

## Моделирование нелинейных процессов в мощных СВЧ транзисторах

*В программном комплексе Sentaurus TCAD проведено моделирование нелинейных процессов в мощных СВЧ транзисторах на примере карбидкремниевого полевого транзистора с затвором Шоттки. Полученные данные дают полный спектр информации о транзисторе вплоть до энергетических параметров.*

**Ключевые слова:** нелинейное моделирование, транзисторы, TCAD, карбид кремния.

На рисунке 1 схематически показано поперечное сечение структуры полевого транзистора с затвором Шоттки (ПТШ). Пунктирными линиями обозначены границы областей пространственного заряда (ОПЗ) вблизи р-п перехода между каналным п-слоем и буферным р-слоем, а также вблизи перехода Шоттки. На рисунке символами  $W_{ch}$  – обозначена толщина канального эпитаксиального слоя,  $L_g$  – толщина ОПЗ, распространяющейся от перехода Шоттки,  $L_{p-n}$  – толщина ОПЗ, распространяющейся от р-п перехода между каналным и буферным слоем,  $h$  – эффективная толщина канала ПТШ.

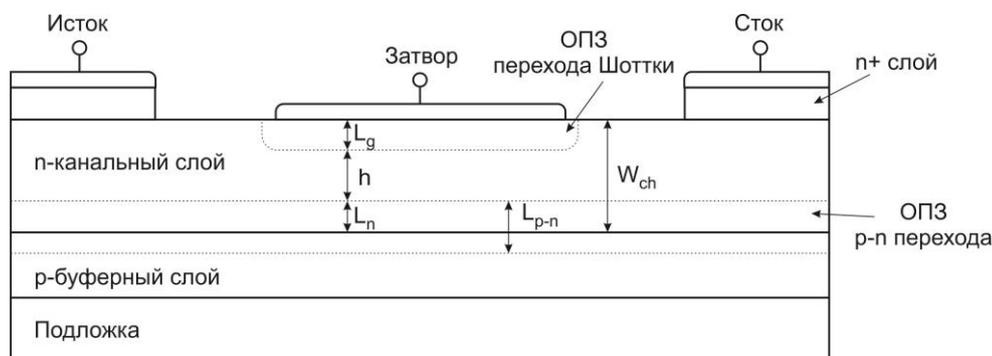


Рис. 1. Схематическое изображение сечения структуры ПТШ.

На основании вышеизложенных аналитических формул, а так же соображений представленных в [1, 2, 3] была создана приборная модель в программном комплексе Sentaurus TCAD. Ширина затвора прибора выбрана 1 мм для упрощения представленных данных. Целью текущего этапа проектирования является построение статических вольтамперных характеристик прибора, а так же получение малосигнальных параметров в виде Y-матрицы.

Смоделированное семейство входных и передаточная вольтамперные характеристики ПТШ на основе карбида кремния представлены на рисунке 2. Отрицательный ток стока при малых смещениях на стоке и относительно больших на затворе транзистора относительно истока объясняются утечками через переход Шоттки при его прямом смещении.

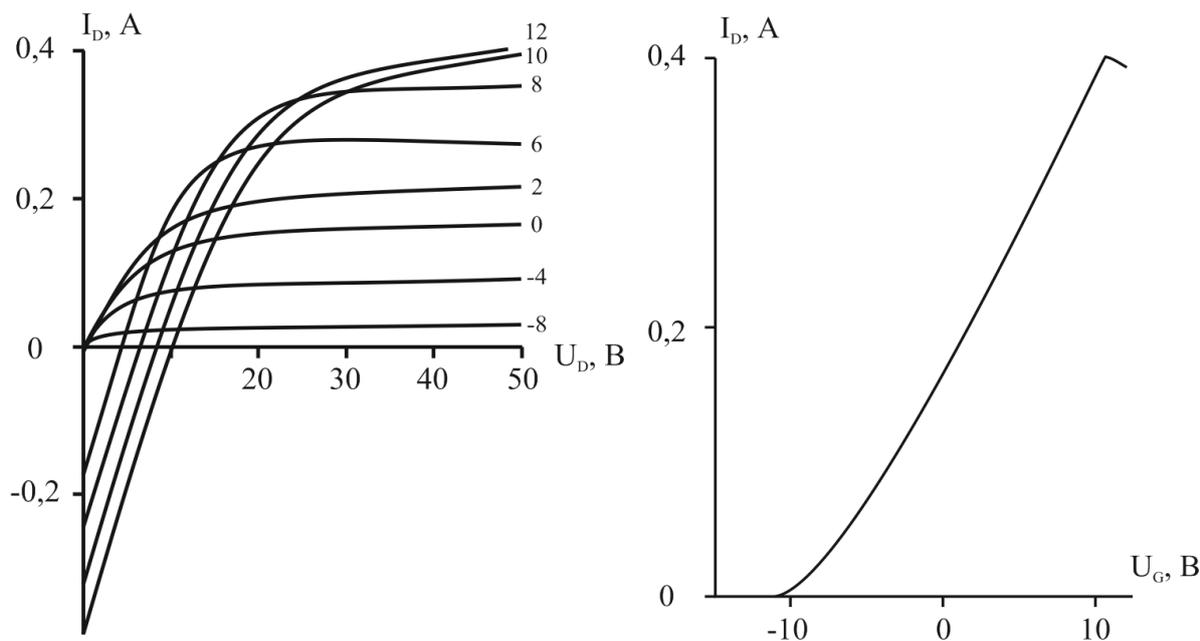


Рис. 2. Слева выходная вольтамперная характеристика ПТШ. Справа передаточная вольтамперная характеристика ПТШ.

С использованием стандартных моделей извлечения малосигнальных параметров Sentaurus TCAD моделируемого прибора были получены элементы  $Y$ -матрицы.  $Y$ -матрица описывает как ток в приборе реагирует на малые изменения напряжения  $\delta u$ :

$$\delta i = Y \cdot \delta u = (A + j \cdot \omega \cdot C) \cdot \delta u, \quad (5)$$

где  $\delta i$  – небольшие изменение тока происходящие вследствие изменений напряжения,  $\omega$  – частота этих изменений,  $j$  – мнимая единица.  $A$  – реальная часть матрицы,  $C$  – мнимая часть матрицы. В матричном виде данное выражение можно записать как:

$$\begin{bmatrix} i(g) \\ i(d) \\ i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(g,g) & a(g,d) & a(g,s) \\ a(d,g) & a(d,d) & a(d,s) \\ a(s,g) & a(s,d) & a(s,s) \end{bmatrix} + j \cdot \omega \cdot \begin{bmatrix} c(g,g) & c(g,d) & c(g,s) \\ c(d,g) & c(d,d) & c(d,s) \\ c(s,g) & c(s,d) & c(s,s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(g) \\ u(d) \\ u(s) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$Y$ -матрица посчитанная для закрытого транзистора с приложенным напряжением питания представлена ниже.

	gg	gd	gs	dg	dd	ds	sg	sd	ss
c	$2,89 \cdot 10^{-13}$	$-6,46 \cdot 10^{-14}$	$-2,25 \cdot 10^{-13}$	$-6,46 \cdot 10^{-14}$	$2,35 \cdot 10^{-13}$	$-1,71 \cdot 10^{-13}$	$-2,25 \cdot 10^{-13}$	$-1,71 \cdot 10^{-13}$	$3,95 \cdot 10^{-13}$
a	$3,11 \cdot 10^{-10}$	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$-7,88 \cdot 10^{-11}$	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$6,22 \cdot 10^{-10}$	$-3,81 \cdot 10^{-10}$	$-7,88 \cdot 10^{-11}$	$-3,81 \cdot 10^{-10}$	$1,56 \cdot 10^{-10}$

По результатам моделирования предложена простейшая цепь согласования транзистора (рис. 3). Указанная цепь была перенесена в SPICE интерфейс программы Sentaurus TCAD.

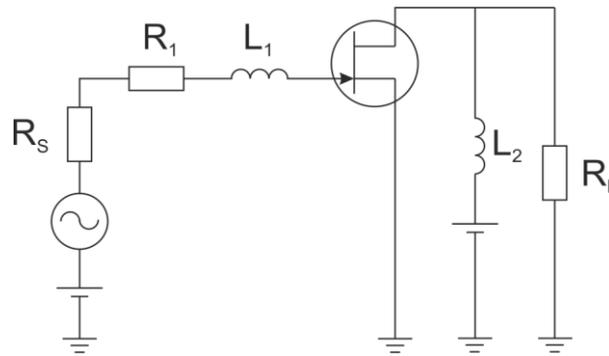


Рис. 3. Цепь использованная для моделирования поведения транзистора.

На основании разработанной модели были построены осциллограммы переходных процессов при включении и релаксации транзистора на частоте 1 ГГц. Осциллограмма при смещении на затворе транзистора, соответствующая режиму работы в классе АВ, показана на рисунке 4. Осциллограмма при смещении на затворе транзистора, соответствующая режиму работы в классе А, показана на рисунке 5.

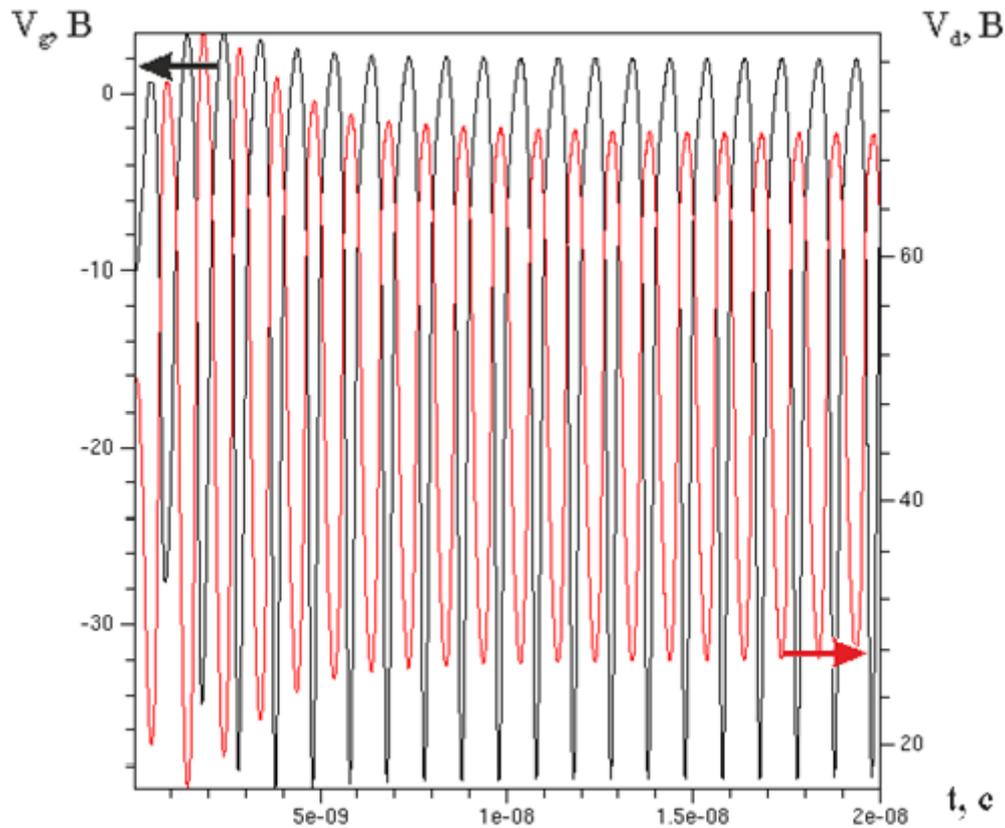


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса включения упрощенной транзисторной ячейки при амплитуде в классе АВ смещения на затворе -10 В.

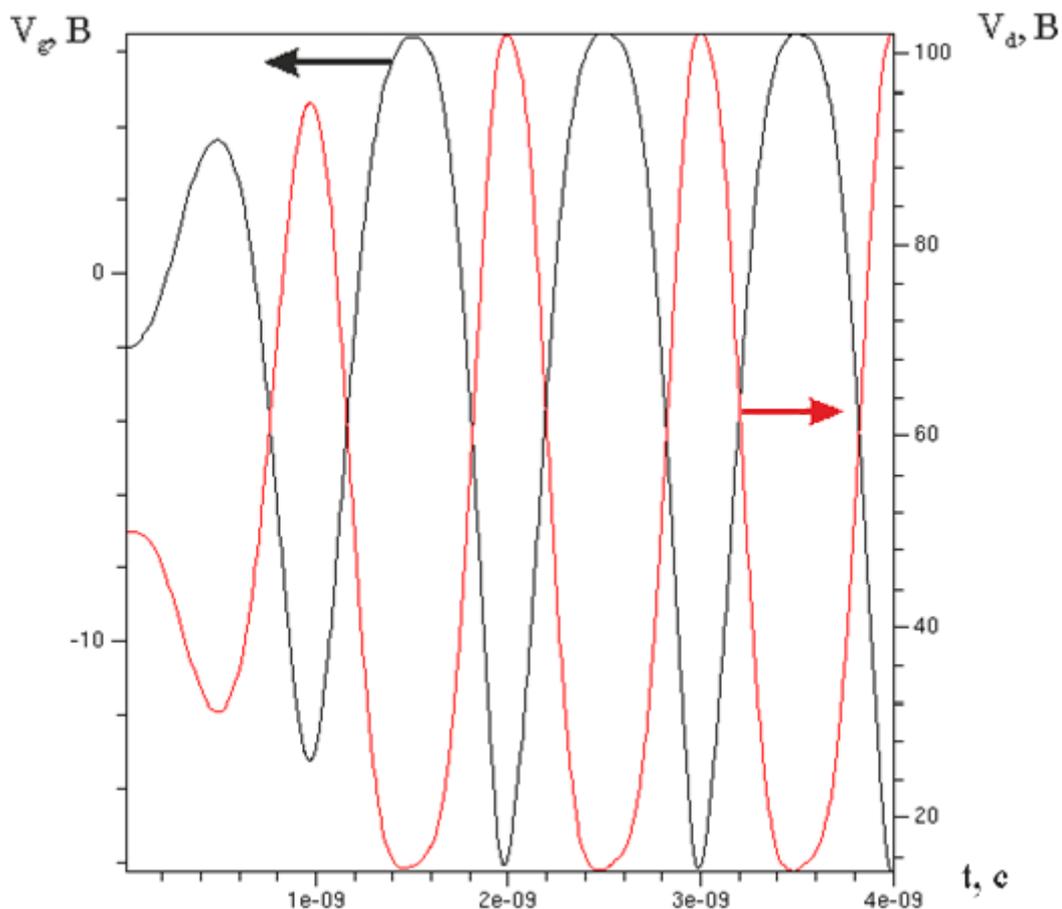


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса включения упрощенной транзисторной ячейки при амплитуде в классе А смещения на затворе -2 В.

#### Библиографический список

1. М.И. Черных, А.Н. Цоцорин, В.А. Кожевников, Моделирование влияния технологических параметров формирования канального слоя на электрические характеристики мощного СВЧ полевого карбид кремниевый транзистора Шоттки // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Физика, Математика .– Воронеж, 2015 .– №2 .– С. 53–60.
2. Моделирование влияния параметров буферного слоя на статические характеристики мощных СВЧ транзисторов с затвором Шоттки на основе карбида кремния / М. И. Черных, А. Н. Цоцорин, В. А. Кожевников // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып. 2-3 (236-237), стр. 70-80, 2015 г.
3. М.И. Черных. Выбор конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ MESFET-транзисторов на основе карбида кремния// Электроника НТБ. Вып. 1. Стр. 160-166. 2016 г.