

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.382.133+539.23

Полупроводниковые гетероструктуры и квантовые приборы на их основе

А.А.Горбачевич, В.И.Егоркин, В.В.Капаев, Ю.В.Копаев, А.К.Мороча, С.С.Шмелев

Описаны результаты теоретических и экспериментальных работ по исследованию, разработке и созданию базовых элементов нанoeлектроники на основе полупроводниковых гетероструктур. Рассмотрены методы моделирования и проектирования приборных гетероструктур, квантовые аналоги КМОП-вентилей, использующие эффект управляемой передислокации волновой функции в туннельно-связанных квантовых ямах, приборы с акустическим переносом заряда в полупроводниковых гетероструктурах, а также базовые элементы волноводной нанoeлектроники.

В настоящее время полупроводниковые гетероструктуры представляют собой основу многочисленных исследований фундаментальных физических свойств, а также разнообразных приборных приложений [1]. При этом достижения современных технологий широко используются при проведении фундаментальных исследований. Примером может служить целочисленный квантовый эффект Холла, который наблюдается в двумерном электронном газе, образующемся в сформированном МОП-транзисторе в режиме инверсии. С другой стороны, фундаментальные исследования часто приводят к созданию методов и технологий, имеющих важное практическое значение. Так, например, метод селективного легирования полупроводниковых гетероструктур первоначально был разработан в рамках фундаментальных исследований свойств двумерного электронного газа [2], которые впоследствии привели к открытию целочисленного и дробного квантовых эффектов Холла [3]. В настоящее время этот прием используется при создании конструкции практически всех современных гетероструктурных полевых транзисторов. В результате успешного взаимодействия физики и технологии полупроводниковых гетероструктур в короткие сроки достигнута высокая степень их совершенства, что сыграло определяющую роль в развитии таких важных современных направлений экономики, как лазерная техника, СВЧ-техника, электронная техника для систем телекоммуникаций и связи, вычислительных систем, светотехника.

Основной элемент гетероструктуры – гетеропереход, представляющий собой контакт двух химически различных материалов, при котором кристаллическая решетка одного материала без нарушения периодичности переходит в решетку другого материала. На гетеропереходе происходит скачкообразное изменение свойств материала: эффективной массы, ширины запрещенной зоны и положения краев зон (валентной зоны и зоны проводимости в полупроводниках), упругих и фононных характеристик, диэлектрической и магнитной проницаемостей, намагниченности (в магнитных гетероструктурах) и т.д. Практически с каждым из перечисленных свойств связаны конкретные приборные применения гетеропереходов.

© А.А.Горбачевич, В.И.Егоркин, В.В.Капаев, Ю.В.Копаев, А.К.Мороча, С.С.Шмелев, 2005

Гетероструктура может содержать один или несколько гетеропереходов. Согласно принятой в последнее время классификации объекты, один или несколько размеров которых находятся в диапазоне от 1 до 100 нм, относятся к наноструктурам. Например, типичный пример наноструктуры – два близко расположенных гетероперехода. Если энергия носителей заряда (край соответствующей разрешенной зоны) в пространстве между гетеропереходами меньше, чем снаружи, то такая гетероструктура представляет собой квантовую яму, в которой локализованы носители заряда. Масштаб 100 нм соответствует характерной длине волны электрона. Поэтому на таких масштабах сказывается волновая природа носителей заряда и их описание требует использования законов квантовой механики. В частности, в силу ограничения движения носителей заряда (конфайнмента) в направлении роста квантовой ямы их энергетический спектр квантован (размерное квантование). Существенно квантово-механический характер процессов и явлений служит основанием для выделения наноструктур в принципиально новый класс объектов, отличный от макроскопических систем и структур. В реальных полупроводниковых гетероструктурах широкозонную область вблизи гетероперехода часто легируют. При этом объемный заряд ионизированной примеси создает электрическое поле, формирующее узкую квантовую яму в области материала с меньшей шириной запрещенной зоны непосредственно вблизи плоскости гетероперехода. Поэтому даже отдельно взятый такой гетеропереход также представляет собой наноструктуру. В настоящей работе рассмотрены некоторые из возможных путей использования квантово-размерных гетероструктур для создания новых элементов наноэлектроники, исследованных в последние годы в Московском государственном институте электронной техники.

Приборные расчеты, ставящие своей целью оптимизацию конструкции прибора, требуют многократного численного решения уравнений, описывающих гетероструктуру, состоящую из сотен атомных слоев. Уровень развития методов расчета «из первых принципов» еще явно недостаточен для проведения инженерных расчетов. В качестве теоретической основы моделирования и проектирования систем и устройств на базе полупроводниковых гетероструктур повсеместно утвердился более простой метод эффективной массы (МЭМ) или метод огибающей [4, 5]. Этот метод обеспечивает значительную экономию вычислительных ресурсов по сравнению с полуэмпирическими методами, а также методами расчета «из первых принципов». Первоначально МЭМ был разработан для описания медленно меняющихся потенциалов в объемных материалах. Однако, достаточно неожиданно, он оказался применим и для расчета свойств гетероструктур, в которых зонные параметры меняются скачком. Физическая причина такого универсализма длительное время служила предметом дискуссии в литературе и лишь недавно были предложены последовательные схемы вывода уравнений для огибающей в моделях со скачкообразными изменениями параметров [6, 7]. При этом центральное место в приложениях МЭМ к расчетам реальных гетероструктур занимает проблема выбора граничных условий для огибающей функции. В общем случае граничные условия для огибающей не сводятся к требованию непрерывности волновой функции и ее производной. Физический смысл обобщенных граничных условий был подробно изучен в работе [8]. В работах [9, 10] была предложена процедура вывода граничных условий из микроскопической модели, позволяющая определить не только параметры обобщенного граничного условия, но и само положение гетероперехода в рамках МЭМ в элементарной ячейке. Большинство приборных приложений предполагает, что система находится в неравновесных условиях. При моделировании и проектировании приборов на основе полупроводниковых гетероструктур был использован оригинальный программный комплекс, включающий блок самосогласованного решения уравнений

Шредингера и Пуассона в квантовой области во внешних электрическом и магнитных полях, блок решения уравнений дрейфа и диффузии в классических областях и блок сопряжения квантовых и классических областей.

Применение полупроводниковых гетероструктур позволило значительно улучшить параметры и характеристики основного элемента современной микроэлектроники – транзистора. Дополнительные возможности по созданию элементов вычислительных устройств открывает использование туннельно-связанных квантовых ям в канале полевого транзистора. Под воздействием напряжения, приложенного к затвору, носители заряда могут туннельным образом, т.е. быстро, переходить из одной квантовой ямы в другую. Если при этом подвижность носителей в различных ямах различна (например, за счет модулированного легирования), то проводимость канала, включающего в себя обе ямы, в целом будет изменяться [11]. Преимущество такого транзистора с модулированной подвижностью (Velocity Modulation Transistor) по сравнению с обычным полевым транзистором, где носители при переключении уходят из канала в электроды и подложку, заключается в более высоком быстродействии. В случае релаксационных переходов носителей заряда с испусканием фононов время перехода из одной квантовой ямы в другую составляет десятки пикосекунд. Вместе с тем результаты моделирования [12, 13] показывают, что время междуямной передислокации электронной плотности может быть значительно меньше 1 пс в случае резонансного интерференционного механизма передислокации. Механизм такой быстрой перестройки электронной конфигурации связан с существованием нетривиальной физической аналогии задачи динамической эволюции и статической задачи рассеяния. Как известно [14], задача адиабатической, т.е. медленной, эволюции квантовой системы эквивалентна статической задаче рассеяния в квазиклассическом приближении. В работе [12] показано, что для двухуровневой системы задача динамической эволюции *точно* сводится к статической задаче рассеяния со специально подобранным потенциалом. При этом режим быстрой передислокации в задаче динамической эволюции соответствует безотражательным потенциалам в задаче рассеяния.

Значительную роль в современной электронике играют цифровые системы и устройства. При этом квантовые системы с дискретным набором состояний и дискретным спектром представляют собой естественные физические носители цифровой информации. В подавляющем большинстве современных цифровых электронных устройств обработка и преобразование информации осуществляется в двоичном коде. С этой точки зрения базовым элементом для построения электронных устройств может служить любая двухуровневая система, например две связанные квантовые ямы. Логические «0» или «1» в такой системе соответствуют нахождению максимума амплитуды электронной плотности в одной или другой квантовой яме. При передислокации электронной плотности можно добиться значительного изменения сопротивления отдельной квантовой ямы, что отвечает переходу между двумя логическими уровнями. Считывание информации может быть осуществлено классическим образом путем создания селективных контактов к отдельным квантовым ямам и измерения сопротивления каждой из квантовых ям в отдельности.

Такая структура фактически представляет собой квантовый (по механизму переключения) аналог классической КМОП-пары [15, 16, 17]. Для создания селективных контактов в работе [18] была использована технология изготовления самоформирующихся омических контактов к отдельным квантовым ямам в гетероструктурах. Расщепление управляющего электрода значительно расширяет возможности приборов с управляемой передислокацией амплитуды волновой функции [17]. На рис.1,а

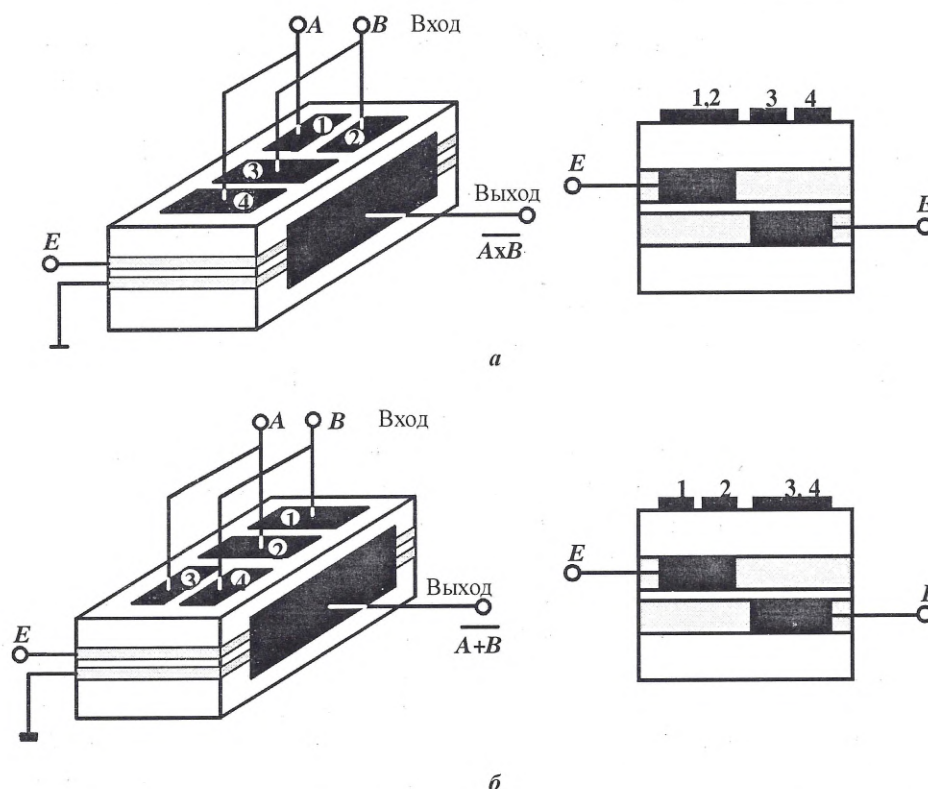


Рис.1. Квантовые аналоги КМОП-вентилей: а - вентиль И-НЕ; б - вентиль ИЛИ-НЕ

представлен логический элемент И-НЕ. Принцип действия элемента заключается в следующем. Выход элемента имеет общий электрический контакт к обоим квантовым ямам. Питание и общая шина (земля) подключены соответственно к верхней и нижней ямам. Для исключения сквозных токов электроды питания и общей шины пространственно разнесены. Управляющие электроды 1 и 2 осуществляют передислокацию волновой функции в той пространственной области, где расположен электрод питания, а электроды 3 и 4 – в области электрода общей шины. Входы A и B попарно соединяют электроды 1, 3 и 2, 4. Таким образом, в цепи общая шина–квантовая яма–выход электроды входов A (1) и B (2) подключены параллельно, а в цепи питание–квантовая яма–выход входы A (4) и B (3) подключены последовательно. Отрицательное напряжение (напряжение питания $E < 0$) соответствует логическому «0», а потенциал общей шины – «1». Пусть связанные квантовые ямы имеют такие параметры, что при напряжении на обоих входных электродах, соответствующем «0», максимум амплитуды волновой функции находится в нижней квантовой яме, а при напряжении, соответствующем логической «1» – в верхней яме. При этом цепь питание–квантовая яма–выход разомкнута, а цепь общая шина–квантовая яма–выход – замкнута и на выходе имеем «1». При подаче на электрод потенциала общей шины (логическая «1») максимум амплитуды волновой функции в области под электродом смещается в верхнюю яму. Однако цепь общая шина–квантовая яма–выход размыкается, а цепь питание–квантовая яма–выход замыкается и напряжение на выходе соответствует уровню «0», только если потенциал общей шины подан на оба входа. Конструкция логического элемента ИЛИ-НЕ представлена на рис.1,б. В этом случае цепь общая шина–квантовая яма–выход разомкнута, а цепь питание–квантовая яма–выход замкнута при подаче потенциала общей шины («1») на любой из входов A или B .

Другим примером широких функциональных возможностей полупроводниковых гетероструктур для создания новых приборов могут служить приборы с акустическим переносом заряда (ПАПЗ) [19]. В материале, обладающем пьезоэффектом, деформация в акустической волне создает электрическое поле, которое движется вместе с волной и может перемещать носители заряда подобно многоразрядному регистру. Этот принцип реализуется также и в приборах с зарядовой связью (ПЗС), где пакеты носителей заряда перемещаются в потенциальных ямах, создаваемых внешним полем, но быстродействие ПАПЗ на 3 порядка превышает быстродействие ПЗС. Параметры и характеристики ПАПЗ можно значительно улучшить, если носители заряда разместить в квантовой яме, препятствующей их диффузионному растеканию. В такой конструкции фактически реализуется принцип раздельного ограничения (поле акустической волны локализовано в более широкой области, чем волновая функция носителя заряда), эффективно используемый в современных полупроводниковых лазерах на гетероструктурах [1]. Сила тока акустического переноса определяется концентрацией электронов в яме и частотой ПАВ. На частотах ≈ 10 ГГц становится доступным измерение тока переноса отдельных электронов.

Для разработки и создания ПАПЗ использовались гетероструктуры Al–GaAs–GaAs [20, 21]. Акустическая волна возбуждается при помощи встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Максимум потенциала ПАВ приходится на канал переноса. Эффективность переноса увеличивалась за счет того, что канал переноса смещен от поверхности и не подвержен влиянию различного рода поверхностных дефектов. В процессе роста гетероструктуры можно сформировать встроенное поперечное поле необходимой величины. Встроенное поперечное поле, как показали расчеты, позволяет уменьшить коэффициент затухания ПАВ и увеличить эффективность переноса зарядов. На основе существующей технологии изготовления схем на арсениде галлия была отработана технология приборов на поверхностных волнах, смоделированы и выращены гетероструктуры для приборов с переносом зарядов полем поверхностной волны, спроектирован и исследован тестовый кристалл – линия задержки на 1,2 мкс. Схематично исследованный прибор показан на рис.2, здесь же приведена осциллограмма снятого сигнала. На входной ВШП подавался радиосигнал с несущей частотой 286 МГц, на входной инжектирующий диод – сигнал прямого смещения $U_{\text{см}}$ в интервале от 0,2 до 6 В. Инжектированные в диод носители захватывались потенциалом волны и переносились по каналу к выходному диоду, смещенному в обратном направлении ($U_{\text{см}} = -2,5$ В). Измерялось время задержки выходного сигнала и амплитудное значение тока через выходной диод. Сила тока через инжектирующий диод задавалась в интервале от 10 мкА до 50 мА. Расчетная величина количества электронов в каждом зарядовом пакете

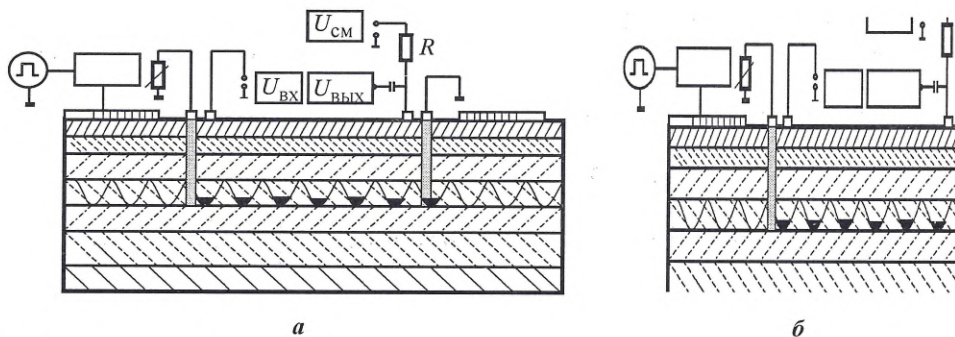


Рис.2. Схема прибора с переносом заряда полем ПАВ (а) и осциллограмма входного и выходного (задержанного) сигналов (б)

составляет $5 \cdot 10^4$, что соответствует 2,4 мкА при максимальном заполнении потенциальной ямы, образованной акустоэлектрической волной. Измеренное значение максимального тока – 2 мкА.

На основе исследуемого эффекта был разработан кристалл для корреляционной обработки аналоговых сигналов. В нем используются нелинейные взаимодействия носителей зарядов в области встроенных диодов. При таком взаимодействии билинейный коэффициент должен быть довольно высоким (порядка –30 дБ). Наиболее перспективным видится применение таких приборов для регистрации однократных сигналов, когда входной сигнал можно запомнить в дискретном виде при помощи матрицы диодов, а затем осуществить его сверхскоростную обработку на выходе. Использование эффекта акустического переноса зарядов на основе гетероструктур арсенида галлия открывает широкие перспективы по созданию нового класса приборов для обработки аналоговых сигналов сверхвысоких частот.

В настоящее время значительные усилия предпринимаются по развитию методов литографии в нанометровой области. Сочетание технологии полупроводниковых гетероструктур, позволяющей относительно легко формировать двумерные проводящие слои, и технологии нанолитографии открывает новые возможности по созданию электронных приборов на базе квантовых проводников.

На основе численного решения двумерного уравнения Шредингера исследован баллистический транспорт в квантовых проволоках (электронных волноводах) переменного сечения. Сужения и расширения в таких системах играют роль потенциальных барьеров и ям, т.е. имеется близкая аналогия вертикального (вдоль оси роста) транспорта в полупроводниковых гетероструктурах и проводимости квазиодномерных электронных волноводов. Выяснено, что принципиальным моментом оказывается многомодовость задачи. Волноводная природа распространения и взаимодействие мод открывают новые степени свободы, позволяют получить ряд новых эффектов. Наиболее характерными для волноводного распространения мод являются «квантование» кондактанса, обусловленное включением новых распространяющихся мод, и резонансы Фано, связанные с взаимодействием распространяющихся и локализованных мод.

Последовательность двух микросужений по отношению к пропусканию электронных волн будет вести себя, как обычная двухбарьерная туннельно-резонансная структура. При этом из-за принципиально многомодового характера задачи можно ожидать появления дополнительных резонансов, связанных с межмодовым взаимодействием и аналогичных эффектам Г – Х смешивания в резонансно-туннельных структурах на основе полупроводников группы A_3B_5 . На рис.3 представлено сечение электронного волновода – аналога резонансно-туннельного диода и зависимость уровней размерного квантования E_{yi} от координаты в направлении распространения x . Характерной особенностью волноводного аналога РТД является наличие нескольких каналов распространения, соответствующих возбуждению соответствующей модой E_i подводящего волновода.

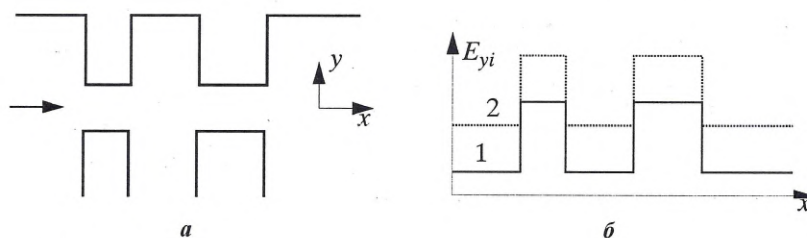


Рис.3. Сечение электронного волновода – аналога резонансно-туннельного диода (а) и зависимость уровней размерного квантования от координаты в направлении распространения волны (б)

Зависимости $T(E)$ для каждого из каналов имеют характерный для резонансного туннелирования вид с максимумами, положение которых определяется профилем E_{yi} . Семейство $T(E)$ для последовательных мод левого волновода является аналогом зависимостей $T_k(E)$ для разных импульсов поперечного движения в обычном резонансно-туннельном диоде. В нашем случае, в отличие от РТД, где ширина резонанса от k не зависит, с ростом номера падающей моды ширина резонанса существенно уменьшается. Более существенным отличием является появление при некоторой энергии резких провалов пропускания, имеющих характерную для резонансов Фано асимметричную форму. Эти резонансы обусловлены взаимодействием локализованных в области между сужениями состояний и распространяющихся мод.

Роль потенциальной ямы в электронном волноводе играет микрорасширение. При этом микрорасширение отщепляет локализованное состояние от каждой моды, на которой могут рассеиваться электроны мод с меньшими номерами. При рассеянии на связанном состоянии волновая функция испытывает сдвиг фазы на π . Таким образом, рассеянная волна и волна, прошедшая без рассеяния, при интерференции могут погасить друг друга, формируется минимум в пропускании, имеющий характерную асимметричную форму: резонанс Фано. В данном случае имеет место аналогия с явлением антикроссинга уровней размерного квантования в одномерных системах.

В настоящее время предложен ряд приборов, принцип действия которых основан на использовании эффектов интерференции электронных волн в квантоворазмерных структурах. Одним из таких квантовых приборов является квантовый интерференционный транзистор, который может быть реализован как в многосвязанных структурах, когда проводимость определяется разностью фаз волн, распространяющихся по разным путям (электрический аналог эффекта Ааронова–Бома), так и в односвязанных системах, когда интерференция в выходном волноводе определяется изменением граничных условий в области затвора. Однако до сих пор не опубликовано убедительных доказательств наблюдения этих эффектов. Трудности в реализации электростатического эффекта Ааронова–Бома обусловлены принципиальной многомодовостью системы, наблюдение эффекта затруднено наложением надбарьерных резонансов и резонансов Фано. Из приведенных расчетов следует, что существуют достаточно жесткие требования на параметры структуры (в основном на ширину подводящих волноводов H), при которых интерференция волн, распространяющихся в разных каналах, приводит к погашению пропускания (и кондактанса), а вклады надбарьерных резонансов и резонансов Фано – минимальны. Таким образом, развитие методов нанолитографии позволит создавать новые наноэлектронные приборы и структуры, аналогичные многослойным полупроводниковым гетероструктурам, но отличающиеся от них планарным исполнением. Таким образом, луч литографа сможет выполнить функции эпитаксиальной ростовой камеры.

Литература

1. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1068–1086.
2. Two dimensional electron gas at a semiconductor-semiconductor interface / H.L.Stormer, R.Dingle, A.C.Gossard et al. // Solid State Comm. – 1979. – Vol. 29, N 10. – P. 705–709.
3. Квантовый эффект Холла: Сб. статей / Пер. под ред. Ю.В.Шмарцева. – М.: Мир, 1986. – С. 10–17.
4. Luttinger J.M., Kohn W. Motion of electrons and holes in perturbed periodic fields // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 97. – P. 869–883.
5. Bastard G., Brum J.A., Ferreira R. Electronic states in semiconductor heterostructures // Solid State Phys. – 1991. – Vol. 44. – P. 229–415.
6. Foreman B.A. Exact effective-mass theory for heterostructures // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 52. – P. 12241–12259.

7. **Тахтамиров Э.Е., Волков В.А.** Обобщение метода эффективной массы для полупроводниковых структур с атомарно резкими гетеропереходами // ЖЭТФ. – 1999. – Т. 116, вып. 5(11). – С. 1843–1870.
8. **Tokatly I.V., Tsibizov A.G., Gorbachevich A.A.** Interface electronic states and boundary conditions for envelope functions // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65, N 16. – P. 165328-1-10.
9. **Gorbachevich A.A.** Microscopic structure of heterointerface and envelope function boundary conditions // Proceed. of 11 th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology» (St. Petersburg, Russia, June 23–28, 2003). – 2003. – P. 81, 82.
10. **Горбацевич А.А., Жабицкий О.В.** Микроскопическая теория симметричных гетероинтерфейсов // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 2. – С. 3–10.
11. **Sakaki H.** Velocity-modulation transistor (VMT) – A new field-effect transistor // Jpn. J. Appl. Phys. – 1982. – Vol. 21, N 6. – P. L381–L383.
12. **Горбацевич А.А., Капаев В.В., Конаев Ю.В.** Управляемая эволюция электронных состояний в наноструктурах // ЖЭТФ. – 1995. – Т. 107, вып. 4. – С. 1320–1349.
13. **Горбацевич А.А., Капаев В.В., Конаев Ю.В.** Бездиссипативная динамика электронов в наноструктурах // УФН. – 1995. – Т. 165, № 2. – С. 225–229.
14. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика. – Курс теоретической физики. Т. 3. Квантовая механика. – М.: Физматлит, 2001.
15. **Gorbachevich A.A., Kapayev V.V., Konaev Yu.V., Kremlev V.Ya.** Wave-Function-Rearrangement-Quantum-Devices // Phys. Low-Dim. Struct. – 1994. – Vol. 4/5. – P. 57–62.
16. **Горбацевич А.А., Капаев В.В., Конаев Ю.В., Кремлев В.Я.** Квантовые приборы на основе передислокации волновых функций в гетероструктурах // Микроэлектроника. – 1994. – Т. 23, вып. 5. – С. 17–26.
17. **Горбацевич А.А., Капаев В.В., Конаев Ю.В., Кремлев В.Я.** Квантовые приборы на основе эффекта передислокации волновых функций в гетероструктурах // Электронная промышленность. – 1995. – Вып. 4–5. – С. 28–31.
18. New approach to the independent ohmic contact formation in the structures with two parallel isotype quantum wells / **Yu.G.Sadofyev, S.E.Yevstigneev, Yu.V.Konaev et al.** // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2000. – N 18(3). – P. 1668–1671.
19. **Gaalema S.D., Schwartz R.J., Gunshor R.L.** Acoustic Surface Wave Charge-Coupled Device // Appl. Phys. Lett. – 1976. – Vol. 29, N 2. – P. 82, 83.
20. **Мороча А.К., Егоркин В.И., Казаков И.П.** Исследование акустического переноса заряда в гетероструктурах на основе арсенида галлия // Изв. вузов. Электроника. – 2003. – № 3. – С. 11–14.
21. Исследование влияния тока инжекции на амплитуду сигнала акустического переноса в гетероструктурах на основе арсенида галлия / **В.И.Егоркин, А.К.Мороча, С.С.Шмелев и др.** // Микроэлектроника. – 2004. – № 4. – С. 290–295.

Горбацевич Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* физика твердого тела, наноэлектроника.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* радиоэлектроника, акустоэлектроника и наноэлектроника.

Капаев Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФИАН им. П.Н.Лебедева и МИЭТ. *Область научных интересов:* физика твердого тела, квантовая физика, наноэлектроника.

Конаев Юрий Васильевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор ОФТТ ФИАН им. П.Н.Лебедева. *Область научных интересов:* физика твердого тела, сверхпроводимость, наноэлектроника.

Мороча Арнольд Климентьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* магнитная радиоспектроскопия, квантовая акустика, акустоэлектроника и наноэлектроника.

Шмелев Сергей Сергеевич – начальник отдела НОЦ ФИАН и МИЭТ «Квантовые приборы и нанотехнологии». *Область научных интересов:* технология микро- и наноэлектроники, физика полупроводниковых приборов.