

肖特基栅型共振隧穿三极管器件模型的研究^①

宋瑞良^{②*} 毛陆虹^{③*} 郭维廉* 谢 生* 齐海涛* 张世林* 梁惠来*

(* 天津大学电信学院 天津 300072)

(** 南开大学光电子所 天津 300071)

摘 要 基于共振隧穿二极管(RTD)的电流-电压方程,结合对肖特基栅型共振隧穿三极管(SGRIT)物理机制的分析和计算,推导出了 SGRIT 器件的器件模型。根据实际器件的材料结构、版图参数等指标计算得到的 SGRIT 器件模型,能很好地与实际器件的特性相吻合。利用 PSPICE 软件,该模型可准确快捷地实现电路功能验证和仿真,此项研究的结果为共振隧穿器件的电路集成和研制奠定了基础。

关键词 共振隧穿三极管(RTT),器件模型,肖特基接触

0 引 言

近些年来,共振隧穿器件由于其高频、高速的特点,被广泛应用于数字电路、光纤传输、半导体照明、AD/DA 转换以及各种高速逻辑电路中^[1-4]。其中,基于量子隧穿效应的共振隧穿三极管(resonant tunneling transistor, RTT)具有极高的工作速度,同时还具有三端可控特性,因而成为化合物量子器件中最有发展潜力的器件之一。在电路应用中,RTT 器件由于扇出大,对输出特性具有调制功能,输入输出回路可隔离,电路集成度高,其应用前景更为广阔。RTT 器件材料是基于分子束外延(MBE)技术生长的多层量子阱结构,由于工艺、材料等因素的影响,不同生产批次的器件之间特性参数差异很大,这就给器件的电路模型的建立造成了很大困难。目前,国际上较为公认的是共振隧穿二极管(resonant tunneling diode, RTD)物理模型,该模型是基于双势垒、单势阱的量子阱结构利用相干隧穿模型求解薛定谔方程得到的^[5],该模型具有形式相对简单、物理参数清晰、适用范围广等优点而被很多研究者采用^[6]。而 RTT 器件由于增加了栅极台面,而且工艺影响因素多,因而没有合适的直流模型。从目前的文献看,RTT 器件的宏观模型大都需要复杂的电学参数,运算量大,同时和实际工艺偏离较远^[7]。为了得到准确、易于求解、贴合工艺参数的电路模型,本文从

RTD 的通用物理模型和 RTT 器件原理入手,利用半导体理论构建了肖特基栅型 RTT (Schottky gate RTT, SGRIT)的直流电路简单模型,该模型可直接用于实际器件特性的验证。

1 肖特基栅型 RTT 的物理机制

RTT 器件的材料结构的核心是双势垒单势阱结构(double barrier structure, DBS),根据量子隧穿机制理论,该结构在外加电压下形成隧穿电流,其 I-V 特性和 RTD 器件一致。RTT 器件的结构特点是在器件的势垒区附近增加第三端控制端——栅极,使 RTD 的隧穿电流因控制端的电压得到调控。肖特基栅型 RTT (SGRIT)便是其中的一类器件,其特点是在 RTD 器件栅极台面上,制备肖特基栅电极,其基本结构如图 1 所示。

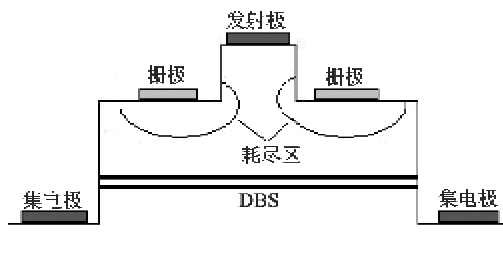


图 1 肖特基栅型 RTT 的结构示意图

① 973 计划(2002CB311905)资助项目

② 男,1980 年生,博士,助理研究员;研究方向:化合物器件模拟与仿真。

③ 通讯作者, E-mail: lhmiao@tju.edu.cn

(收稿日期:2008-08-15)

SGRTT 的栅极采用钛等肖特基金属,栅金属与半导体形成肖特基接触,在半导体内产生高阻的耗尽区。当不加栅压时,发射极接地,集电极加正电压, I-V 特性即为 RTD 的负阻特性曲线。当加负栅压后,随着栅压绝对值的增大,耗尽区同时在纵向和横向扩展,高阻的耗尽区使发射极和集电极间的电子电流通道变窄,RTD 的隧穿电流随之变小,在 I-V 特性曲线上呈现对应于不同栅压的一族 RTD 曲线,如图 2 所示^[8]。这种肖特基栅型 RTT 的特点是,利用栅极电压控制发射极和集电极的隧穿电流,起到电压调控电流的作用,从而克服了 RTD 器件直流特性不能调控、连接电路时输入与输出回路不能隔离等缺点。

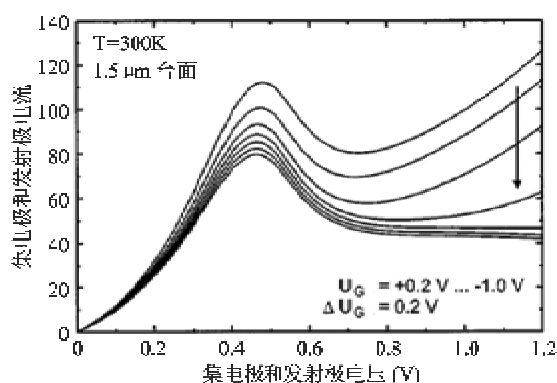


图2 肖特基栅型 RTT 的 I-V 特性曲线

2 肖特基栅型 RTT 的器件模型

SGRTT 器件发射极和集电极间的电流符合 RTD 隧穿电流特性,因此 RTD 器件的电流模型是 SGRTT 模型的基础。目前国际上较为公认的 RTD 直流电路模型为^[9]

$$I = A \ln \left[\left[\frac{1 + e^{(B-C+n_1 V)q/KT}}{1 + e^{(B-C-n_1 V)q/KT}} \right] \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{C - n_1 V}{D} \right) \right] \right] + H(e^{n_2 qV/KT} - 1) \quad (1)$$

其中 V 为 RTD 两端所加的电压, I 为流过 RTD 的电流, q 为电子电量, K 为波尔兹曼常数, T 为温度, A 、 B 、 C 、 D 、 n_1 、 n_2 、 H 是通过实测 I-V 特性曲线拟合的参数,其中, $A = \frac{em^* kTT}{4\pi^2 \hbar^3}$, B 是发射区费米能级, C 是相对于阱中最低的量子化能级, D 是取共振宽度 Γ 的一半, n_1 、 n_2 是拟合系数。此模型包括两个电流部分,即隧穿电流和过剩电流。RTD 的总电流由这两部分电流叠加构成。

本文所研制肖特基栅型 RTT 器件,采用 MBE 生长技术,帽层为 500nm 的掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 n^+ -GaAs,发射区为 100nm 的 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ GaAs,势垒势阱区为不掺杂的 $1.7 \text{ nm AlAs} - 5 \text{ nm In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As} - 1.7 \text{ nm AlAs}$,下面是 100nm 的 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ GaAs 集电区和 500nm 的掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 n^+ -GaAs 集电极接触层。器件为台面结构,如图 3 所示。其工艺过程简述如下:先制作 AuGeNi 发射极叉指状电极,利用发射极的金属作为掩蔽,将材料腐蚀到栅电极台面,蒸发栅电极,栅金属采用 Ti/Au,将材料腐蚀到集电极台面,蒸发集电极金属 AuGeNi,最后连接金属引线、封装。在这个工艺过程中,栅电极制作在 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ GaAs 栅台面上,栅极和发射极采用叉指形状电极,可以更好地实现栅压对隧穿电流的调控作用。

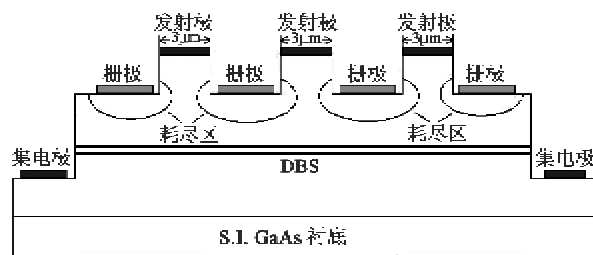


图3 叉指状 SGRTT 的剖面图

栅电极金属 Ti 的功函数 W_{Ti} 为 4.33eV,栅台面 GaAs 材料掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,其功函数 W_{GaAs} 为 4.17eV。当栅电极与 GaAs 接触后,由于钛金属的费米能级低于半导体的费米能级,半导体中的电子将向金属流动,使金属表面带负电,半导体表面带正电,在半导体表面形成一个正的空间电荷层,半导体表面的电势升高,能带向上弯曲,形成肖特基势垒。由于空间电荷主要由电离施主形成,电子浓度低于半导体内部,因此形成的是高阻的阻挡层。用扩散理论可以得到该耗尽层宽度为^[10]

$$x_d = \sqrt{-\frac{2\epsilon_{\text{GaAs}}\epsilon_0(V_{s0} + V)}{qN_D}} \quad (2)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_{GaAs} 为 GaAs 的相对介电常数, q 为电子电量, V_{s0} 为零偏压下半导体表面和内部的电势差, N_D 为 GaAs 的掺杂浓度, V 为金属上加的外电压。

由于

$$-qV_s = W_{\text{Ti}} - W_{\text{GaAs}} \quad (3)$$

经过式(3)可以计算出 GaAs 的表面势 V_s 。如果在金

属上加电压 V 为负电压时,和 V_s 同号, GaAs 表面势垒高度提高,同时耗尽区宽度 x_d 也相应增大。

对于式(1),可认为 $I = f(V)$ 。令未加栅压时的电流为 $I|_{V_G=0}$,施加栅压后电流为 $I|_{V_G \neq 0}$,由于这两种情况下栅压通过横向扩展的耗尽区而改变了 SGRTT 器件从发射极到集电极的串联电阻,因此有

$$\frac{I|_{V_G=0}}{I|_{V_G \neq 0}} = \frac{R_s|_{V_G \neq 0}}{R_s|_{V_G=0}} = \frac{A_s|_{V_G=0}}{A_s|_{V_G \neq 0}} \quad (4)$$

其中, R_s 为 SGRTT 的电流通道等效的串联电阻, A_s 为 SGRTT 电流通道的横截面积。

因此,栅型 RTT 的电流-电压模型可用如下

$$I = \frac{A_s|_{V_G \neq 0}}{A_s|_{V_G=0}} \cdot f(V)|_{V_G=0} \quad (5)$$

来表示。其中, $f(V)|_{V_G=0}$ 为 SGRTT 未加栅压时的 I - V 表达式。由于电流通道的横截面积 $A_s = w_{\text{emitter}} \cdot l$, 其中 w_{emitter} 为发射极的宽度(垂直于纸面方向), l 为电流通道的横向长度(水平方向)。当栅压为负时, V_G 绝对值增大, x_d 变大,有效的电流通道横向长度 l 越小,如图 4 所示。由于 w_{emitter} 是定值,用 l_e 表示发射极条长度,所以

$$\frac{A_s|_{V_G \neq 0}}{A_s|_{V_G=0}} = \frac{l|_{V_G \neq 0}}{l|_{V_G=0}} = \frac{(l_e - 2x_d)|_{V_G \neq 0}}{(l_e - 2x_d)|_{V_G=0}} \quad (6)$$

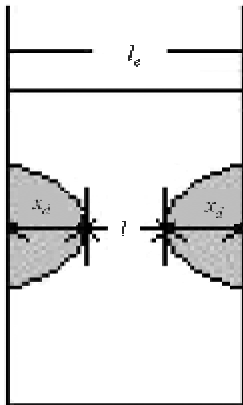


图 4 发射区电流通道示意图

因此,RTT 的电流电压模型可以表示为

$$\begin{aligned} I &= \frac{(l_e - 2x_d)|_{V_G \neq 0}}{(l_e - 2x_d)|_{V_G=0}} \cdot f(V)|_{V_G=0} \\ &= \frac{(l_e - 2x_d)|_{V_G \neq 0}}{(l_e - 2x_d)|_{V_G=0}} \cdot \left\{ A \cdot \ln \left[\frac{1 + e^{(B-C+n_1 V)q/KT}}{1 + e^{(B-C-n_1 V)q/KT}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \arctan \left(\frac{C - n_1 V}{D} \right) \right\} + H \cdot (e^{n_2 qV/KT} - 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{l_e - 2 \times \sqrt{-\frac{2\epsilon_{\text{GaAs}}\epsilon_0(V_{s0} + V_G)}}{qN_D}}{l_e - 2 \times \sqrt{-\frac{2\epsilon_{\text{GaAs}}\epsilon_0 V_{s0}}{qN_D}}} \right) \\ &\quad \left\{ A \cdot \ln \left[\frac{1 + e^{(B-C+n_1 V)q/KT}}{1 + e^{(B-C-n_1 V)q/KT}} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \arctan \left(\frac{C - n_1 V}{D} \right) \right] + H \cdot (e^{n_2 qV/KT} - 1) \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

该模型中, ϵ_{GaAs} 、 V_{s0} 、 N_D 、 l_e 要根据实际 SGRTT 的材料参数、版图参数计算得到, A 、 B 、 C 、 D 、 H 、 n_1 、 n_2 需要根据 SGRTT 器件在零栅压条件下拟合 I - V 特性曲线得到。

3 SGRTT 的实测结果及模型参数

本文中流片的 SGRTT 发射极条长 $l_e = 3\mu\text{m}$, 栅台面的 GaAs 材料掺杂浓度 $N_D = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, GaAs 材料的功函数 $W_{\text{GaAs}} = 4.17\text{eV}$, 栅金属的功函数 $W_{\text{Ti}} = 4.33\text{eV}$, 该浓度下的 GaAs 相对介电常数 $\epsilon_{\text{GaAs}} = 13.18$, 由式(3)可以求得 V_{s0} 为 -0.16V 。

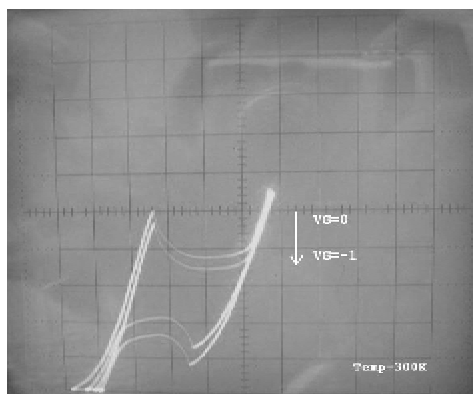
SGRTT 经过 XJ4801 图示仪进行直流特性测量, I - V 特性曲线如图 5(a) 所示。

根据前文理论,从实测曲线上提取 $V_G = 0$ 曲线各点数值,用 Matlab 软件用式(7)进行参数拟合,由此得到的拟合参数为: $A = 0.5091$; $B = 0.5686$; $C = 0.8178$; $D = 0.04116$; $H = 0.2525$; $n_1 = 1.196$; $n_2 = 0.09183$ 。

将所得各参数代入式(7),得到符合本实验材料特性的 SGRTT 电流-电压模型:

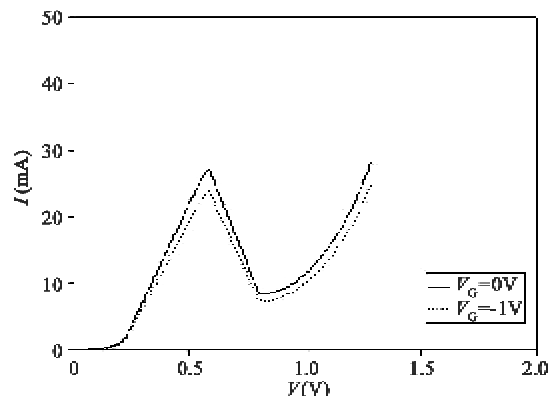
$$\begin{aligned} I &= 0.5091 \times \left(\frac{3 - 2 \times \sqrt{-0.0291 \times (-0.16 + V_G)}}{2.864} \right) \\ &\quad \cdot \left\{ \ln \left[\frac{1 - e^{(-0.3492 + 1.196 \times V)q/KT}}{1 - e^{(-0.3492 - 1.196 \times V)q/KT}} \right] \right. \\ &\quad \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{0.8178 - 1.196 \times V}{0.04116} \right) \right] \\ &\quad \left. + 0.2525 \cdot (e^{0.09183 \times V \cdot q/KT} - 1) \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

通过该模型得到的模拟曲线如图 5(b) 所示。从该图可以看出,此模型可以较好地复原实测数据。本文为了验证模型的可行性,在直流特性测试时暂采用 XJ4801 图示仪,虽然在读取数据时存在微小误差,但其模拟结果证明该模型可以很好地表征实测结果,因此可以在电路中直接应用该模型进行电路仿真。



(a) SGRIT 的实测 I-V 特性曲线

X:0.2V/div Y:5mA/div



(b) SGRIT 的模型拟合曲线

图5 SGRIT 的实测 I-V 特性曲线以及模型拟合曲线

4 SGRIT 的模型应用

由于 RTT 器件可以大大减少电路单元的器件数目,同时又具有较高的转换速度,因此它现在被广泛应用到各种数字门电路中,诸如 MOBILE(单稳-双稳逻辑转换单元电路)、与非门、或非门、同或、异或等逻辑门电路。以 MOBILE 电路^[11]为例,其电路单元的结构如图 6 所示。

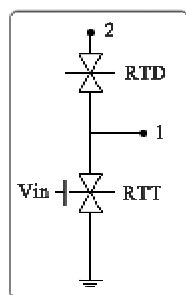


图6 MOBILE 电路结构图

RTT 管作为驱动管,栅极作为输入端 V_{in} , RTD 作为负载管,在节点 2 施加时钟信号,节点 1 作为输出端 V_{out} 。当时钟信号 (V_{clock}) 为高电平,如果 V_{in} 为低电平, V_{out} 即为高电平,如果 V_{in} 为高电平, V_{out} 为低电平,此时电路实现反相器的功能;当时钟信号为低电平时,输出端始终为低电平状态。特别的是,当时钟信号处于一个高电平周期,电路具有自锁功能,即在 V_{clock} 由低电平变为高电平时,可以触发 V_{out} 和 V_{in} 反相(图 7 虚线位置),在这个 V_{clock} 高电平周期内,电路将会锁定该输出电平,即使 V_{in} 再发生变化, V_{out} 也不随之改变(图 7 虚线右侧)。图 7 将本

实验中所得到的 SGRIT 模型应用到 MOBILE 电路,用 PSPICE 软件进行仿真的电路波形。从仿真结果可以看出,本文所建立的 SGRIT 模型能很好地应用于电路模拟,可准确快捷地完成 MOBILE 电路功能仿真工作。

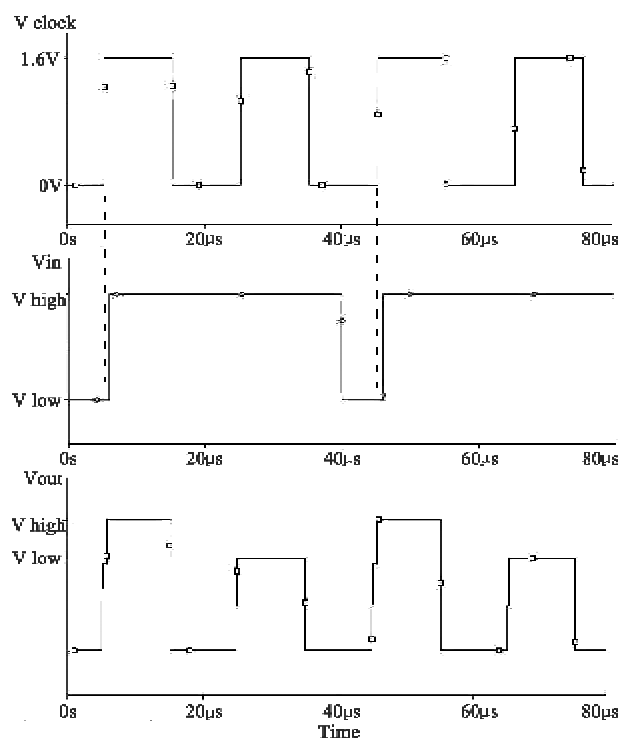


图7 利用 SGRIT 模型仿真的 MOBILE 电路波形图

5 结论

本文在共振隧穿二极管的电流-电压方程的基础上,通过对肖特基栅型 RTT 的物理机制进行分析和计算,推导出 SGRIT 器件的直流模型。将实际器

件的材料结构、版图参数等指标经过计算、拟合,最终可以得到符合实际器件特性的模型参数。通过仿真验证,该模型可以很好的符合实测数据,并直接应用到电路的功能验证,为 RTT 器件的电路集成和研制奠定了基础。

参考文献

- [1] Zhang B Z, Wang J, Xue C Y, et al. A GaAs acoustic sensor with frequency output based on resonant tunneling diodes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 139(1-2):42-46
- [2] Pettenghi H, Avedillo M J, Quintana J M. Using multi-threshold gates in RTD-based logic design: A case study. *Microelectronics Journal*, 2008, 39(2): 241-247
- [3] Pettenghi H, Avedillo M J, Quintana J M. New circuit topology for logic gates based on RTDs. In: Proceedings of the 5th IEEE Conference on Nanotechnology, Nagoya, Japan, 2005. 283-286
- [4] Yoneyama M, Sano A, Hagimoto K, et al. Optical repeater circuit design based on InAlAs/InGaAs HEMT digital IC technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, V45(12): 2274-2282
- [5] Ricco B, Azbel M Y. Physics of resonant tunneling: the one-dimensional double-barrier case. *Phys Rev B*, 1984, 29(4): 1970-1981
- [6] 郭维廉. 共振隧穿二极管(RTD)的物理模型——共振隧穿器件讲座(3). 微纳电子技术, 2006, V4: 167-171
- [7] Barkanaa B D, Erkayab H H. A model for the resonant tunneling semiconductor-controlled rectifier. *Microelectronics Journal*, 2007, V38: 871-876
- [8] Stock J, Malindretos J, Indlekofer K M, et al. A vertical resonant tunneling transistor for application in digital logic circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(6): 1028-1032
- [9] Schulman J N, Santos H J, Chow D H. Physics-based RTD current-voltage equation. *IEEE Electron Device Letters*, 1996, V17 (5): 220-222
- [10] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学. 第4版. 北京:国防工业出版社,2003.184
- [11] Matsuzaki H, Fukuyama H, Enoki T. Analysis of transient response and operating speed of MOBILE. *Transactions on Electron Devices*, 2004, V51(4): 616-622

Research on a device model for Schottky gate resonant tunneling transistors

Song Ruiliang^{* **}, Mao Luhong^{*}, Guo Weilian^{*}, Xie Sheng^{*}, Qi Haitao^{*}, Zhang Shilin^{*}, Liang Huilai^{*}

(^{*} School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(^{**} Institute of Photoelectron, Nankai university, Tianjin 300071)

Abstract

Based on the current-voltage equation of resonant tunneling diodes (RTD) and the analysis and computation of the physical theory mechanism of Schottky gate resonant tunneling transistors (SGRTT), a SGRTT device model is deduced and realized in this paper. The experimental results show that the model obtained through calculation of material and layout parameters of the devices can well fit the experimental curves. The model can also implement the circuit function test and simulation for the devices accurately and conveniently using the PSPICE software. The establishment of the model can lay a foundation for the circuit integration and development of resonant tunneling devices.

Key words: resonant tunneling transistor(RTT), device model, schottky contact