

## NANOELECTRONICS – BASIS OF INFORMATION SYSTEMS FOR THE XXI CENTURY

V. E. BORISENKO

*Scientific background and promotion of nanoelectronics as a new branch in modern electronics are presented and discussed with the emphasis on the development achieved and prospects for novel generations of information systems.*

**Обсуждаются научные предпосылки становления нового направления в современной электронике – наноэлектронике, его основные достижения и перспективы использования для создания новых поколений информационных систем.**

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА – ОСНОВА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ XXI ВЕКА

В. Е. БОРИСЕНКО

Белорусский государственный университет  
информатики и радиозлектроники, Минск

### ВВЕДЕНИЕ

Наноэлектроника является новой областью науки и техники, формирующейся сегодня на основе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии и технологии полупроводниковой электроники. Ее содержание определяется необходимостью установления фундаментальных закономерностей, определяющих физико-химические особенности формирования наноразмерных структур (структур с размером от единиц до десятков нанометров,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), их электронные и оптические свойства. Исследования в области наноэлектроники важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации.

Понятие “информационные системы” включает все устройства, обеспечивающие получение, обработку и передачу информации. Это различные датчики, преобразующие внешние воздействия (звук, изображение в виде светового поля различной локальной интенсивности, давление, температура, химический состав среды и др.) в электрические сигналы, это электронные системы преобразования и обработки этих сигналов на основе компьютерной техники и, наконец, это средства радиосвязи и телекоммуникаций. Информация в этих системах дается либо в виде непрерывного электрического сигнала – аналоговая форма кодирования информации, либо в виде последовательности электрических импульсов – цифровая форма кодирования. При аналоговом кодировании необходимая информация представляется соответствующей амплитудой или частотой колебаний непрерывного электрического сигнала. В цифровой форме информация выражается в виде двоичного кода, задаваемого электрическим импульсом, для которого логическому состоянию “0” соответствует отсутствие электрического напряжения (или тока), а состоянию “1” – его наличие. Цифровые коды благодаря хорошей защищенности от ошибок и помех, высоким скоростям обработки в вычислительных системах и высокой плотности передачи по каналам связи получили преимущественное распространение в современных информационных системах. Их основным элементом является электронный прибор с

двумя устойчивыми электрическими состояниями, соответствующими логическому 0 и 1. Типичные конструкции таких приборов и их эволюция по мере развития электроники показаны на рис. 1. Простейшим из них является механический ключ, который, размыкая и замыкая электрическую цепь, реализует два названных логических состояния.

Первым электронным переключающим прибором был вакуумный диод, запатентованный в 1904 году англичанином Д.А. Флемингом. С тех пор развитие электроники отмечено изобретением и практическим освоением вакуумного триода (1906 год, Л. Де Форест и Р. Либен) и полупроводникового транзистора (1947 год, У. Браттейн, Дж. Бардин, У. Шокли), а затем интегральных микросхем на кремнии (1958–1959 годы), положившим начало новому направлению в электронике – микроэлектронике. Главной тенденцией этого развития является уменьшение размеров приборных структур. В современных интегральных микросхемах они составляют единицы и десятые доли микрона ( $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ).

По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области ( $1 \text{ нм} = 0,001 \text{ мкм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), а это образования из единиц и десятков атомов, все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими

становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой – открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных систем. Последние и являются основным объектом исследований и разработок новой области электроники – наноэлектроники, зародившейся в 80-х годах нашего века.

Прежде чем перейти к современным достижениям наноэлектроники, кратко рассмотрим квантовые эффекты, лежащие в основе информационного функционирования наноразмерных элементов. Поскольку для кодирования информации мы должны иметь возможность управлять переносом электронов в таком элементе, выделим лишь те квантовые эффекты, которые влияют на этот процесс.

## КВАНТОВЫЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

С позиций квантовой механики электрон может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. Распространение этой волны в наноразмерных твердотельных структурах

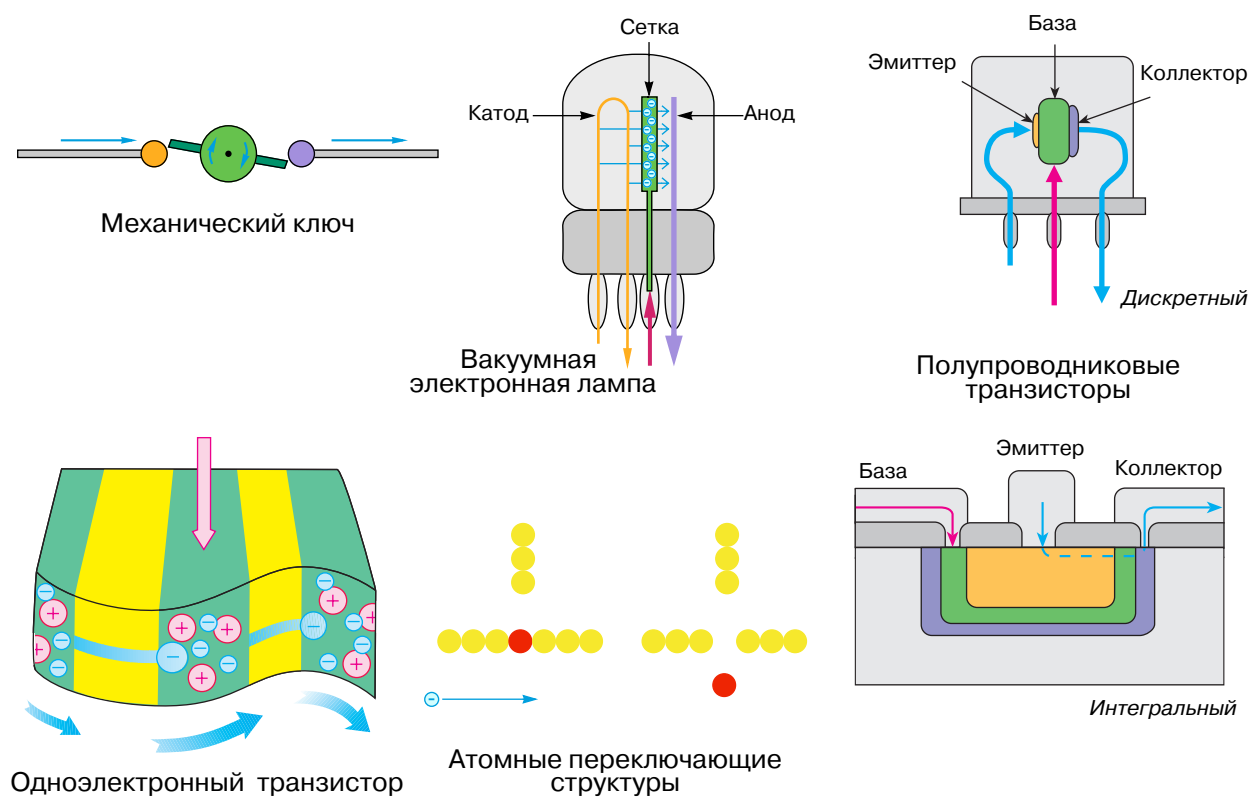


Рис. 1. Элементы информационных систем

контролируется эффектами, связанными с квантовым ограничением, интерференцией и возможностью туннелирования через потенциальные барьеры.

### Квантовое ограничение

Волна, соответствующая свободному электрону в твердом теле, может беспрепятственно распространяться в любом направлении. Ситуация кардинально меняется, когда электрон попадает в твердотельную структуру, размер которой  $L$ , по крайней мере в одном направлении, ограничен и по своей величине сравним с длиной электронной волны. Классическим аналогом такой структуры является струна с жестко закрепленными концами. Колебания струны могут происходить только в режиме стоячих волн с длиной волны  $\lambda_n = 2L/n$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Аналогичные закономерности поведения характерны и для свободного электрона, находящегося в твердотельной структуре ограниченного размера или области твердого тела, ограниченной непроницаемыми потенциальными барьерами. На рис. 2 такая ситуация проиллюстрирована на примере квантового шнура, у которого ограничены размеры сечения  $a$  и  $b$ . В этих направлениях возможно распространение только волн с длиной, кратной геометрическим размерам структуры. Разрешенные значения волнового вектора для одного направления задаются соотношением  $k = 2\pi/\lambda_n = n\pi/L$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $L$  в соответствии с рис. 2 может принимать значения, равные  $a$  или  $b$ . Для соответствующих им электронов это означает, что они могут иметь только определенные фиксированные значения энергии, то есть имеет место дополнительное квантование энергетических уровней. Это явление получило название квантового ограничения. Вдоль же шнура могут двигаться электроны с любой энергией.

Запирание электрона с эффективной массой  $m^*$ , по крайней мере в одном из направлений, в соответствии с принципом неопределенности приводит к увеличению его импульса на величину  $\hbar/L$ . Соответственно увеличивается и кинетическая энергия электрона на величину  $\Delta E = \hbar^2 k^2 / 2m^* = (\hbar^2 / 2m^*) (\pi^2 / L^2)$ . Таким образом, квантовое ограничение сопровождается как увеличением минимальной энергии запятого электрона, так и допол-

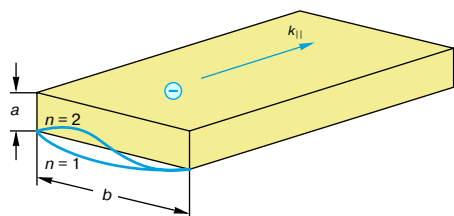


Рис. 2. Возможности для движения электронов в квантовоограниченной наноразмерной структуре

нительным квантованием энергетических уровней, соответствующих его возбужденному состоянию. Это приводит к тому, что электронные свойства наноразмерных структур отличаются от известных объемных свойств материала, из которого они сделаны.

### Интерференционные эффекты

Взаимодействие электронных волн в наноразмерных структурах как между собой, так и с неоднородностями в них может сопровождаться интерференцией, аналогичной той, которая наблюдается для световых волн. Отличительная особенность такой интерференции состоит в том, что благодаря наличию у электронов заряда имеется возможность управлять ими с помощью локального электростатического или электромагнитного поля и таким образом влиять на распространение электронных волн.

### Туннелирование

Уникальным свойством квантовых частиц, в том числе и электронов, является их способность проникать через преграду даже в случаях, когда их энергия ниже потенциального барьера, соответствующего данной преграде. Это было названо туннелированием. Схематически оно представлено на рис. 3. Будь электрон классической частицей, обладающей энергией  $E$ , он, встретив на своем пути преграду, требующую для преодоления большей энергии  $U$ , должен был бы отразиться от этой преграды. Однако как волна он хотя и с потерей энергии, но проходит через эту преграду. Соответствующая волновая функция, а через нее и вероятность туннелирования рассчитываются из уравнения Шрёдингера

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\Psi}{dx^2} = (E - U)\Psi(x).$$

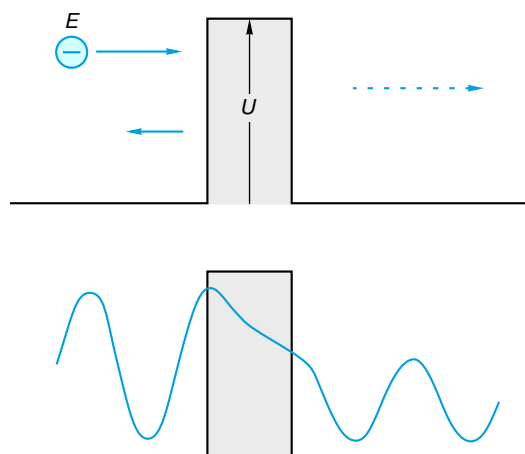


Рис. 3. Туннелирование электрона с энергией  $E$  через потенциальный барьер высотой  $U$ ,  $U > E$

Эта вероятность тем выше, чем геометрически тоньше барьер и меньше разница между энергией падающего электрона и высотой барьера.

Квантовое ограничение, проявляясь в наноразмерных структурах, накладывает специфический отпечаток и на туннелирование. Так, квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, периодически расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер, то есть туннельно просочиться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией.

Другим специфическим проявлением квантового ограничения является одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады (рис. 4). Чтобы объяснить этот термин, рассмотрим иллюстрируемый рис. 4 пример прохождения электроном структуры металл–диэлектрик–металл. В качестве наглядной иллюстрации параллельно проводится аналогия с каплей, отрывающейся от края трубки. Первоначально граница раздела между металлом и диэлектриком электрически нейтральна. При приложении к металлическим областям потенциала на этой границе начинает накапливаться заряд. Это продолжается до тех пор, пока его величина не окажется достаточной для отрыва и туннелирования через диэлектрик одного электрона. После акта туннелирования система возвращается в первоначальное состояние. При сохранении внешнего приложенного напряжения все повторяется вновь. Таким образом, перенос заряда в такой структуре осуществляется порциями, равными заряду одного электрона. Процесс же накопления заряда и отрыва электрона от границы металла с диэлектриком определяется балансом сил кулоновского взаимодействия этого электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в металле.

Рассмотренные квантовые явления уже используются в разработанных к настоящему времени нанoeлектронных элементах для информационных систем. Однако следует подчеркнуть, что ими не исчерпываются все возможности приборного применения квантового поведения электрона. Активные поисковые исследования в этом направлении продолжают и сегодня.

### НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В транзисторах на квантовых эффектах волновая природа электронов и соответствующие явления становятся основополагающими в их работе. Это достигается в полупроводниковых структурах с размерами, уменьшенными до 10 нм и ниже. Одними из первых появились элементы на резонансном туннелировании. Явление резонансного туннелирования было впервые описано в 1958 году японским исследователем Л. Исаки и детально исследовалось им до 1974 года. Однако всестороннее теоретическое

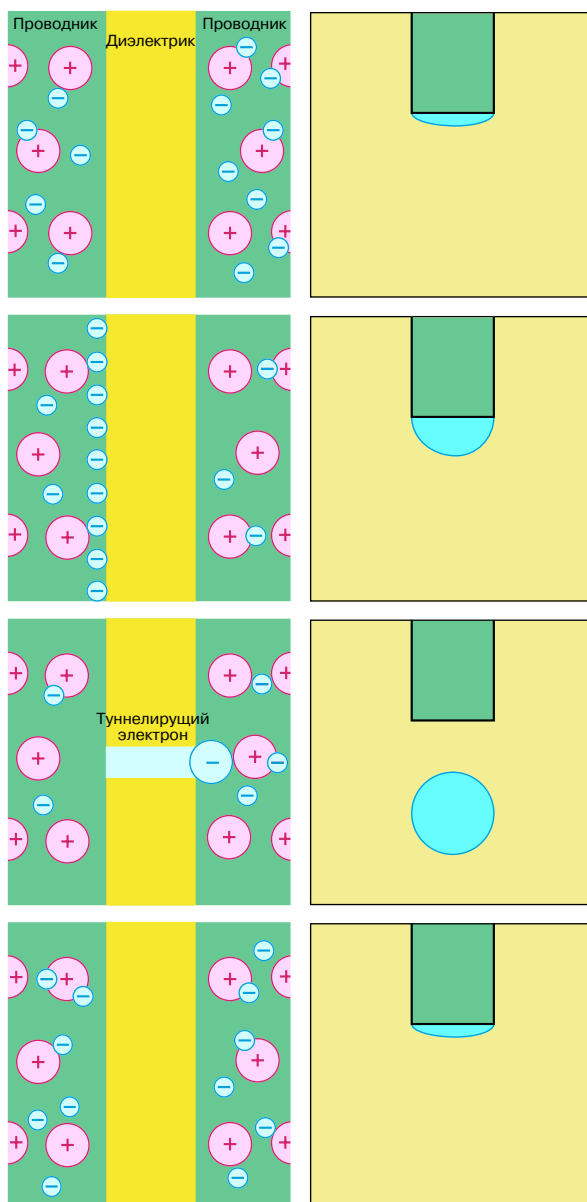


Рис. 4. Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады

обоснование и экспериментальные транзисторы на резонансном туннелировании появились лишь в начале 90-х годов. Транзисторы на резонансном туннелировании представляют собой двухбарьерный диод на квантовых ямах, у которого потенциал и соответствующие резонансные условия контролируются третьим электродом. Эти транзисторы имеют частоты переключения порядка  $10^{12}$  Гц, что в 100–1000 раз выше, чем у самых лучших кремниевых транзисторов из современных интегральных микросхем. Есть предложения по созданию на таких

транзисторах ячеек статической памяти и других элементов для вычислительных систем.

В 1986 году советскими учеными К.К. Лихаревым и Д.В. Авериним, изучавшими одноэлектронное туннелирование, был предложен, а позже и опробован одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады. В его конструкции, состоящей из двух последовательно включенных туннельных переходов (рис. 1), туннелирование индивидуальных электронов контролируется кулоновской блокадой, управляемой потенциалом, приложенным к активной области транзистора, расположенной в его середине между двумя прослойками тонкого диэлектрика. Количество электронов в этой области прибора должно быть не более 10, а желательно и меньше. Это может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 10 нм. В цифровых интегральных схемах на одноэлектронных транзисторах один бит информации, то есть два возможных состояния 0 и 1, может быть представлен как присутствие или отсутствие индивидуального электрона. Тогда однокристалльная схема памяти емкостью  $10^{12}$  бит, что в 1000 раз больше, чем у современных сверхбольших интегральных схем, разместится на кристалле площадью всего  $6,45 \text{ см}^2$ . Над практической реализацией этих перспектив сегодня активно работают специалисты ведущих американских, японских и европейских электронных фирм.

Квантовый интерференционный транзистор, предложенный в 1986 году Ф. Солсом и др., использует эффект фазовой интерференции электронов в вакууме. Прибор состоит из полевого эмиттера, коллектора и сегментированных конденсаторов между ними. Конденсаторы контролируют траектории и фазовую интерференцию электронов в вакууме за счет электростатического потенциала на них. Рабочие частоты этого прибора оцениваются величинами  $10^{11}$ – $10^{12}$  Гц.

В 1993 году японскими учеными (Ю. Вада и др.) было разработано новое семейство цифровых переключающих приборов на атомных и молекулярных шнурах. Базовая ячейка (рис. 1) состоит из атомного шнура, переключающего атома (на рисунке он показан красным цветом) и переключающего электрода. Общий размер такой структуры составляет менее 10 нм, а рабочие частоты оцениваются величинами порядка  $10^{12}$  Гц. Принцип работы атомного реле состоит в следующем. Переключающий атом смещается из атомного шнура электрическим полем, приложенным к переключающему электроду. Реле переходит в выключенное состояние. Теоретически показано, что зазор в атомном шнуре величиной 0,4 нм является достаточным, чтобы прервать продвижение по нему электронов. На предложенной основе разработаны логические элементы НЕ–И и НЕ–ИЛИ, ячейка динамической памяти. Предполагается, что они позволят создать суперком-

пьютер с оперативной памятью  $10^9$  байт на площади  $200 \text{ мкм}^2$ . Для создания атомных реле требуется уникальный сканирующий туннельный микроскоп, обеспечивающий прецизионную манипуляцию атомами. Работы в этом направлении идут успешно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в последние годы наноэлектронные элементы по своей миниатюрности, быстродействию и потребляемой мощности составляют серьезную конкуренцию традиционным полупроводниковым транзисторам и интегральным микросхемам на их основе как главным элементам информационных систем. Уже сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит информации (0 и 1) с помощью одного электрона, локализация которого в пространстве может быть задана одним атомом. Ожидает практического разрешения и идея аналогичных однофотонных элементов. Широкое применение одноэлектронных и однофотонных элементов для создания информационных систем пока сдерживается недостаточной их изученностью, а главное, необходимостью обладать технологией – нанотехнологией, позволяющей конструировать требуемые структуры из отдельных атомов. Такие возможности существуют только в исследовательских лабораториях. Однако современные темпы развития электроники позволяют уверенно прогнозировать промышленное освоение нанотехнологии, а вместе с ней и наноэлектроники уже в начале XXI века.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Likharev K.K., Claeson T. Single Electronics // Sci. Amer. 1992. № 6. P. 50–55.
2. Thornton T.J. Mesoscopic Devices // Rept. Progr. Phys. 1994. Vol. 57. P. 311–364.
3. Borisenko V.E. Nanostructure Based Informatics // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / Ed. V.E. Borisenko et al. Minsk: BSUIR, 1995. P. 246–256.

\* \* \*

Виктор Евгеньевич Борисенко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микроэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, научный руководитель исследовательской лаборатории наноэлектроники и новых материалов. Область научных интересов – электронные и оптические свойства наноразмерных твердотельных структур и полупроводниковых силицидов. Автор более 100 печатных работ, в том числе двух монографий, и 49 изобретений.