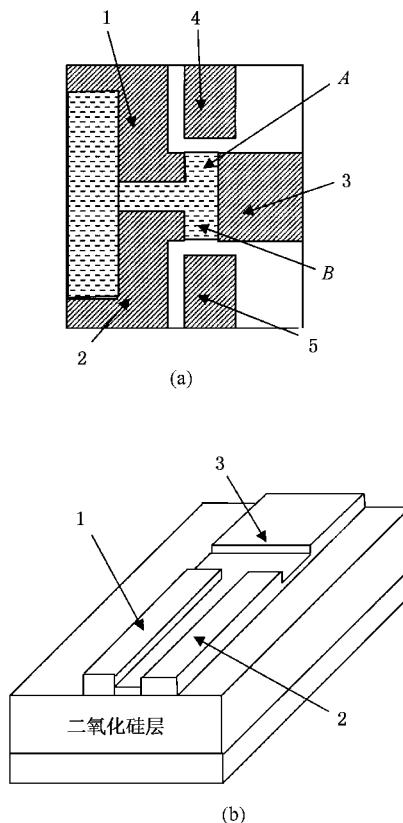


图1 改进的 V-PADOX 单电子晶体管的版图(a)和氧化之前的器件结构(b) 其中1为SET1的漏2为SET2的源3为SET1的源和SET2的漏4和5为两个侧栅,A处和B处为两个库仑岛

被完全氧化成  $\text{SiO}_2$  就会形成两个硅岛. 这种氧化是很容易控制的. 如图2(a)所示, 氧化完成后沉积多晶硅膜形成控制栅, 互补的双 SET 的等效电路图如图2(b)所示. 输入信号从控制栅输入, 从共用的一个电极3(SET1的源和SET2的漏)输出, SET1的漏端1加上一个直流偏置电压  $V_{DD}$ , SET2的源端2接地, 两个侧栅4和5分别加上偏置电压  $V_A$  和  $V_B$ .

我们知道, 每个单电子器件的  $I-V$  特性同时受到对应的侧栅和共同的控制栅控制. 如果固定侧栅的电势, 那么在源漏间电压设定时, 单电子晶体管的输出电流随着控制栅电压发生振荡, 此即单电子晶体管的库仑振荡. 并且, 其相位是一定的, 调节侧栅电势, 就可以使库仑振荡曲线横向(沿着控制栅电压轴线方向)移动, 即相当于相位发生了变化. 分别调节两个侧栅的电压  $V_A$  和  $V_B$ , 可以使对应的 SET 的  $I_D-V_g$  特性沿着  $V_g$  轴发生偏移. 当调节使两个 SET 的  $I_D-V_g$  特性如图3(a)所示, 就形成了互补的 SET 对<sup>[4]</sup>. 当输入电压使 SET1 断开时, SET2 开启, 输出

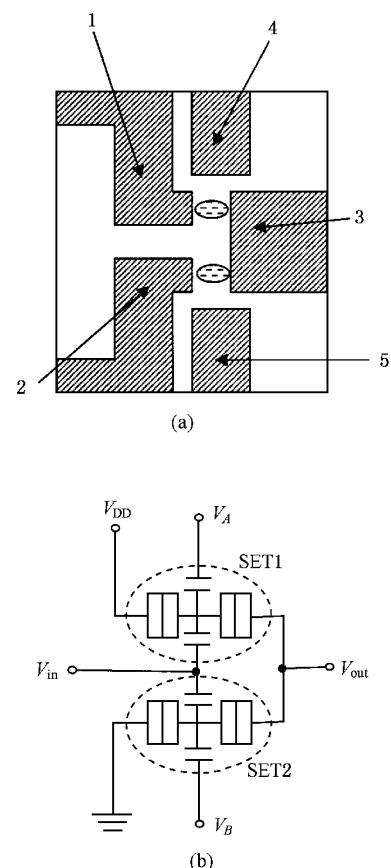


图2 氧化后的图形(a)和互补SET对等效电路图(b) (图注同图1)

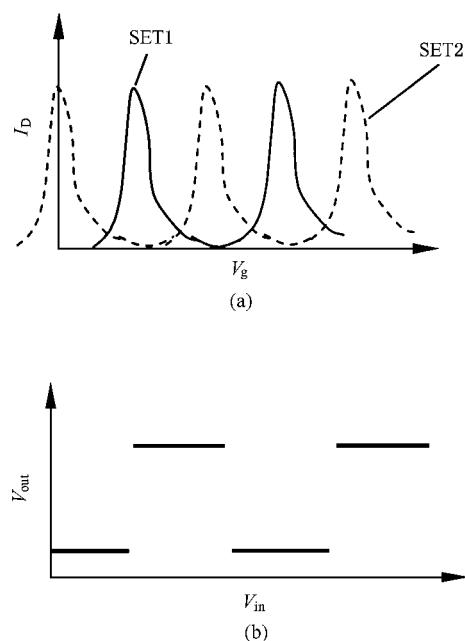


图3 两个SET成互补的相位关系(a)和互补SET结构的多阈值传输特性(b)

低电平  $V_l$  (理想状态为零);同样,当输入电压使 SET1 开启时,SET2 断开,输出高电平  $V_h$  (理想状态为  $V_{DD}$ )。由于 SET 的周期性库仑振荡特性,所以互补的 SET 结构出现图 3(b)所示的类似方波的  $V_{in}$ - $V_{out}$  特性。这种多阈值的传输结构可以用于 A/D 转换器中,大大简化 A/D 转换器的结构。为了使分析简单,假设图 3(b)中的类方波的占空比为 50%,即高低电平输出各占一半,这样就可以取 A/D 转换器的量化单位为  $V_q = e/2C_g$ 。

### 3. A/D 转换器的实现和工作原理

图 4 是利用互补 SET 器件实现的一种 3 位 A/D 转换器。在输入信号中加上一个补偿电压  $V_q/2$  是为了将量化误差从 0—1LSB 转移到  $-1/2$ — $1/2$ LSB, CLK 是采样时钟信号。电路下端的电阻网络将采样的输入信号  $V_{in} + V_q/2$  分别二等分、四等分,可以看出

$$V_0 = V_{in} + V_q/2,$$

$$V_1 = (V_{in} + V_q/2)/2,$$

$$V_2 = (V_{in} + V_q/2)/4.$$

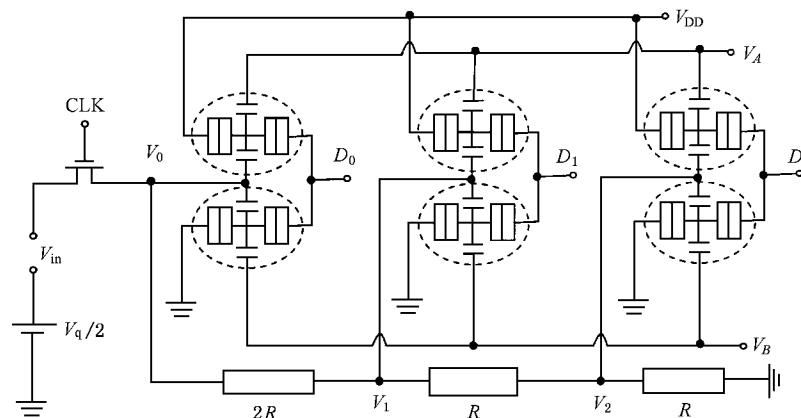
这些电压分别被对应的互补 SET 对器件转化为  $D_0$ — $D_2$ 。

为了分析 3 位 A/D 转换器的方便,我们将互补 SET 传输结构的传输特性的 4 个周期内的情况全部画出来,如图 5 所示。现在分析图 4 中的 A/D 转换器的工作原理。假设图 4 中电路输入信号

$$6.5V_q < V_{in} < 7.5V_q,$$

由于

$$V_0 = V_{in} + V_q/2,$$



所以

$$7V_q < V_0 < 8V_q.$$

由图 5 可以看出,  $D_0$  输出高电平“1”, 由于

$$V_1 = (V_{in} + V_q/2)/2,$$

所以

$$3.5V_q < V_1 < 4V_q.$$

由图 5 可以看出,  $D_1$  输出高电平“1”。又由于

$$V_1 = (V_{in} + V_q/2)/4,$$

所以

$$1.75V_q < V_1 < 2V_q,$$

$D_2$  输出高电平“1”。所以当  $6.5V_q < V_{in} < 7.5V_q$  时,该 A/D 转换器输出为“111”。

由此可以类推,当  $5.5V_q < V_{in} < 6.5V_q$  时,

$$6V_q < V_0 < 7V_q,$$

$$D_0 = 0,$$

$$3V_q < V_1 < 3.5V_q,$$

$$D_1 = 1,$$

$$1.5V_q < V_2 < 1.75V_q,$$

$$D_2 = 1,$$

输出为“110”。

当  $4.5V_q < V_{in} < 5.5V_q$  时,

$$5V_q < V_0 < 6V_q,$$

$$D_0 = 1,$$

$$2.5V_q < V_1 < 3V_q,$$

$$D_1 = 0,$$

$$1.25V_q < V_2 < 1.5V_q,$$

$$D_2 = 1,$$

输出为“101”。

当  $3.5V_q < V_{in} < 4.5V_q$  时,

图 4 一种互补 SET 对组成的 3 位 A/D 转换器

$$4V_q < V_0 < 5V_q ,$$

$$D_0 = 0 ,$$

$$2V_q < V_1 < 2.5V_q ,$$

$$D_1 = 0 ,$$

$$1V_q < V_2 < 1.25V_q ,$$

$$D_2 = 1 ,$$

输出为“100”。

当  $2.5V_q < V_{in} < 3.5V_q$  时,

$$3V_q < V_0 < 4V_q ,$$

$$D_0 = 1 ,$$

$$1.5V_q < V_1 < 2V_q ,$$

$$D_1 = 1 ,$$

$$0.75V_q < V_2 < 1V_q ,$$

$$D_2 = 0 ,$$

输出为“011”。

当  $1.5V_q < V_{in} < 2.5V_q$  时,

$$2V_q < V_0 < 3V_q ,$$

$$D_0 = 0 ,$$

$$1V_q < V_1 < 1.5V_q ,$$

$$D_1 = 1 ,$$

$$0.5V_q < V_2 < 0.75V_q ,$$

$$D_2 = 0 ,$$

输出为“010”。

当  $0.5V_q < V_{in} < 1.5V_q$  时,

$$V_q < V_0 < 2V_q ,$$

$$D_0 = 1 ,$$

$$0.5V_q < V_1 < V_q ,$$

$$D_1 = 0 ,$$

$$0.25V_q < V_2 < 0.5V_q ,$$

$$D_2 = 0 ,$$

输出为“001”。

当  $0 < V_{in} < 0.5V_q$  时,

$$0.5V_q < V_0 < V_q ,$$

$$D_0 = 0 ,$$

$$0.25V_q < V_1 < 0.5V_q ,$$

$$D_1 = 0 ,$$

$$0.125V_q < V_2 < 0.25V_q ,$$

$$D_2 = 0 ,$$

输出为“000”。这样,整个电路的  $D_0$ — $D_2$  的转移曲线如图 6 所示。

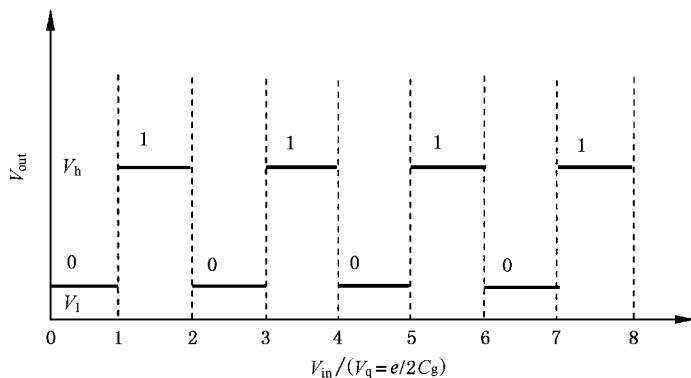


图 5 互补 SET 传输结构转移曲线

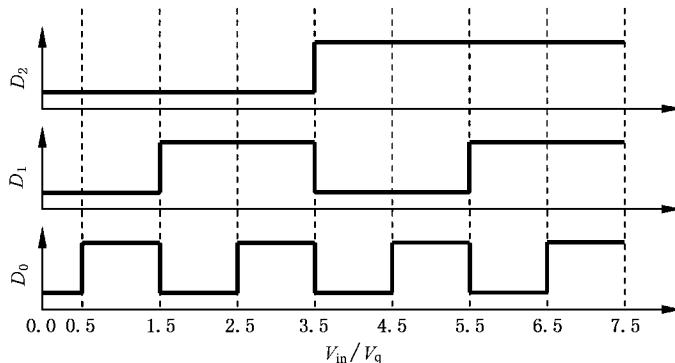


图 6 3 位 A/D 转换器的  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  的转移曲线

可以看出 对于一个  $N$  位的互补 SET A/D 转换器 ,只需要  $2N$  个 SET , $N$  个电阻和一个 MOSFET ,较之传统的 Flash A/D 转换器 ,其复杂程度大为降低 .

整个电路的运行是单电子行为的 ,所以功耗极低 ,因此充放电的时间也很短 ,而且电路简单、布线少 ,所以传输时间也很短 .但是 ,量化单位是由 SET 自身特性决定的(即由  $e/2C_g$  决定的 ) ,不能随意变化 ,而在传统的 A/D 转换器中 ,可以通过改变参考电平而随意改变量化单位 .

在电路设计中 ,要求每个 SET 具有完全相同的几何参数和电学参数 ,并能够精确控制所有参数 .这

对目前的微加工技术提出了更高的要求 .

#### 4. 结 论

单电子晶体管的库仑振荡效应使其具有多阈值开关现象 .利用改进的 V-PADOX 工艺 ,能够同时制造两个参数相同的单电子晶体管 ,这两个 SET 共用一个控制栅 ,并且源漏相接 ,适当调节各自的侧栅电势 ,就可以使它们工作在互补状态 .利用互补的单电子对结构做成的 3 位 A/D 转换器 ,具有结构简单、功耗低、速度快等优点 .

- 
- [ 1 ] Kuo T H , Lin H C , Potter R C et al 1991 *IEEE J. Solid-State Circuits* **26** 145
- [ 2 ] Wei S J , Lin H C , Potter R C et al 1993 *IEEE J. Solid-State Circuits* **28** 697
- [ 3 ] Yukinori O , Yasuo T , Kenji Y 2000 *IEEE Trans. Electron Devices* **42** 147
- [ 4 ] Yukinori O , Yasuo T , Kenji Y et al 2001 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3121

## A novel single-electron analog-to-digital converter<sup>\*</sup>

Zhang Zhi-Yong Wang Tai-Hong

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

( Received 25 October 2002 ; revised manuscript received 30 November 2002 )

### Abstract

The ideal single-electron transistor has a folding  $I-V$  characteristic . Multi-threshold periodic transmitting function can be achieved by using a complementary single-electron transistor structure , which can be used to simplify the analog-to-digital ( A/D ) converter . A novel 3-bit A/D converter by using the complementary single-electron transistor structure has many advantages including a simple structure , high speed and low power .

**Keywords** : Coulomb oscillation , analog-to-digital converter , complementary single-electron transistor structure

**PACC** : 7340Q

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China ( Grant No. G2001CB3095 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 69925410 ).