



НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Авторы: В. В. Вьюрков, А. А. Орликовский

НАНОЭЛЕКТРОНИКА, область электроники, включающая создание приборов и устройств на основе твердотельных низкоразмерных структур с миним. размерами элементов менее 100 нм, что обеспечивает их улучшенные характеристики и/или новые функциональные возможности. Принципиальное отличие приборов Н. заключается в их «квантовости»; на их свойства оказывают влияние квантовые явления: квантовые размерные эффекты, туннелирование, кулоновская блокада, волновые свойства частиц, их интерференция и др.

Становление наноэлектроники

Н. является естеств. развитием [микроэлектроники](#), возникновение которой связывают с изобретением [интегральной схемы](#) (ИС). В соответствии с эмпирич. законом Мура в 1999 технология микроэлектроники преодолела рубеж миним. размеров (MP) 100 нм, что положило начало становлению пром. Н. на основе кремния. Это стало возможным благодаря прогрессу в оптич. литографии (см. [Фотолитография](#)), а именно – созданию т. н. степперов-сканеров с эксимерным лазером на метастабильных молекулах ArF с длиной волны 193 нм, что обеспечивало пространственное разрешение до 50 нм. Дальнейшее продвижение в область нанометровых размеров стимулировало появление иммерсионных степперов-сканеров, которыми оснащены самые передовые произ-ва (позволяют достичь разрешения 20 нм и менее). Большие перспективы открывает создание литографич. проекционных установок с лазероплазменными источниками на длинах волн 13,5 и (в дальнейшем) 6,7 нм, что, по всей вероятности, позволит реализовать пространственное разрешение 15–5 нм. Накопленный технологич. и интеллектуальный потенциал микроэлектроники дал импульс к развитию, помимо Н., целого ряда новых смежных направлений: микро- и наноэлектромеханики, молекулярной Н. и др.

Важную роль в становлении Н. сыграли пионерские работы 1950–60-х гг. У [Шокли](#), Г. [Крёмера](#), Ж. И. [Алфёрова](#) и др. по теории и созданию полупроводниковых гетероструктур. К нач. 1970-х гг. отеч. учёными под рук. Алфёрова созданы низкопороговые гетероструктурные лазеры, высокоэффективные светодиоды, солнечные элементы на гетероструктурах, гетероструктурные биполярные транзисторы и тиристоры. Стремительное развитие физики и технологии гетероструктурных приборов стимулировало появление новых прецизионных методов получения гетероструктур (молекулярно-пучковой эпитаксии, газофазной эпитаксии из паров металлоорганич. соединений и их модификаций), применение которых позволило создать низкоразмерные (с толщиной отд. слоёв менее 100 нм) гетероструктуры с двумерным (2D) электронным газом, сверхрешётками, одномерными (1D) квантовыми проводами, нульмерными (0D) квантовыми точками, а также качественно новые приборы на их основе. Это низкопороговые (приблизительно до 20 A/cm^2) и термостабильные лазеры и фотоприёмники с квантовыми точками, квантовые каскадные лазеры, сверхскоростные транзисторы с двумерным электронным газом, туннельно-резонансные диоды и др. Таким образом, нач. 1970-х гг. можно считать рождением гетеропереходной Н. и нового раздела физики твёрдого тела – физики низкоразмерных структур. Исследования наноструктур сопровождались крупными открытиями: в 1980 К. фон [Клитцингом](#) – эффекта квантования холловского сопротивления двумерного электронного газа в структуре кремниевого полевого транзистора в сильных магнитных полях и при низких темп-рах; в 1982 Д. [Цуи](#) и Х. [Стормером](#) – дробного эффекта Холла в гетероструктурах на основе GaAs (см. [Квантовый эффект Холла](#)).

В 1987 Т. А. Фултон и Г. Дж. Долан (Bell Laboratories, США) создали первый одноэлектронный транзистор и наблюдали эффект кулоновской блокады при низких темп-рах. Впервые о возможности создания одноэлектронных транзисторов на основе кулоновской блокады сообщили в 1986 рос. учёные К. К. Лихарев и Д. В. Аверин. В 1996 создан первый в мире одноэлектронный молекулярный нанокластерный транзистор, работающий при комнатной темп-ре (С. П. Губин, В. В. Колесов, Е. С. Солдатов и др.).

В кон. 1980-х гг. А. Фер (Франция) и П. Грюнберг (Германия) открыли эффект гигантского магнитосопротивления (Нобелевская пр., 2007). Магниточувствит. элементы на основе магниторезистивных наноструктур используются в считывающих магнитных головках в системах записи на жёсткие диски. Ведутся интенсивные разработки новых видов памяти, в частности магнитной оперативной памяти (MRAM) на магниторезистивных элементах, а концепции спинового транспорта, спиновой инжекции, спиновых поляризаторов и анализаторов легли в основу нового научно-технич. направления – спинтроники.

К сер. 1980-х гг. относится серия открытий углеродных наноструктур. В 1985 Р. Кёрл, Х. Крото и Р. Смолли обнаружили полиэдрические кластеры углерода, получившие назв. фуллеренов, в т. ч. молекулы

С и C_{60} (Нобелевская пр., 1996). Обнаружены также т. н. высшие фуллерены, C_{70} содержащие большее число атомов углерода (от 74 до 400), которые образуются в значительно меньших количествах и, как правило, имеют довольно сложный изомерный состав. Кристаллич. фуллерены (фуллериты) и плёнки представляют собой полупроводники с шириной запрещённой зоны 1,2–1,9 эВ, обладающие фотопроводимостью. При облучении видимым светом электрич. сопротивление фуллерита уменьшается. Фотопроводимостью обладают и разл. смеси чистого фуллерита с др. веществами. Фуллерены в кристаллах характеризуются относительно невысокими энергиями связи, поэтому уже при комнатной темп-ре в таких кристаллах наблюдаются фазовые переходы, приводящие к ориентационному разупорядочению и размораживанию вращения молекул фуллеренов. Кристаллы

C_{60} , легированные атомами щелочных металлов, обладают металлич. проводимостью и переходят в сверхпроводящее состояние в диапазоне от 19 до 55 К (в зависимости от типа щелочного металла). Ещё более высокая темп-ра сверхпроводящего перехода (вплоть до 100 К) ожидается для сверхпроводников на основе высших фуллеренов. К 2010-м гг. фуллериты не нашли применения в устройствах Н., но исследования возможности использования фуллеренов продолжаются.

Большой интерес вызвало наблюдение в 1991 япон. учёным С. Ииджимой углеродных нанотрубок (УНТ), состоящих из свёрнутых в трубку гексагональных графитовых

плоскостей, заканчивающихся обычно полусферич. головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена. В зависимости от строения нанотрубки могут обладать металлич. или полупроводниковой проводимостью, что предопределяет широкий диапазон их возможных применений в нанoeлектронике.

Важным науч. достижением стало открытие графена – двумерной аллотропной модификации углерода, образованной слоем атомов углерода толщиной в один атом, соединённых посредством

sp^2 -связей в гексагональную двумерную кристаллич. решётку (К. [Новосёлов](#) и А. Гейм; Нобелевская пр., 2010). Графен можно представить как одну плоскость графита, отделённую от объёмного кристалла. По оценкам, он обладает большой механич. жёсткостью и хорошей теплопроводностью (ок. 1 ТПа и $5 \times 10^3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ соответственно). Высокая подвижность носителей заряда делает графен перспективным материалом для нанoeлектроники.

Элементная база и перспективы развития

Технологии Н. не только существенно улучшили характеристики приборов микроэлектроники, но и позволили создать новые типы приборов с уникальными свойствами. В Н. элементной базой аналоговых и цифровых ИС обработки информации и памяти являются нанотранзисторы. По мере уменьшения МР меняется не только конструкция транзисторов, но и представление о том, как они работают. Представления о процессах, происходящих в транзисторе, радикально меняются, когда размер его активной области становится равным 10–50 нм, т. е. сравнимым с дебройлевской длиной волны носителей заряда. В этом случае активная область транзистора ведёт себя как волновод, и для его описания используется волновое уравнение Шрёдингера. Такой транзистор становится квантовым, хотя на внешних электродах измеряются классич. величины – сила тока и напряжение.

Кремниевый полевой нанотранзистор остаётся осн. элементом сверхбольших ИС. Однако в области МР менее 100 нм структура транзистора претерпевает изменения. Уменьшение длины канала транзистора на объёмной подложке требует увеличения степени легирования канала, что приводит к спаду подвижности электронов и дырок

из-за рассеяния на атомах примеси, а следовательно, к снижению тока транзистора в открытом состоянии и быстродействия ИС. Для увеличения подвижности применяют напряжённые кремниевые слои. Изучаются возможности создания встроенных каналов на твёрдых растворах

Ge–Si,

Ge, а также на основе материалов с высокой подвижностью электронов (напр., InAs). Эти приёмы значительно усложняют технологию, поэтому для каналов длиной ок. 20 нм и менее безальтернативной становится конструкция транзистора в тонком (до 10 нм) нелегированном слое «кремния-на-изоляторе» (КНИ). Электрон распространяется в таком канале, как волна Де Бройля, которая интерферирует и рассеивается на случайных атомах примеси и шероховатостях границы с диэлектрич. слоями, что приводит к разбросу (в допустимых пределах) характеристик транзистора. Считается, что именно КНИ-транзисторы будут основой ультрабольших ИС (УБИС) вплоть до 2020 (при этом длина канала достигнет 6 нм). Предельные рабочие частоты таких транзисторов лежат в терагерцевом диапазоне, но быстродействие процессорных УБИС ограничено потребляемой кристаллом мощностью, которая пропорциональна тактовой (рабочей) частоте и выделяется в виде джоулева тепла, поэтому должна быть отведена от кристалла. Известны способы отвода тепла, позволяющие отвести до 400 Вт от 1 см² площади кристалла. Даже в этом случае макс. тактовая частота процессорных УБИС не превышает по порядку величины 1 ГГц. Поэтому их производительность увеличивают архит. методами (многоядерные процессоры). При уменьшении длины канала (5 нм и менее) растёт ток прямого туннелирования между истоком и стоком, который может достигать 10⁻⁶ А на 1 мкм ширины канала, что на три порядка превышает ток термоэлектронной эмиссии и увеличивает потребляемую кристаллом мощность ещё на 700–800 Вт.

Возможной перспективой развития кремниевого полевого транзистора является транзистор с контактами Шоттки, работа которого основана на управлении туннельным током контактов истока и стока с помощью напряжения на затворе. В структуре отсутствуют легированные области, что обеспечивает баллистич. (без рассеяния) перенос носителей в канале. Кроме того, транзистор может обладать

высокой подпороговой крутизной, что позволяет снизить рабочее напряжение. Эти обстоятельства обуславливают возможность увеличения быстродействия транзистора в схемах и снижения энергопотребления.

Полевые транзисторы на основе УНТ. Интерес к применению нанотрубок в электронике обусловлен гл. обр. очень высокой подвижностью носителей заряда, которая при комнатной темп-ре на два порядка превышает подвижность в объёмном нелегиров. монокристаллич. кремнии и составляет $10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Осн. проблемы, связанные с разработкой полевых транзисторов на основе УНТ: формирование нанотрубок заданных размеров и свойств в определённых местах структуры; обеспечение высокопроводящего (омического) контакта с электродами истока и стока; создание огибающего затвора с узкой диэлектрич. прослойкой. Из-за малого диаметра нанотрубки обладают исключительно высокой полевой эмиссией. Первые исследования эмиссионных свойств нанотрубок выполнены под рук. Ю. В. [Гуляева](#) в 1994.

Полевые транзисторы на основе графена и его модификаций интенсивно исследуются. В графене электроны образуют двумерный электронный газ с концентрацией ок. 10^{12} см^{-2} . В «подвешенном» графене, как и в нанотрубках, обнаружена высокая подвижность носителей – ок. $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при комнатной темп-ре. Это открывает перспективу использования графена в транзисторах для сверхбыстродействующих аналоговых схем. Применение графена в логич. схемах представляется проблематичным ввиду отсутствия у него запрещённой зоны и, как следствие, низкого отношения тока в открытом состоянии транзистора к току в закрытом состоянии при комнатной темп-ре. Имеются разл. предложения по «созданию» запрещённой зоны: она возникает в двуслойном графене, в графене, насыщенном водородом, а также в узких полосках графена.

Важным достижением [нанотехнологии](#) явилось формирование слоя графена на подложке карбида кремния (SiC), с которым он имеет близкую кристаллич. структуру. Однако в эпитаксиальном графене наблюдается значит. снижение подвижности носителей, вызванное дефектами границы. Высокую подвижность удаётся наблюдать в верхних слоях

многослойного графена, выполненного в виде сочетания отд. слоёв, слегка повернутых по отношению к соседним. Возможно, графен найдёт и др. применения (напр., в оптоэлектронике). Отсутствие запрещённой зоны в графене позволяет создать на его основе приёмники и источники терагерцевого излучения.

В гетеропереходных полевых транзисторах (др. принятое назв. – транзисторы с высокой подвижностью электронов, ТВПЭ) канал формируется на границе раздела двух полупроводниковых слоёв с разной шириной запрещённой зоны, выращенных на полуизолирующей подложке. На границе между слоями образуется узкая потенциальная яма, в которую «сваливаются» свободные электроны, образуя двумерный электронный газ (ДЭГ). Подвижность электронов в ДЭГ достигает высоких значений, т. к. атомы примеси, поставляющие электроны, пространственно отделены от ДЭГ. Созданные в 2010 ТВПЭ с рекордно высокой рабочей частотой (2,5 ТГц) находят широкое применение в СВЧ ИС для мобильных телефонов, спутниковой аппаратуры, радаров, радиотелескопов и др.

Гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ). Замена гомоперехода «эмиттер – база» на гетеропереход в структуре биполярного транзистора привела к значит. улучшению его характеристик, а именно – к увеличению коэф. усиления по току и мощности и существенному повышению быстродействия (разработаны ГБТ с усилением по току на частотах св. 600 ГГц). ГБТ создаются на соединениях

A В и твёрдых растворах

$\text{Ge}^{\text{III}}\text{--Si}^{\text{V}}$. Разработана также технология гетеропереходных т. н. БиКМОП ИС

(совмещающих биполярные и комплементарные МОП-транзисторы с

n- и

p-каналами) на твёрдых растворах

Ge--Si .

Резонансно-туннельные приборы используют волновую природу носителей заряда и фактически являются аналогами оптич. приборов. Резонансно-туннельные диоды (РТД) создаются методами молекулярно-пучковой эпитаксии так, что в них образуются два узких потенциальных барьера, разделённых квантовой ямой. Если энергия налетающего электрона совпадает с энергией уровня электрона в яме между

барьерами, то происходит значит. увеличение прозрачности структуры. РТД обладает N -образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Наличие на ВАХ области с отрицательной дифференциальной проводимостью позволило использовать РТД в схемах генераторов и получить генерацию на частотах до 700 ГГц. РТД является двухполюсником, что создаёт определённые трудности при построении на основе этих диодов линейных и цифровых схем. Предприняты усилия к созданию резонансно-туннельных транзисторов (РТТ). Напр., для создания РТТ в структуру биполярного транзистора вместо эмиттерного p - n -перехода встраивается РТД. В др. конструкции РТД объединяется с полевым транзистором с затвором Шоттки и реализуется в виде планарной (в плоскости подложки) структуры. Такой РТТ получил применение в сверхскоростных ИС небольшой степени интеграции ($\sim 10^3$ приборов) в спец. аппаратуре.

Работа одноэлектронного транзистора (ОТ) основана на эффекте кулоновской блокады. ОТ состоит из центр. островка, связанного туннельными контактами с истоком и стоком; потенциал островка управляется напряжением на затворе. В условиях кулоновской блокады электрон не может перейти из истока на островок, транзистор закрыт. ОТ обладает высоким собств. быстродействием (десятки ТГц). Для его переключения в открытое состояние необходимо переместить всего один электрон на центр. островок. Соответствующая энергия переключения равна тепловой энергии электрона, что составляет 10^{-8} Дж при комнатной темп-ре. Однако цифровые схемы на основе ОТ имеют фундам. ограничение на быстродействие, поскольку для проявления эффекта кулоновской блокады необходимо, чтобы сопротивление туннельных контактов было гораздо больше т. н. кванта сопротивления (13,6 кОм). Именно это приводит к относительно большим временам перезаряда ёмкостей транзистора.

Выдвинуты идеи создания интерференционных, спиновых и молекулярных нанотранзисторов, которые, как и одноэлектронные транзисторы, пока не получили применения в нанoeлектронике.

Работа интерференционных транзисторов (ИТ) основана на управлении интерференцией носителей тока в канале потенциалами внешних электродов.

Практич. интерес к ИТ вызван возможностью уменьшения энергии переключения транзистора из открытого состояния в закрытое. В обычных полевых транзисторах, в которых происходит управление током термоэмиссии, энергия переключения в расчёте на один электрон не может быть меньше тепловой энергии

kT (

k – постоянная Больцмана,

T – температура). В экспериментах наблюдают управление интерференцией с помощью электрич. поля, но малое отношение тока ИТ в открытом состоянии к току закрытого состояния пока не позволяет говорить о его практич. применении.

Возможной перспективой является использование в ИТ углеродных

У-образных нанотрубок.

Спиновые полевые транзисторы изобретены амер. учёными С. Даттой и Б. Дасом в 1990. В результате спин-орбитального взаимодействия, управляемого напряжением затвора, происходит прецессия спинов электронов, пролетающих в канале транзистора. Ожидаемая практич. польза от применения спиновых транзисторов – уменьшение энергии переключения, поскольку на прецессию не тратится энергия. В предложенном транзисторе используется особый вид спин-орбитального взаимодействия, рассмотренный отеч. физиками Ю. А. Бычковым и Э. И. Рашбой в 1984. Пока надежды, связанные со спиновым транзистором (а именно – сочетание низкого управляющего напряжения, малого энергопотребления и высокого быстродействия), не реализованы. Возможно, в будущем будут созданы наноструктуры, обладающие существенно более сильным спин-орбитальным взаимодействием. Кроме того, необходимо создать инжектор спинового тока и спиновый фильтр с эффективностью, близкой к 100%.

В молекулярных транзисторах в качестве канала используются молекулы или атомы, которые являются идеальными объектами с точки зрения воспроизводимости их размеров и структуры. Однако применение молекулярных транзисторов в нанoeлектронных схемах пока сталкивается с проблемой формирования надёжных электрич. контактов к молекулам.

В качестве альтернативы транзисторной Н. развиваются иные архитектуры ИС для

процессоров. Это, напр., т. н. «кросс-бар» архитектура, разработанная в амер. компании «Hewlett- Packard» в 2001. «Кросс-бар» матрица состоит из двух взаимно перпендикулярных наборов параллельных нанопроводников, разделённых мономолекулярным слоем, сопротивлением которого можно управлять с помощью электр. сигналов. В местах пересечений матрицы образуются т. н. молекулярные ключи, которые должны находиться в установленных состояниях с большим или малым сопротивлением сколь угодно долго при отключённом напряжении питания. В качестве таких молекулярных переключателей изучаются мономолекулярные слои [ротаксанов](#). Предлагается использовать также переключатели на Ag₂S (формирование и разрушение серебряных перемычек), на тонких сегнетоэлектрич. плёнках и др. Такие переключатели названы мемристорами (memory resistor), т. е. наноэлементами, сохраняющими состояния с высоким или низким сопротивлением. Кросс-бар матрицы в зависимости от кодировки могут выполнять сложные логич. функции (напр., полусумматора). Для управления ими следует использовать КМОП-вентили, причём количество вентилях в процессоре существенно сокращается по сравнению с числом вентилях в КМОП-процессорах, что может дать существенную экономию в потребляемой процессором мощности. Хотя такие архитектуры известны давно, исследования в этом направлении на нанотехнологич. уровне могут привести к созданию новых типов наноэлектронных устройств обработки и хранения информации (в т. ч. нейронных) с низкой потребляемой мощностью.

Твердотельные наноструктуры для квантовых компьютеров. Если действие закона Мура продлить вплоть до 2030, то достижимый МР станет равным размеру одного атома. Это означает, что нанотехнологии достигнут моноатомного уровня и позволят создавать полномасштабные [квантовые компьютеры](#) (КК) на основе твердотельных наноструктур. Ведутся исследования твердотельных кубитов с использованием ядерного спина (

$$I = 1/2)$$

$$P^{31} \text{ или}$$

$$Si^{29} \text{ в «бесспиновом» (}$$

$$I = 0)$$

S^{28} , спина электрона и ядерного спина в

NV -центре (атом азота – вакансия) в алмазе, с использованием спиновых и орбитальных электронных состояний в квантовых точках и квантовых нитях и др.

Реализация таких наноструктур требует применения литографии с пространственным разрешением менее 5–10 нм, одноионной имплантации и др. прецизионных процессов, что в будущем непременно будет достигнуто.

Использование твердотельных структур пониженной размерности в транзисторах на ультратонком КНИ, туннельно-резонансных, одноэлектронных и др., в гетеропереходных лазерах и фотоприёмниках с квантовыми точками (см. [Нанолазер](#)) – это начальная стадия развития Н., и крупные достижения ещё впереди. Н. совершит переворот в вычислит. технике, в т. ч. в суперкомпьютерах, средствах телекоммуникаций, системах управления, энергетике и во многих др. областях человеческой деятельности.

Литература

Лит.: Hanson G. W. Fundamental of Nanoelectronics. Upper Saddle River, 2008;

Нанoeлектроника / Под ред. А. А. Орликовского. М., 2009. Ч. 1: Введение в

нанoeлектронику; Базовые лекции по электронике / Под ред. В. М. Пролейко. М., 2010.

Т. 2: Твердотельная электроника.

Processing math: 100%