

由 RTD/MOSFET 构成的新型振荡电路^{*}

王 伟^{1,†} 牛萍娟¹ 郭维廉^{1,2} 于 欣¹ 张世林²

(1 天津工业大学信息与通讯学院, 天津 300160)

(2 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 基于一种新型的振荡机制,利用共振隧穿二极管(RTD)固有的负阻和双稳特性,与 MOSFET 器件相结合,首次实现了工作频率约为 25MHz 的 RTD/MOSFET 高频振荡电路.文章首先从理论上深入分析了该电路的振荡机理,然后通过高级设计系统(ADS)软件仿真和实验验证了此振荡电路的正确性.该电路的实现有望解决传统的基于 RTD 的振荡电路的功率限制问题,如果进一步用高电子迁移率晶体管(HEMT)等高频、高速器件取代 MOSFET,可以在很大程度上提高这一电路的工作频率,并可实现 RTD/HEMT 的单片集成.因此该振荡电路在微波和射频领域具有广阔的应用前景.

关键字: RTD/MOSFET 串联单元; 振荡器; ADS 电路仿真

EEACC: 2560J

中图分类号: TN313.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0289-05

1 引言

随着现代电信系统和现代雷达系统的出现,我们需要在特定的载波频率点建立稳定的谐波调制以便为调制和混频创造必要条件.早期的载波频率大部分处于 1MHz 至 1GHz 的低端,而现代射频系统的载波却常常超过 GHz.这就需要能够产生稳定的、单频正弦波信号的特殊振荡电路.共振隧穿二极管(RTD)具有电压低、功耗低和节省器件等优点,而且实验测得 RTD 具有可达 712GHz^[1] 的最高工作频率和 1.5ps^[2] 超高速的开关特性,这些特性使得 RTD 在高频、高速的数字与模拟电路的应用中具有很大的吸引力.而且其固有的负阻、双稳特性使其成为射频与微波振荡电路的最富期望的器件.对于 RTD 振荡电路的研究已初步取得成果,如 RTD 负阻区的小信号微带振荡电路^[3]、多谐振荡电路^[4]、RTD/HBT 构成的环形振荡器电路^[5]等.近来,文献[6]通过电路仿真的方法提出了一种新型的基于负阻振荡机制的 RTD 振荡电路,它利用了 RTD 与高电子迁移率晶体管(HEMT)串联结构模拟出了 RTD 从峰值到谷值的大信号振荡电路.本文正是在此电路原理的基础上,利用模拟和实验首次实现了 RTD 与 MOSFET 结合的串联振荡电路,这一电路的实现有望解决传统的基于 RTD 的微带振荡电路的功率限制问题.

2 电路原理与仿真

RTD/MOSFET 振荡器的电路结构如图 1 所示,其核心是 RTD 与 nMOSFET 的串联单元结构,在 MOSFET 的栅源间,除 MOS 的寄生电容外,另外增加一个栅源电容 C_{gs} ,通过其充放电过程调节栅源电压.在 MOSFET 的栅极增加一个电感,主要起到限制电流突变的作用,并且可以与电容 C_{gs} 产生谐振.图 2 为振荡器的工作原理图,作为驱动器件的 RTD $I-V$ 特性曲线沿电压轴的正向绘制,作为负载器件的 MOSFET 的 $I-V$ 曲线反向绘于图中(图中只给出了对应于不同栅压的两条主要工作的

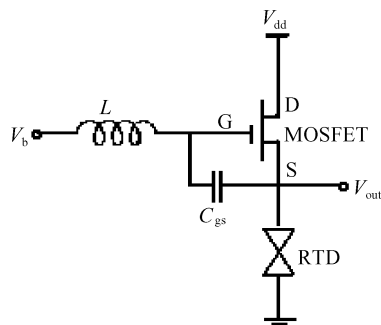


图 1 RTD/MOSFET 振荡器电路结构

Fig. 1 Circuit configuration of RTD/MOSFET oscillator

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号:60536030)

[†] 通信作者,Email:wangweiww33@yahoo.com.cn

2006-07-15 收到,2006-08-24 定稿

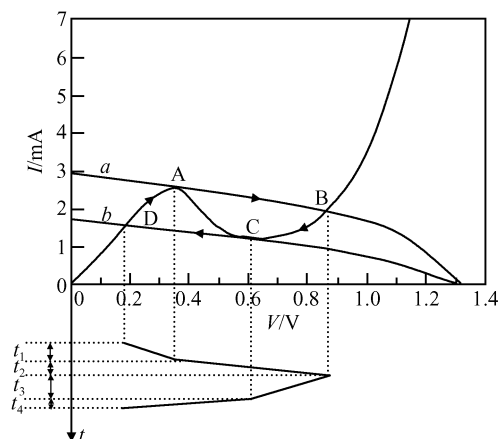


图 2 RTD/MOSFET 振荡器的工作原理图

Fig. 2 Working principle of RTD/MOSFET oscillator

负载线 a 和 b). 工作过程为: 当初始栅压 V_b 由零逐渐升高时, 工作点由 $D \rightarrow A$ 移动, MOS 负载线由 b 逐渐变到 a , 同时电容 C_{gs} 充电, 这一过程 RTD 与 MOS 负载线交于其第一正阻区, RTD 两端处于低电平的工作状态; 当到达 A 点, 此时使 V_b 电压稳定, MOS 管的源漏电流 I_{ds} 刚好超过 RTD 的峰值电流 I_p 时, RTD 的工作区由第一正阻区跳变到第二正阻区, RTD 的电压由低电平跳变到高水平, 工作点由 $A \rightarrow B$; 由于 V_b 保持不变, 而 RTD 的电压增大 $\Delta V (= V_B - V_A)$, 使得 V_{gs} 下降 ΔV , 电容 C_{gs} 开始放电, 如果 ΔV 足够大使得 MOS 的负载线由 MOS 的 a 曲线变化到 b 曲线, 那么工作点将由 $B \rightarrow C$; 此时由于工作点处的负载线 b 低于 RTD 的谷值电流, 因此工作点由 $C \rightarrow D$, RTD 的电压下降一个 $\Delta V' (= V_C - V_D)$, 由于 V_b 不变, V_{gs} 将增大 $\Delta V'$, 电容又会充电, MOS 负载线由 b 变到 a , 工作点由 D 又回到 A , 完成了一个周期的工作过程. 在一定意义上, 接入的 RTD 起到了负反馈的作用. RTD 的开关时间一般在皮秒数量级上, 而选用的 C_{gs} 与 L 构成的充放电时间远大于 RTD 的开关时间, 因此可以认为 RTD 由 $A \rightarrow B$ 和由 $C \rightarrow D$ 的跳变过程, 电容电压基本保持不变. 图 2 下方画出了一个周期内输出电压变化与时间的关系曲线, 其中时间 t_1 和 t_3 由电路中的电容和电感充放电的时间常数决定, t_2 和 t_4 由 RTD 的开关时间决定, 振荡输出波形并非严格的正弦波, 但通过调节 C_{gs} 与 L 的充放电时间常数, 可以调整振荡波形以接近正弦波. 由此看出, 此电路在初始加一个激励 V_b , 然后 V_b 保持不变, 且满足两个必要条件: (1) 稳定时 V_b 的值应恰好能使 MOSFET 的直流 I_{ds} 的值超过 RTD 的峰值电流 I_p ; (2) RTD 的电压跳变幅度 ΔV 足够大, 能够使得 V_{gs} 变化, 从而使 MOS 的 I_{ds} 从超过 RTD 峰值的负载线跳变到低于 RTD 谷值的负载线, 就会在输出

端 V_{out} 产生周期性振荡. 而且其中的 MOSFET 可以用具有类似电压-电流特性的电压控制型器件 (如 HEMT) 所取代.

在此原理的基础上, 本文利用美国 Agilent Technology 公司的 Advanced Design System 软件 (简称 ADS) 进行了电路模拟, 对其振荡的可行性作了进一步分析. ADS 是微波电路强有力的辅助设计软件, 和普通的 SPICE 分析软件相比, 除了具有一般 SPICE 软件所具有的各种模拟分析方法, 它还有精确的传输模型和各种微波部件模型, 适于高频、高速器件的模拟. 在模拟的过程中, RTD 的模型采用了文献[7]中的交流小信号等效电路模型 (如图 3 所示), C_d 代表 RTD 的本征电容, 并考虑到串联电感 L_s 和串联电阻 R_s 的影响. 这里为了与实际吻合, 采用文献[8]的交流参数, 取 $C_d = 1.01 \times 10^{-13} \text{ F}$, $R_s = 8 \Omega$, $L_s = 1.07 \times 10^{-11} \text{ H}$, RTD 的直流特性采用 Schuman 等人[9]提出的基于物理意义的电流-电压方程, 且与本实验所用的实际 RTD 的直流特性拟合得基本一致. 在 ADS 中 RTD 直流部分采用 SDD (symbolically defined devices) 器件实现基于方程自定义的非线性电压控制电流 (VCCS). MOSFET 采用 ADS 的内部模型, 对参数进行了修改以符合本文实际测试的参数.

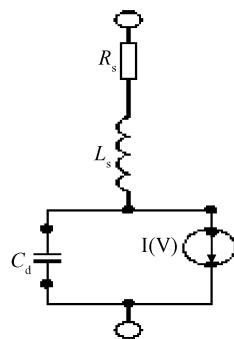


图 3 RTD 的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of RTD

振荡电路瞬态仿真结果如图 4 所示, 这里 $V_{dd} = 1.33 \text{ V}$, $V_b = 1.8 \text{ V}$, $L = 200 \text{ nH}$, $C_{gs} = 22 \text{ pF}$. 图中纵坐标 $V_g - V_{out}$ 为 MOSFET 的栅压与输出电压差, 即 MOS 的栅源电压. $V_b - V_{out}$ 为 V_b 与输出电压差, V_{out} 为输出电压, 也就是 RTD 两端的电压, 从图中可以看出 V_{out} 的波形与图 2 中理论分析波形一致. 该电路在直流条件下输出电压和 MOS 的栅源电压同时产生等幅振荡, 模拟振荡频率约为 400 MHz . 振荡电路电流-电压轨迹曲线的模拟结果如图 5 所示.

在仿真的过程中改变电感 L 的值对振荡的频率产生很大的影响, L 越小振荡的频率越大, 波形可由

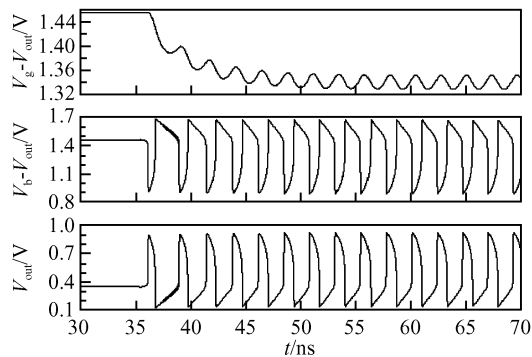


图 4 振荡器电路模拟波形图
Fig. 4 Simulated waveforms of oscillator

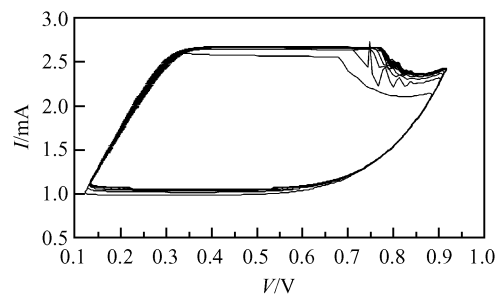


图 5 振荡器电路模拟电流-电压轨迹曲线
Fig. 5 Simulated I - V locus of oscillator

方波逐渐趋于正弦波.因此本文同时还对 L 和 C_{gs} 与振荡频率的关系进行了模拟,结果如图 6 所示,振荡频率随 L 的减小而大幅增大,而对于电容 C_{gs} 的变化,则是随 C_{gs} 的增大略有减小.因此设计时可通过减小 L 来提高振荡的频率,但这种频率调节在实际中还会受到 MOSFET 的最高工作频率的限制.

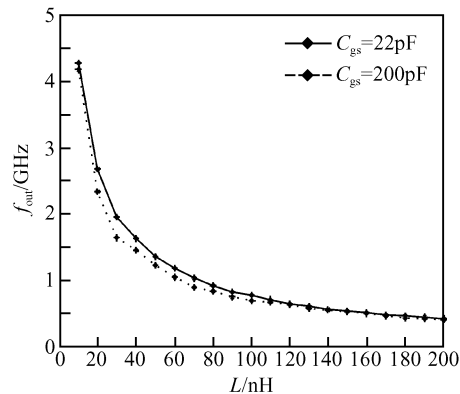


图 6 电感、电容与振荡器频率的关系
Fig. 6 Relationship between inductance, capacitance and output frequency

3 电路实现

根据以上的分析与模拟我们采用了 RTD 与

MOSFET 构建出了该振荡电路. RTD 采用 AlAs/ $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ /AlAs 的单势阱双势垒结构 (DBS), 势阱中采用了 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$, 是为了使开启电压 V_i 和峰值电压 V_p 降低; 为了提高电流峰谷比 PVCRR, 在 E 和 C 区引入了 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 子阱 (subwell), 使 3 维对 2 维共振隧穿变成 2 维对 2 维共振隧穿^[10], 为了减小开启电压 V_i 与峰值电压 V_p , E 区掺杂浓度为 $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. RTD 的生长采用分子束外延 (MBE) 工艺, 所得 RTD 的峰值电压 V_p 为 0.31V, 谷值电压 V_v 为 0.65V, 峰值电流 I_p 为 2.3mA, 谷值电流 I_v 为 1mA, 峰值电流密度为 7500A/cm^2 , 电流峰谷比 PVCRR 约为 2.3 : 1, 该 RTD 的负阻 $|R_N|$ 约为 262Ω . 其直流 I - V 特性如图 7 所示. MOSFET 选择了 3DO 耗尽型场效应管, 其 I - V 特性如图 8 所示. 由图 7 和图 8 可以看出, 当 MOSFET 的栅压为 $V_{gs} = 1.4 \text{V}$ 时, I_{ds} 在漏源电压 $V_{ds} = 1 \text{V}$ 处刚好超过 RTD 的 I_p , 因此理论上 V_{dd} 选取 1.3V 左右 ($= V_{ds} + V_p$), V_b 选取 1.4V 左右,

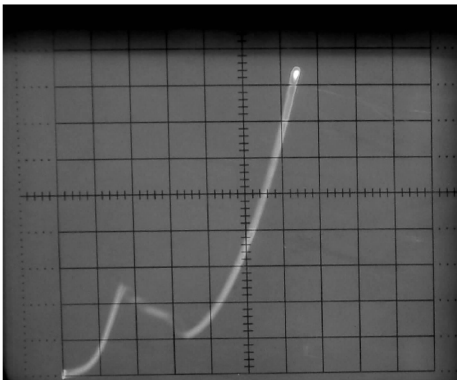


图 7 实际 RTD 的 I - V 特性 x : 0.2V/格, y : 1mA/格
Fig. 7 Measured RTD I - V characteristics x : 0.2V/div, y : 1mA/div

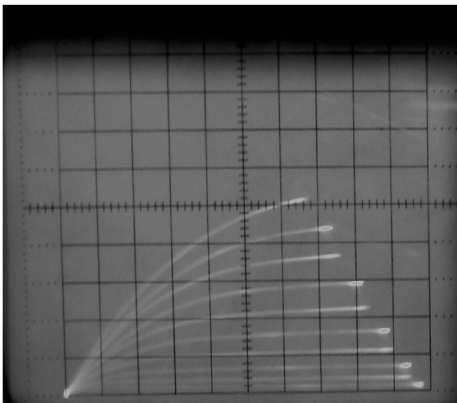


图 8 实际 MOSFET 的 I - V 特性 x : 0.2V/格, y : 1mA/格, 0.2V/阶梯
Fig. 8 Measured MOSFET I - V characteristics x : 0.2V/div, y : 1mA/div, 0.2V/step

C_{gs} 和 L 须根据仿真结果多次尝试, 由于 L 的值为 nH 数量级, 而且振荡电路工作在 MHz 域, 因此电路的寄生参数对电感电容值的影响很大. 电路实验得到 $V_{dd} = 1.33\text{V}$, $V_b = 1.27\text{V}$, $C_{gs} = 22\text{pF}$, $L = 200\text{nH}$ 产生振荡, 得到振荡电路的输出结果如图 9 所示.

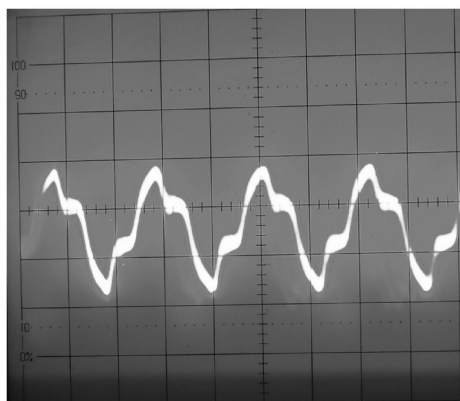


图 9 由 RTD/MOSFET 构成的振荡电路的实测波形输出
x: 20ns/格, y: 50mV/格

Fig. 9 Measured output waveform of RTD/MOSFET oscillator x: 20ns/div, y: 50mV/div

由图 9 可以看出, 输出振荡波形的频率大约为 25MHz, 振荡幅度约为 0.15V, 其波形不是严格的正弦波, 而是在一个周期中, 上升阶段分为两个阶段, 下降阶段分为两个阶段, 这正与前面原理部分讨论的由电容和电感充放电过程和 RTD 开关时间所决定的充放电时间一致. 产生振荡的电路频率和电压幅值与理论和仿真结果有一定的偏差, 这主要是由于电路中存在很大的寄生电感和电容, 它们已经接近电路中所接电感与电容的数量级, 根据射频电路分析理论^[11], 在 MHz 域的电路传输线的分布参数对电感和电容产生的影响很大, 因此导线传输可以造成很大的电压衰减. 对于振荡电路的最高工作频率, 除了与电路中电容和电感的充放电时间有关, 一般而言, 电路的工作频率由电路中所使用最低频率的器件所决定. 我们知道, RTD 的工作频率最高可达 712GHz, 而此电路的工作频率远低于这一数量级, 这主要是由于电路中 MOSFET 的工作频率相对较低, 若要提高频率, 则可以使用与 RTD 工作频率匹配的高频高速的电压控制的三端器件如 HEMT 等, 可使频率大大提高, 工作于 GHz 域, 而且可以实现 RTD/HEMT 的单片集成.

4 结 论

本文基于一种新型的振荡机制, 利用共振隧穿器件固有的负阻和双稳特性, 与 MOSFET 器件相结合, 首次实现了工作频率为 25MHz, 振荡幅度为 0.15V 的 RTD/MOSFET 高频振荡电路. 本文首先从理论上深入分析了该电路的振荡机理, 而且通过 ADS 软件仿真验证了分析的正确性, 并实现了此振荡电路. 这一电路的实现有望解决传统的基于 RTD 振荡电路的功率限制问题, 如果进一步用 HEMT 等高频、高速的电压控制器件取代 MOSFET, 同时对电路中寄生参数进行优化, 可以在很大程度上提高这一电路的工作频率, 使该振荡电路用于微波和射频通信领域的收发系统中, 从而具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Brown E R, Soderstrom J R, Parker C D, et al. Oscillations up to 712GHz in InAs/AlSb resonant tunneling diodes. Appl Phys Lett, 1991, 58: 2291
- [2] Shimizu N, Nagatsuma T, Waho T, et al. InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes with switching time of 1.5ps. Electron Lett, 1995, 31(19): 1695
- [3] Qian Bosen. Negative resistance device & circuit and its applications. Tianjin: Tianjin University Press, 1993: 162 (in Chinese)[钱博森. 负阻器件、负阻电路及其应用. 天津: 天津大学出版社, 1993: 162]
- [4] Doyl J M. Pulse fundamentals. Prentice-Hall Inc, 1973
- [5] Lin C H, Yang K, East J R, et al. Ring oscillator using an RTD-HBT heterostructure. Journal of the Korean Physical Society, 2001, 39(3): 572
- [6] Muramatsu N, Okazaki H, Waho T. A novel oscillation circuit using a resonant-tunneling diode. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005, 8(5): 2341
- [7] Niu Pingjuan, Guo Weilian, Liang Huilai, et al. The AC small-signal model establishment of resonant tunneling diodes (RTD). Research & Progress of SSE, 2005, 22(2): 137 (in Chinese)[牛萍娟, 郭维廉, 梁惠来, 等. 共振隧穿二极管交流小信号模型的建立. 固体电子学研究进展, 2005, 22(2): 137]
- [8] Niu Pingjuan. Study on resonant tunneling device and its application. PhD Dissertation, Tianjin University, 2002 (in Chinese)[牛萍娟. 共振隧穿器件及其应用研究. 天津大学博士学位论文, 2002]
- [9] Schulman J N, De Los Santos H J. Physics-based RTD current-voltage equation. IEEE Electron Device Lett, 1996, 17(5): 220
- [10] Boaregba R, Vanbésien O, Mounaix P, et al. Resonant tunneling diodes as sources for millimeter and sub-millimeter wavelengths. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1993, 41(11): 2025
- [11] Ludwig R H, Bretchko P. RF circuit design: theory and applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002

A Novel Oscillator Based on RTD/MOSFET^{*}

Wang Wei^{1,†}, Niu Pingjuan¹, Guo Weilian^{1,2}, Yu Xin¹, and Zhang Shilin²

(1 *School of Information and Communication, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China*)

(2 *School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Based on a novel oscillating mechanism, a 25MHz high-frequency oscillating circuit is achieved by combining resonant tunneling diode (RTD) characterized by intrinsic negative differential resistance (NDR) and bi-stability with a MOSFET. The mechanism of this oscillating circuit is analyzed theoretically, and the correctness of the circuit analysis is verified by advanced design system (ADS) simulation and experiment. The realization of this circuit can solve the problem of power limitation in conventional RTD-based oscillating circuits. If using a high-frequency, high-speed device such as a high electron mobility transistor (HEMT) in stead of a MOSFET, this circuit can improve its frequency greatly and is more suitable for monolithic integration. Thus it can find wide applications in radio-frequency and microwave fields.

Key words: RTD/MOSFET element; oscillator; ADS circuit simulation

EEACC: 2560J

Article ID: 0253-4177(2007)02-0289-05

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60536030)

[†] Corresponding author. Email: wangweiww33@yahoo.com.cn

Received 15 July 2006, revised manuscript received 24 August 2006