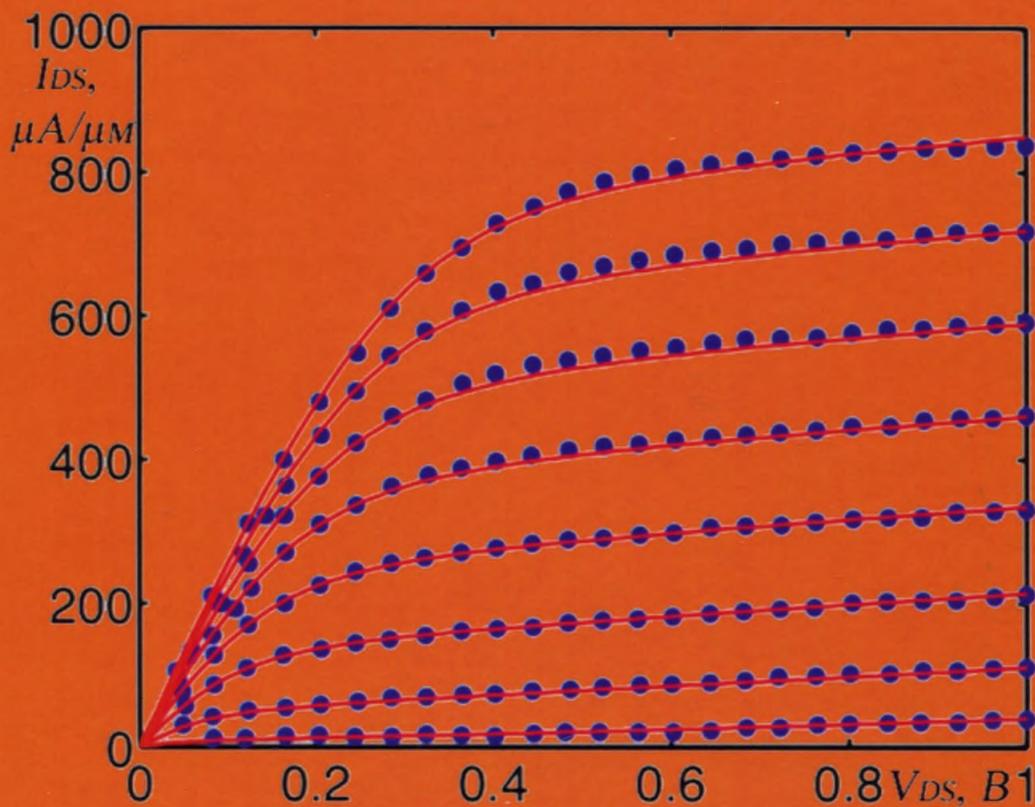


621.385  
К.84

# Ю. А. Кругляк

## Физика и моделирование нанотранзисторов



Одесса  
ТЭС  
2018

**Ю. А. Кругляк**

**Физика и моделирование нанотранзисторов**

Одесса  
ТЭС  
2018

УДК 621.382 PACS; 72.80.Ey, 85.30.-z, 85.30.De, 85.30.Tv, 8S.40.-e  
К 840 Кругляк, Юрий Алексеевич

**Физика и моделирование нанотранзисторов/**

**Ю. А. Кругляк. – Одесса: ТЭС, 2018 – 314 стр.; 142 рис.; 210 лит.**

Книга посвящена физике и моделированию полевых транзисторов с акцентом на короткоканальные микро- и современные нанотранзисторы типа МДП-транзистора с изолированным затвором MOSFET, полевого транзистора с высокой подвижностью электронов III-V НЕМТ, транзисторов на чрезвычайно тонкой КНИ-подложке ETSOI, в том числе с затворами DG и GAA, с каналами NW и CNT, транзисторов FinFET, однако, развитые подходы применимы и к транзисторам типа JFET, MESFET, ВJT и им подобным. Рассматривается физическое устройство, метрика и управление FET, теория MOSFET дается сначала в традиционном изложении, затем формулируются начала модели виртуального истока, приближение истощения на фоне уравнение Пуассона, обсуждается подвижный электронный заряд в массивной структуре MOS и в исключительно тонкой SOI, из 2D электростатики MOS подробно рассматриваются DIBL, геометрическое экранирование, емкостная модель, масштабирование транзисторов, их пробой.

Во второй части достаточно подробно излагается обобщенная транспортная модель Ландауэра - Датта - Лундстрема сначала применительно к 2D баллистическим MOSFET, затем баллистическая модель объединяется с моделью виртуального истока, качественно обсуждается рассеяние электронов в канале проводимости и строится модель прохождения MOSFET, которая затем объединяется с моделью виртуального истока в финальный, наиболее современный ныне вариант модели MVS-прохождения, иллюстрируемой примерами обработки экспериментальных выходных характеристик нанотранзисторов ETSOI MOSFET и III-V НЕМТ.

В заключение обсуждаются фундаментальные пределы и ограничения Si FET, квантовый транспорт в MOSFET с длиной канала менее 10 нм, упрощающие допущения и неясные вопросы в модели MVS-прохождения, а также полевой транзистор рассматривается с позиций нанoeлектроники «снизу – вверх». Книга написана в основном по лекциям Марка Лундстрема «Fundamentals of Nanotransistors», прочитанных в 2016 году: [www.nanohub.org/courses/NT](http://www.nanohub.org/courses/NT).

Книга предназначена для специалистов в области короткоканальной микроэлектроники и нанoeлектроники, а также физики полупроводников.

**ISBN 978-617-7711-06-2**

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Глава 1. Устройство, метрика и управление MOSFET   | 9  |
| 1.1. Введение  | 9  |
| 1.2. Из истории микро- и нанoeлектроники   | 10 |
| 1.3. О физике нанотранзисторов   | 12 |
| 1.4. Физическая структура MOSFET   | 14 |
| 1.5. Вольт-амперные характеристики   | 18 |
| 1.6. Метрика MOSFET  | 20 |
| 1.7. Управление транзистором   | 24 |
| 1.8. Вольт-амперная характеристика MOSFET с позиций модели термоэлектронной эмиссии                        | 31 |
| Литература   | 39 |
| Глава 2. Теория MOSFET в традиционном изложении, начала модели виртуального истока и приближение истощения | 41 |
| 2.1. Введение  | 41 |
| 2.2. Ток, заряд и скорость   | 41 |
| Линейная область   | 42 |
| Область насыщения: скорость насыщения  | 43 |
| Область насыщения: классическая область отсечки  | 44 |
| Вычисление цельной ВАХ: от линейной части до квадратичной области насыщения                                | 46 |
| 2.3. Изменение электрического поля вдоль канала  | 47 |
| 2.4. Насыщение скорости и насыщение тока стока   | 48 |
| 2.5. Метрика нанотранзисторов  | 50 |
| 2.6. Начала модели виртуального истока   | 51 |
| Скорость в канале и напряжение на стоке  | 52 |
| 2.7. Учет терминальных сопротивлений   | 54 |
| 2.8. Приближение истощения и уравнение Пуассона  | 58 |
| Энергия и изгиб зон  | 59 |
| Уравнение Пуассона — Больцмана   | 66 |
| Приближение истощения  | 67 |
| Инверсия   | 70 |
| Влияние подложки   | 71 |
| Литература   | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| Глава 3. Напряжение на затворе и поверхностный потенциал,<br>подвижный электронный заряд в массивной структуре MOS и<br>в исключительно тонкой SOI | 79  |
| 3.1. Введение  | 79  |
| 3.2. Напряжение на затворе и поверхностный потенциал   | 80  |
| Пороговое напряжение   | 85  |
| Емкость затвора  | 86  |
| Приближенная зависимость напряжения на затворе от<br>поверхностного потенциала   | 90  |
| 3.3. Подвижный электронный заряд: массивная структура MOS  | 93  |
| Подвижный электронный заряд  | 94  |
| Подвижный заряд ниже порогового напряжения   | 96  |
| Подвижный заряд выше порогового напряжения   | 98  |
| Еще о поверхностном потенциале и напряжении на затворе   | 102 |
| 3.4. Подвижный электронный заряд: исключительно тонкий SOI   | 104 |
| Подвижный электронный заряд  | 104 |
| Подвижный электронный заряд ниже порогового напряжения   | 111 |
| Подвижный электронный заряд выше порогового напряжения   | 114 |
| Ход поверхностного потенциала с изменением напряжения<br>на затворе  | 118 |
| Литература   | 122 |
| Глава 4. 2D электростатика MOS и модель виртуального истока  | 123 |
| 4.1. Введение  | 123 |
| 4.2. 2D электростатика MOS   | 124 |
| 2D Уравнение Пуассона  | 125 |
| Спад порогового напряжения и <i>DIBL</i>   | 126 |
| Геометрическое экранирование   | 128 |
| 2D Электростатика: емкостная модель  | 131 |
| 4.3. Масштабирование транзисторов  | 136 |
| 4.4. Пробой транзисторов   | 141 |
| 4.5. Модель виртуального истока  | 145 |
| Подпороговая область   | 147 |
| Из под порога в область выше порога  | 152 |
| Литература   | 155 |

|   |     |
|---|-----|
| Глава 5. Транспортная модель Ландауэра — Датта - Лундстрема и баллистические MOSFET                             | 157 |
| 5.1. Введение   | 157 |
| 5.2. Обобщенная модель электронного транспорта  | 158 |
| Большие и малые напряжения  | 160 |
| Коэффициент прохождения   | 162 |
| Моды проводимости   | 167 |
| Квант проводимости  | 169 |
| Плотность электронов  | 170 |
| 5.3. Баллистические MOSFET  | 175 |
| MOSFET как устройство с наноканалом проводимости  | 176 |
| Линейная область  | 178 |
| Область насыщения   | 178 |
| От линейной области к насыщению   | 179 |
| Выражения для тока через электронный заряд  | 179 |
| Литература  | 187 |
| Глава 6. Баллистическая скорость впрыскивания и объединение баллистической модели с моделью виртуального истока | 189 |
| 6.1. Введение   | 189 |
| 6.2. Баллистическая скорость впрыскивания   | 189 |
| Зависимость скорости от напряжения на стоке   | 190 |
| Насыщение скорости в баллистических MOSFET  | 191 |
| Баллистическая скорость впрыскивания  | 195 |
| 6.3. Объединение баллистической модели с моделью виртуального истока  | 199 |
| Резюме баллистической модели  | 199 |
| Резюме модели виртуального стока  | 200 |
| Объединенная модель   | 201 |
| Линейная область: баллистическая модель и модель виртуального истока  | 202 |
| Область насыщения: баллистическая модель и модель виртуального истока   | 204 |
| Сравнение с экспериментальными результатами   | 206 |
| Литература  | 212 |

|  |     |
|--|-----|
| Глава 7. Рассеяние электронов и модель прохождения MOSFET                                      | 213 |
| 7.1. Введение  | 213 |
| 7.2. Рассеяние электронов и коэффициент прохождения  | 214 |
| Характеристические времена и длины   | 214 |
| Скорости рассеяния и энергия   | 216 |
| Коэффициент прохождения  | 220 |
| Средняя длина свободного пробега назад   | 224 |
| 7.3. Модель прохождения MOSFET   | 228 |
| Резюме баллистической модели MOSFET  | 229 |
| Линейная область   | 230 |
| Область насыщения  | 230 |
| От линейного тока до насыщения   | 231 |
| Выражение для тока через электронный заряд   | 231 |
| Зависимость коэффициента прохождения от напряжения на стоке                                    | 235 |
| Литература   | 241 |
| Глава 8. Объединение модели прохождения и модели виртуального истока:                          |     |
| модель MVS/прохождения   | 243 |
| 8.1. Введение  | 243 |
| Резюме модели прохождения  | 243 |
| Резюме модели виртуального истока  | 244 |
| 8.2. Объединение модели прохождения и модели виртуального истока                               | 246 |
| Линейная область   | 246 |
| Область насыщения  | 248 |
| 8.3. Транспорт в нанотранзисторах с позиции MVS/прохождения                                    | 252 |
| Обзор модели MVS/прохождения   | 252 |
| 8.4. ETSOI MOSFET и III-V HEMT   | 257 |
| Вписывание MVS/прохождения в экспериментальные данные  | 259 |
| Результаты анализа экспериментальных данных ETSOI MOSFET и III-V HEMT в модели MVS/прохождения | 260 |
| Анализ линейной области  | 262 |
| Анализ области насыщения   | 265 |
| Анализ перехода линейной области к насыщению   | 266 |
| Литература   | 269 |

|  |     |
|--|-----|
| Глава 9. Фундаментальные пределы и ограничения   | 271 |
| 9.1. Введение  | 271 |
| 9.2. Фундаментальные пределы   | 271 |
| 9.3. Квантовый транспорт в MOSFET с длиной канала меньше $10 \text{ нм}$                   | 275 |
| 9.4. Упрощающие допущения в модели прохождения   | 277 |
| Вывод формулы Ландауэра для тока   | 279 |
| Неидеальные контакты   | 282 |
| Критическая длина при рассеянии назад  | 282 |
| Зависимость средней длины свободного пробега и подвижности от<br>длины канала проводимости | 284 |
| Роль рассеяния   | 286 |
| Вырождение носителей тока  | 288 |
| Плотность заряда и транспорт   | 289 |
| Литература   | 294 |
| Глава 10. Полевой транзистор с позиций наноэлектроники «снизу - вверх»                     | 297 |
| 10.1. Введение   | 297 |
| 10.2. Соотношение между током и напряжением  | 298 |
| 10.3. Почему ток насыщается?   | 299 |
| 10.4. Роль заряжания проводника  | 301 |
| 10.5. Квантовая емкость  | 304 |
| 10.6. Электростатический «выпрямитель»   | 308 |
| 10.7. Расширенная модель проводника  | 310 |
| 10.8. Уравнение диффузии и расширенная модель проводника                                   | 311 |
| Литература   | 313 |