

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 практических работ по дисциплине «Нанoeлектроника»
для студентов направления 28.03.02 «Наноинженерия»
и лабораторных работ по дисциплине «Нанoeлектроника»
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
всех форм обучения

Воронеж 2023

УДК 621.38(07)

ББК 32.85я73

Составитель

канд. техн. наук Е. Ю. Плотникова

Нанoeлектронные приборы и структуры: методические указания к проведению практических работ по дисциплине «Нанoeлектроника» для студентов направления 28.03.02 «Наноеинженерия» и лабораторных работ по дисциплине «Нанoeлектроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е. Ю. Плотникова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. – 23 с.

В методических указаниях рассматриваются основные принципы работы в САПР технологического уровня применительно к дискретным микро- и нанoeлектронным приборам и приборам на квантовых эффектах. Приводятся базовые методы построения моделей микроэлектронных устройств и технология построения их геометрии. Для каждой работы сформированы 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 «Наноеинженерия» и 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» всех профилей и форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ЛР и ПР_НЭПиС.pdf.

Ил. 10

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 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.

РАБОТА № 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ КНИ СТРУКТУРЫ

Тонкопленочные полностью обедненные МОП-транзисторы со структурой КНИ достигают низких пороговых напряжений и почти идеальных обратных подпороговых наклонов. Это делает их идеальными для работы с малым энергопотреблением. Код задачи показывает, что Atlas способен моделировать как транзистор с частично обедненным каналом, так и структуру с полностью истощенным каналом.

Сетка моделирования в этом коде была доработана так, чтобы рассчитывать более тонкую структуру КНИ.

Задача 1. PDSOI

```
go atlas  
TITLE SOI device simulation
```

на SiO₂ толщиной 0,4 мкм наносится Si толщиной 0,2 мкм

mesh space.mult=1.0

x.mesh loc=0.00 spac=0.50

x.mesh loc=1.15 spac=0.02

x.mesh loc=1.5 spac=0.1

x.mesh loc=1.85 spac=0.02

x.mesh loc=3 spac=0.5

y.mesh loc=-0.017 spac=0.02

y.mesh loc=0.00 spac=0.005

y.mesh loc=0.1 spac=0.02

y.mesh loc=0.2 spac=0.01

y.mesh loc=0.6 spac=0.25

region num=1 y.max=0 oxide

region num=2 y.min=0 y.max=0.2 silicon

region num=3 y.min=0.2 oxide

блок определения электродов (сток, исток, затвор, подложка)

#1-GATE

#2-SOURCE

#3-DRAIN

#4-SUBSTRATE (под оксидом)

electrode name=gate x.min=1 x.max=2 y.min=-0.017 y.max=-0.017

electrode name=source x.max=0.5 y.min=0 y.max=0

electrode name=drain x.min=2.5 y.min=0 y.max=0

electrode substrate

распределение концентрации легирующей примеси в областях

doping uniform conc=2e17 p.type reg=2

doping gauss n.type conc=1e20 char=0.2 lat.char=0.05 reg=2 x.r=1.0

doping gauss n.type conc=1e20 char=0.2 lat.char=0.05 reg=2 x.l=2.0

save outf=project51_0.str

tonyplot project51_0.str -set project51_0.set

задание зарядовых областей на обеих границах окисла

```

interf qf=3e10 y.max=0.1
interf qf=1e11 y.min=0.1

# работа выхода затвора
contact name=gate n.poly

# используемые модели
models conmob srh auger bgn fldmob print

solve init

# расчёт передаточных ВАХ

method newton trap
solve prev
solve vgate=-0.2
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.1

# смещение напряжения затвор-исток
log outf=project51_1.log master
solve vgate=0.1 vstep=0.1 name=gate vfinal=1.5

# выводение результатов моделирования передаточных ВАХ в стандартный
редактор
tonyplot project51_1.log -set project51_1.set

# отображения подпорогового наклона кривых
tonyplot project51_1.log -set project51_2.set

extract name="subvt" 1.0/slope(maxslope(curve(v."gate",log10(abs(i."drain")))))
extract name="vt" (xintercept(maxslope(curve(v."gate",abs(i."drain"))))) -
abs(ave(v."drain"))/2.0)
quit

```

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования рассматриваемой структуры с требуемыми настройками отображения прибора и его характеристик.

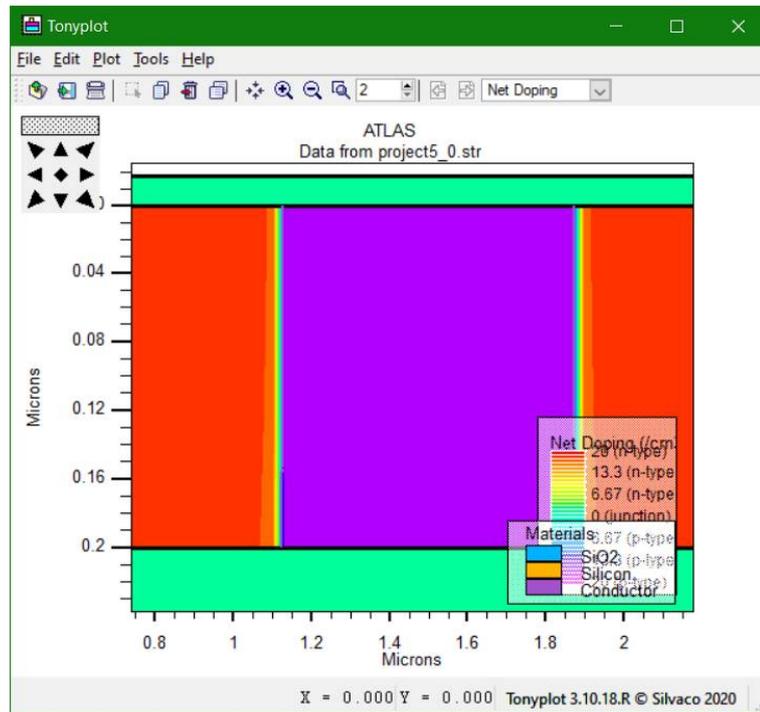
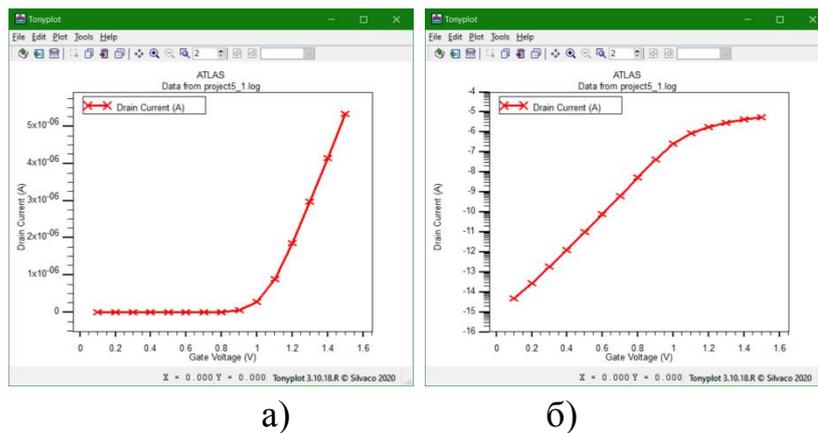


Рис. 1. Моделирование исходной структуры транзистора



а)

б)

Рис. 2. Передаточные характеристики транзистора (а) с разными настройками масштаба для отображения подпорогового наклона (б)

Задача 2. FDSOI

go atlas

TITLE SOI device simulation

на подслое из SiO₂ толщиной 0,4 мкм нанесен слой Si толщиной 0,1 мкм

mesh space.mult=1.0

x.mesh loc=0.00 spac=0.50

x.mesh loc=1.15 spac=0.02

x.mesh loc=1.5 spac=0.1
x.mesh loc=1.85 spac=0.02
x.mesh loc=3 spac=0.5

y.mesh loc=-0.017 spac=0.02
y.mesh loc=0.00 spac=0.005
y.mesh loc=0.05 spac=0.02
y.mesh loc=0.1 spac=0.01
y.mesh loc=0.5 spac=0.25

region num=1 y.max=0 oxide
region num=2 y.min=0 y.max=0.1 silicon
region num=3 y.min=0.1 oxide

electrode name=gate x.min=1 x.max=2 y.min=-0.017 y.max=-0.017
electrode name=source x.max=0.5 y.min=0 y.max=0
electrode name=drain x.min=2.5 y.min=0 y.max=0
electrode substrate

doping uniform conc=1e17 p.type reg=2
doping gauss n.type conc=1e20 char=0.2 lat.char=0.05 reg=2 x.r=1.0
doping gauss n.type conc=1e20 char=0.2 lat.char=0.05 reg=2 x.l=2.0
save outf=project52_0.str
tonyplot project52_0.str -set project52_0.set
interf qf=3e10 y.max=0.05
interf qf=1e11 y.min=0.05

contact name=gate n.poly
models conmob srh auger bgn fldmob print

solve init

method newton trap
solve prev
solve vgate=-0.2
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.1

log outf=project52_1.log master
solve vgate=0.1 vstep=0.1 name=gate vfinal=1.5

```
tonyplot project52_1.log -set project52_1.set
```

```
tonyplot project52_1.log -set project52_2.set
```

```
extract name="subvt" 1.0/slope(maxslope(curve(v."gate",log10(abs(i."drain")))))
```

```
extract name="vt" (xintercept(maxslope(curve(v."gate",abs(i."drain"))))) -  
abs(ave(v."drain"))/2.0)
```

```
quit
```

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования рассматриваемой структуры с требуемыми настройками отображения прибора и его характеристик.

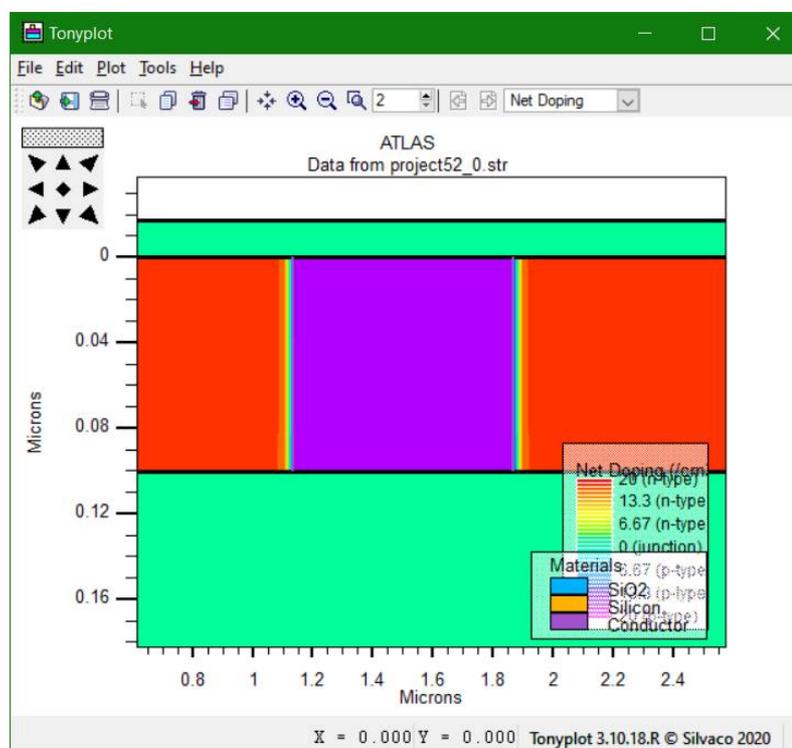


Рис. 3. Моделирование исходной структуры транзистора

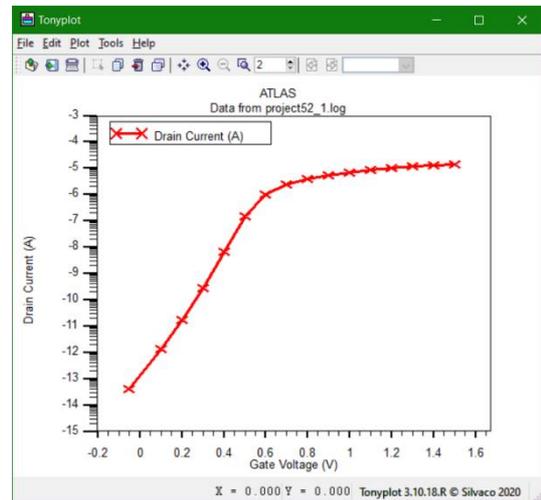
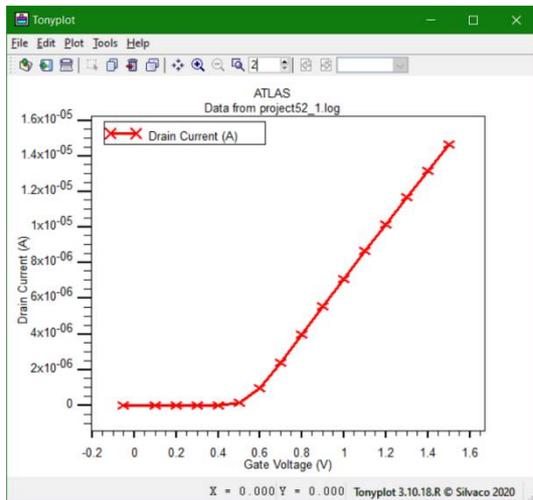


Рис. 4. Передаточные характеристики транзистора (а) с разными настройками масштаба для отображения подпорогового наклона (б)

РАБОТА № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ КНИ СТРУКТУРЫ

В этом коде демонстрируется моделирование 3D КНИ структуры в модуле Atlas. Конкретно это моделирование не может быть выполнено с помощью 2D-симулятора, поскольку корпусной электрод расположен вне плоскости стока, затвора и истока.

```
go atlas
```

```
TITLE 3D simulation of a Body Contacted SOI MOSFET
```

```
# на пленку SiO2 толщиной 0,4 мкм наносится слой кремния толщиной 0,05  
МКМ
```

```
mesh three.d space.mult=1.0
```

```
x.mesh loc=0.00 spac=0.5
```

```
x.mesh loc=2.0 spac=0.5
```

```
x.mesh loc=2.8 spac=0.1
```

```
x.mesh loc=2.95 spac=0.02
```

```
x.mesh loc=3.2 spac=0.2
```

```
x.mesh loc=3.45 spac=0.02
```

```
x.mesh loc=3.6 spac=0.1
```

```
x.mesh loc=4.50 spac=0.5
```

```
x.mesh loc=6.5 spac=0.5
```

y.mesh loc=-0.022 spac=0.02
y.mesh loc=-0.012 spac=0.02
y.mesh loc=0.00 spac=0.0025
y.mesh loc=0.025 spac=0.005
y.mesh loc=0.05 spac=0.005
y.mesh loc=0.1 spac=0.05
y.mesh loc=0.5 spac=0.2

z.mesh loc=0 spac=0.5
z.mesh loc=1 spac=0.5
z.mesh loc=2 spac=0.5
z.mesh loc=2.5 spac=0.1
z.mesh loc=3.5 spac=0.25
z.mesh loc=4 spac=0.1

region num=1 y.max=0 z.min=0 z.max=4 oxide
region num=2 y.min=0 y.max=0.05 z.min=0 z.max=4 silicon
region num=3 y.min=0.05 z.min=0 z.max=4 oxide

electrode name=source x.max=2.0 y.min=-0.012 y.max=0 z.min=0 z.max=1
electrode name=gate x.min=2.8 x.max=3.6 y.min=-0.022 y.max=-0.012 z.min=0
z.max=2.5
electrode name=drain x.min=4.5 y.min=-0.012 y.max=0 z.min=0 z.max=1
electrode name=body x.min=2.8 x.max=3.6 y.min=-0.012 y.max=0.0 z.min=3.5
z.max=4
electrode substrate

doping uniform p.type conc=1.5e17
doping uniform n.type conc=5.e19 x.left=0. x.right=3.0 y.top=0.0 y.bottom=0.05
z.min=0 z.max=2
doping uniform n.type conc=5.e19 x.left=3.5 x.right=6.5 y.top=0.0 y.bottom=0.05
z.min=0 z.max=2
doping uniform p.type conc=5.e19 x.left=2.8 x.right=3.6 y.top=0.0 y.bottom=0.05
z.min=3.5 z.max=4

save outf=project6_0.str

contact name=gate n.poly
models conmob srh auger bgn fldmob print
impact selb

```
tonyplot3d project6_0.str -set project6_0.set
solve init
solve prev
```

```
method bicgst maxtrap=6 trap
solve vdrain=0.025
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.1
```

```
log outf=project6_1.log
```

```
solve vgate=0.025 vstep=0.025 vfinal=0.2 name=gate
solve vgate=0.3 vstep=0.1 vfinal=1.5 name=gate
```

```
tonyplot project6_1.log -set project6_1.set
```

```
# выходная ВАХ
# смещаем электрод затвора до 1,5 В
```

```
log off
solve init
```

```
method bicgst maxtrap=6 trap
```

```
solve vgate=0.5
solve vgate=1
solve vgate=1.5
```

```
# смещаем электрод стока и сохраняем результирующую ВАХ в файл
```

```
log outf=project6_2.log master
solve vdrain=0.00625
solve vdrain=0.0125
solve vdrain=0.025
solve vdrain=0.05
solve vdrain=0.1 vstep=0.1 vfinal=1 name=drain
solve vdrain=1.25 vstep=0.25 vfinal=3 name=drain
```

```
method bicgst maxtrap=6 trap
solve vdrain=3.25 vstep=0.25 name=drain vfinal=4
```

```

tonyplot project6_2.log -set project6_2.set
tonyplot project6_2.log -set project6_3.set
quit

```

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования рассматриваемой структуры с требуемыми настройками отображения прибора и его характеристик.

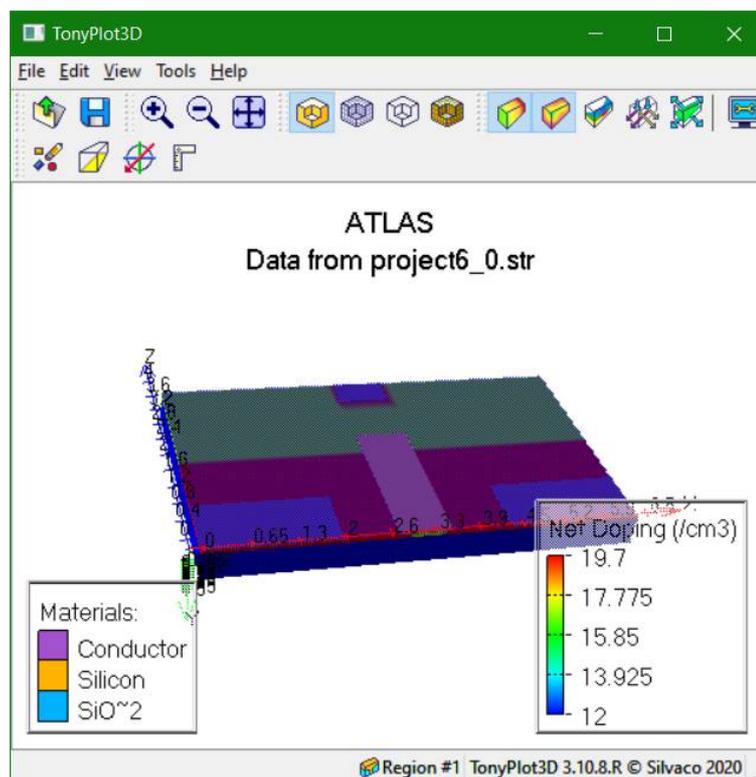


Рис. 5. Исходная структура трехмерного КНИ тонкопленочного транзистора

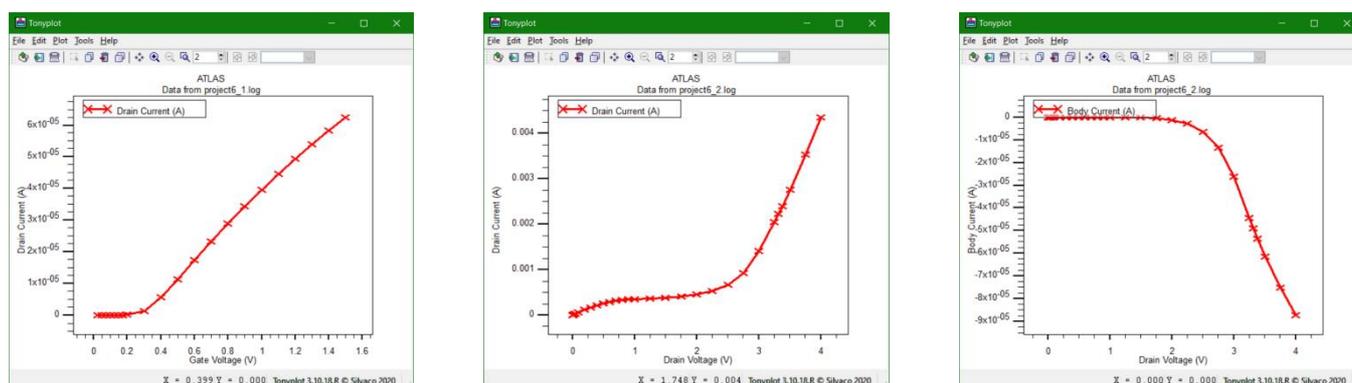


Рис. 6. Графики функций, характерных для данного транзистора (виды графиков студентам требуется определить самостоятельно)

РАБОТА № 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КНИ СТРУКТУРЫ

В коде работы реализуется моделирование процесса разработки КНИ МОП-транзистора с полной диэлектрической проницаемостью. Затем выполняется моделирование характеристик этого устройства с использованием модели неизотермического баланса энергии (NEB). Код моделирования технологического процесса и выходных характеристик описывает:

- формирование структуры КНИ с использованием технологического процесса SSuprem 4;
- частично обедненную структуру КНИ;
- выбор моделей энергодобавки и разогрева кристаллической решетки в модуле Atlas;
- выбор численных методов для метода парных решений;
- моделирование выходных ВАХ при значениях $V_{gs} = 1.0, 3.0$ и 5.0 В.

Структура кремний-оксид-кремний была сформирована в SSuprem 4 с использованием определения областей в редакторе Athena. Затем эта структура была подвергнута стандартной последовательности обработки объемного MOSFET. Структура была спроектирована таким образом, чтобы толщина КНИ была больше глубины стыков истока и стока. Это гарантирует, что устройство будет работать в частично обедненном режиме при последующем моделировании работы прибора.

Одним из основных изменений, внесенных в стандартную последовательность изготовления МОП-транзистора, было введение LOCOS – этапа создания особого слоя диэлектрика (**студенты, найдите информацию по данной технологии!**). Результатом использования данного этапа технологического процесса будет создание полностью изолированного окислом островка кремния.

В данном коде для окисления используется модель COMPRESS, так как она более сложная и точная. Модель может использоваться для изучения эффектов «птичьего клюва» в полевых МОП-транзисторах с КНИ, информация о котором есть в мануалах по модулю Athena и описанию технологического процесса SSuprem 4.

Модель технологического процесса автоматически передается в модуль Atlas, в котором происходит моделирование ВАХ созданного прибора.

```
go athena
```

```
TITLE: SOI Process and Device Simulation Example
```

```
# Задание сетки подложки  
line y loc=0 spac=0.02 tag=top  
line y loc=0.13 spac=0.01
```

```
line y loc=0.2 spac=0.02 tag=oxtop
line y loc=0.7 spac=0.5
line y loc=1.2 spac=0.1 tag=oxbot
line y loc=2 spac=0.5 tag=bot
```

```
line x loc=-1 spac=0.5 tag=left
line x loc=0 spac=0.1
line x loc=1.55 spac=0.01
line x loc=2 spac=0.25 tag=right
```

```
region silicon xlo=left xhi=right ylo=top yhi=oxtop
region oxide xlo=left xhi=right ylo=oxtop yhi=oxbot
region silicon xlo=left xhi=right ylo=oxbot yhi=bot
```

```
init orient=100 c.phos=1e14 space.mult=1.5
```

```
# нанесение окисла и нитрида кремния
deposit oxide thick=0.02 div=1
deposit nitride thick=0.1 div=1
```

```
# с данного этапа моделирование отображается в 2D режиме
```

```
etch nitride left p1.x=0
etch oxide left p1.x=0
```

```
# окисление с определенным режимом технологического процесса
```

```
method compress fermi
diffus time=90 temp=1000 weto2 press=1.00 hcl.pc=0
```

```
etch nitride all
```

```
etch oxide start x=1 y=-1
etch continue x=3 y=-1
etch continue x=3 y=0.1
etch done x=1 y=0.1
```

```
# формирование p-кармана и скрытого n-кармана
```

```
diffus time=30 temp=1000 dryo2 press=1.00 hcl=3
```

etch oxide thick=0.02

имплантация p-кармана

implant boron dose=8e12 energy=100 pears

имплантация скрытого n-кармана (в данном коде не отображается)

термические процессы разгонки примеси / отжига структуры

diffus time=220 temp=1200 nitro press=1

diffus time=90 temp=1200 t.rate=-4.444 nitro press=1

etch oxide thickness=0.03

с данного этапа происходит создание области затвора (первый этап – окисление)

diffus time=11 temp=925 dryo2 press=1.00 hcl=3

извлечение параметров рассчитываемой структуры

extract name="gateox" thickness oxide mat.ocno=1 x.val=2.0

задание порогового напряжения имплантацией бора

implant boron dose=9.5e11 energy=10 pearson

наращивание поликремниевого затвора

depo poly thick=0.2 divi=2 c.phosphor=2e20

etch poly left pl.x=1.5

окисление поликремния

method fermi compress

diffuse time=3 temp=900 weto2 press=1.0

имплантация LDD n-типа

implant phosphor dose=3.0e13 energy=20 pearson

создание боковых стенок

depo oxide thick=0.120 divisions=8

etch oxide dry thick=0.120

имплантация областей истока/стока

implant arsenic dose=5.0e15 energy=50 pearson

```

method fermi compress
diffuse time=2 temp=900 nitro press=1.0
etch oxide thickness=0.02

# нанесение металла и вытравливание рельефа контактов S/G/D
deposit alumin thick=0.03 divi=2

struct mirror right

etch alumin right p1.x=4.5
etch alumin left p1.x=-0.5

etch alumin start x=1.25 y=-1
etch continue x=2.75 y=-1
etch continue x=2.75 y=0.1
etch done x=1.25 y=0.1

# определение электродов структуры
electrode name=gate x=2.0 y=-0.1
electrode name=source x=0.0
electrode name=drain x=4.0
electrode name=substrate backside

# сохранение структуры в файл
structure outfile=project7_0.str
tonyplot project7_0.str -set project7_0.set

go atlas

# задание работы выхода электрода затвора
contact name=gate n.poly

# задание заряда  $Q_{ss}$  на границе окисла с затвором
interface qf=3e10

# подключение модели CVT, используемой при моделировании МОП-
структуры
models cvt srh hcte.el lat.temp
impact selb

```

```
thermcontact num=1 elec.num=4 ext.temp=300
```

```
#инициализация процесса моделирования  
method newton trap autonr maxtrap=10
```

```
solve init
```

```
output e.field j.electron j.hole j.conduc j.total ex.field ey.field \  
flowlines e.mobility h.mobility qss e.temp h.temp val.band con.band \  
qfn qfp j.disp photogen impact
```

```
# приложение малого начального смещения стока  
solve vfinal=0.25 vstep=0.05 name=drain
```

```
# расчёт ВАХ при  $V_g=1, 3, 5$  В  
solve vfinal=1 vstep=0.25 name=gate  
save outf=project7_1.str
```

```
solve vfinal=3 vstep=0.25 name=gate  
save outf=project7_3.str
```

```
solve vfinal=5 vstep=0.25 name=gate  
save outf=project7_5.str
```

```
# расчёт выходной ВАХ при  $V_g=1$  В  
load infile=project7_1.str master  
solve prev  
log outf=project7_1.log  
solve vfinal=5 vstep=0.25 name=drain  
save outf=project7_1a.str
```

```
log outf=tmp
```

```
# расчёт выходной ВАХ при  $V_g=3$  В  
load infile=project7_3.str master  
solve prev  
log outf=project7_3.log  
solve vfinal=5 vstep=0.25 name=drain  
save outf=project7_3a.str  
log outf=tmp
```

```

# расчёт выходной ВАХ при  $V_g=5$  В
load infile=project7_5.str master
solve prev
log outf=project7_5.log
solve vfinal=5 vstep=0.25 name=drain
save outf=project7_5a.str

```

```

tonyplot -overlay project7_1.log project7_3.log project7_5.log -set project7_1.set
tonyplot -overlay project7_1.log project7_3.log project7_5.log -set project7_2.set
tonyplot project7_5a.str -set project7_5a.set
quit

```

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 7 и 8 представлены результаты моделирования рассматриваемой структуры с требуемыми настройками отображения прибора и его характеристик.

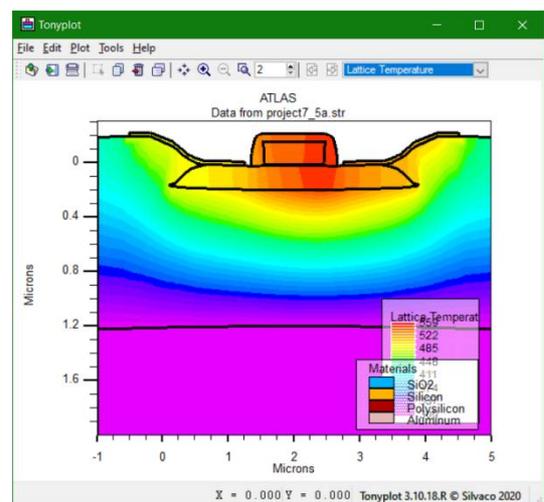
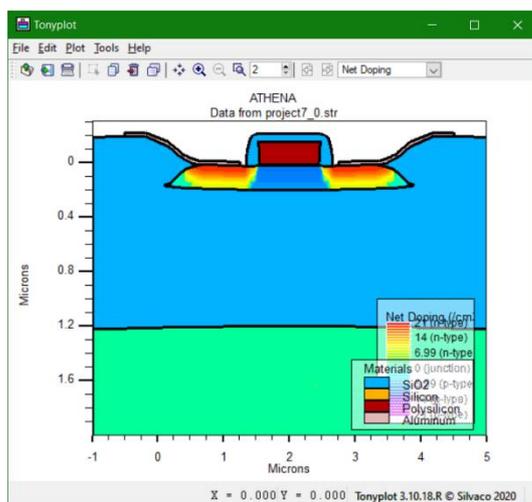


Рис. 7. Структура смоделированного в модуле Athena транзистора

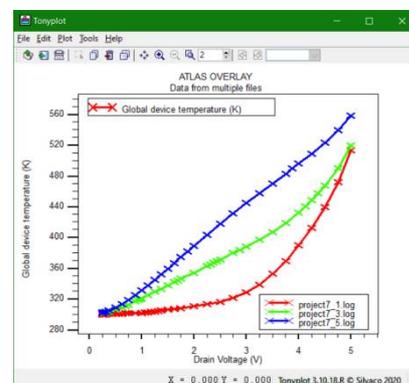
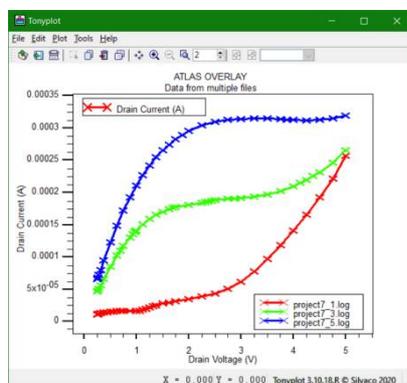


Рис. 8. Выходная ВАХ и температурная зависимость ВАХ транзистора

РАБОТА № 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ОБЛАСТЯМИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

В данной работе солнечный элемент (СЭ) реализован в виде коаксиального кремниевого наношнура толщиной порядка 380 нм. Предполагается, что наношнур состоит из трех слоев кремния – положительно заряженного ядра, тонкого нейтрально заряженного или с собственным зарядом промежуточного слоя и отрицательно заряженного внешнего слоя. Когда фотон ударяет в наношнур, он генерирует электронно-дырочную пару заряда. Заряд разделяется и движется радиально: электроны направляются к внешнему электроду, а дырки – к внутреннему.

Преимуществом подобной структуры по сравнению с классическими СЭ является более короткое расстояние, которое проходят электрон и дырка до выходного контакта СЭ.

В модуле Atlas3D параметр **CYLINDRICAL** задает саму конструкцию цилиндрической структуры. Сетка устанавливается как **MESH THREE.D CYLINDRICAL**, где параметр **THREE.D** указывает симулятору на необходимость создания полноценной трехмерной сетки. В этом случае требуется указывать настройки будущего прибора – радиус шнура, углы шага и длину в декартовых координатах.

```
go atlas
```

```
mesh cylindrical three.d
```

```
r.mesh l=0 spacing=0.05
```

```
r.mesh l=0.08 spacing=0.01
```

```
r.mesh l=0.16 spacing=0.05
```

```
r.mesh l=0.19 spacing=0.01
```

```
# распределение сечения по углам и шаг углов
```

```
a.m l=0 spac=60
```

```
a.m l=360 spac=60
```

```
# длина шнура
```

```
z.mesh l=0 spacing=0.01
```

```
z.mesh l=0.03 spacing=0.01
```

```
z.mesh l=0.11 spacing=0.025
```

```
z.mesh l=3.105 spacing=1
```

```
z.mesh l=3.11 spacing=0.0015
```

region num=1 material=Silicon a.min=0 a.max=360 z.min=0 z.max=0.03 r.min=0
r.max=0.19

region num=2 material=Silicon a.min=0 a.max=360 z.min=0.03 z.max=3.105
r.min=0.16 r.max=0.19

region num=3 material=Silicon a.min=0 a.max=360 z.min=0.03 z.max=0.11
r.min=0 r.max=0.16

region num=4 material=Silicon a.min=0 a.max=360 z.min=0.11 z.max=3.105
r.min=0.08 r.max=0.16

region num=5 material=Silicon a.min=0 a.max=360 z.min=0.11 z.max=3.11
r.min=0 r.max=0.08

region num=6 material=air a.min=0 a.max=360 z.min=3.105 z.max=3.11
r.min=0.08 r.max=0.29

electrode name=cathode a.min=0 a.max=360 r.min=0 r.max=0.19 z.min=0 z.max=0

electrode name=anode a.min=0 a.max=360 r.min=0 r.max=0.19 z.min=3.11
z.max=3.11

doping region=1 uniform n.type conc=5e+17

doping region=2 uniform n.type conc=5e+17

doping region=3 uniform n.type conc=1e+14

doping region=4 uniform n.type conc=1e+14

doping region=5 uniform p.type conc=4e+16

save outf=project8_0.str

beam num=1 z.origin=-2.0 raytrace=project8_1.str x.origin=0 y.origin=0 phi=0.0
theta=90 nx=10 nz=10 power.file=solar.spec

models fermi ni.fermi cvt srh

method BICGST

solve init

log outf=project8_0.log

solve previous

solve vstep=0.02 vfinal=0.55 name=anode

log off

solve init

solve b1=1

log outf=project8_1.log

solve previous

solve vstep=0.02 vfinal=0.55 name=anode

tonyplot -overlay project8_0.log project8_1.log -set project8_0.set

tonyplot3d project8_1.str -set project8_1.set

extract init inf="project8_1.log"

extract name="Jsc" y.val from curve(v."anode", i."cathode") where x.val=0.0

extract name="Voc" x.val from curve(v."anode", i."cathode") where y.val=0.0

extract name="Pm" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode")))

extract name="Vm" x.val from curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode")) where y.val="\$Pm"

extract name="Im" "\$Pm"/"\$Vm"

extract name="FF" ("Pm"/("\$Jsc"*\$Voc"))

extract name="Eff" ("Pm"/(3.14157*(0.19)*(0.19)*1e-8*0.1))*100

quit

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 9 и 10 представлены результаты моделирования рассматриваемой структуры с требуемыми настройками отображения прибора и его характеристик.

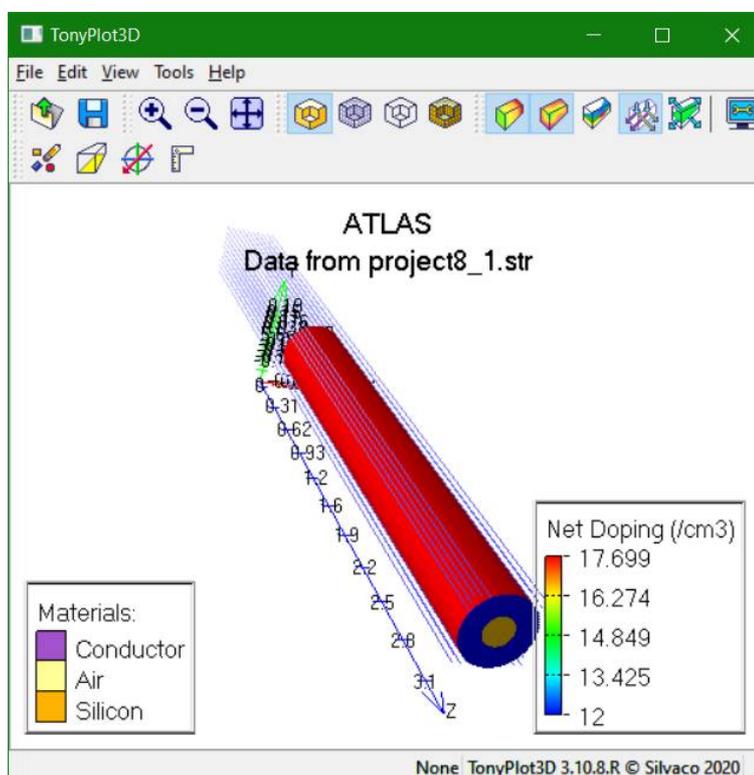


Рис. 9. Структура СЭ в 3D

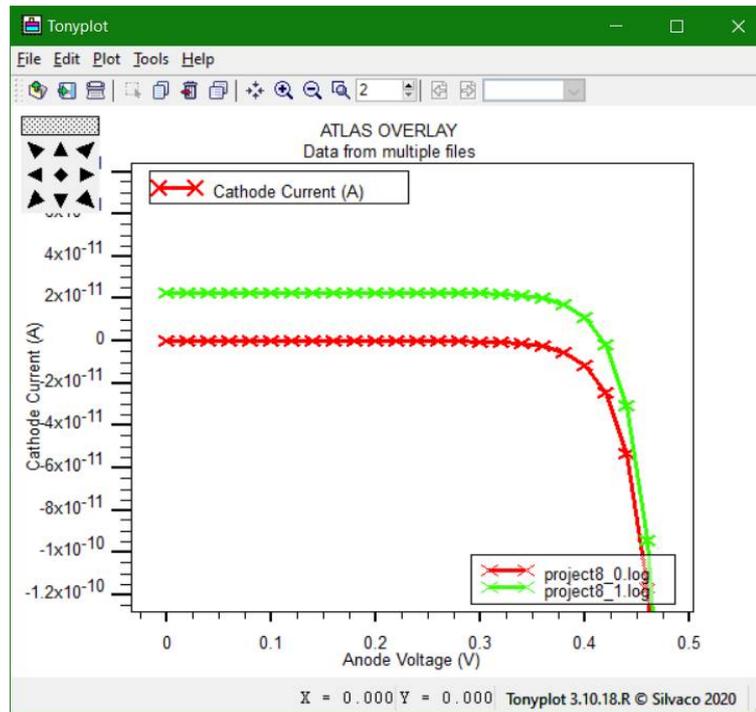


Рис. 10. ВАХ СЭ при освещении и без него

ОГЛАВЛЕНИЕ

Задание на лабораторные работы.....	3
Работа № 1. Моделирование КНИ структуры.....	3
Работа № 2. Моделирование трехмерной КНИ структуры.....	9
Работа № 3. Моделирование технологического процесса изготовления КНИ структуры.....	13
Работа № 4. Моделирование солнечного элемента с наноразмерными областями и исследование его характеристик.....	19

НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СТРУКТУРЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению практических работ по дисциплине «Нанотехнологии»
для студентов направления 28.03.02 «Наноинженерия»
и лабораторных работ 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. 1,1.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84