МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра твердотельной электроники

НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СТРУКТУРЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ по дисциплине «Нанотехнологии» для студентов направления 28.03.02 «Наноинженерия» и по дисциплине «Наноэлектроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» всех форм обучения

Воронеж 2023

Составитель канд. техн. наук Е. Ю. Плотникова

Наноэлектронные приборы и структуры: методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплине «Нанотехнологии» для студентов направления 28.03.02 «Наноинженерия» и по дисциплине «Наноэлектроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е. Ю. Плотникова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. – 35 с.

В методических указаниях рассматриваются основные принципы работы в САПР технологического уровня применительно К дискретным микро-И наноэлектронным приборам и приборам на квантовых эффектах. Приводятся базовые методы построения моделей микроэлектронных устройств и технология сформированы работы построения ИХ геометрии. Для каждой задание. теоретическое описание отдельных элементов, а также приведены результаты моделирования, которые должны служить базой для построения моделей студентами.

Предназначены для студентов направлений 28.03.02 «Наноинженерия» и 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» всех профилей и форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ЛР_НЭПиС.pdf.

Ил. 23

УДК 621.38(07) ББК 32.85я73

Рецензент – Т. В. Свистова, канд. техн. наук, доцент кафедры твердотельной электроники ВГТУ

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Для выполнения каждой лабораторной работы студенту необходимо получить код-задание и рассчитать его на TCAD. Построить и отредактировать характеристики таким образом, чтобы получить результаты, аналогичные приведенным в задании каждой работы. Сохранить полученный результат на съемном носителе / в сети (на ПК информацию сохранять не рекомендуется, так как есть вероятность её потери).

2. Построчно и посимвольно разобрать команды, которые используются в коде и в комментариях. После кода разместить в отчёте построенные структуры и графики с пояснениями элементов, изображенных на них.

3. Определить, что за структура/прибор были смоделированы, найти описание подобных приборов/структур в статьях (типовые геометрические размеры, материалы, характеристики) из интернета. Внести информацию в отчёт работы. Статьи не должны быть связаны с проектами примеров, приведенных на сайте TCAD.

4. Изменить какой-то параметр в коде в большую и меньшую сторону (учитывая адекватность изменений реально существующим технологиям); или полностью перестроить структуру исследуемого прибора. Указать, какой параметр меняется. Привести структуры и графики прибора с измененными параметрами. Объяснить / обосновать результаты внесенных изменений.

5. Подготовить оформленную работу к отчету. Можно работать и оформлять отчеты в парах, защиты проводятся индивидуально.

Программа для работы в TCAD под OC **Windows** - на кафедре (файл объемом менее 500 Mб). Установка и присоединение ключ-файла должны выполняться строго по инструкции из прилагаемого pdf-файла. В используемой версии (рис. 1) отсутствуют блоки victory (process, device, stress), которые будут задействованы позднее в магистратуре.



Рис. 1. Путь к программе в коневом каталоге OC Windows

Основное рабочее окно, в котором будет создаваться проект, запускается в папке «SedaTools» щелчком на ярлыке «DeckBuild».

По щелчку открывается окно, состоящее из нескольких блоков:

– область для написания кода структуры,

- окно для выведения лог-файла во время расчёта,

– окно, в котором будут выведены данные по рассчитываемым переменным,

– окно, в котором выводится набор файлов рассчитанных структур и графиков,

– область мониторинга ресурсов системы.

Проверка работоспособности установленного ПО (рис. 2, 3):



– File – Examples: – открывается окно с набором встроенных готовых проектов, в котором выбирается проект из блока Product – Athena; описание проекта видно при щелчке на названии;

- выбираем «load»;

File Edit View Run Tools	Commands H	elp	iexus.in		
New Image: Symposized Constraints Image: Symposized Constratints Image: Symposized Constr	Ctrl+N Ctrl+O Ctrl+D	<u>ি</u> া	» • • • Variables history	Connect 🧈 🖌	Examples ? > X Search Clear Help no h
New Deckbuild New Deckbuild Open File Save Save Save Preferences	Ctrl+M Ctrl+P Ctrl+S Ctrl+Alt+S	ar .dat	Outputs		Name Comment PRODUCT Athena_CALIBRA Process Simulator Calibration ancaex01.in OED Tuning Using TWO.DIM for DRY02 ancaex02.in OED Calibration Using THETA.0 ancaex03.in Calibration of Thin WetO2 Oxidation
Examples Examples in Browser Recent Files Exit athena # set	,		Pitter:	Denduk Frite	ancaevolatin Tuning UCOS shapes Using the COMPRESS Model ancaevolatin Tuning Threshold Voltage using Seg.0 and Theta.0 ancaevolatin Tuning Directional and Isotropic Etch for Spacer Formation ancaevolatin Extraction of Implant Moments from Measured Data Athena_DIFFUSI Diffusion Process Simulation Tuning Threshold Voltage using Seg.0 and Theta.0 Requires: SSuprem 4
example=ancaex05			0 bytes 0 byte	is/s	Minimum Versions: Athena 5.22.3.R
Output Scroll to bottom	Clear		Memory IO read	IO write	Load Load Deck and Input Files Load Deck Only Close

Рис. 3. Путь запуска примеров расчёта моделей TCAD

– в основном окне кода будет загружен текст проекта; обратите внимание на цветовые обозначения элементов текста:

сиреневый (начинается со слова «go », используется всегда) – указание на решающий модуль (Athena, Atlas, DevEdit, Internal – кстати, на

диске С в папке «C:\sedatools\lib» расположены папки с мануалами pdf по этим модулям, названия совпадают),

розовый (начинается со слова «set », используется не во всех кодах) – задание переменной / переменных (в коде будут использованы ссылки со знаками \${ }),

чёрный основной текст кода,

синий – те самые ссылки на переменные,

зеленый (начинается с знака «#») – это комментарии, то, что написано в них, никак не будет учитываться программой при расчёте,

зелено-голубой – цифры,

чёрный полужирный (начинается со слова «extract », используется не во всех кодах) – формула для расчёта или экстракции какого-то параметра структуры;

– запуск кода на выполнение осуществляется щелчком на кнопке «play» (зеленый треугольник в верхнем левом углу);

 при выполнении кода просчитываемая строка подсвечена желтым, а сам расчёт выводится в нижней части экрана (рис. 4):

синий – текст кода команды,

черный – сам лог расчёта,

розовый – экстракция какого то значения командой «extract ».

DeckBuild - 5.0.10.R - C:/Users/Katy/Documents - mos1ex01.in -							
<u>File Edit View Run Tools Commands H</u> elp							
9 🕨 📕 🗮 💥 🎯 🜮 🖍 🕅 🖓 🔳 🖓 📲 🦉 🚰 🖉 🦉	h [😡 🔛 🚍 🙆 📃	👻 🤝 Connect				
Deck		Variables history	×				
<pre>############ Vt Test : Returns Vt, Beta and Theta ####################################</pre>	^	gateox nxj n++ sheet rho idd sheet rho chan surf conc	100.163077431803 (^ 0.174288367889877 (29.0935782049464 (2176.83542470721 (3.73448034516482e+16 (*				
contact name=gate n.poly interface qf=3e10		Outputs Filter: *.str, *.log	× ✓ Default Filter				
method newton solve init # Bias the drain		 ptcsetup.log diodeex01.log diodeex03.log diodeex12_5.log 					
<pre>solve vdrain=0.1 # Ramp the gate log outf=mos1ex01_1.log master</pre>		diodeex12_4.log	~ ×				
solve vgate=0 vstep=0.25 vfinal=3.0 name=gate	~	Tresource usage					
direct x x x rhs rhs rhs i j m -5.00* -5.00* -26.0* -17.3* -17.3*	^	93.5 MB					
1 N 0.413 -0.112 -0.002 -19.98 -0.360 -6.980 2 N 0.981 0.810 0.821 -27.5* -0.288 -5.847 3 N 1.982 -0.009 -0.005 -14.64 -0.308 -4.576 4 N 2.000 4.413 2.580 -13.44 -0.314 -3.704 5 N 2.000 6.836 6.606 -12.44 1.614 -0.296							
Output 🗹 Scroll to bottom Clear	~	Memory IO re	ead ID write				
Line: 0 Column: 1 Executing line 135 - atlas Size of generated files : 51.5 KB Free space : 3	38.4 (GB DeckBuild 5.0.10.R Co	opyright © 1984 - 2021 silvaco				

Рис. 4. Пример отображения окна при выполнении кода программы

Модули TonyPlot и TonyPlot3D отвечают за вывод рассчитанных характеристик и структур – в версии под Windows могут выдавать ошибку загрузки.

Методы запуска рассчитанных структур и графиков показаны на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Модули вывода на экран графических результатом моделирования в папке с

программой



Рис. 6. Вывод графических данных непосредственно из кода программы

Когда откроется окно графика (тип файла .log), его необходимо настроить для правильного отображения (рис. 7, 8). ПКМ на графике – Display – откроется окно настройки осей графика. По оси Х можно задать 1 переменную, по оси Y – несколько. Масштаб может быть линейным, логарифмическим, можно построить график в полярной системе координат. Масштабирование можно осуществлять мышью, тогда вверху слева появится область управления или через настройки графика.

Можно открывать несколько графиков на одном (File – Open, внизу выбираем OverLay) или в соседних областях окна (File – Open, внизу выбираем Add).



Рис. 7. Отображение графиков в программе



Рис. 8. Настройки отображения графиков

При работе со структурами (тип файла .str) нажимаем ПКМ и выбираем пункт Display, который позволяет настроить отображение сетки, контуров областей, материалов структуры, концентрации носителей заряда, границ p-n переходов, электродов (остальные настройки в рамках курса не понадобятся) — основные элементы управления приведены на рис. 9, 10.

При активном параметре распределения носителей заряда (по умолчанию – распределение концентрации носителей заряда без деления по типу) для настройки различных распределений необходимо выбрать в окне настройки выпадающий список Define – Contours; откроется окно, в котором основным элементом будет выпадающий список Quantity, в котором выбираются требуемые распределения.



Рис. 9. Первый шаг настройки отображения структур



Рис. 10. Второй шаг настройки отображения структур

ВАЖНО!

Каждый проект необходимо сохранять в отдельную папку (если в одном задании делается несколько расчётов, то или каждый расчёт или должен находиться в своей папке, или вариации параметра будут заданы блоком «set» в коде).

Чтобы код программы, написанный в OC Windows, без проблем сохранялся и отображал нечитаемые символы, используйте англоязычные пути к файлу решаемой задачи.

Файл «.in» можно открывать обычным Блокнотом или WordPadoм.

Файлы «.str» и «.log» открываются только в модуле TonyPlot (или TonyPlot 3D), поэтому для формирования отчёта по поставленной задаче требуется делать снимки экрана (printscreen) с отображенными графиками или структурами.

Если программа под ОС Win не устанавливается на конкретный ПК, можно использовать вариант TCAD для **виртуальной** машины, который «весит» порядка 29 Гб. Папку с программой можно сохранить на флеш-карту (64 Гб) или внешний жесткий диск. Система, под которую программа устанавливается, должна иметь размерность 64 бита. Оперативная память – не меньше 4 Гб, половина из которых отдается под загрузку виртуального образа с системой.

Оболочка VMWare (можно использовать WorkStation или Player) имеет размер порядка 50 Мб, рекомендуется использовать последнюю версию программы. <u>Пароль на вход в систему</u> на виртуальной машине: 12345. В системе открываем папку S.EDA Tools, запускаем ярлык DeckBuild (рис. 11).



Рис. 11. Внешний вид окна программы, запущенного под виртуальной машиной

Зеленый треугольник – запуск кода на выполнение.

Путь «File – Examples» открывает каталог с примерами кода для различных структур.

Путь «Home - \uparrow - \uparrow - opt – silvaco – lib – (папки)» дает выход на файлы с описанием модулей, содержащихся в TCAD. Нам нужны: Athena, Atlas, DeckBuild, TonyPlot, TonyPlot3D, VictoryProcess, VictoryDevice. Нужные файлы лежат в подпапках «docs» и содержат в названии «_users1».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАХ НАНОРАЗМЕРНОГО ДВУХЗАТВОРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ГРИНА

Модуль Atlas электрофизических симулятор характеристик -ЭТО разрабатываемых приборов. Моделирование алгоритмов работы устройств – это направлений технологического моделирования, одно ИЗ позволяющее не воссоздавать пошагово полный технологический процесс создания прибора, а, разработав структуру, построить её виртуальные характеристики.

Физические имитаторы устройств предсказывают электрические характеристики, связанные с заданными физическими структурами и условиями смещения. Это достигается путем аппроксимации работы устройства на двумерную или трехмерную сетку, состоящую из ряда точек сетки, называемых узлами. Применяя набор дифференциальных уравнений, выведенных из законов Максвелла, на этой сетке можно смоделировать перемещение носителей через структуру. То есть электрические характеристики устройства можно моделировать в постоянном, переменном или переходном режимах работы.

В начале моделирования создается прямоугольная сетка с достаточно маленьким шагом. Эта область будет служить подложкой, в качестве материала используется кремний. Длина устройства составляет 35 нм, толщина канала -1 нм, толщина подзатворного окисла - 1 нм, длина затвора -10 нм.

go atlas mesh diag.flip

x.m l=0.00 s=0.00025 x.m l=0.035 s=0.00025

y.m l= -0.0045 s=0.0001 y.m l= -0.0015 s=0.0001 y.m l= -0.0005 s=0.0001 y.m l= 0.0005 s=0.0001 y.m l= 0.0015 s=0.0001 y.m l= 0.0045 s=0.0001

Затем задаются и нумеруются области транзистора, им назначаются соответствующие материалы и определяется их форма. Необходимо помнить, что в структуре не должно быть областей, не заполненных каким-либо материалом. В случае, если осталось пустое место, эту область закрывают воздухом (air) или необходимым газом.

region num=2 silicon region num=1 x.min=0.01 x.max=0.025 y.min= 0.0015 y.max=0.0045 sio2 region num=1 x.min=0.01 x.max=0.025 y.min=-0.0045 y.max=-0.0015 sio2

Далее формируются области электродов стока, истока и затвора. В данном случае строится двухзатворный транзистор, поэтому созданы gate1 и gate2.

electrode num=1 name= source x.max=0 y.min= -0.0045 y.max=0.0045 electrode num=2 name= drain x.min=0.035 y.min= -0.0045 y.max=0.0045 electrode num=3 name=gate1 x.min=0.0125 x.max=0.0225 y.min=-0.0045 y.max=-0.0025

electrode num=4 name=gate2 x.min=0.0125 x.max=0.0225 y.min= 0.0025 y.max=0.0045

Из-за баллистической природы переноса заряда падение напряжения вблизи контактов истока и стока отсутствует. Так же необходимо, чтобы потенциал в истоке и стоке должен быть изменяющимся, потому что некоторое число электронов отражается, и, следовательно, общая концентрация носителей на контактах может изменяться. По этим причинам используется параметр «reflect» при определении контактов для применения граничных условий фон Неймана для потенциала. Уровни Ферми в контактах фиксированы.

```
contact name=source reflect
contact name=drain reflect
contact name=gate1 workfun=4.7
contact name=gate2 workfun=4.7 common=gate1
```

doping region=2 n.type uniform conc=1.0E20 x.max=0.0125 doping region=2 n.type uniform conc=1.0E20 x.min=0.0225 doping region=2 p.type uniform conc=1.0E15 x.min=0.0125 x.max=0.0225 Параметр Шредингера в операторе MODELS указывает модулю на то, что при расчете должно быть использовано квантовое уравнение. Параметр NEGF_MS указывает, что мы хотим производить вычисления с использованием неравновесной функции Грина (NEGF). Параметры OX.SCHRO и OX.MARGIN контролируют проникновение волновой функции в оксид. Параметр NUM.DIRECT установлен в значение 1, то есть учитывается только одна изотропная масса. Затем задается количество точек сетки для решения неравновесной функции Грина.

```
models schrodinger negf_ms SP.Smooth Ox.Schro Ox.Margin=0.0006
num.direct=1
```

```
method carriers=0
```

```
output band.par con.band val.band eigens=6 esizeout.negf=500
```

Далее задаются локальная плотность состояний, плотность носителей заряда по отношению к энергии и локальная плотность тока в зависимости от энергии.

На последнем этапе формируются команды решения начального равновесного уравнения, сохранения численных результатов в определенный файл и построения в структуре (рис. 12 – 14).

```
probe transmission filename="project1_TranvsE"
probe dosvse x=0.0
probe dosvse x=0.035
probe curdvse x=0.01
```

```
solve prev
save outf=project1_init.str negf.log
```

```
tonyplot project1_init.str -set project1_dens.set
tonyplot project1_TranvsE0.log -set project1_tran.set
```

```
log outf=project1_IVd_vg07.log
solve v3=0.7 v2=0.0 vstep=0.05 vfinal=1.0 name=drain
log off
save outf=project1 vd1 vg07.str negf.log
```

```
tonyplot project1_vd1_vg07.str -set project1_dens.set
tonyplot project1_IVd_vg07.log -set project1_IVd.set
tonyplot project1_TranvsE1.log -set project1_tran.set
```

solve init

```
log outf=project1_IVg_vd06.log
solve v2=0.6 v3=0.0 vstep=0.05 vfinal=1.0 name=gate1
log off
save outf=project1_vd06_vg1.str negf.log
```

tonyplot project1_vd06_vg1.str -set project1_dens.set tonyplot project1_IVg_vd06.log -set project1_IVg.set tonyplot project1_TranvsE2.log -set project1_tran.set

exit



РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рис. 12. Исходная структура



Рис. 13. Приложено смещение, файлы с именем (vd1_vg07), (IVd_vg07) и (TranvsE1)



Рис. 14. Приложено смещение, файлы с именем (vd06_vg07), (IVg_vg06) и (TranvsE2)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА N-ТИПА НА GAAS

Данная лабораторная работа посвящена моделированию резонансного туннельного диода GaAs n-типа с 2 нм двойным барьером, разделенным 2 нм колодцем. Моделирование основывается на самосогласованном решении уравнений Пуассона и неравновесной функции Грина.

go atlas mesh diag.flip

Первым этапом формирования структуры происходит задание сетки. В нашем случае для повышения точности моделирования используется неоднородная сетка.

x.mesh loc=0.00 spac=0.01 x.mesh loc=0.01 spac=0.01

y.mesh loc=-0.072 spac=0.0005 y.mesh loc=-0.01 spac=0.0002 y.mesh loc=0.011 spac=0.0001 y.mesh loc=0.013 spac=0.0001 y.mesh loc=0.015 spac=0.0001 y.mesh loc=0.017 spac=0.0001 y.mesh loc=0.04 spac=0.0002 y.mesh loc=0.1 spac=0.0005 Затем задаются области модели, описываются материалы для различных регионов. Области истока и стока должны быть указаны с параметром EQUIL.NEGF, который обеспечивает квазиравновесное состояние. Здесь же задаются имена электродов (эмиттер и коллектор), типы проводимости и концентрации носителей заряда созданных областей.

```
region num=1 material=GaAs y.max=0.011 equil.negf
region num=2 material=AlGaAs x.comp=0.5 y.min=0.011 y.max=0.013
region num=3 material=GaAs y.min=0.013 y.max=0.015
region num=4 material=AlGaAs x.comp=0.5 y.min=0.015 y.max=0.017
region num=5 material=GaAs y.min=0.017 equil.negf
```

elec num=1 name=emitter top elec num=2 name=collector bottom

```
material material=AlGaAs align=0.4
```

doping reg=1 y.max=-0.01 uniform n.type conc=1e18 doping reg=5 y.min= 0.04 uniform n.type conc=1e18

Для запуска модели требуется использовать параметры N.NEGF PL1D или P.NEGF PL1D MODELS. В операторе В результате создается решение одноразмерной модели в одном отдельном массиве, которое копируется для остальных областей. Если массивы не равны, следует использовать параметры N.NEGF PL и/или P.NEGF PL для решения одноразмерной модели для каждого массива. Размер энергетической сетки задается с помощью ESIZE.NEGF. Чтобы задать рассеяние в квазиравновесных областях, следует использовать параметр ЕТА.NEGF. Для выбора состояний, локализованных в определенной области следует использовать параметры EIG.YMIN и EIG.YMAX у MODELS.

models n.negf_pl1d eta.negf=0.0066 esize.negf=2001 eig.ymin=-0.01 eig.ymax=0.015 method carr=0

probe transmission x=0 filename="project2_TranvsE_" probe dosvse x=0 y=-0.03 probe dosvse x=0 y=0.01 probe dosvse x=0 y=0.014 probe dosvse x=0 y=0.018 probe dosvse x=0 y=0.06 probe curdvse x=0 y=0.06

Задав координаты точек измерения параметров, создаем условия для расчета зависимостей структуры, в частности устанавливаем полную энергию и энергию в области эмиттера.

probe name="Well charge " integrate charge y.min=0.012 y.max=0.016 probe name="Emitter charge " integrate charge y.min=-0.072 y.max=0.012 probe name="Well state energy (eV)" nbnd.ener state=1 y=0.014 x=0 probe name="Emitter state energy (eV)" nbnd.ener state=2 y=0.01 x=0

Блок расчета завершается вольт-амперными характеристиками, которые сохраняются в файл для дальнейшего построения графиков. Для того, чтобы найти решение для внутренней энергии и волновых функций, следует использовать параметр NEGF.EIG для строк SOLVE и SAVE.

```
output con.band val.band eigen=5
log outf=project2_IV.log
```

```
solve init
save outf=project2_init.str negf.log negf.eig
```

```
solve v2=0 name=collector vstep=0.02 vfinal=0.1 negf.eig
save outf=project2_v01.str negf.log negf.eig
```

```
solve name=collector vstep=0.02 vfinal=0.2 negf.eig
save outf=project2_v02.str negf.log negf.eig
```

```
solve name=collector vstep=0.02 vfinal=0.3 negf.eig
save outf=project2_v03.str negf.log negf.eig
```

```
solve name=collector vstep=0.02 vfinal=0.4 negf.eig
save outf=project2_v04.str negf.log negf.eig
```

```
solve name=collector vstep=0.02 vfinal=0.48 negf.eig
save outf=project2_v048.str negf.log negf.eig
```

```
solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.5 negf.eig
save outf=project2_v05.str negf.log negf.eig
```

solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.6 negf.eig
save outf=project2_v06.str negf.log negf.eig

```
solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.68 negf.eig
save outf=project2_v068.str negf.log negf.eig
```

solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.7 negf.eig
save outf=project2_v07.str negf.log negf.eig

```
solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.8 negf.eig
save outf=project2_v08.str negf.log negf.eig
```

solve name=collector vstep=0.005 vfinal=0.9 negf.eig
save outf=project2_v09.str negf.log negf.eig

solve name=collector vstep=0.02 vfinal=1 negf.eig
save outf=project2_v1.str negf.log negf.eig

solve name=collector vstep=0.02 vfinal=2 negf.eig
save outf=project2_v2.str negf.log negf.eig

solve name=collector vstep=0.02 vfinal=3 negf.eig
save outf=project2_v3.str negf.log negf.eig

solve name=collector vstep=0.02 vfinal=4 negf.eig save outf=project2_v4.str negf.log negf.eig log off

Команда TonyPlot (рис. 15, 16) используется для вывода визуализированных структур и графиков: распределение концентрации электронов в структуре, распределение энергий зоны проводимости, зависимость тока стока от напряжения стока, зависимости полной энергии и энергии истока от напряжения стока и графики зависимостей трансмиссии электронов и плотности электронного тока от энергии.

tonyplot project2_v06.str -set project2_fig1.set tonyplot project2_v06.str -set project2_fig2.set tonyplot project2_IV.log -set project2_fig3.set tonyplot project2_IV.log -set project2_fig4.set tonyplot project2_TranvsE_6.log -set project2_fig5.set quit







Рис. 16. Графики функций

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

Моделирование туннельного диода в модуле Atlas

В данной работе рассматривается методика применения параметров BBT.NONLOCAL и QTREGION для изучения прямого и обратного туннельного тока в кремниевом диоде при комнатной температуре (300 K) и снижения концентрации легирования таким образом, чтобы исключить перегиб напряжения (отрицательное дифференциальное сопротивление) при прямом смещении. Рассмотрим моделирование межзонного туннельного диода. Команда LOOP используется для создания трех одинаковых туннельных диодов с единственным отличием - концентрацией легирующей примеси на каждой стороне перехода.

Далее идет задание неоднородной тонкой сетки будущего прибора. Создаются и нумеруются области диода, задается материал и присваиваются имена электродов (катод и анод).

Затем создаются квантовые области, на которые накладывается p-n переход. Они нужны для того, чтобы в модели происходило туннелирование. Квантовая область туннелирования определяется блоком QTREGION, который создает четырехугольные области, соединяемые между собой для сформирования неплоского туннельного перехода. В коде задаются параметры легирования областей и параметры модели симуляции. Модель BBT.NONLOCAL определяется в операторе MODELS и обеспечивает нелокальное туннелирование.

Далее задаются команды к решению и сохранению численных результатов в определенный файл. Знак \$ будет заменен на текущее значение легирования, заданное второй строкой кода.

В конце кода модели используется команда TonyPlot, она выводит визуализированную структуру диода и его ВАХ (Рис. 17, 18).

LOOP steps=3 assign name=doping n.value=(2.5, 2.25, 2.15) go atlas

mesh

x.mesh location=0.00 spacing=0.050 x.mesh location=0.15 spacing=0.020 x.mesh location=0.25 spacing=0.001 x.mesh location=0.35 spacing=0.020 x.mesh location=0.50 spacing=0.050

```
y.mesh location=0 spacing=0.005
y.mesh location=0.06 spacing=0.002
y.mesh location=0.08 spacing=0.005
y.mesh location=0.1 spacing=0.01
y.mesh location=0.2 spacing=0.05
y.mesh location=.5 spacing=0.1
```

```
region num=1 material=Si
```

elec name=anode top x.min=0 x.max=0.2 elec name=cathode top x.min=0.3

```
qtregion number=1 PTS.TUNNEL=51 PTS.NORMAL=5 X1=0.000 Y1=0.025
X2=0.215 Y2=0.025 X3=0.250 Y3=0.075 X4=0.000 Y4=0.075
qtregion number=1 pts.normal=5 x2=0.225 y2=0.015 x3=0.275 y3=0.050
qtregion number=1 pts.normal=5 x2=0.225 y2=0.000 x3=0.275 y3=0.000
```

```
doping uniform n.type conc=${doping}e19
doping gaussian p.type conc=2*${doping}e19 x.min=0.0 x.max=0.249 y.min=0.0
y.max=0.05 x.char=.01 y.char=.01
```

models temperature=300 srh fermi ni.fermi bbt.nonlocal bgn print output band.temp traps u.srh j.electron j.hole j.total

solve init
save outf=project31_\$'doping'_0V.str

log outf=project31_\$'doping'.log solve name=anode vanode= .10 vstep=-0.0050 vfinal= 0.02 solve name=anode vanode= .02 vstep=-0.0005 vfinal=-0.02 solve name=anode vanode=-.02 vstep=-0.0050 vfinal=-0.10 log off

save outf=project31_\$'doping'_-100mV.str

L.END

```
tonyplot project31_$'doping'_-100mV.str -set project31_2Ddop.set
tonyplot project31_2.5.log project31_2.25.log project31_2.15.log -set
project31_3iv.set
quit
```







Рис. 18. График зависимости тока анода от напряжения

Моделирование туннельного транзистора в модуле Atlas

Данный блок демонстрирует возможности моделирования кремниевого нанопроволочного спин-вентильного туннельного полевого транзистора (NW-GAA-TFET) с использованием нелокальной модели межзонного туннелирования. Здесь

используются модели BBT.NONLOCAL, QTX.MESH и QTY.MESH, которые позволяют получить передаточную BAX кремниевого нанопроволочного спинвентильного туннельного полевого транзистора при комнатной температуре (300 K) при двух установленных напряжениях сток-исток, 1,2 B и 0,05 B, соответственно.

В начале задаются длина канала (Lg), радиус (R), толщина оксида (tOX), степень легирования стока (p), истока (n), канала (channel), диэлектрическая проницаемость изоляционной области под затвором (insul_perm), длина стока и истока (Lds). Затем задается сетка. Определяются области транзистора: исток в левой части структуры, далее - канал, сток - справа, еще определены оксид под затвором, воздушные области возле истока в левой и стока в правой частях транзистора. В структуре задаются названия электродов, материалы для них и определяются степени легирования областей.

Чтобы в симуляции происходило туннелирование, p-i переход накладывается на квантовую сетку, которая определяется параметрами QTX.MESH и QTY.MESH, которые формируют простую сетку для плоских туннельных переходов.

Модель BBT.NONLOCAL задается в операторе MODELS для использования нелокальной модели туннелирования. Далее задаются команды для решения и сохранения численных результатов в заданный файл. Команда LOOP используется для создания двух одинаковых туннельных транзисторов с некоторыми модификациями структуры.

Команда TonyPlot используется (рис. 19 – 21) для вывода визуализированных структур и графиков: визуализация структуры нанопроволочного спин-вентильного туннельного транзистора, распределение концентрации электронов в структуре, зависимости тока стока от напряжения затвор-исток при различных напряжениях сток-исток.

go atlas

```
set Lg=.200
set R=.035
set tOX=.0045
set doping_p=1e19
set doping_n=1e19
set doping_channel=1e17
set gate_wf=4
set insul_perm=25
set Lds=.080
```

mesh cylindrical

```
x.mesh loc=0.0 spacing=.01
x.mesh loc=$r-.005 spacing=.001
x.mesh loc=$r spacing=.0005
x.mesh loc=$r+.005 spacing=.01
x.mesh loc=$r+$tox+.0015 spacing=.01
```

```
y.mesh loc=0 spacing=.02
y.mesh loc=0.01 spacing=.02
y.mesh loc=$lds-.005 spacing=.001
y.mesh loc=$lds spacing=.0001
y.mesh loc=($lg+$lds)/2 spacing=.02
y.mesh loc=$lg+$lds spacing=.01
y.mesh loc=$lg+$lds+.005 spacing=.01
y.mesh loc=$lg+$lds+.01 spacing=.02
y.mesh loc=$lg+$lds+$lds-.01 spacing=.02
```

region num=1 name=source material=silicon y.min=0.01 y.max=\$lds x.min=0 x.max=\$r

```
region num=3 name=channel material=silicon y.min=$lds y.max=$lg+$lds x.max=$r
```

region num=4 name=drain material=silicon y.min=\$lg+\$lds y.max=\$lg+\$lds+\$lds-.01 x.max=\$r

```
region num=5 material=sio2 y.min=$lds y.max=$lg+$lds x.min=$r
region num=6 material=air y.min=0 y.max=$lds x.min=$r
region num=7 material=air y.min=$lg+$lds y.max=$lg+$lds+$lds x.min=$r
```

```
electrode name=source material=aluminum y.min=0 y.max=.01 x.min=0 x.max=$r
electrode name=drain material=aluminum y.min=$lg+$lds+$lds-.01
```

```
y.max=$lg+$lds+$lds x.min=0 x.max=$r
```

```
electrode name=gate material=aluminum y.min=$lds y.max=$lg+$lds x.min=$r+$tox x.max=$r+$tox+.0015
```

doping gaussian material=si p.type concentration=\$doping_channel y.min=\$lds y.max=\$lds+\$lg x.max=\$r y.char=0.01 x.char=0

```
doping gaussian material=si p.type concentration=$doping_p y.min=0.01
y.max=$lds x.max=$r y.char=0.025 x.char=0
```

```
doping gaussian material=si n.type concentration=$doping_n y.min=$lds+$lg
y.max=$lg+$lds+$lds-.01 x.max=$r y.char=0.025 x.char=0
```

qtx.mesh loc=0 spac=0.0050

```
qtx.mesh loc=$r-.005 spac=0.0005
qtx.mesh loc=$r spac=0.0001
```

```
qty.mesh loc=$lds-.050+.01 spac=0.00025
qty.mesh loc=$lds+.01 spac=0.00010
qty.mesh loc=$lds+.050+.01 spac=0.00025
```

```
material material=si me.tunnel=.22 mh.tunnel=.12
material material=sio2 permittivity=$insul_perm
contact name=gate workfunc=$gate_wf
```

models qtunn.dir=ydir bbt.nonlocal temperature=300 fermi ni.fermi srh auger cvt fldmob conmob bgn print

method itlimit=5 output band.temp band.param traps u.srh j.electron j.hole j.total qfn qfp

loop steps=2 assign name=vn n.value=(1.2, .05)

```
solve init
solve name=drain vdrain=0 vstep=0.025 vfinal=$vn
save outf=project32_vg0_vd$'vn'.str
```

log outf=project32_idvg_vd\$'vn'.log solve name=gate vgate=-0.0 vstep=-.05 vfinal=-.5 solve name=gate vgate=-0.5 vstep=0.05 vfinal=1.5

```
save outf=project32_vg1.5_vd$'vn'.str
log off
l.end
```

```
tonyplot project32_vg1.5_vd1.2.str
tonyplot -overlay project32_idvg_vd0.05.log project32_idvg_vd1.2.log -set
project32.set
quit
```



Рис. 19. Структура NW-GAA-TFET



Рис. 20. Распределение концентрации электронов в структуре



Рис. 21. Зависимости тока стока от напряжения затвор-исток при различных напряжениях сток-исток

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО FINFET В 3D С ВQР

Данная лабораторная работа является примером моделирования устройства FinFET с использованием BQP и энергетического баланса в 3D. Квантование внутри канала почти двумерно, и поскольку у нас нет главного направления квантования, мы не можем быть уверены, что модель откалибрована, пока не проведем калибровку по двумерной модели Шредингера-Пуассона.

Применяется смещение стока, а затем напряжение затвора увеличивается, чтобы включить устройство. Ток стока строится в TonyPlot, а структура устройства – в TonyPlot3D.

Задаются и нумеруются области транзистора, им присваиваются соответствующие материалы и определяется их форма. Важной особенностью построения структуры в модуле Atlas является то, что в структуре не должно быть областей, не заполненных каким-либо материалом.

Задаются типы проводимости и степени легирования областей, также их материалы.

Далее задаются команды к решению, сохранению численных результатов в определенный файл и построению структуры транзистора в TonyPlot 3D (рис. 2), распределению концентрации электронов в структуре (рис. 3) и графика зависимости тока стока от напряжения затвор-исток (рис. 4) командой tonyplot.

go devedit simflags="-3d" DevEdit version=2.6.0.R

work.area x1=-0.01 y1=-0.01 x2=0.02 y2=0.045 region reg=1 mat=Silicon color=0xffcc00 pattern=0x4 z1=0.01 z2=0.09 polygon="0,0 0.01,0 0.01,0.015 0,0.015" constr.mesh region=1 default max.height=0.01 max.width=0.02

region reg=2 mat="Silicon Oxide" color=0xff pattern=0x2 z1=0.01 z2=0.09 polygon="0.013,0.015 0.01,0.015 0.01,0 0,0 0,0.015 -0.003,0.015 -0.003,-0.003 0.013,-0.003"

```
constr.mesh region=2 default max.height=0.001 max.width=0.001
```

```
region reg=3 name=gate mat=PolySilicon elec.id=1 work.func=0 color=0xffff00
pattern=0x5 z1=0.035 z2=0.065 polygon="0.013,-0.003 -0.003,-0.003 -0.003,0.015 -
0.01,0.015 -0.01,-0.01 0.02,-0.01 0.02,0.015 0.013,0.015"
constr.mesh region=3 default max.height=0.01 max.width=0.02
```

```
region reg=4 mat="Silicon Oxide" color=0xff pattern=0x2 z1=0 z2=0.1 polygon="-
0.01,0.015 -0.003,0.015 0,0.015 0.01,0.015 0.013,0.015 0.02,0.015 0.02,0.045 -
0.01,0.045"
```

constr.mesh region=4 default max.height=0.01 max.width=0.02

```
region reg=5 name=drain mat=Aluminum elec.id=2 work.func=0 color=0xffc8c8
pattern=0x7 z1=0 z2=0.01 polygon="0,0 0.01,0 0.01,0.015 0,0.015"
constr.mesh region=5 default max.height=0.01 max.width=0.02
```

region reg=6 name=source mat=Aluminum elec.id=3 work.func=0 color=0xffc8c8 pattern=0x7 z1=0.09 z2=0.1 polygon="0,0 0.01,0 0.01,0.015 0,0.015" constr.mesh region=6 default max.height=0.01 max.width=0.02

base.mesh height=0.01 width=0.005

```
bound.cond !apply max.slope=28 max.ratio=300 rnd.unit=0.0001
line.straightening=1 align.points when=automatic
imp.refine min.spacing=0.02 z=0
```

constr.mesh max.angle=90 max.ratio=300 max.height=10000 max.width=10000 min.height=0.0001 min.width=0.0001

constr.mesh type=Semiconductor default

```
constr.mesh type=Insulator default
constr.mesh type=Metal default
constr.mesh type=Other default
constr.mesh region=1 default max.height=0.01 max.width=0.02
constr.mesh region=2 default max.height=0.001 max.width=0.001
constr.mesh region=3 default max.height=0.01 max.width=0.02
constr.mesh region=4 default max.height=0.01 max.width=0.02
constr.mesh region=5 default max.height=0.01 max.width=0.02
constr.mesh region=6 default max.height=0.01 max.width=0.02
```

```
constr.mesh id=1 x1=0 y1=0 x2=0.01 y2=0.015 default max.height=0.002 max.width=0.002
```

constr.mesh id=2 x1=0 y1=0 x2=0.001 y2=0.015 default max.height=0.0005 max.width=0.0005

constr.mesh id=3 x1=0.009 y1=0 x2=0.01 y2=0.015 default max.height=0.0005 max.width=0.0005

constr.mesh id=4 x1=0.001 y1=0 x2=0.009 y2=0.001 default max.height=0.0005 max.width=0.0005

constr.mesh id=5 x1=0 y1=0.0145 x2=0.01 y2=0.016 default max.height=0.0008 max.width=0.0008

Mesh Mode=MeshBuild

```
z.plane z=0
                  spacing=0.1
z.plane z=0.005
                  spacing=0.1
z.plane z=0.01
                  spacing=0.1
                 spacing=0.1
z.plane z=0.012
z.plane z=0.0167 spacing=0.1
z.plane z=0.0233 spacing=0.1
z.plane z=0.0267 spacing=0.1
z.plane z=0.030
                  spacing=0.1
z.plane z=0.0315 spacing=0.1
z.plane z=0.033
                  spacing=0.1
z.plane z=0.035
                  spacing=0.1
                 spacing=0.1
z.plane z=0.041
z.plane z=0.047
                  spacing=0.1
z.plane z=0.053
                  spacing=0.1
z.plane z=0.059
                 spacing=0.1
z.plane z=0.065
                  spacing=0.1
z.plane z=0.067
                 spacing=0.1
```

```
z.plane z=0.0685 spacing=0.1
     z.plane z=0.070
                       spacing=0.1
     z.plane z=0.0733 spacing=0.1
     z.plane z=0.0767 spacing=0.1
     z.plane z=0.0833 spacing=0.1
                       spacing=0.1
     z.plane z=0.088
     z.plane z=0.090
                       spacing=0.1
                       spacing=0.1
     z.plane z=0.095
                       spacing=0.1
     z.plane z=0.100
     z.plane max.spacing=1000000 max.ratio=1.5
     structure outf=project4_0.str
     go atlas
     set gamma=1.4
     set alpha=0.3
     electrode name=bulk bottom
     doping num=1 p.type uniform conc=1e18
     doping num=1 gaussian n.type conc=1e21 y.min=0.0 y.max=0.015 z.min=0.010
z.max=0.0233 zlat.char=0.004 char=0.001
     doping num=1 gaussian n.type conc=1e21 y.min=0.0 y.max=0.015 z.min=0.0767
z.max=0.091 zlat.char=0.004 char=0.001
     material material=Silicon eg300=1.1245 affinity=4.05 permitti=11.9 ml=0.7
mt1=0.7 mt2=0.7 nc300=2.8e19
```

```
material material=Oxide eg300=8.05 affinity=1.00 permittivity=3.9 ml=0.30 mt1=0.30 mt2=0.30 nc300=2.8e19 nv300=1.04e19
```

```
material material=Poly eg300=1.1245 affinity=4.05 permitti=11.9
```

```
contact name=gate work=4.85
```

model fermi bqp.n srh ni.fermi hcte.el bqp.ngamma=\$gamma bqp.nalpha=\$alpha evsatmod=0 fldmob print

```
method maxtrap=6 autonr nblockit=45 bicgst dvlimit=1.0
```

```
solve init
solve vgate=0.4 nocurrent
solve vdrain=0.001 name=drain vstep=0.0005 vfinal=0.01
```

```
log outf=project4.log
solve vgate=0.4 name=gate vstep=0.05 vfinal=1.0
log off
```

output p.quantum band.temp con.band val.band band.par save outf=project4_1.str master

tonyplot project4.log -set project4.set tonyplot3d project4_1.str -set project4_0.set tonyplot3d project4_1.str -set project4_1.set

quit



Рис. 22. Исходная структура



Рис. 23. График функции

ОГЛАВЛЕНИЕ

Задание для выполнения лабораторных работ									
Лабораторная	работа	N⁰	1.	Моделирование	BAX	наноразмерного			
двухзатворного транзистора с помощью функции Грина									
Лабораторная работа № 2. Моделирование резонансного туннельного диода									
п-типа на GaAs									
Лабораторная работа № 3. Моделирование туннельных диодов и транзисторов									
Лабораторная работа № 4. Моделирование кремниевого FINFET в 3D с BQP									

НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СТРУКТУРЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ по дисциплине «Нанотехнологии» для студентов направления 28.03.02 «Наноинженерия» и по дисциплине «Наноэлектроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» всех форм обучения

> Составитель Плотникова Екатерина Юрьевна

> > В авторской редакции

Подписано к изданию 28.11.2023. Уч.-изд. л. 1,8.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84