

Моделирование нанотранзисторов: устройство MOSFET

Ю.А. Крутляк¹, П.А. Кондратенко², Ю.М. Лопаткин³

¹ Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016 Одесса, Украина

² Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, 03058 Киев, Украина

³ Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 01.10.2018; в отредактированной форме – 07.12.2018; опубликовано online 18.12.2018)

Предлагается состоящий из нескольких частей по данной тематике обзор, задачей которого является обсуждение физических моделей и принципов, лежащих в основе функционирования наноразмерных MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – МОП / МДП-транзистор с изолированным затвором) и основанных как на привычном традиционном подходе «сверху – вниз», так и на более современном подходе, берущим свое начало еще в работах Рольфа Ландауэра, предложившего модель упругого резистора задолго до её экспериментального подтверждения в нанопроводниках, а также Суприо Датта и Марка Лундстрема, переосмысливших эту модель, придавших ей нынешнее звучание и доказавших применимость её к электронным устройствам как наноскопическим, так и микро- и макроскопическим произвольной размерности 1D, 2D и 3D и работающим в баллистическом, квазibalлистическом и диффузионном режимах. Первая часть посвящена физической структуре и вольт-амперным характеристикам MOSFET.

Ключевые слова: Наноэлектроника, Полевой транзистор, Вольт-амперные характеристики.

DOI: [10.21272/jnep.10\(6\).06034](https://doi.org/10.21272/jnep.10(6).06034)

PACS numbers: 72.80.Ey, 85.30. – z, 85.30.De, 85.30.Tv, 85.40. – e

1. ВВЕДЕНИЕ

Изобретение транзистора считают важнейшим открытием XX века. Транзисторы используются в электронной схеме практически любого электронного прибора. Миллиарды транзисторов содержатся в наших смартфонах и планшетах, в настольных компьютерах и суперкомпьютерах, во всех разнообразных гаджетах, без которых мы уже не можем представить себе XXI век. Нано-транзистор представляет большой интерес и сам по себе.

Электроны в MOSFET движутся от истока S по проводящему каналу и выходят из стока D. Соответствующий ток I_D контролируется затвором G, изолированным от канала проводимости диэлектрической прослойкой толщиной уже менее 2 нм. Если длина канала проводимости к концу второго тысячелетия составляла около 100 нм, то сегодня – уже приближается к 10 нм.

Функционирование MOSFET интересно с познавательной точки зрения.

На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) MOSFET. Два важных участка послепороговой области – линейный участок и область насыщения. Максимальное напряжение, прикладываемое между затвором G и стоком D есть напряжение питания V_{DD} . Небольшой ток утечки в допороговой области на линейном участке I_D не заметен.

Такое электронное устройство как MOSFET полезно в качестве элемента в различных электронных схемах. Они могут выполнять роль цифрового коммутатора (ON/OFF) или, например, аналогового усилителя входных сигналов.

2. ИЗ ИСТОРИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Электронная схема любого электронного прибора содержит взаимосвязанные электронные компоненты и

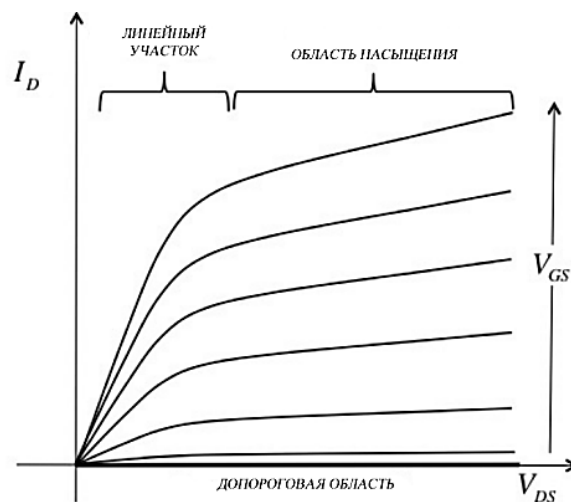


Рис. 1 – Вольт-амперные характеристики n -MOSFET: По вертикальной оси откладывается ток I_D , текущий от стока D к истоку S, а по горизонтальной оси – напряжение между ними V_{DS} . Разные характеристики соответствуют разным значениям напряжения V_{GS} на затворе G

устройства. Сопротивления, конденсаторы и дроссели – это очень простые электронные компоненты, однако, электронные схемы нуждаются в нелинейных устройствах, простейшим из которых может служить такой электронный элемент как диод, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Первым применением полупроводниковых диодов в начале XX века стало обнаружение радиосигналов. Эти кристаллические детекторы были очень капризны и вскоре были заменены вакуумными ламповыми детекторами, содержащими катод прямого накала и металлический анод, при подаче на который положительного потенциала электроны с катода притягивались к аноду и шел ток.

Вскоре появились вакуумные триоды, а затем и

вакуумные лампы с большим числом электродов – тетроды, пентоды и др. При помещении между катодом и анодом металлической сетки ток можно было контролировать путем подачи небольшого потенциала на сетку, усиливая тем самым детектируемый сигнал. Широкое применение вакуумных ламп революционизировало технику связи и привело к созданию первых электронных вычислительных машин, однако, с вакуумными лампами было несколько серьезных проблем – они были громоздкими, хрупкими и слишком энергоемкими.

Появившийся в первой половине XX века MESFET (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor – Полевой транзистор с контактом металл-полупроводник (диодом Шоттки) в качестве затвора), твердотельная замена вакуумному триоду, был меньше вакуумного триода по размерам, был более надежный и потреблял меньше энергии. Полупроводниковая технология в то время была еще недостаточно развита, чтобы конкурировать с промышленным производством вакуумных ламп. Со временем все технологические проблемы, связанные с производством полевых транзисторов были преодолены, и сегодня MOSFET является основным полевым транзистором в любых электронных устройствах [1].

К 1960 году была разработана и внедрена технология производства нескольких транзисторов в виде единой электронной схемы на кремниевой подложке. Гордон Мур в 1965 году заметил, что число транзисторов в таких интегральных схемах удваивается с каждой новой технологической генерацией (закон Мура) – вначале ежегодно, затем каждые полтора-два года. Он предсказал, что такое удвоение числа транзисторов в чипе сохранится и далее в течение еще некоторого времени, но даже он не мог представить себе, что подобное удвоение продлится более 50 лет [2].

Удвоение числа транзисторов на интегральной схеме сопровождалось неуклонным уменьшением их размеров. Вначале размеры транзисторов измерялись в микрометрах, и электроника стала именоваться микроэлектроникой. Физики разработали простые математические модели транзисторов, уточнение и дальнейшее развитие этих моделей происходило по мере совершенствования микросистемных технологий [3, 4]. С каждой технологической генерацией размеры транзисторов уменьшались в $\sqrt{2}$ раз, так что площадь, занимаемая транзистором, уменьшалась в 2 раза, и число транзисторов в чипе удваивалось. В районе 2000 года длина канала проводимости в транзисторах достигла 100 нм, микроэлектроника стала наноэлектроникой, и нанотранзистор стал знаменем нанотехнологической революции. К сегодняшнему дню длина канала проводимости уменьшилась в 10 раз, и вопрос сейчас звучит следующим образом: «Насколько современная технология позволит канал проводимости сделать менее 10 нм».

После преодоления нанометрового порога замеры всех электрофизических характеристик нанотранзисторов существенно не изменились. Однако, кое-что существенное таки изменилось – другой стала физи-

ка переноса электронов от истока до стока. Изложению этой новой физики транспортных явлений в нанотранзисторах посвящаются предлагаемые вашему вниманию обзорные исследования.

3. О ФИЗИКЕ НАНОТРАНЗИСТОРОВ

В подавляющем большинстве разнообразных транзисторов их работа контролируется высотой энергетического барьера путем изменения прилагаемого напряжения на затворе. Этот барьер препятствует движению электронов от истока к стоку. Путем изменения напряжения V_{GD} между затвором G и стоком D можно менять высоту этого энергетического барьера и таким образом контролировать ток по каналу проводимости транзистора.

Анализ работы MOSFET обычно начинается с уравнения

$$I_{DS} = W |Q(V_{GS}, V_{DS})| \langle v \rangle, \quad (1)$$

где W – ширина канала проводимости в направлении, перпендикулярном движению электронов, Q – это подвижный электронный поверхностный заряд, $\langle v \rangle$ – средняя скорость движения электронов. Построение математической модели работы транзистора сводится к физической трактовке электростатики (Q) и транспорта ($\langle v \rangle$). В то время как дизайн и трактовка электростатики транзистора мало изменились за последние несколько десятилетий, физическая природа и характер переноса электронов существенно менялись по мере того, как длина канала проводимости транзистора становилась все меньше и меньше.

Краеугольным камнем традиционной физики полупроводников является уравнение дрейф-диффузии

$$J_x = n_s q \mu E_x + q \bar{D} \frac{dn_s}{dx}, \quad (2)$$

которое утверждает, что плотность тока в однородном полупроводнике в направлении движения электронов пропорциональна электрическому полю, а в его отсутствие ток обеспечивается электронами, диффундирующими навстречу градиенту концентрации электронов, где n_s – плотность электронов, q – величина заряда электрона, μ – подвижность электронов, \bar{D} – коэффициент диффузии. Хотя большинство учебников по физике полупроводников начинается с уравнения (2), нет уверенности в том, что предположения, которые делаются при выводе этого уравнения, остаются в силе применительно к нанопроводникам. Действительно, моделирование [5] показало, что транспорт электронов в наноразмерных проводниках хотя и оказывается весьма сложным явлением, но вместе с тем и более простым по сравнению с транспортом в массивных проводниках.

Новый подход к описанию транспорта электронов в виде модели упругого резистора был предложен Ландауэром еще в 1957 году [6], задолго до её экспериментального подтверждения в нанопроводниках. В этой модели вместо (2) ток вычисляется по формуле

$$I = \frac{2q}{h} \int T(E)M(E)(f_1(E) - f_2(E))dE, \quad (3)$$

где $M(E)$ – число мод (каналов) при величине энергии E , доступных для проводимости, $f_1(E)$ и $f_2(E)$ – равновесные функции Ферми на истоке и стоке, $T(E)$ – коэффициент прохождения. Если допустимо сравнивать канал проводимости в нанотранзисторе с широкополосным автомобильным шоссе, то число мод аналогично числу полос на шоссе, а коэффициент прохождения лежит в области между нулем и единицей, т. е. является мерой вероятности того, что электрон, впрыснутый истоком, окажется на стоке. Для массивных проводников уравнение (3) сводится к (2) и оно пригодно для нанопроводников, применительно к которым недостаточно ясно, как пользоваться уравнением (2).

Протекание тока рассматривалось до сих пор только полуклассически. Другими словами, электроны рассматривались лишь как частицы, а их квантово-механическая природа учитывалась опосредованно через зонную структуру проводящего канала введением понятия эффективной массы электрона. Однако, по мере дальнейшего уменьшения длины канала проводимости все настоятельнее требуется в явном виде учесть квантовую природу электронов. Можно ожидать, что квантово-механические эффекты станут играть важную роль, когда потенциальная энергия начнет меняться быстро в масштабе де-бройлевской длины волны электрона. Простая оценка де-бройлевской длины волны электронов в термически равновесном образце Si дает приблизительно 10 нм, что не намного меньше реально достигнутой на практике длины канала проводимости при массовом производстве нанотранзисторов. В течение последних двух десятилетий были разработаны надежные и достаточно мощные модели квантового транспорта электронов применительно к нанопроводникам [5, 7-9]. Чем больше удаляется длина канала проводимости от 10 нм в сторону уменьшения, тем все важнее становится учитывать квантово-механическую природу транспорта электронов, однако, при длине канала проводимости более 10 нм, как мы убедимся, полуклассическая модель работает достаточно надежно [10].

4. ФИЗИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА MOSFET

Наша конечная цель объяснить и математически описать физику процессов, происходящих в транзисторе, т. е. увязать токи, протекающие в транзисторе, с электрическими потенциалами, подаваемыми на контакты (терминалы) транзистора (рис. 1). Вначале полезно рассмотреть транзистор как «черный ящик», формализовано, не вникая в физику происходящих в транзисторе процессов.

Ток, текущий между терминалами S и D , контролируется электрическим потенциалом, подаваемым на терминал G (рис. 1). В некоторых вариантах транзисторов этот терминал может использоваться для подачи тока. Иногда используется и терминал B . Разработано много вариантов транзисторов [11], но все они имеют три или четыре терминала. Термина-

лы могут называться по-разному в зависимости от типа транзистора.

Мы сосредоточимся на кремниевых полевых транзисторах Si-MOSFET и на полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов III-V HEMT (High Electron Mobility Transistor), однако, развиваемые далее подходы применимы ко всем типам полевых транзисторов.

Сначала рассмотрим устройство n -канального Si MOSFET. В кремниевой пластине p -типа формируется канал проводимости n -типа с двумя омическими контактами истока S и стока D . Контактные области S и D сильно n -допированы. По проводящему каналу n -типа движется поток электронов от истока к стоку. В верхней части пластины изготавливается омический контакт затвора G . Аналогичный контакт изготавлиют в нижней части подложки B .

В полевом транзисторе n -Si MOSFET каналный ток управляется электрическим полем, возникающим при приложении электрического напряжения между затвором и стоком.

На рис. 2 показано сечение и вид сверху n -Si MOSFET.

Под металлическим контактом затвора находится тонкий слой SiO_2 , а под ним – узкая зона p -типа. Длина канала проводимости L является критическим параметром транзистора, она же определяет фактический размер транзистора на чипе и скорость срабатывания транзистора: чем меньше L , тем больше эта скорость. Ширина канала проводимости W определяет величину тока по каналу. Для каждой технологической генерации производства транзисторов значения L и W проектируются таким образом, чтобы функционирование транзисторов было максимально эффективным для $L \geq L_{min}$, некоторого минимального значения длины канала проводимости.

В n -канальном MOSFET ток обеспечивается электронами в зоне проводимости. Возможно создать аналогичный транзистор p -MOSFET, проводимость которого также обеспечивается электронами, но в валентной зоне, что мысленно визуализируется с помощью «дырок» в валентной зоне.

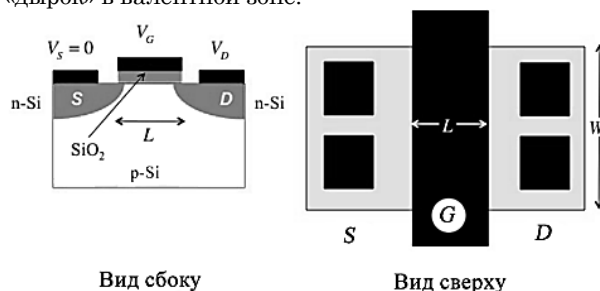


Рис. 2 – n -Канальный Si MOSFET: вид сбоку и сверху. Схематически показаны контакты истока и стока (черные квадраты) и затвора (черный прямоугольник)

p -Канальный MOSFET конструируется на n -Si подложке. Контактные области S и D сильно p -допированы. Обратим внимание, что $V_{DS} < 0$ для p -MOSFET и что требуется $V_{GS} < 0$ для перевода p -MOSFET в режим «ON». Ток течет из стока, а не в

сторону стока как в *n*-MOSFET. Современная электроника конструируется по технологии CMOS (Complementary MOS – КМОП / комплементарная МОП-структура), в которой каждый *n*-транзистор спарен с *p*-транзистором.

Обратим внимание, что для *n*-MOSFET $V_{DS}, V_{GS} > 0$, а для *p*-MOSFET $V_{DS}, V_{GS} < 0$. Ток I_D течет от *D* к *S* в случае *n*-MOSFET и от *S* к *D* в случае *p*-MOSFET.

В прикладной схемотехнике транзисторы обычно конфигурируются на восприятие входного напряжения и работают при определенном выходном напряжении. Входное напряжение измеряется между двумя входными терминалами, а выходное напряжение – между двумя выходными терминалами. Входной ток это ток, который входит в один из двух входных терминалов и выходит из другого входного терминала, а выходной ток это ток, который входит в один из двух выходных терминалов и выходит из другого выходного терминала. В схемотехнике, по договоренности, ток считается положительным, если он входит в терминал, так что ток истока I_D в *n*-MOSFET положительный, а ток истока I_D в *p*-MOSFET отрицательный. Поскольку мы располагаем только тремя терминалами (терминал подложки В особый, он позволяет настраивать операционные характеристики транзистора), то один из терминалов должен быть общим либо со входом, либо с выходом. Есть три возможных схемы включения транзистора – с общим истоком, с общим стоком и с общим затвором.

На рис. 3 показан *n*-MOSFET, включенный по схеме с общим истоком.

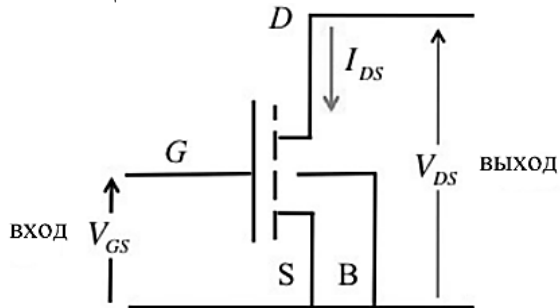


Рис. 3 – *n*-MOSFET, включенный по схеме с общим истоком

Входным напряжением является V_{GS} , а выходным – V_{DS} . Выходным током является I_{DS} , а ток затвора обычно пренебрежимо мал, так что входной постоянный ток предполагается нулевым.

В этом случае постоянным выходным током является ток от стока к истоку I_{DS} , а постоянным выходным напряжением является напряжение между стоком и истоком V_{DS} . Постоянным входным напряжением является напряжение между затвором и истоком V_{GS} . Постоянный входной ток обычно очень мал и им, как правило, пренебрегают.

Нас будут в первую очередь интересовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов. Поясним используемую терминологию. Два типа ВАХ особенно интересны: выходные и передаточные характеристики. Для построения выходных ВАХ от-

кладывают выходной ток I_{DS} против выходного напряжения V_{DS} при постоянном значении входного напряжения V_{GS} . В случае передаточных ВАХ откладывают выходной ток I_{DS} против входного напряжения V_{GS} при постоянном выходном напряжении V_{DS} . Рассмотрим подробнее оба типа характеристик и поясним используемую терминологию.

5. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 4 показаны ВАХ идеального резистора. В этом случае ток пропорционален приложенному напряжению $I = V/R$, где R есть сопротивление резистора.

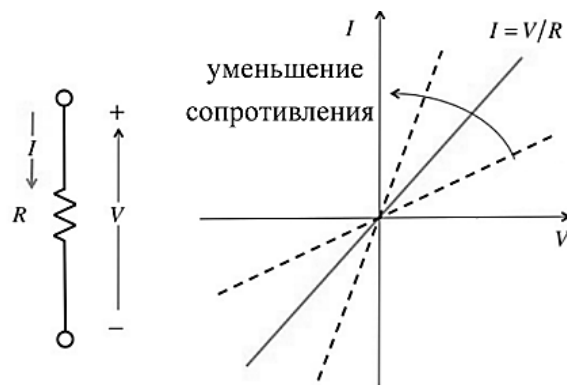


Рис. 4 – Вольт-амперная характеристика идеального резистора

На рис. 5 показана ВАХ источника тока.

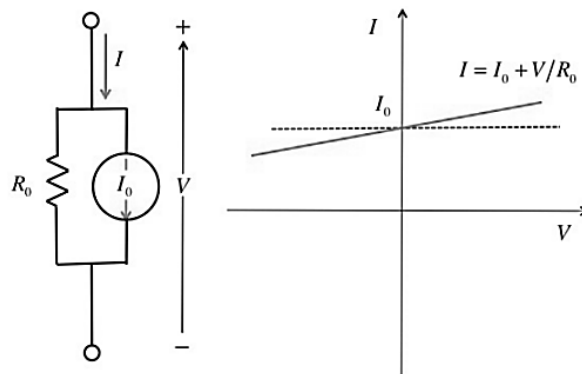


Рис. 5 – Вольт-амперная характеристика источника тока. Когда ток не зависит от напряжения, его величина постоянна I_0 (пунктирная линия). В реальных источниках тока наблюдается зависимость его от напряжения, что эквивалентно включению резистора R_0 параллельно источнику тока I_0

Выходные характеристики транзистора выглядят как ВАХ для резистора при небольших значениях V_{DS} и как ВАХ источника тока при больших значениях выходного напряжения V_{DS} .

Выходные ВАХ *n*-MOSFET показаны на рис. 1. Каждая характеристика в этом семействе ВАХ соответствует определенному значению V_{GS} . Для V_{DS} , меньшего некоторого критического значения V_{DSAT} ,

ток пропорционален напряжению. В этой линейной (омической) области транзистор ведет себя как резистор, сопротивление которого определяется входным напряжением V_{GS} .

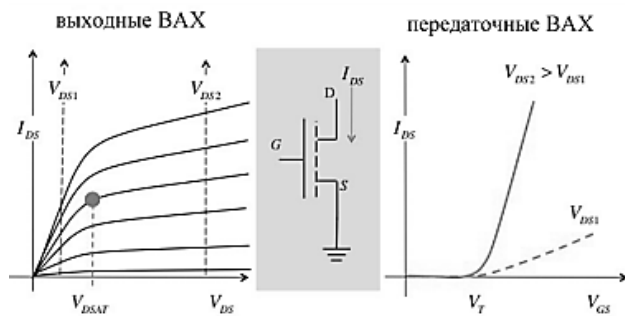


Рис. 6 – Сравнение выходных ВАХ n -MOSFET, включенного по схеме с общим истоком (слева) с передаточными ВАХ этого же транзистора (справа). Кривая V_{DS1} на передаточных ВАХ, соответствует небольшому значению V_{DS} на выходных ВАХ слева, а кривая V_{DS2} – большому значению V_{DS}

В области $V_{DS} > V_{DSAT}$ (область насыщения) транзистор ведет себя как источник тока, величина

которого определяется значением V_{GS} . Ток немного увеличивается с ростом V_{DS} , что эквивалентно тому, что этот источник тока характеризуется конечным значением выходного сопротивления r_d .

Третья область функционирования транзистора это допороговая область, для которой V_{GS} меньше некоторого критического значения порогового напряжения V_T . В случае $V_{GS} < V_T$ ток I_{DS} очень небольшой и не виден на линейном участке.

На рис. 6 сравниваются выходные и передаточные ВАХ для n -MOSFET.

Выходные характеристики показаны слева. Зафиксируем небольшое значение V_{DS} , равное V_{DS1} , и прогоним ток I_{DS} по соответствующим значениям V_{GS} . Это нам даст передаточный график V_{DS1} среди передаточных ВАХ справа. Если возьмем большое значение V_{DS} , равное $V_{DS2} > V_{DS1}$, получим передаточную характеристику, помеченную V_{DS2} . Передаточные характеристики показывают, что при $V_{GS} < V_T$ ток I_{DS} очень небольшой.

Результаты, представленные на рис. 6, будут использованы в следующих частях обзора.

Моделювання нанотранзисторів: будова MOSFET

Ю.О. Кругляк¹, П.О. Кондратенко², Ю.М. Лопаткін³

¹ Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016 Одеса, Україна

² Національний авіаційний університет, пр.Космонавта Комарова, 1, 03058 Київ, Україна

³ Сумський державний, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

Пропонується огляд, який складається з декількох частин з даної тематики і завданням якого є обговорення фізичних моделей і принципів, що лежать в основі функціонування нанорозмірних MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – МОП / МДП-транзистор з ізолюваним затвором) і засновані як на звичному традиційному підході «зверху – вниз», так і на більш сучасному підході, що бере свій початок ще в роботах Рольфа Ландауера, який запропонував модель пружного резистора задовго до її експериментального підтвердження в нанопровідниках, а також Супріє Датта і Марка Лундстрема, які переосмислили цю модель і надали їй нинішнього звучання і довели застосовність її до електронних пристроїв як наноскопічних, так і мікро- і макроскопічних довільної розмірності 1D, 2D і 3D і працюючих в балістичному, квазібалістичному і дифузійному режимах. Перша частина присвячена фізичній структурі і вольт-амперним характеристикам MOSFET

Ключові слова: Наноелектроніка, Польовий транзистор, Вольт-амперні характеристики.

Modeling of Nanotransistors: Device of MOSFET

Yu.A. Kruglyak¹, P.O. Kondratenko², Yu.M. Lopatkin³

¹ Odessa State Environmental University, 15, Lviv Str., 65016 Odessa, Ukraine

² National Aviation University, 1, Komarov Ave., 03058 Kyiv, Ukraine

³ Sumy State University, 2, Rymskiy-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

It is offered a review, which consists of several parts on the subject and whose task is to discuss the physical models and principles underlying the functioning of nanoscale MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) and based both on the traditional «top – down» approach and on a more modern approach originating in the works of Rolf Landauer who proposed the model of an elastic resistor long before its experimental confirmation in nanoconductors, as well as of Suprio Datta and Mark Lundstrom, who rethought this model and gave it the current sound and proved its applicability to electronic devices as nanoscopic, and micro- and macroscopic with arbitrary dimensions of 1D, 2D and 3D and operating in ballistic, quasi-ballistic and diffusion modes. The first part is devoted to the physical structure and current-voltage characteristics of MOSFET.

Keywords: Nanoelectronics, Field effect transistor, Current-voltage characteristics.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bo Lojek, *History of Semiconductor Engineering* (New York: Springer: 2007).
2. M. Lundstrom, *Science* **299**, 210 (2003).
3. Y. Tsividis, C. McAndrew, *Operation and Modeling of the MOS Transistor* (New York: Oxford Univ. Press: 2011).
4. Y. Taur, T. Ning, *Fundamentals of Modern VLSI Devices* (New York: Oxford Univ. Press: 2013).
5. Z. Ren, R. Venugopal, S. Goasguen, S. Datta, M.S. Lundstrom, *IEEE T. Electron Dev.* **50**, 1914 (2003).
6. Yu.A. Kruglyak, *Rus. Phys. Chem. A* **88**, 1826 (2014).
7. S. Datta, *Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport* (Singapore: World Scientific: 2012).
8. Yu.A. Kruglyak, P.A. Kondratenko, Yu.M. Lopatkin, *J. Nano- Electorn. Phys.* **5** No 1, 01023 (2013).
9. S. Datta, *Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport – Part B: Quantum Transport* (Singapore: World Scientific: 2018).
10. M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018).
11. K.Ng. Kwork, *Complete Guide to Semiconductor Devices* (New York: Wiley Interscience: 2002).