

TFET model 使用手册

1、TFET model 简介

Verilog-A 是一种基于 Verilog 语法，旨在对模拟电路建模的编程语言。不同于 Verilog 对数字电路进行描述，Verilog-A 可以模拟连续时间行为，并被大部分 Spice 仿真器支持。本次实验使用的 TFET 器件模型就是基于 Verilog-A 语言进行建模的，其文件名称由“.va”结尾。

本次实验提供的 TFET 模型文件一共包含两大部分：va 文件，tbl 文件，如 Fig. 1. 所示。其中 heterotfet.va 和 homotfet.va 中分别定义了异质结和同质结两种 tfet 的仿真入口，这两个文件会进一步调用 tfet_master.va 求解电路的电流和寄生参数。tfet_master.va 求解过程主要基于在 tbl 文件中事先存取好的寄生参数和电流电压关系，通过接收仿真器给定的电压输入，在 tbl 中查找得到对应的电流和寄生参数并返回给仿真器。综上文件之间的依赖关系可以由 Fig. 2 所示。

CGD-GaSb-InAs-HNTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	1,067 KB
CGD-GaSb-InAs-HPTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	1,070 KB
CGD-InAs-NTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	609 KB
CGD-InAs-PTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	609 KB
CGS-GaSb-InAs-HNTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	1,067 KB
CGS-GaSb-InAs-HPTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	1,070 KB
CGS-InAs-NTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	609 KB
CGS-InAs-PTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	609 KB
heterotfet.va	✓	9/9/2021 21:36	VA 文件	3 KB
homotfet.va	✓	9/9/2021 21:36	VA 文件	3 KB
IdVg-GaSb-InAs-HNTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	1,805 KB
IdVg-InAs-NTFET-Lg-20nm.tbl	✓	9/9/2021 21:36	TBL 文件	618 KB
tfet_master.va	✓	9/9/2021 21:36	VA 文件	5 KB

Fig. 1 TFET 工艺库文件

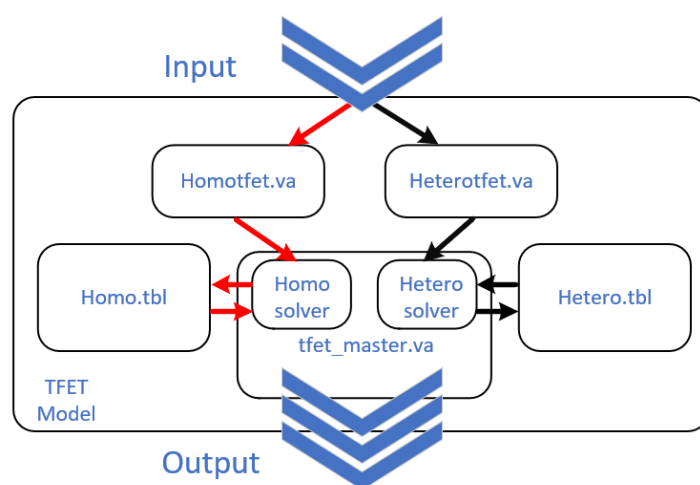


Fig. 2 TFET 模型结构

本次实验中我们将使用异质结 TFET 进行仿真。下面将会对基于 model 使用的异质结的 TFET 进行介绍。

2、异质结 TFET 模型

传统的 MOSFET 基于 thermionic emission of electrons 传导电流，存在理想的亚阈值摆幅极限（室温下为 59.5 mV/dec），因此在超低电压应用下传统 MOSFET 的开关特性很难满足高性能和低功耗的需求。Tunneling FET (TFET) 与传统的 MOSFET 有不同的导电机理，其源漏存在不对称掺杂，并且通过栅极电压调节本征沟道能带，在源沟间形成电子或者空穴

的隧穿通道，通过能带间的隧穿效应传导载流子。由于 TFET 和传统 MOSFET 的工作机理有本质上的不同，TFET 不受传统 MOSFET 的理想亚阈值摆幅制约，是一类能够在室温下实现亚 60mV/dec 的低功耗器件[4]。

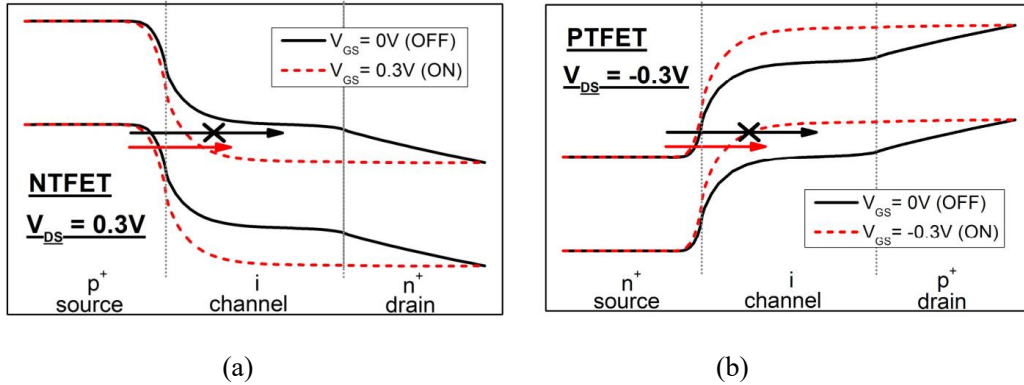


Fig. 3 NTFET 和 PTFET 工作原理 (a) NTFET 由 P⁺IN⁺ 结构成，其中 P⁺ 为源区，N⁺ 为漏区，沟道为本征区，当栅压为 0 时，源和沟道的势垒宽度较大，电子隧穿概率低，此时管子为关断状态；当施加栅压为 0.3V 时，本征区形成 N 型反型层，源沟势垒宽度降低，隧穿概率增大，此时为开态；(b) PTFET 同样由 P⁺IN⁺ 构成，此时 N⁺ 为源区，关态时源沟势垒宽度大，开态时，源沟势垒宽度降低，隧穿概率增大[5]

本次实验的模型基于[1][2]进行矫正和验证，图三为器件概图[1]，其 UTB (ultral-thin body) 为 5nm，沟道长度为 40nm 同时有 2.5nm 的 HiK 氧化层，漏端、沟道和源端分别是掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 InAs，本征 InAs 以及掺杂浓度为 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaSb。通过 OMEN 仿真器(an atomistic and full-band quantum transport simulator)提取[1]中的实验数据，作为对 TCAD 仿真结果的矫正。为了验证有效性，模型同时利用 OMEN 对[2]中的实验数据进行拟合，与 TCAD 仿真结果在 IV 特性，截止频率 (cut-off frequency) 等器件特性上进行了比较，且进一步利用 TCAD 对寄生电容进行提取。详细结果请参考[3]。

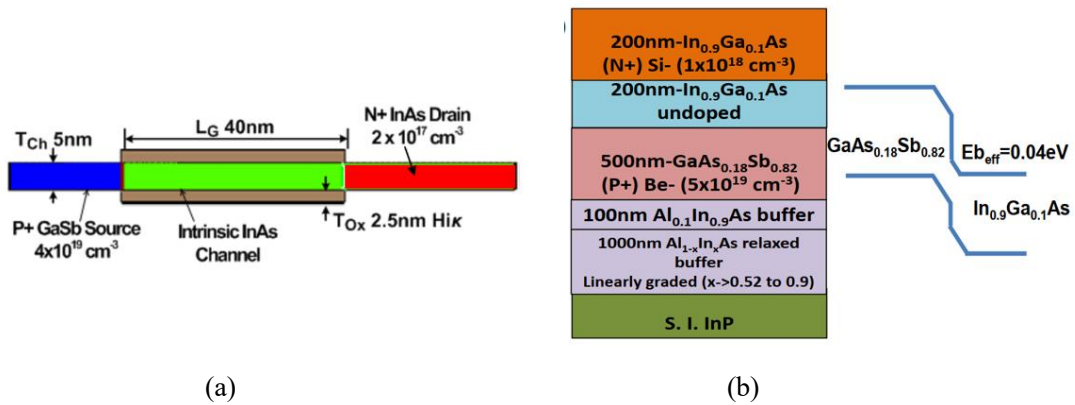


Fig. 4 器件简图 (a) 矫正器件[1] (b) 验证器件[2]

3、TFET 模型调用及注意事项

引用库文件

库文件路径

```
.hdl1 './../LAB1_LIB/TFET/heterotfet.va'
```

上图为调用 TFET 库文件的代码，其中.hdl 代表 va 模型引用，其后跟相应的 va 文件路径。更进一步的，调用 TFET 模型，可以参考下列实例代码。

```
***** 参数定义 *****
** width 为晶体管宽度，大小可调，此处设置为0.06um (width在model中的默认单位为um)
** Rseries 为TFET寄生电阻，其大小和宽度成比例
.param Width=0.06
.param RSeries=55
** 定义标准电源电压为0.3V
.param supply = 0.3
** 设置仿真温度为25度，实际上本次实验使用的TFET模型只能得到25度的结果**
.temp 25

***** 模型引用 *****
* define the subckt of nfet and pfet

.subckt nfet drain gate source w=width

***** 寄生电阻R1 *****
R1 source s1 'RSeries/Width'

***** NTFET 定义 *****
X1 d1 gate s1 tfet type=1 w=width

***** 寄生电阻R2 *****
R2 drain d1 'RSeries/Width'

.ends
Xn d g s nfet w=width
```

.param 定义了器件宽度，寄生电阻，以及电源电压。本次实验使用 TFET 模型基于 20nm，该模型不支持修改沟道长度。同时本模型也不支持多温度仿真，改变.temp 设置不影响 TFET 器件性能。调用期间时，实例代码采用.subckt 包装的方式，将原模型加入寄生电阻，并且引出相应的源漏栅极，以及可修改参数，因此最终在调用模型时采用子电路的调用方式。

Reference:

- [1] M. Luisier and G. Klimeck, "Performance comparisons of tunneling field-effect transistors made of InSb, carbon, and GaSb-InAs broken gap heterostructures," in *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp.1,4, 2009.
- [2] R. Bijesh *et al*, "Demonstration of In_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs_{0.18}Sb_{0.82} near broken-gap tunnel FET with ION=740μA/μm, GM=700μS/μm and Gigahertz Switching Performance at VDS=0.5V", *IEDM Tech.Digest.*, pp. 28.2.1–28.2.4, Dec. 2013.
- [3] Liu, H. , et al. "III-V Tunnel FET Model 1.0.0."
- [4] <https://www.zurich.ibm.com/st/nanophotonics/tunneling.html>

- [5] C. Chen, Y. Chen, M. Fan, V. P. Hu, P. Su and C. Chuang, "Evaluation of TFET and FinFET devices and 32-Bit CLA circuits considering work function variation and line-edge roughness," *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 2325-2328.