Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых транзисторов на арсениде галлия с учетом радиационных эффектов

С.В.Оболенский¹

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия

В статье представлен обзор по методам моделирования характеристик GaAs полевых транзисторов с длиной канала 0,1–1 мкм, функционирующих в условиях радиационного воздействия.

Введение

Развитие полупроводниковой электроники связано с уменьшением размеров активных областей активных элементов (диодов и транзисторов), которые на сегодняшний день достигли значений 0,1 мкм и менее. Принципиальное изменение физических процессов движения электронов в таких структурах позволило повысить предельные частоты, уменьшить необходимую для переключения энергию, а также снизить длину линий передачи данных в интегральных схемах (ИС).

В последние годы идет исследование взаимодействия различных видов фотонного и корпускулярного излучений с составными частями радиоэлектронной аппаратуры: интегральными схемами и дискретными полупроводниковыми приборами. С одной стороны, важность подобных исследований обусловлена проблемой радиационной стойкости военных и космических систем, а с другой стороны – развитием и все большим применением радиационных технологических процессов, использующихся для изготовления и испытаний полупроводниковых устройств. Применение математических моделей позволяет не только экономить время и средства, требуемые для разработки аппаратуры, но часто является единственно возможным средством, позволяющим понять и наглядно представить физические процессы, протекающие в субмикронных структурах полупроводниковых приборов при радиационном воздействии. Анализ процессов в полупроводниковых приборах с размерами более 0,5-1 мкм и влияния радиационного излучения на эти процессы приведен в [1-34].

Воздействие радиационного излучения приводит к образованию дефектов и ионизации полупроводника. Радиационные дефекты условно можно разделить на точечные (вакансия и атом в междоузлии), комплексы дефектов (например, вакансия – атом примеси) и кластеры радиационных дефектов (КРД), т.е. скопления точечных дефектов и их комплексов, которые образуются при воздействии быстрых нейтронов, космических протонов и более тяжелых частиц. Тенденция к уменьшению размеров активных областей субмикронных полупроводниковых приборов имеет физические ограничения, связанные: (а) с неравномерностью распределения и конечным числом точечных заряженных центров (ионов примеси, дефектов и т.п.) в приборах; (б) с размером протяженных областей пространственного заряда (ОПЗ)

¹ Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

(p-n переходов, барьеров Шоттки, КРД и т.п.), которые определяются уровнями легирования слоев полупроводника. Последнее ограничение наиболее существенно в перспективных приборах с длинами активных областей 0,1 мкм и менее.

В условиях радиационного воздействия уменьшение размеров структур приводит к принципиальным изменениям физики работы приборов. Эти изменения связаны с тем, что: 1) характерные пространственные масштабы изменения электрического поля сопоставимы с длинами релаксации энергии и импульса электронов и длиной свободного пробега электронов; 2) характерные размеры рабочих областей приборов сравнимы с расстоянием между КРД; 3) характерные размеры рабочих областей приборов сопоставимы с размерами КРЛ: 4) ионизирующее излучение разогревает электронный газ, который не успевает остывать за времена пролета рабочей области приборов; 5) при облучении нейтронами происходит перестройка протонированных изолирующих областей ИС, что сказывается на процессах протекания тока и фоточувствительности; 6) взаимодействие ионизирующих излучений (особенно лазерных) с нанометровыми металлическими объектами имеет особенности; 7) радиационные технологические процессы (например, геттерирование) существенно изменяют электрофизические характеристики полупроводника, что заметным образом сказывается на процессах формирования радиационных дефектов в субмикронных приборах; 8) электроны, разогнанные до энергий 0,5...1 эВ большими электрическими полями (~ 100 кВ/см) в субмикронных приборах, могут проникать сквозь КРД, что принципиально меняет подход к моделированию радиационной стойкости приборов.

Поглощение радиационного излучения в субмикронных структурах вблизи границ раздела материалов имеет свои особенности. Различия в атомных весах, плотности, сечениях взаимодействия с фотонами и быстрыми частицами порождают неравновесные процессы на границах раздела, приводящие как к усилению радиационного воздействия, так и к его ослаблению. Характерные длины проявления подобных эффектов сравнимы с размерами рабочих областей современных приборов (~ 0,05...0,1 мкм), поэтому неоднородности в дефектообразовании и ионизации, разогреве электронного газа и возникновении квантово-размерных структур КРД приводят к качественному изменению процесса протекания тока в активных областях приборов. Несмотря на то, что длины рабочих областей современных приборов сравнимы с длиной бесстолкновительного пролета электронов и, казалось бы, радиационные дефекты не должны влиять на функционирование приборов, при некоторых значениях напряженностей электрических полей это влияние вызывает *улучшение* характеристик субмикронных приборов.

Иная ситуация возникает на границах раздела полупроводника с металлическим объектом, имеющим нанометровые размеры. Несмотря на то, что процесс взаимодействия радиационного излучения с многослойными композициями носит случайный характер, в нанометровых областях, прилегающих к граням протяженных металлических объектов, кластеры радиационных дефектов за счет эффекта усиления флюенса будут расположены упорядочено, по крайней мере, по двум из трех координат. Последнее приводит к существенному изменению транспорта электронов в таких областях. Необходимо учитывать не только процессы, протекающие вблизи двумерных объектов (границ раздела), но и принимать в расчет одномерные объекты: протяженные грани металлических контактов, цепочки КРД и т.д. Требуется модифицировать математические модели для адекватного описания процессов в субмикронных приборах, проведения оптимизации их конструкции (в том числе и по параметру "радиационная стойкость") и обработки результатов экспериментов и испытаний.

Для анализа движения носителей заряда в полупроводниковом материале и моделирования поглощения радиационного излучения в многослойных композициях разработан целый ряд математических моделей, в том числе, основанных на методе частиц (с использованием математической процедуры Монте-Карло). До сих пор при расчетах радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов использовались упрощенные методы моделирования, основанные на замене исследуемого прибора эквивалентной схемой. Эта методика оправдана для приборов, имеющих микронные топологические нормы, но не позволяет учесть перечисленные выше физические эффекты, связанные с субмикронными размерами областей.

Для анализа процессов в субмикронных приборах требуется сочетание физикотопологического моделирования (квазигидродинамическое приближение) с привлечением метода частиц на основе процедуры Монте-Карло. Наиболее важным преимуществом в подобном сочетании методов является возможность комплексного анализа процессов ионизации, дефектообразования и электронного транспорта в многослойных нанометровых структурах. Благодаря использованию физикотопологических моделей полупроводниковых приборов, которые в том или ином приближении рассчитывают реальное движение носителей заряда, за счет изменения условий протекания электронов удается моделировать перечисленные выше процессы, получая реальную картину взаимодействия электронов с изменяющимися во времени нанометровыми структурами КРД. Применительно к субмикронным приборам такая работа ранее не проводилась.

Отсутствие единого подхода к моделированию комплексного радиационного воздействия на субмикронные полупроводниковые приборы и отличие в экспериментальных данных по радиационной стойкости для отечественных и зарубежных субмикронных приборов обуславливает необходимость разработки законченной системы расчетно-экспериментальных методов моделирования радиационного воздействия на субмикронные полупроводниковые приборы. Двумерное и трехмерное нестационарное моделирование движения носителей заряда при воздействии квантов и быстрых частиц, а также расчет распределения тепла в полупроводниковых структурах позволяет в динамике изучать процессы перераспределения концентрации и энергии носителей заряда, электрического поля и обусловленных ими электрических токов. Последнее весьма важно при обработке результатов экспериментов, когда за измеренными зависимостями токов и напряжений от времени скрываются комплексные процессы взаимодействия электронного газа с кристаллической решеткой и радиационным излучением.

Предлагаемый для анализа действия радиации на приборы теоретический подход должен позволять: 1) проводить расчет пространственной структуры КРД и их распределения в пространстве как в однородном материале, так и в многослойных композициях; 2) моделировать бесстолкновительное движение электронов и прерывающие это движение процессы столкновений с радиационными дефектами, рассчитывать функции распределения электронов по энергии и заполнение энергетических долин; 3) использовать результаты аналитических расчетов и экспериментальные данные в качестве начальных и граничных условий; 4) проводить расчет статических и динамических параметров полупроводниковых приборов и радиотехнических схем в целом.

Экспериментальные исследования описанных выше процессов требуют применения комплексного подхода к анализу параметров материала, многослойных структур и приборов. Желательно в рамках одного анализируемого объекта проводить комплекс измерений, позволяющий определить максимальное число параметров как материала, так и прибора. Ранее подобный подход не использовался ввиду других пространственных масштабов (характерных длин) протекаемых процессов. Относительно большие размеры исследуемых приборов позволяли обходиться несколькими объектами, удобными для тех или иных измерений.

Цель работы – разработка методов и средств расчетно-экспериментального моделирования физических процессов в субмикронных арсенидгаллиевых полупроводниковых приборах с учетом размерных и радиационных эффектов. Результаты проведенной работы опубликованы в работах [24-69], на основе которых и написан настоящий обзор.

Исследование электрофизических характеристик эпитаксиальных GaAs структур субмикронных полупроводниковых приборов при радиационном воздействии

С целью получения исходных данных для создания моделей субмикронных полупроводниковых приборов был проведен анализ процесса взаимодействия радиационного излучения с субмикронными полупроводниковыми структурами. Имеющиеся в литературе аналитические оценки и модели [3-8, 10-19] уточнены, исходя из появившихся в последние годы экспериментальных данных и результатов компьютерных экспериментов [30,33,58,62,63]. Разработана модель кластера радиационных дефектов как частично прозрачного для носителей заряда высокой энергии (0,3 ... 1 эВ) образования.

В ходе вычислений для каждой из энергий первичного атома – 10, 25, 50, 100, 200 и 400 кэВ были рассчитаны по 300 каскадов столкновений. В каждом каскаде проводился подсчет числа субкластеров радиационных дефектов (СКРД) с учетом их распределения по размерам и расчет среднего расстояния между субкластерами (рис.1,2). Общая картина такова: при нейтронном облучении GaAs и Si в полупроводниках возникают КРД с характерным размером субкластеров около 10 нм и расстоянием между ними 10...40 нм в GaAs и 30...80 нм в Si. Поскольку у горячих электронов (с энергией больше 0,3 эВ) длина свободного пробега имеет величину менее 5...10 нм, то столкновения электронов с субкластерами можно рассматривать отдельно.

С целью последующего моделирования процессов быстрого восстановления параметров субмикронных приборов после импульса нейтронного излучения рассматривались процессы формирования области стабильного КРД в GaAs. В отличие от кремния, GaAs характеризируется практически неподвижными вакансиями и большим разнообразием комплексов точечных дефектов. Поэтому на последней стадии формирования кластера его форма и заряд, определяющий поле в области пространственного заряда субкластеров КРД, будут определяться перестройкой комплексов дефектов вокруг относительно неподвижного и стабильного ядра. В среднем, при облучении GaAs нейтронами с энергией 1,5 МэВ в КРД образуется 2...10 устойчивых субкластера. ОПЗ субкластеров объединяются в единое целое, препятствующее движению низкоэнергетичных электронов, а электроны с энергиями более 0,2...0,5 эВ могут пролетать между субкластерами. Поскольку разброс величин расстояний между субкластерами велик, то практически в каждом кластере найдется "отверстие", через которое горячий электрон сможет проникнуть сквозь КРД (рис.2).

Для моделирования ионизационных токов в субмикронных полупроводниковых приборах при гамма-облучении исследовался процесс разогрева электронного газа за счет рождения гамма-квантами (50...5000 кэВ) первичных электронов (30...500 кэВ) и последующей генерации вторичных электронов с энергиями 0,2...1 эВ [36]. Показано, что результирующая функция распределения электронов по энергии в момент гамма-облучения с точностью 10...20 % может быть аппроксимирована известным выражением для максвелловского распределения. Последнее позволяет использовать квазигидродинамическое приближение при анализе процессов в субмикронных приборах в момент гамма-облучения и учитывать таким образом изменение энергии электронного газа, приводящее к изменению пространственного распределения носителей заряда, их скорости, высокочастотных и статических параметров прибора в целом.

На основе результатов моделирования процессов взаимодействия радиационных излучений с субмикронными полупроводниковыми структурами показано, что из-за наличия механических напряжений, близости границ раздела металлполупроводник, нанометровой толщины переходных и активных слоев приборов примесно-дефектная система структуры субмикронных приборов отличается от образцов с микронными размерами. Предложен экспериментальный подход к анализу процессов в субмикронных GaAs приборах при радиационном воздействии.

Исходя из совокупности анализируемых процессов, были выбраны структура и параметры исследуемых образцов, выделены основные и второстепенные структуры. Выбор образцов проводился так, чтобы исследуемые процессы разделялись, т.е. в одних типах образцов основными были процессы, связанные с изменением концентрации и подвижности носителей заряда, а в других – превалировали эффекты баллистического движения электронов. Оптимальным для проведения подобных измерений является полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ). Анализ его вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик позволяет получить не только профили распределения концентрации электронов и их подвижности по глубине, но и зависимость скорости носителей заряда от электрического поля. Все это, в совокупности с наличием в распоряжении автора квазибаллистических ПТШ с эффективной длиной затвора менее 30 нм, определило полупроводниковую структуру типа ПТШ как основную для проведения экспериментальных исследований [47,48, 52,54].





Распределение субкластеров по размерам в каскаде столкновений для различных начальных энергий первичного атома. Данные приведены для Ga, внедряемого в GaAs [50]



Рис. 2

Зависимости среднего расстояния между непрозрачными для электронов областями субкластеров от энергии электрона в n-GaAs: концентрация легирующей примеси 6·10¹⁷см⁻³ - (—); 10¹⁵см⁻³ – (- -). Цифрами указана энергия первичного атома Ga (в кэВ). D - размер зазора между кластерами при котором существенным становится квантовое отражение [50]

Для сопоставления эффектов в субмикронных и микронных структурах исследовались ПТШ с длинами затвора: 30 нм, 250 нм, 330нм, 500 нм, 700 нм, 1 мкм, 2 мкм, 10 мкм, 20 мкм, 50 мкм. Для учета влияния температуры на результаты измерений различались мощные ПТШ с рабочей температурой в канале около 150° С, и малошумящие ПТШ с практически комнатной температурой канала. Ширина транзисторов варьировалась от 25 до 4800 мкм, а ширина одной секции изменялась от 12 до 1000 мкм. Для более детальных экспериментов подбирались структуры, на которых были изготовлены транзисторы с 3...5 различными длинами затвора, при этом сопоставление результатов измерений проводилось только в пределах одной конкретной структуры. Между собой структуры сравнивались по усредненным данным. Дополнительные измерения проводились на диодах Шоттки, тестовых элементах для измерения контактных сопротивлений и сопротивлений металлизации, образцах кристаллов и структур для ИК спектроскопии, элипсометрии и холловских измерений. Для статических измерений характеристик образцов использовался характериограф Л2-56 и измерители емкости Е7-12 и Е7-14. Для проведения емкостной спектроскопии глубоких уровней использовался специальный стенд, позволяющий проводить измерения при сканировании по температуре от 77 К до 300 К. Также специально разработан метод нестационарной токовой спектроскопии, предназначенный для анализа быстропротекающей релаксации глубоких уровней после импульсного радиационного воздействия. Высокочастотные измерения характеристик ПТШ (коэффициенты усиления и шума и выходная мощность) проводились по стандартной методике.

Для анализа процессов быстрого восстановления характеристик субмикронных ПТШ при импульсном радиационном воздействии использовались установки НИИИС (Конечный Пользователь 2): КАВКАЗ, Аргумент и т.д. Исследовалось влияние импульса гамма-облучения на GaAs ПТШ с длиной канала 10; 1; 0,5; 0,25 и 0,1 мкм. Длительность импульса гамма-излучения составляла 20...30 нс, мощность дозы – до $3 \cdot 10^{10}$ Гр/с, средняя энергия квантов – 1 МэВ. Регистрировался фототок в полевом транзисторе в момент и непосредственно после радиационного облучения (рис.3). Дополнительно регистрировался фототок во встречно-штыревом фотодетекторе [25, 54-57]. Благодаря малому времени жизни в протонированном слое і-GaAs отклик фотодетектора повторял форму импульса гамма-облучения.

Анализ результатов измерений выявил два глубоких уровня, отвечающих за долговременные (до 100 мкс) изменения тока транзисторов. Положение и глубина залегания уровней совпали с результатами емкостной спектроскопии. Экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется суммой двух экспонент с разными знаками, соответствующих двум типам дефектов. По величине коэффициентов перед экспонентами были вычислены концентрации дефектов, а по характерным временам перезарядки оценена глубина залегания энергетического уровня дефектов. Получены следующие результаты: $E_c - 0.8$ эВ с концентрацией 10^{14} см⁻³ и $E_c - 0.4$ эВ с концентрацией $3 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

На втором этапе измерений проводилась регистрация зависимостей тока транзисторов от времени при воздействии импульса нейтронного излучения (рис.4) с флюенсом порядка 3·10¹⁴ н/см². Зафиксирован процесс перестройки комплексов радиационных дефектов в миллисекундном диапазоне. Анализ выходных ВАХ транзисторов, снятых через каждые 5 мс после нейтронного импульса, позволил оценить глубину залегания уровней, соответствующих радиационным дефектам в запрещенной зоне. Анализ экспериментальных данных и результаты расчета показали, что происходит перестройка структуры оболочки КРД. Характерное время перестройки составляет 5...15 мс, а концентрация радиационных дефектов за это время уменьшается на порядок.

С целью анализа процессов в субмикронных приборах при комплексном радиационном облучении исследовались процессы формирования КРД в полупроводнике с большой концентрацией точечных радиационных дефектов при протонном и последующем нейтронном облучении GaAs. В связи с тем, что сопротивление образцов при больших дозах и флюенсах облучения велико, наиболее точным методом измерения оказалась оптически индуцируемая токовая спектроскопия глубоких

Труды 3-го совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors. Нижний Новгород, 2003

уровней радиационных дефектов. Для проведения измерений исследовался фоточувствительный элемент, конструктивно представляющий собой встречноштыревую систему электродов, изготовленную на основе GaAs полуизолирующий подложки (АГЧП-4) с эпитаксиальным нелегированным слоем (10¹⁴ см⁻³), обработанной тремя дозами протонов по 0,1 ... 2 мкКл каждая и энергиями 30, 60 и 90 кэВ, соответственно. Расстояние между контактами варьировалось в пределах 5...50 мкм. Встречно-штыревая структура состояла из 10...50 штырей (длина штыря – 0,1...1 мм, ширина – 10...25 мкм). Создаваемая протонами область толщиной до 1,2 мкм от поверхности протонированная уменьшала темновое сопротивление структур на порядок и более. Подобные слои используются для изоляции контактных площадок ПТШ от активной области транзистора и друг от друга.





Напряжение на нагрузке ПТШ с длиной канала 0,1 мкм (верхний луч) и напряжение на фотодетекторе (нижний луч) при одновременном облучении рентгеновскими квантами: верхний луч – 500 мВ/кл; нижний луч – 200 мВ/кл; развертка – 250 нс/кл. Стрелкой указан момент воздействия излучения. Высокочастотная наводка до момента излучения объясняется электромагнитным полем рентгеновской установки



Рис. 4

Релаксация ВАХ субмикронного ПТШ после облучения импульсом нейтронов. Верхний луч – напряжение, пропорциональное току стока ПТШ: напряжение затвор-исток U_{зи}= -1 В; напряжение на стоке пилообразное 0...5 В; развертка – 2 мс/кл. Нижний луч – сигнал с детектора нейтронного излучения

Зависимости тока встречно-штыревого фотодетектора при освещении от длины волны приведена на рис.5. Уменьшение фоточувствительности при нейтронном облучении связано с наличием потенциальной ямы для дырок в области КРД. Последнее приводит к захвату и быстрой рекомбинации дырок через дефектные уровни в окрестности кластера радиационных дефектов. Токовая спектроскопия (рис.6) показала, что при нейтронном облучении происходит перестройка комплексов радиационных дефектов, созданных протонами (мелкие уровни в запрещенной зоне), в более крупные КРД. При этом фоточувствительность образцов для квантов с энергиями вблизи края фундаментального поглощения слабо зависит от дозы гамма-облучения до 10^5 Гр и флюенса нейтронного облучения до 10^{14} см⁻². Подобные структуры с успехом применялись в качестве радиационно-стойких фотодетекторов. Продемонстрирована работоспособность и высокая радиационная стойкость ИС фотопереключателя на основе встречно-штыревой структуры и ПТШ, использующегося в качестве коммутирующего элемента.



Рис. 5

Зависимости фототока i-GaAs встречноштыревой структуры с обработанной протонами (30; 60; 90 кэВ дозой 1,4·10¹²см⁻² для каждой энергии) рабочей областью и облученного быстрыми нейтронами (<En> =1 МэВ) и гаммаквантами (<Eγ> =1 МэВ)



Рис. 6

Спектры оптически индуцированной токовой спектроскопии фотосопротивлений после радиационного воздействия: исходные образцы – 1; доза гамма-квантов – 10^4 Гр и флюенс нейтронов 10^{14} см⁻² – 2; доза гамма-квантов 10^5 Гр – 3; доза гамма-квантов 10^2 Гр и флюенс нейтронов 10^{13} см⁻² – 4. Сверху указана глубина залегания и тип уровня в запрещенной зоне GaAs

Моделирование движения носителей заряда в субмикронных GaAs полупроводниковых структурах при протонном, гамма и нейтронном воздействии

При сокращении длины рабочей области субмикронных полупроводниковых приборов до 50...500 нм существенными становятся эффекты баллистического и квазибаллистического движения электронов в сильно-неодородных электрических полях [1,22,23]. В этом случае анализ радиационной стойкости предполагает использование двух- или трехмерного приближения и учета ряда новых эффектов, связанных с разогревом электронного газа при радиационном воздействии и рассеянием носителей на радиационных дефектах. Для анализа радиационного воздействия на субмикронные полупроводниковые приборы был использован квазигидро-

динамический метод (КГМ) описания движения носителей заряда [1,22,24,35,37,39, 40,42,45,46,53,59–61]. Для определения изменения времён релаксации энергии и импульса, средней энергии и дрейфовой скорости электронов, других параметров полупроводникового материала при радиационном воздействии использовался метод Монте-Карло [32,36,63].

При усреднении по ансамблю электронов моделировались процессы бесстолкновительного движения электронов в коротких GaAs структурах, прерываемые рассеянием на фононах, ионах легирующей примеси, и междолинными переходами. Для учета точечных дефектов вводился дополнительный механизм малоуглового рассеяния на основе потенциала взаимодействия Брукса-Херринга (а также Конвелла-Вайскопфа). Взаимодействие носителей заряда с СКРД рассматривалось как упругое рассеяние на включениях, окруженных областью пространственного заряда, с рандомизирующим угловым распределением. Размер области, блокирующей поток электронов, зависел от энергии налетающего электрона согласно результатам расчета размеров СКРД.

По данным о средних расстояниях между субкластерами и среднем количестве субкластеров в каскаде столкновений оценивалась их концентрация. Также использовалась экспериментальная оценка концентрации точечных дефектов $N_{nd} = K_t(F_n) \cdot F_n$, где N_{nd} – концентрация точечных дефектов; F_n – флюенс нейтронов. Коэффициент K_{pd} (F_p) имеет величину около 50 см⁻¹. Средняя концентрация субкластеров выбиралась на основе оригинальных экспериментальных данных, согласующихся с результатами измерений других авторов $N_{dr} = K_{dr}(F_n) \cdot F_n$, где $N_{\rm dr}$ – концентрация разупорядоченных областей. При флюенсах $10^{14}...10^{16}$ см⁻² кон-центрация кластеров составляет $10^{13}...10^{15}$ см⁻³, так что коэффициент $K_{dr}(F_n) \approx$ 0.2 см^{-1} . Уточнение K_{pd} и K_{dr} проводилось путем их варьирования так, чтобы вычисленное значение концентрации и подвижности электронов соответствовало экспериментальным данным и данным спектроскопии глубоких уровней. Для различных образцов и условий экспериментов значения коэффициентов колебались в пределах

Кратко результаты моделирования электронного транспорта при радиационном воздействии сводятся к следующему. В случае рассеяния на точечных дефектах с ростом их концентрации длина дебаевского экранирования увеличивается, т.е. рассеяние остается малоугловым, но уменьшается среднее расстояние между рассеивающими центрами, что приводит к увеличению частоты рассеяния. Это отличие между рассеянием на радиационных дефектах и атомах ионизированной примеси (для которой частота рассеяния не меняется, а растет средний угол рассеяния) приводит к тому, что для одинаковой концентрации атомов примеси (10^{16} см⁻³) и точечных дефектов зависимости дрейфовой скорости и времени релаксации импульса отличаются на 10...15%.

На рис.7 и 8 представлены зависимости дрейфовой скорости, подвижности и времён релаксации энергии и импульса электронов в GaAs до и после облучения протонами. Несмотря на малоугловой характер рассеяния электронов на заряженных радиационных дефектах, значительное увеличение частоты рассеяния приводит к уменьшению длины свободного пробега и, как следствие, к падению подвижности и дрейфовой скорости. С другой стороны, уменьшение скорости набора энергии электронов вызывает уменьшение вероятности излучения оптических фононов и междолинных переходов, в результате чего время релаксации энергии увеличивается. Экспериментальные данные получены на основе анализа ВАХ ПТШ, облученных протонами (20...100 кэВ).



Рис. 7

Зависимости дрейфовой скорости v (—) в GaAs, подвижности μ (- -) в GaAs и (—) в Si от напряженности электрического поля для различной дозы протонов: $D_p = 0 \text{ см}^{-2} - 1$; $D_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} - 2$; $D_p = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} - 3$. Значками отмечены: результат аналитической оценки – \Box ; экспериментальные данные – Δ . Концентрация примеси 6 $\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в GaAs и 10^{17} см^{-3} в Si



Зависимости времени релаксации энергии τ_w (----) в GaAs, импульса τ_p (---) в GaAs и (---) в GaAs и (---) в Si от средней энергии электронов для различной дозы протонов: $D_p = 0 \text{ см}^{-2} - 1$; $D_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} - 2$; $D_p = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} - 3$; экспериментальные данные $-\Delta$, \Box . Концентрация примеси $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в GaAs и 10^{17} см^{-3} в Si

Исследовалось изменение всплеска дрейфовой скорости в субмикронных структурах. Влияние точечных дефектов на амплитуду всплеска уменьшается при увеличении напряженности электрического поля. Для полей менее 25 кВ/см в структурах длиной 250 нм присутствие точечных дефектов с концентрацией, сравнимой с концентрацией легирующей примеси, приводит к подавлению эффекта всплеска скорости. Для необлученных GaAs структур указанный факт имеет место при длине образца выше 1000 нм. Для полей порядка 100 кВ/см (рабочие поля в субмикронных ПТШ) эффект всплеска скорости проявляется даже при концентрациях дефектов в 2...5 раз выше. Это обуславливает увеличение радиационной стойкости субмикронных ПТШ.

Исследовалось влияние нейтронного облучения на электрофизические характеристики n-GaAs с различной концентрацией легирующей примеси: 10¹⁵ и 10¹⁷ см⁻³, что соответствует уровням легирования буферного слоя и канала полевого транзистора. Были рассчитаны (рис.9) и экспериментально измерены зависимости подвижности и скорости в GaAs от напряженности электрического поля, а также зависимости времен релаксации энергии и импульса от энергии электронов в необлученных и облученных нейтронами образцах.

Как и в случае протонного облучения, рассеяние на кластерах радиационных дефектов приводит к уменьшению времени релаксации импульса, подвижности и скорости электронов при энергиях электронов менее 0,4 эВ (рис.9, 10). Благодаря рандомизирующему характеру рассеяния на разупорядоченных областях рассеянные назад электроны тормозятся электрическим полем. Этот процесс до некоторой степени аналогичен сбросу энергии при генерации оптического фонона, что компенсирует влияние точечных дефектов и обуславливает слабую чувствительность времени релаксации энергии к флюенсу нейтронного облучения.

Изменение времен релаксации энергии и импульса приводит к изменению заселенности долин. Наиболее сильно эти изменения сказываются на эффекте убегания. Увеличение времени релаксации энергии в диапазоне энергий электронов до 0,3 эВ даже при малых электрических полях 2...4 кВ/см приводит к возрастанию энергии электронов до тех пор, пока не начнется междолинное рассеяние. Чувствительность эффекта к наличию радиационных дефектов сказывается на увеличении (в 1,5 раза) напряженности электрического поля, соответствующей максимуму стационарной дрейфовой скорости электронов в облученном нейтронами материале (рис.9).

Влияние ионизирующего излучения на перенос электронов в субмикронных структурах рассматривалось как в необлученных, так и в предварительно облученных нейтронами структурах. Расчет проводился для однородных структур длиной 100, 250, 500 и 1000 нм с концентрацией легирующей примеси 10^{14} см⁻³. На рис.12 приведены зависимости средней дрейфовой скорости и энергии электронов от напряженности электрического поля при гамма-облучении. При E < 4 кВ/см наблюдается двукратное увеличение энергии электронов при облучении, которое приводит к пятикратному увеличению заселенности L-долины (рис.13). Средняя дрейфовая скорость электронов уменьшается с появлением неравновесных носителей. С одной стороны, это обусловлено увеличением населенности верхних долин, характеризующихся большей эффективной массой, а с другой стороны, уменьшением дрейфовой скорости в каждой из долин. Экспериментальные исследования дали хорошее совпадение теории и эксперимента.





Зависимости дрейфовой скорости (—) и подвижности (- - -) электронов в GaAs и Si от напряженности электрического поля: без облучения – 1 и 2; после облучения флюенсом нейтронов 10^{15} см⁻² – 3 и 4. Концентрация легирующей примеси: 10^{15} см⁻³ – 1 и 3; 10^{17} см⁻³ – 2 и 4. Экспериментальные данные - \Box , Δ , ∇ , о, •, \diamond



Зависимости времени релаксации энергии τ_w (- - -) и импульса τ_p (-----) электронов от средней энергии электронов в GaAs и Si: без облучения – 1 и 2; после облучения флюенсом нейтронов 10^{15} см⁻² – 3 и 4. Концентрация легирующей примеси: 10^{15} см⁻³ – 1 и 3; 10^{17} см⁻³ – 2 и 4. Экспериментальные данные – \Box , Δ , о, •

Рис. 11

Зависимости средней энергии электронов от продолжительности действия электрического поля [42]: необлученный GaAs – 1 и 3; GaAs облученный флюенсом нейтронов 10^{15} см⁻² – 2 и 4; GaAs облученный дозой протонов 0,2 мкКл – 5 и 6. Напряженность электрического поля: 3,2 кВ/см – 1, 2 и 5; 2 кВ/см – 3, 4 и 6

Действие ионизирующего излучения на структуры с радиационными дефектами исследовалось в структуре длиной 100 нм. Генерация неравновесных носителей приводит к увеличению средней энергии электронов и повышению вероятности междолинного рассеяния. Рассеяние на дефектах, наоборот, сокращает время свободного пробега, уменьшает среднюю энергию, приобретаемую электронами за пробег, и увеличивает населенность в Г-долине. В результате присутствие радиационных дефектов увеличивает среднюю дрейфовую скорость в момент воздействия гамма-излучения в 2 и более раз в полях более 80 кВ/см (рис.14). Поскольку такие поля являются рабочими для субмикронных ПТШ, то данный результат важен для прогнозирования необратимых отказов из-за неконтролируемого увеличения тока в момент облучения.





Рис. 13

Теоретические зависимости средних дрейфовой скорости (—) и энергии электронов (- - -) от напряженности электрического поля в отсутствие излучения и при облучении потоком гамма-квантов в структуре длиной 100 нм

3

0

0

10¹¹G/s

50

E, kV/sm

v, x10⁷ sm/s

n G/s

10¹⁰ G/s

100







Строгий переход к квазигидродинамическому приближению возможен лишь при максвелловском распределении электронов по энергии. Как показывают расчеты, в GaAs как до, так и после нейтронного облучения распределение электронов по энергии в L и X долинах максвелловское, а в Г-долине отличается от максвелловского только в больших полях, когда заселенность этой долины мала. При моделировании гамма-облучения расчеты функции распределения электронов по энергии проводились для структуры длиной 100 нм и напряженности поля 20 кВ/см, при

150

которой достигалось максимальное значение дрейфовой скорости электронов в структуре. При увеличении мощности дозы от $5 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{10}$ Гр/с доля концентрации "горячих" электронов увеличивается от 8,5 до 85% концентрации равновесных электронов. В целом, при гамма-облучении вид функции распределения остается близким к максвелловскому.

Основными уравнениями, определяющими транспорт носителей заряда в квазигидродинамическом приближении, являются: уравнения Пуассона, непрерывности, баланса энергии и импульса носителей заряда, а также выражения для плотности тока и потока энергии электронов [24],

$$\Delta V = \frac{q}{\varepsilon_s} \left(n(F_n) - N_+(F_n) + N_-(F_n) \right),$$

$$\frac{dm(W)\upsilon(F_n)}{dt} = -q\mathbf{E} - \frac{m(W)}{\tau_p(F_n)}\upsilon(F_n),$$

$$\frac{\partial n(F_n)}{\partial t} = \frac{1}{q} (\nabla, \mathbf{j}) + G - R,$$

$$\frac{\partial (Wn(F_n))}{\partial t} = (\nabla, \mathbf{j}_W) + (\mathbf{j}_n, \mathbf{E}) + GW_e - \frac{n(F_n)(W - W_0)}{\tau_W(F_n)}, \qquad (1)$$

$$\mathbf{j}_n = -qn\upsilon(F_n) + q\nabla (D(F_n)n(F_n)),$$

$$\mathbf{j}_W = -n(F_n)W\upsilon(F_n) + \nabla (D(F_n)n(F_n)W),$$

$$\mathbf{j}_t = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \ \mathbf{E} = -\nabla V,$$

где V – потенциал; n – концентрация электронов; N_+ , N_- концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); j, j_t – плотность электронного и полного тока; j_W – плотность потока энергии электронов; W, W_0 – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно; τ_w – время релаксации энергии; τ_p – время релаксации импульса; m – эффективная масса электрона; D – коэффициент диффузии электронов; v – дрейфовая скорость электронов; E – напряженность электрического поля; ε_s – диэлектрическая проницаемость; F_n – флюенс нейтронов; q – абсолютная величина заряда электрона; G – коэффициент генерации носителей заряда при воздействии излучения (учитывается только в момент действия ИИ); R – коэффициент рекомбинации (учитывается только в момент и непосредственно после действия ИИ); W_e – средняя энергия генерируемого электрона (учитывается только в момент действия ИИ).

Процессы нелокального разогрева электронного газа в резко неоднородных электрических полях, возникающие в канале субмикронных полевых транзисторов при радиационном воздействии, определяют скорость разгона и торможения электронов при их движении вдоль канала транзистора. Эти процессы учитываются корректно благодаря введению в квазигидродинамическую модель уравнений баланса энергии и импульса, коэффициенты которых зависят от радиационного воздействия.

При моделировании процессов ионизации, связанных с рождением электроннодырочных пар, количество уравнений в системе (1) необходимо увеличить, добавив аналогичные выражения для плотности тока дырок и потока энергии, а также уравнение непрерывности для дырочной компоненты тока. Поскольку подвижность дырок в GaAs на порядок меньше, чем у электронов, а концентрация дырок сравнивается с концентрацией электронов в канале транзистора только при мощностях дозы выше 10^{11} Гр/с, то учет процессов всплеска скорости и иных особенностей нестационарного и нелокального изменения энергии дырок в меньшей степени сказывается на результатах расчета параметров транзисторов. Тем не менее, при расчете распределения электрического поля в канале ПТШ в момент действия гаммаизлучения заряд дырок учитывался наряду с процессом рекомбинации.

Несмотря на то, что в ПТШ изоляция затвора осуществляется с помощью барьера Шоттки, диэлектрические слои используются для пассивации открытой поверхности GaAs. Результаты экспериментов показали, что накопление заряда в диэлектрических слоях может изменять ВАХ транзисторов на величину 5...10%, что объясняется высоким уровнем легирования канала исследуемых субмикронных транзисторов. Для полноты описания процессов в транзисторе в модель был включен механизм, учитывающий накопление заряда на поверхности GaAs. Путем введения дополнительного заряда в граничные узлы расчетной сетки удавалось моделировать приповерхностный изгиб зон, т.е. увеличение проводимости канала ПТШ.

На рис.15 приведены результаты расчета зависимости скорости электронов от координаты, полученные с помощью метода Монте-Карло, в квазигидродинамическом и локально-полевом приближениях. Сопоставлены зависимости для необлученного и облученного нейтронами GaAs в случае трех различных распределений электрического поля от координаты. Для удобства сравнения вид модельной функции, описывающей зависимость напряженности электрического поля от координаты, был выбран одинаковым. Это – функция, описывающая распределение Гаусса. Амплитуда поля во всех случаях равнялась 90 кВ/см, а параметры, описывающие в распределении Гаусса среднее значение и дисперсию, масштабировались и равнялись, соответственно 10^2 , 10^3 , 10^4 нм. Для длин более 10 мкм при напряженности поля 90 кВ/см зависимость скорости от координаты, определяемая по локальнополевой модели, становится близкой к точным результатам, полученным методом Монте-Карло. При уменьшении напряженности поля до значений менее 20 кВ/см. которое реализуется в ПТШ с длиной канала более 2...3 мкм при традиционном питании 5 В, результаты расчета по локально-полевой модели коррелируют с расчетами по методу Монте-Карло при длинах канала более 3 мкм. Квазигидродинамическое приближение корректно описывает процессы для всех представленных длин и флюенсов нейтронного облучения, а "усеченная квазигидродинамика" при длинах затвора более 1 мкм.



Рис. 15

Зависимости скорости электронов от координаты, рассчитанные для колоколообразного распределения напряженности электрического поля: в локально-полевом приближении – ЛП; в квазигидродинамическом приближении – КГ; усеченном квазигидродинамическом приближении (т.е. без учета уравнения баланса энергии); методом Монте-Карло - МК. Без нейтронного облучения – ЛП, КГ, КГУ и МК; после нейтронного облучения – КГ(Fn) и МК(Fn)

Теоретические и экспериментальные исследования радиационных эффектов в GaAs субмикронных полевых транзисторах с затвором Шоттки

С целью оценки уровней стойкости субмикронных полевых транзисторов проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов в субмикронных полевых транзисторах с затвором Шоттки при радиационном облучении [24, 26,37,40,42,45,48,60,63]. С целью выбора оптимальной математической модели определялся предел применимости локально-полевой и квазигидродинамической моделей. Были проведены исследования влияния нейтронного облучения на характеристики n-GaAs транзисторов с длинной затвора 10 мкм; 5 мкм; 1,5 мкм; 0,75 мкм; 0,5 мкм; 0,25 мкм; 30 нм (рис.16). В последнем случае длина канала транзистора определяется величиной области пространственного заряда затвора и в зависимости от напряжений на затворе и стоке имеет величину 50...150 нм. Измерялись ток насыщения, выходная мощность и коэффициент усиления ПТШ на рабочих частотах (см. таблицу). Показано, что локально-полевая модель адекватно описывает процессы в транзисторах с длиной затвора более 1...2 мкм.

Для апробации квазигидродинамической модели проводилось сравнение результатов расчета деградации характеристик ПТШ при нейтронном облучении (см. таблицу) с учетом зависимости времён релаксации энергии и импульса от флюенса нейтронного воздействия и без учета этого эффекта. Отклонение рассчитанных от экспериментально измеренных ВАХ ПТШ до облучения составляло не более 10%. Отклонение рассчитанных от измеренных ВАХ после облучения составляло более 60% для модели без учета деградации времён релаксации; менее 20% при учете (приведено в таблице). Также экспериментально измерялись зависимости тока стока транзистора (Lg = 30нм) при облучении импульсом гамма-излучения на установке ИГУР. Показано, что теоретически рассчитанные и экспериментально измеренные зависимости отличаются на 20%.



Рис. 16 Микрофотоснимок поперечного сечения полевого транзистора с V-канавкой в области затвора (V-ПТШ), полученный на РЭМ JEOL (ИФМ РАН). Уровни легирования слоев GaAs: n⁻ буфер – 10^{14} см⁻³, n канал – $6 \cdot 10^{17}$ см⁻³; n+ – контактный слой – 10^{19} см⁻³. Металлизация затвора – Аи с подслоем из W. Радиус закругления острия V-затвора – 15 нм

Исследовалась отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) нормально закрытого квазибаллистического V-ПТШ. При положительных смещениях 0...0,2 В на затворе и 0,5...1,5 В на стоке, соответствующих ОДП транзистора, наблюдалась генерация на частотах 32...38 ГГц. Разброс частоты генерации транзисторов, изготовленных на одной полупроводниковой структуре, составлял около 1 ГГц при ширине полосы генерируемого сигнала 20 МГц. Мощность сигнала достигала 1 мВт на 1 мм ширины затвора, а его амплитуда имела максимум при напряжении на стоке 0,7 В и уменьшалась в два-три раза при изменении напряжения до 0,5 В (или до 1,5 В). Эффективность электронной перестройки частоты при изменении напряжения стока – 1 ГГц/В.

Высокочастотные характеристики прибора при воздействии ионизирующего излучения исследовались с помощью светодиода (40 мВт, 0,85 мкм), размещенного в измерительном стенде. При освещении коэффициент усиления по мощности увеличивался на 0,1...0,3 дБ, что объяснялось лучшим согласованием V-ПТШ с измерительной системой. Ширина полосы генерируемого сигнала слабо зависела от мощности излучения, а частота генерации уменьшалась при освещении на 20...30 МГц. При напряжении 0,5 В зафиксирован режим включения генерации с помощью освещения.

Таблица

Длина канала, мкм / Ширина затвора, мкм	Флюенс нейтронов, х 10 ¹⁵ _н /см ²	Рабочая частота, ГГц /Предельная частота усиления, ГГц	Расчетное значение концентра- ции носителей заряда в канале ПТШ до и после облучения ^{**} , 10 ¹⁷ см ⁻³	Ток насыщения до и после об- лучения, мА	Коэффициент усиления по мощности на рабочей частоте до и после облучения, дБ	Выходная мощность на рабо- чей частоте до и после облуче- ния, мВт
0,75 /4800	0,5	7 /18	1,5 /1,2	1800 (1950) /1380 (1450)	7,5 (8)/ 4,8 (5)	1200 (1250) / 850 (820)
0,5 /600	1,4	12 /29	1,9 /1,5	250 (270) / 160 (200)	8 (8,9) /5,4(5,5)	250 (280) / 140 (150)
0,25 /100	3	37 /70	1,6 /1,2	15 (17) / 9 (8,2)	8 (9,1) / 4,5 (5,4)	5 (5,6) / 3,1 (4)
0,1*/ 25	5	60 /100	0,9 /0,7	5 (5,4) / 3,3 (3,1)	5 (6,2) / 2,8 (3,2)	1 (1,1) / 0,65 (0,6)

Экспериментально измеренные характеристики ПТШ. В скобках указаны значения, рассчитанные по квазигидродинамической модели

После облучения V-ПТШ нейтронами (<E>=1 МэВ) приборы делились на две неравные группы. В первой группе (80...90% испытанных образцов) наблюдалось двукратное уменьшение крутизны и коэффициента усиления транзистора в 1,5 – 3 раза при флюенсах 5·10¹⁵ см⁻². После нейтронного облучения флюенсом 10¹⁵ см⁻² характеристики генерируемого сигнала остались без изменений, а при флюенсе 5·10¹⁵ см⁻² амплитуда генерируемого сигнала уменьшилась на 60 %. Во второй группе (10...15 % испытанных образцов) наблюдалось улучшение высокочастотных параметров транзистора в 1,3...1,5 раза.

Причины возникновения ОДП и высокочастотной генерации исследовались с помощью двумерной квазигидродинамической модели. Показано, что генерация связана с междолинными переходами, и объясняется уменьшением длины баллистического пролета электронов при увеличении продольного электрического поля в канале V-ПТШ. Последнее приводит к уменьшению средней скорости электронов и тока стока в целом при увеличении напряжения на стоке. Размер образца, где возможна реализация междолинных переходов, определяется отношением скорости электронов к частоте междолинных переходов. Для электронов в GaAs по порядку величины он сравним с длиной канала V-ПТШ (50...100 нм). Поскольку проводимость приконтактной n^+ области изменяет свое сопротивление при флюенсах нейтронов порядка 10^{16} см⁻², а сам процесс междолинного перехода не чувствителен к облучению до флюенсов $3...5 \cdot 10^{15}$ см⁻², то радиационная стойкость генератора на основе V-ПТШ значительно выше, чем классического диода Ганна. Это обосновано с помощью квазигидродинамической модели.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование высокочастотных шумов в V-ПТШ при радиационном воздействии. Для экспериментов из имевшегося набора транзисторов были выбраны приборы с оптимальной шириной затвора для каждого из частотных диапазонов: 200 мкм (входная емкость затвор-исток С_{зи}=0,15 пФ) – для 12 ГГц, 100 – мкм (С_{зи}=0,08 пФ) для 37 ГГц, 50 мкм (C_{зи}=0,05 пФ) – для 60 ГГц. Ток насыщения транзисторов составлял около 7 мА (при ширине затвора 50 мкм). Крутизна более 450 мСм/мм. Области напряжений на затворе и стоке, при которых возникали генерация и усиление транзистора, не перекрывались. Минимальный коэффициент шума зарегистрирован в нормально закрытых транзисторах при полаче на затвор постоянного смешения +0.1÷0.3 В. Моделирование показало, что это объясняется возникновением виртуального инжектора в области истока при подаче питания. На рис.17 показано дно зонной диаграммы в активной области ПТШ и выделена область инжекции, поставляющая высокоэнергетические электроны в канал транзистора. Смыкание потенциального барьера, образованного контактом Шоттки, и потенциального барьера канал-буферный слой образует характерную седлообразную структуру инжектора. Форма инжектора определяется профилем распределения легирующей примеси и напряжением, поданным на контакты стока и затвора, что позволяет управлять током транзистора.

Электроны влетают в инжектор со случайным направлением вектора скорости и при пролете по нему упруго отражаются от стенок. В результате действия продольного поля изменяется угловое распределение вылетающих из инжектора электронов так, что максимум распределения совпадает с осью инжектора, а угол вброса электронов в область канала составляет 50...60° к границе раздела буферный слойканал.

На рис.18 представлены зависимости средней энергии электронов от координаты для оптимальной и неоптимальной траектории движения электронов. Поскольку на сток транзистора подается напряжение 2...3 В, то длина канала (определяемая ОПЗ затвора) составляет 0,15...0,2 мкм. Максимум энергии электронного газа приходится на стоковый край затвора, что объясняется максимальным электрическим полем в этой области. При облучении потоком гамма-квантов происходит разогрев электронного газа.



Рис. 17 Положение дна зоны проводимости в активной области ПТШ с V-образной канавкой: х – координата вдоль канала транзистора; у – координата от поверхности вглубь структуры

Координата максимума междолинного рассеяния (рис.19 и 20) в отсутствие облучения совпадает с координатой максимума зависимости энергии от расстояния. В области 0,2...0,4 мкм возможны междолинные переходы, которые приводят к образованию статического домена. При облучении структуры потоком гамма-квантов домен смещается на 70 ... 90 нм ближе к истоку. Это происходит вследствие перестройки распределения электронов при генерации неравновесных носителей. Увеличение энергии электронов в области инжектора приводит к уменьшению интенсивности примесного рассеяния в области с координатами 0...0,15 мкм. Частота рассеяния на примесях существенно зависит от долины, в которой находится рассеиваемый электрон, что обуславливает возрастание интенсивности примесного рассеяния в области статического домена.

Описанные процессы при мощности дозы 10^9 Гр/с приводят к ухудшению коэффициента шума (F) приблизительно в 1,5 раза при учете разогрева электронного газа и практически не изменяют F без учета разогрева (т.е. при учете только изменения концентрации носителей заряда). Это объясняется тем, что Y-параметры ПТШ начинают существенно изменяться только тогда, когда ионизованные электроны вносят существенный вклад в проводимость канала, т.е. при мощности дозы более 10^9 Гр/с. В то же время ответственная за шумы дисперсия тока стока начинает меняться раньше из-за того, что средняя энергия электронного газа выше, чем до облучения.

С помощью квазигидродинамической модели проведено исследование процессов восстановления высокочастотных характеристик ПТШ после воздействия гамма- и нейтронного импульса (быстрый отжиг). Опираясь на результаты экспериментальных исследований зависимости концентрации глубоких уровней от времени после импульсного радиационного облучения показано, что характеристики ПТШ восстанавливаются в течение 3...30 мс после импульса нейтронного облучения флюенсом 10¹⁴... 10¹⁵ см⁻² и в течение 10...50 мкс после импульса гамма-облучения мощностью дозы 10¹⁰...10¹¹ Гр/с.



Зависимости средней энергии электронов от координаты в V-ПТШ при гаммаоблучении: неоптимальная траектория движения – 1; оптимальная – 2. Обозначения: энергия междолинного перехода – W_{Г-L}; энергия оптического фонона -Wф





Зависимости интенсивностей рассеяния от координаты вдоль оптимальной траектории движения электронов в V-ПТШ при гамма-облучении: междолинное рассеяние – 1; рассеяние на примесях – 2; оптическое рассеяние – 3

Рис. 20

Зависимости интенсивностей рассеяния от координаты вдоль неоптимальной траектории движения электронов в V-ПТШ при гамма-облучении: междолинное рассеяние – 1; рассеяние на примесях – 2; оптическое рассеяние – 3

Неравновесные процессы на границах раздела металл-полупроводник в субмикронных GaAs полевых транзисторах с затвором Шоттки

Важным аспектом проблемы моделирования радиационной стойкости является многослойность полупроводниковых структур, используемых в современных субмикронных приборах. Наиболее сильно влияние радиации проявляется в структурах, где электроны движутся вдоль границ раздела, так как любая модификация последней сказывается на всем пути движения электронов. Сочетание материалов с различными плотностями и атомными весами приводит к дисбалансу в поглощении излучения на границе. Если раньше это касалось лишь процесса ионизации в областях, примыкающих к границам раздела (эффект усиления мощности дозы), то сейчас в структурах с толщинами слоев порядка 10 нм и границами раздела порядка 1 нм следует учитывать неравновесность при дефектообразовании (эффект усиления флюенса). Исследовано влияние эффекта усиления мощности дозы и флюенса на радиационную стойкость квазибаллистического ПТШ с длиной канала 0,01...0,1 мкм [36, 48, 63].

Теоретически и экспериментально проведено сравнение процессов в ПТШ с Al и Ац затвором длиной 0,25 мкм при гамма-облучении. Теоретически рассчитаны коэффициенты усиления и шума ПТШ при гамма-облучении. Показано, что эффект усиления мощности дозы снижает радиационную стойкость транзистора с Аи затвором в 2...3 раза. Нейтронное облучение многослойных композиций индуцирует вброс более тяжелых атомов из соседних слоев и вызывает в полупроводнике проявление эффекта усиления флюенса нейтронного облучения. Для расчета количества вылетевших атомов из более плотного материала в менее плотный учитывалась концентрация атомов вещества и отношение сечений взаимодействия быстрых нейтронов с атомами Au и Ga (As) (от 2 до 4 в зависимости от энергии нейтрона). Благодаря различию длин пробега вылетевших из соседнего материала атомов, на границах раздела может наблюдаться как увеличение концентрации дефектов, так и их уменьшение. Существенные изменения концентрации дефектов наблюдаются на расстояниях менее 100 нм от границы раздела (рис.21), а величина концентрации дефектов, по сравнению с реализующейся в глубине материала, может изменяться в несколько раз.

При нейтронном облучении многослойных композиций наблюдается обратное рассеяние вторичных атомов и каналирование атомов в слоях более легких материалов. Последнее приводит к изменению пространственного распределения дефектов и способствует некоторому увеличению концентрации дефектов в слоях легких материалов, например, в подслое Ті и прилегающем слое GaAs затворной композиции Au-Ti-GaAs.

Исследовано возникновение кластеров радиационных дефектов в канале V-ПТШ на границе с Au затвором. Благодаря внедрению смещенных нейтронами атомов золота из затвора в прилегающий слой GaAs в канале транзистора образуется повышенная концентрация КРД. Размер ОПЗ кластеров будет определяться уровнем легирования полупроводника, прилегающего к металлу. Поскольку радиус закругления острия затвора (10...15 нм) сопоставим с размерами КРД, то возникает ситуация, когда плотные КРД образуют в канале транзистора упорядоченную цепочку под острием затвора поперек линий тока электронов. Поэтому в структурах V-ПТШ при их облучении нейтронным потоком может наблюдаться процесс самосогласованного образования прозрачных для электронов отверстий между КРД.



Рис. 21 Распределения концентрации радиационных дефектов по глубине GaAs слоя при облучении нейтронами спектра деления двухслойных композиций типа материал-GaAs

Возникновение отверстий в канале транзистора приводит к пространственному перераспределению плотности тока. Поскольку инжекция электронов в канал достигается за счет уменьшения барьера инжектора продольным полем канала, то вброс электронов будет автоматически происходить напротив квантово-размерных отверстий, т.е. там, где продольное поле канала не блокировано областью КРД. Поэтому распределение тока в канале ПТШ станет трехмерным, а вероятность баллистического пролета электрона через отверстие возрастет. Разброс в размере отверстий, их сопротивлении, а значит, и количестве вбрасываемых в отверстие электронов будет определять величину изменений параметров ПТШ.

Расчеты концентрации точечных дефектов, средних расстояний между КРД и диаметра ОПЗ кластеров показали, что при флюенсах нейтронов более 3·10¹⁵см⁻² реализуется ситуация, когда среднее расстояние между СКРД будет сопоставимо с длиной волны электронов, что приведет к образованию в канале V-ПТШ специфической структуры, улучшающей работу транзистора (рис.22). Глубина, на которой проявляется эффект, составляет около 50 нм.

Улучшение параметров ПТШ возможно за счет охвата токопроводящих отверстий управляющим полем затвора со всех сторон, аналогичного процессам в ПТШ с гофрированным затвором. Поскольку размеры отверстий имеют величину порядка длины волны электрона, в некоторых из них при определенных напряжениях смещения затвора происходит квантово-размерное движение носителей заряда, которое, в отдельных случаях, увеличивает крутизну транзистора. Согласно расчетам, наличие отверстий приводит к увеличению крутизны транзистора в 1,5...2 раза и более.

Экспериментально зафиксировано, что после облучения нейтронами крутизна ВАХ некоторых V-ПТШ увеличивалась, что приводило к увеличению коэффициента усиления транзистора. В отличие от нейтронного, при протонном облучении структуры радиационные дефекты не образуют квантово-размерных отверстий, и характеристики транзистора монотонно уменьшаются с набором флюенса.



Рис. 22

Распределение дефектов по глубине в структуре Au-Ti-GaAs при инжекции ионов Au с энергией 100 кэВ в GaAs, полученное с помощью расчета метолом Монте-Карло. Вил на затвор и сечение канала с радиационными дефектами со стороны истока. Значком ⊗ указано направление движения электронов в сторону стока через наноразмерные отверстия между КРД (указаны пунктиром). Запрещенные для движения электронов области пространственного заряда затвора и буферного слоя указаны штрихпунктиром

Анализ изменения параметров всего набора исследуемых ПТШ с различной длиной затвора показал, что при уменьшении длины канала до значений порядка размеров КРД при облучении наблюдается существенное увеличение дисперсии параметров приборов так, что в отдельных случаях (при малых длинах канала) эти параметры могут улучшиться. Подобная зависимость объясняется существенными неоднородностями в распределении дефектов в ПТШ с малыми объемами рабочей области.

Проявление эффекта усиления флюенса в малошумящем полевом транзисторе на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с широкозонным буферным слоем. Разработана гетероструктура GaAs/AlGaAs с модулированным легированием для полевого транзистора с барьером Шоттки. Изготовленный на ее базе Vобразный ПТШ имел исключительно высокие рабочие характеристики для прибора с легированным каналом. Крутизна выходной характеристики достигала 550 мСм/мм, а его высокочастотные характеристики сравнимы с характеристиками НЕМТ приборов. Теоретически показано, что проявление эффекта самосогласованного введения КРД в канал такого транзистора приведет к улучшению его характеристик, причем за счет изоляции буферного слоя энергетическим барьером улучшение характеристик транзистора будет более значительным, чем в V-ПТШ на обычной гомоструктуре.

Исследована нанометровая модификация субмикронных GaAs структур методом электродинамической локализации оптического излучения. Традиционный путь уменьшения размеров элементов вплоть до нанометров, основанный на использовании обычных оптических принципов, требует соответствующего уменьшения длины волны излучения так, чтобы она оставалась меньше размеров модифицируемого объекта. Для нанометровых объектов такой подход означает переход к рентгеновским длинам волн, что сопряжено с большими техническими трудностями и затратами. С другой стороны, известно, что использование электромагнитного

излучения на низких частотах, например, 50 Гц, почти всегда происходит в областях много меньше длины волны. Для описания происходящих здесь процессов используются не оптические принципы, а классический электродинамический подход. Для локализации мощности применяются протяженные металлические объекты, один из размеров которых меньше длины волны (например, провод, экран и т.д.). Единство природы электромагнитного и оптического излучения предполагает, что электродинамические принципы локализации переменного поля применимы и в оптическом диапазоне. Предложено использовать электродинамический способ локализации оптического излучения в областях, существенно меньших длины волны, аналогичный тому, который реализуется с помощью антенн. Применение подобного подхода позволило модифицировать свойства вещества в нанометровых областях с помощью лазерного излучения с длиной волны, существенно превышающей размеры модифицируемой области, что весьма актуально для изготовления полупроводниковых приборов наноэлектроники.

Транзисторы с длиной затвора больше и порядка длины волны излучения. Исследование действия лазерного облучения (с энергией квантов меньше ширины запрещенной зоны GaAs) на ПТ с длиной затвора от 10 до 0,5 мкм при облучении структуры с лицевой и обратной стороны показало, что изменение характеристик приборов подобно друг другу. Это объясняется малым поглощением излучения в GaAs и плавной структурой оптического поля, которое меняется на масштабах, сравнимых с длиной волны. Теоретически оцененная средняя температура импульсного разогрева канала составляла 200...300 °C. Изменение характеристик связано с генерацией и термостимулированной диффузией атомов в области канала ПТ, а также захватом электронов на ловушки, возникшие при лазерном облучении. Зависимость скорости изменения характеристик транзисторов от мощности излучения имеет пороговый характер. При уменьшении мощности излучения до 2 мДж за импульс характеристики ПТ не изменялись.

Транзисторы с эффективной длиной затвора меньше длины волны. При лазерном облучении ПТ с V-образным затвором с лицевой стороны изменение параметров подобно длиноканальным транзисторам. Облучение с обратной стороны за счет дифракции излучения на клиновидном затворе и локализации выделявшейся энергии в области канала транзистора приводило к качественно иной модификации структуры. Как показал анализ вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, область повышенного энерговыделения была сосредоточена около острия затвора, а ее размеры (~ 0,1 мкм) были существенно меньше длины волны лазерного излучения (1,06 мкм). Средняя температура разогрева канала, вычисленная по экспериментальным значениям току стока и затвора транзистора в момент облучения, имела величину 100...400 °С, причем величина температуры разогрева слабо влияла на интенсивность проявления эффекта. В ПТ с областью ОДП на ВАХ в зависимости от степени модификации структуры наблюдалось полное или частичное подавление процесса генерации. Подобный эффект положительный, так как позволяет повысить стабильность усиления транзистора [29,35,41,63,61].

Транзисторы с эффективной длиной затвора меньше длины волны излучения, предварительно подвергнутые нейтронному облучению (3...6·10¹⁵ см⁻²). После нейтронного облучения ПТ с V-образным затвором сохраняли усилительные и генераторные способности, но абсолютные значения параметров изменялись, как это показано выше. После модификации структуры транзисторов однократным импульсом лазерного излучения, в них была полностью подавлена отрицательная дифференциальная проводимость, хотя усилительные свойства сохранялись (на несколько худшем уровне, чем до лазерного облучения). Облучение транзисторов однократным лазерным импульсом с уменьшенной на 80...90% мощностью приводило к увеличению тока стока транзистора при сохранении генерации, что было расценено как модификация отверстий между КРД.

Влияние радиационных технологических процессов на радиационную стойкость GaAs субмикронных полевых транзисторов

Для повышения радиационной стойкости и высокочастотных свойств субмикронных ПТШ предложено использовать радиационные технологические процессы: магнетронное напыление затвора с последующим облучением транзистора локальным электронным пучком и ионно-лучевое дальнодействующее геттерирование. Показано, что использование магнетронного напыления металлизации барьера позволяет улучшить характеристики субмикронных ПТШ, в том числе и его радиационную стойкость, путем модификации границы раздела металл-полупроводник в слое порядка 2...5 нм, приводящей к изменению ВАХ затвор-исток и затвор-сток и уменьшению нелинейных искажений прибора. Экспериментально и теоретически исследовано влияние облучения пучком электронов зазора между затвором и стоком мощного субмикронного ПТШ на его высокочастотные характеристики и радиационную стойкость. На основании результатов исследования распределения микроплазм по анализу картины электролюминесценции в видимом диапазоне показано, что благодаря более равномерному распределению тока в канале транзистора и изменению напряжения пробоя улучшаются как высокочастотные характеристики транзистора, так и его радиационная стойкость. Теоретические расчеты подтверждаются экспериментом.

Проведен краткий анализ результатов экспериментальных исследований процессов старения ПТШ. Рассмотрены процессы выгорания транзисторов, внезапные отказы, постепенная деградация параметров, исследовано влияние поверхности канала на параметры ПТШ, а также влияние подложки и буферного слоя на временную стабильность ПТШ. Показано, что пути повышения стабильности субмикронных ПТШ и интегральных схем на их основе совпадают с требованиями по повышению радиационной стойкости приборов.

Исследовано повышение радиационной стойкости субмикронных полевых транзисторов при дальнодействующем ионно-лучевом геттерировании [27,28,34,38, 43,44,49,64]. Показано, что в результате операции дальнодействующего ионнолучевого геттерирования (ионами аргона и водорода) за счет перестройки и рекомбинации дефектов на границах раздела полупроводниковых слоев в области канала характеристики транзисторов улучшаются. Зарегистрировано укручение профиля распределения легирующей примеси и увеличение подвижности электронов (рис.23), которые привели к 10...30 % увеличению крутизны транзистора. Отмечено уменьшение разброса напряжений пробоя исток-затвор и затвор-сток, что позволило поднять процент выхода годных приборов. Анализ карт распределения параметров транзисторов по площади пластины выявил оптимальное сочетание типов геттерирующих ионов. Наибольший положительный эффект проявлялся при облучении аргоном, меньший эффект – при комплексном облучении аргоном и водородом, а облучение водородом приводило к отрицательному эффекту ухудшения параметров приборов. Влияние комплексного воздействия объяснено с точки зрения перестройки КРД при последовательном облучении ионами различных масс.











Усредненные по 15 образцам зависимости коэффициента усиления по мощности ПТШ от флюенса нейтронного облучения: не геттерированные – 1; предварительно геттерированные – 2

Проведено сопоставление влияния ионно-лучевого и лазерного излучения (1,06 мкм, 30 мДж в импульсе длительностью 10 нс), генерирующих упругие волны, на характеристики GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ). Идентичность процессов дальнодействующего геттерирования при ионном и лазерном облучении структур показывает, что изменение параметров структур вызвано генерацией упругих волн, возникающих на обратной, подложечной стороне структуры и распространяющихся через подложку к приборной стороне.

Исследована радиационная стойкость GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки после ионно-лучевого геттерирования. Характер наблюдавшихся изменений параметров структур при ионно-лучевом геттерировании показывает, что в результате ионного облучения снижается концентрация кристаллографических дефектов, негативно влияющих на подвижность и концентрацию носителей заряда в приборных слоях транзисторных композиций. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предварительное облучение ионами ускоряет релаксационную перестройку компонентов примесно-дефектного состава каждого из образующих транзисторную структуру слоев и приграничных областей между ними. Одним из следствий этого является снижение концентрации ответственных за возникновение глубоких уровней при воздействии нейтронов фоновых примесей и антиструктурных дефектов. Показано, что радиационная стойкость субмикронных ПТШ, прошедших процедуру ионно-лучевого геттерирования, повышается в 2 и более раз как по статическим (крутизна), так и по высокочастотным (коэффициент усиления) параметрам (рис.24).

Выводы

 Предложен расчетно-экспериментальный метод моделирования воздействия нейтронного, протонного и гамма-излучений на субмикронные (вплоть до 0,05...0,1 мкм) полупроводниковые приборы с использованием комплексной модели, позволяющей:

- анализировать процессы образования и стабилизации кластеров радиационных дефектов и точечных дефектов, ионизации в многослойных (с нанометровой толщиной слоев) твердотельных структурах;
- моделировать процессы квазибаллистического транспорта электронов в субмикронных структурах с радиационными дефектами и рассчитывать параметры полупроводниковых материалов;
- учитывать неоднородности энерговыделения при поглощении радиационного излучения, приводящие к неравновесным эффектам на границах нанометровых слоев твердотельных структур приборов;
- рассчитывать статические и высокочастотные характеристики субмикронных полупроводниковых приборов при радиационном воздействии, включая нестационарные процессы в момент и непосредственно после радиационного импульса.

2. Определены доминирующие механизмы деградации электрофизических параметров субмикронных арсенидгаллиевых структур при радиационном воздействии. Показано, что благодаря высокой средней энергии электроны могут проникать между отдельными частями (субкластерами) кластеров радиационных дефектов. В результате расчетов методом Монте-Карло и дополнительного обобщения экспериментальных данных (известных из литературы и оригинальных) получены характерные размеры кластеров радиационных дефектов в Si и GaAs, их распределение в пространстве и форма, рассчитаны характерные размеры областей пространственного заряда. Анализ процессов стабилизации КРД выявил порог образования стабильного субкластера в КРД. Показано, что КРД состоит из плотных субкластеров с характерными размерами 4...15 нм, а расстояние между ними имеет величину 3...20 нм. Последнее обуславливает проникновение горячих электронов между субкластерами в КРД, что приводит к преобладанию этого эффекта в квазибаллистическом ПТШ над механизмами, доминирующими в приборах с микронными топологическими нормами (изменение концентрации и подвижности электронов).

 На основе метода Монте-Карло разработана модель транспорта носителей заряда в субмикронных полупроводниковых структурах, содержащих радиационные дефекты различных размеров (от точечных до нанометровых непрозрачных включений кластеров радиационных дефектов), учитывающая разогрев электронного газа в момент облучения потоком гамма-квантов, а также в больших электрических полях (~100 кВ/см), характерных для субмикронных приборов. Рассчитано изменение зависимостей времен релаксации энергии, импульса и коэффициента диффузии электронов при радиационном облучении. В результате моделирования транспорта электронов в субмикронных полевых транзисторах показано, что при облучении полупроводниковых структур с размерами меньше длины релаксации энергии (меньше 0,5 мкм) из-за генерации неравновесных носителей заряда электронный газ разогревается, что влияет на транспорт электронов в таких структурах. Функция распределения электронов в этом случае имеет близкий к максвелловскому вид, а средняя энергия ионизованных электронов составляет 0,24 эВ. Показано, что наиболее сильно подобный эффект проявляется в твердотельных структурах транзисторов с длиной канала 0,05...0,1 мкм, где ионизованные горячие электроны не успевают остыть вплоть до их втягивания в контакты.

4. Созданы двумерные нестационарные физико-топологические модели субмикронных полевых транзисторов в квазигидродинамическом приближении с учетом радиационного воздействия. Разработана трехмерная модель переноса тепла в структурах субмикронных многосекционных ПТШ средней мощности. На базе этих моделей разработаны методы расчета деградации частотных и шумовых характеристик полевых транзисторов. Разработана модель субмикронных полевых транзисторов, объединяющая метод Монте-Карло, квазигидродинамическое приближение и метод эквивалентной схемы. Модели реализованы в виде программ численного моделирования. Экспериментальная апробация модели показала, что оптимальное сочетание методов позволяет рассчитывать процессы в субмикронных GaAs структурах и полупроводниковых приборах с высокой точностью (20%), в том числе при облучении структур нейтронным, протонным и гамма-облучением.

5. В результате теоретических расчетов показано, что для моделирования процессов в субмикронных структурах GaAs полевых транзисторов необходимо учитывать изменение времён релаксации энергии и импульса электронов, а также разогрев электронного газа при воздействии на структуры протонного, нейтронного и гамма-излучения. Проведен сравнительный анализ радиационной стойкости полевых транзисторов с длиной канала 0,1; 0,25; 0,5; 1; 5 и 50 мкм. Показано, что локально-полевое приближение адекватно описывает процессы в полевых транзисторах с длиной канала 3...4 мкм и более, а квазигидродинамическое приближение справедливо для любых длин канала. Проведено моделирование нестационарных процессов в субмикронных транзисторах в момент и непосредственно после радиационного воздействия. Показано, что на процесс восстановления высокочастотных свойств транзисторов большую роль оказывают процессы перезарядки глубоких энергетических уровней, вводимых в субмикронные структуры транзисторов во время технологических операций и при облучении нейтронным и протонным излучением.

 Теоретически и экспериментально исследованы эффекты усиления мощности дозы и флюенса в многослойных композициях подзатворного узла субмикронных полевых транзисторов с характерными толщинами слоев 5...50 нм. Показано, что наличие золотого затвора приводит к неравновесным процессам на границе раздела Au-GaAs, которые увеличивают неоднородность энерговыделения в 3...4 раза. Показано, что благодаря неоднородному дефектообразованию и эффекту усиления флюенса, при нейтронном облучении квазибаллистических полевых транзисторов в канале транзистора формируются наноразмерные отверстия между радиационными дефектами. Перестройка процесса движения электронов через дефектную структуру может в некоторых случаях приводить к улучшению параметров транзисторов в 1,5...2 раза за счет квантово-механических процессов прохождения электронов через наноразмерные отверстия.

7. С целью обеспечения заданных уровней радиационной стойкости разработана технология дальнодействующего ионно-лучевого геттерирования, повышающая радиационную стойкость субмикронных полевых транзисторов. В результате исследования влияния ионно-лучевого и лазерного дальнодействующего геттерирования на электрические характеристики GaAs n⁺nn⁻ структур с изготовленными на них полевыми транзисторами с затвором Шоттки показано, что сходство процессов геттерирования при воздействии ионно-лучевого и лазерного излучений объясняется аналогичными механизмами генерации упругих волн в полупроводниковой структуре, приводящими к модификации границ раздела эпитаксиальный слой – подложка и металл-полупроводник в исследуемых структурах. Комплексное нейтронное и лазерное облучение субмикронных структур квазибаллистических ПТШ с длиной канала 0,05...0,1 мкм позволяет создать в канале транзисторов особую структуру радиационных дефектов, при которой отрицательная дифференциальная проводимость транзистора сохраняется, а высокочастотные свойства транзистора улучшаются.

Предложен комплексный подход к исследованию электрофизических параметров субмикронных структур полевых транзисторов, который позволил получить достоверные результаты и оценить вклад неоднородностей и границ раздела в процессы взаимодействия радиационного излучения со структурами. Экспериментально исследовано влияние импульсного гамма- и нейтронного излучений на нестационарные процессы генерации, быстрого отжига, перестройки и перезарядки дефектов различной природы, приводящие к изменению параметров структур в 2...10 раз.

Предложена специальная протонная обработка GaAs, позволяющая использовать подобную структуру в качестве радиационно-стойкого фотодетектора. Исследованы процессы комплексного протонно-нейтронного и гамма-протонного воздействия радиационного излучения на характеристики радиационно-стойких фотодетекторов. Показано, что благодаря перестройке структуры глубоких уровней в структуре фоточувствительность сохраняется неизменной в диапазоне флюенсов до 10^{14} см⁻².

Экспериментально исследованы процессы в субмикронных и квазибаллистических полевых транзисторах при протонном, нейтронном и гамма-облучении. Проведены измерения деградации статических (ВАХ, крутизна, емкости) и динамических (коэффициенты усиления и шума) параметров субмикронных (в том числе с длиной канала 0,05...0,1 мкм) транзисторов при радиационном облучении.

Экспериментально показано, что в режиме междолинной генерации квазибаллистический полевой транзистор (с длиной канала 0.05...0.1 мкм) имеет на порядок меньшую чувствительность к радиационному облучению чем классический диод Ганна. В режиме усиления подобный транзистор продемонстрировал стойкость к нейтронному облучению вплоть до $3...5 \cdot 10^{15}$ см⁻², к дозе гамма-облучения до 10^5 Гр, и к мощности дозы гамма-облучения свыше $3 \cdot 10^{10}$ Гр/с.

На основе экспериментальных данных показано, что благодаря дифракции оптического излучения на острие V-образного затвора квазибаллистического ПТШ удается локализовать энерговыделение излучения в областях, существенно меньших длины волны, и модифицировать область канала транзистора, в том числе при наличии в ней радиационных дефектов.

Экспериментально апробирована технология магнетронного напыления затвора мощного субмикронного ПТШ с последующей дополнительной обработкой поверхности GaAs между затвором и стоком электронным облучением, позволяющая улучшить высокочастотные параметры и радиационную стойкость транзистора в 2 и более раз.

Экспериментально апробирована процедура дальнодействующего ионнолучевого геттерирования, улучшающая высокочастотные параметры и радиационную стойкость мощных субмикронных полевых транзисторов в 2...3 раза.

Результаты работы использованы в ННГУ при постановке учебных курсов "Твердотельная электроника", "Моделирование полупроводниковых приборов" и при подготовке лабораторного практикума по курсу "Физика полупроводниковых приборов".

Работа выполнена при частичной поддержке гранта по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Автор крайне признателен своим коллегам за большую помощь при подготовке статьи. Раздел, посвященный моделированию транспорта электронов в субмикронных GaAs структурах, написан в соавторстве с Н.В.Демариной. Экспериментальные данные по высокочастотным параметрам полевых транзисторов любезно предоставлены М.А.Китаевым и А.Г.Фефеловым. Особую благодарность автор выражает В.К.Киселеву, А.Н.Качемцеву, В.А.Козлову, Д.В.Громову, В.Т.Громову, В.Д.Скупову, Д.И.Тетельбауму и А.В.Якимову за ценные замечания, рекомендации и предложения, которые автор получил в ходе обсуждения материалов работы.

Литература

- Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. –Вильнюс: Мокслас, 1989, 264 с.
- [2] Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. –М.: Энергоатомиздат, 1989, 256 с.
- [3] Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. –М.: Физматгиз, 1963, 264 с.

- [4] Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. –М.: Наука, 1988, 192 с.
- [5] Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. –М.: Атомиздат, 1969, 311 с.
- [6] Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. –М.: Атомиздат, 1975, 128 с.
- [7] Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. –Киев: Наукова думка, 1979, 332 с.
- [8] Корбетт Дж., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в твердых телах. –М.: Мир, 1979, 379 с.
- [9] Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. –М.: Наука и техника, 1986, 254 с.
- [10] Динс Д., Виньярд Д. Радиационные эффекты в твердых телах. –М.: Изд. иностр. лит., 1960, 243 с.
- [11] Ланг Д. Точечные дефекты в твердых телах. -М.: Мир, 1979, 379 с.
- [12] Коноплева Р.Ф., Питвинов В.Л., Ухин Н.А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. –М.: Атомиздат, 1971, 176 с.
- [13] Радиационные методы в твердотельной электронике. –М.: Радио и связь, 1990, 184 с.
- [14] Физические процессы в облученных полупроводниках. –Новосибирск: Наука, 1977, 253 с.
- [15] Голанд А. Современное изучение точечных дефектов в металлах. Избранные вопросы //Точечные дефекты в твердых телах. –М.: Мир, 1979, 379 с.
- [16] Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. –Минск: Университетское, 1992, 219 с.
- [17] Томсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. –М: Мир, 1971, 367 с.
- [18] Biersak J.P. "Computer simulation of sputtering" //Nuclear instruments and methods in physic research, 1987. № 1. P.21-36.
- [19] Зулиг Р. Арсенид галлия в микроэлектронике. -М.: Мир, 1988, с. 501-547.
- [20] Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. –М.: Энергоатомиздат, 1988, 256 с.
- [21] Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. --М.: Сов.радио, 1980, 224 с.
- [22] Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. –М.: Мир, 1991, 632 с.
- [23] Полевые транзисторы на арсениде галлия. -М.: Радио и связь, 1988, 496 с.
- [24] Оболенский С.В. "Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов" //Изв. вузов. Электроника. 2002. № 6. С. 31-38.

- [25] Оболенский С.В. "Неаддитивность дефектообразования при последовательном протонном и нейтронном облучении GaAs" //ФизХОМ. 2001. № 2.С. 5-6.
- [26] Оболенский С.В., Китаев М.А. "Полевой транзистор с 30-nm затвором" //Письма в ЖТФ. 2000. № 10. С.13-16.
- [27] Оболенский С.В., Скупов В.Д. "Особенности проявления эффекта дальнодействия в арсенидгаллиевых транзисторных структурах при комбинированном облучении ионами различных масс" //Письма в ЖТФ. 2003. № 2. С.30-34.
- [28] Оболенский С.В., Скупов В.Д. "Влияние ионно-лучевого геттерирования на параметры GaAs-транзисторных структур при нейтронном облучении" //Письма в ЖТФ. 2000. № 15. С.1-5.
- [29] Козлов В.А., Оболенский С.В., Китаев М.А. "Нанометровая модификация материала методом электродинамической локализации оптического излучения" //Письма в ЖТФ. 2001. № 19. С.32-38.
- [30] Оболенский С.В. "Структура кластера радиационных дефектов при нейтронном облучении полупроводников" //В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. – Н.Новгород: ТАЛАМ. 2002. С.155-165.
- [31] Киселев В.К., Оболенский С.В., Скупов В.Д. "Влияние внутреннего геттера в кремнии на параметры структур Au-Si" //ЖТФ. 1999. № 6. С.129-131.
- [32] Демарина Н.В., Оболенский С.В. "Электронный транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии" //ЖТФ. 2002. № 1. С.66-71.
- [33] Демарина Н.В., Оболенский С.В., Скупов В.Д. "Новый метод исследования быстропротекающей релаксации радиационных дефектов в полупроводниковых материалах" //Известия РАН: сер. Физическая. 2000. № 11. С.2162-2167.
- [34] Оболенский С.В., Скупов В.Д. "Эффект дальнодействия при радиационных воздействиях на полупроводниковые структуры с внутренними границами раздела" //Поверхность. 2000. № 5. С.75-79.
- [35] Оболенский С.В., Китаев М.А. "Исследование процессов генерации в баллистическом полевом транзисторе" //Микроэлектроника. 2001. № 1. С.10-15.
- [36] Демарина Н.В., Оболенский С.В. "Разогрев электронного газа в субмикронных структурах быстрыми электронами, инжектированными из металла" //ФизХОМ. 2001. № 1. С.20-23.
- [37] Оболенский С.В., Павлов Г.П. "Влияние нейтронного и космического излучения на характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки" //ФТП. 1996. № 3. С.413-420.
- [38] Оболенский С.В., Скупов В.Д., Фефелов А.Г. "Проявление эффекта дальнодействия в ионно-облученных транзисторных структурах на основе GaAs" //Письма в ЖТФ. 1999. № 16. С.50-54.
- [39] Оболенский С.В., Китаев М.А. "Отрицательная дифференциальная проводимость квазибаллистического полевого транзистора" //Микроэлектроника. 2001. № 6. С.459-465.
- [40] Demarina N.V., Obolensky S.V. "Modeling of Ionizing Irradiation Influence on Schottky-Gate Field-Effect Transistor" //Microelectronics Reliability. 1999. № 8. P.1247-1263.

- [41] Козлов В.А., Оболенский С.В., Китаев М.А., Демарина Н.В. "Воздействие оптического излучения на баллистический полевой транзистор с нанометровым затвором" //Микросистемная техника. 2001. № 4. С.26-28.
- [42] Демарина Н.В., Оболенский С.В. "Моделирование воздействия ионизирующего излучения на полевой транзистор с затвором Шоттки" //Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 4. С.66-80.
- [43] Патент РФ на изобретение № 2176422 "Способ геттерирующей обработки эпитаксиальных слоев полупроводниковых структур" от 28.06.01г. //Киселев В.К., Оболенский С.В., Скупов В.Д.
- [44] Патент РФ на изобретение № 2156520 "Способ контроля структурного совершенства монокристаллических полупроводниковых пластин" от 21.04.00 г. //Киселев В.К., Оболенский С.В., Скупов В.Д.
- [45] Оболенский С.В., Демарина Н.В., Китаев М.А. "Моделирование воздействия ионизирующего излучения на полевой транзистор с затвором Шоттки" //Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ: серия «Высокие технологии в радиоэлектронике». 1997. № 1. С.128-133.
- [46] Obolensky S.V., Pavlov G.P. The pulse radiation influence on MESFET //Fundamental investigation of new materials and processes in substance /Edit by Tikhonov A.N., Sadovnichi W.A., Tret'yakov Yu.D. –M.:MSU. 1996. P.17-18.
- [47] Оболенский С.В. "Определение электрофизических констант GaAs при радиационном воздействии" //В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002, С.146-155.
- [48] Оболенский С.В. "Моделирование характеристик полевого транзистора при инжекции атомов Au затвора в GaAs, стимулированной нейтронным облучением" //В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред.А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.134-142.
- [49] Оболенский С.В. "Идентичность процессов дальнодействующего геттерирования при ионном и лазерном облучении транзисторных структур" //В кн.: Тр. 2го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.142-146.
- [50] Оболенский С.В. "Структура кластера радиационных дефектов при нейтронном облучении полупроводников" //В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. – Н.Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.155-165.
- [51] Оболенский С.В., Демарина Н.В., Козлов В.А., Китаев М.А. "Воздействие оптического излучения на баллистический полевой транзистор с нанометровым затвором" //В кн.: Труды межд. совещ. "Нанофотоника-2000", 23-27 марта 2000. –Н.Новгород: ИФМ РАН, 2000, с.250-253.
- [52] Оболенский С.В., Китаев М.А., Фефелов А.Г "Влияние нейтронного и протонного излучения на скорость электронов в n-GaAs" //В кн: Труды VIII межнационального совещ. "Радиационная физика твердого тела", Севастополь, 1-4 июля 1998, –М: МГИЭМ, 1998, с.161-165.

- [53] Оболенский С.В., Демарина Н.В. Моделирование радиационной стойкости диода Ганна //Наука – производству. 1998. № 12. С.12-16.
- [54] Оболенский С.В. Токовая спектроскопия глубоких уровней в n-GaAs на основе анализа ВАХ полевых транзисторов //Новые промышленные технологии. 2001. № 2-3. С.29-32.
- [55] Асмолова Н.Ф., Киселев В.К., Оболенский С.В. Конверсия спектра рентгеновского излучения в технологических целях //Новые промышленные технологии. 2001. № 2-3. С.24-25.
- [56] Киселев В.К., Оболенский С.В., Семьин Г.Н., Труфанов А.Н. "Исследование характеристик фотоуправляемого GaAs фотопереключателя" //Новые промышленные технологии. 2001. № 2-3. С.47-49.
- [57] Киселев В.К., Оболенский С.В., Семьин Г.Н., Труфанов А.Н. "Исследование характеристик GaAs фотопереключателя" //ВАНТ: сер. Воздействие радиационного излучения на РЭА. 2001. № 1-2. С.145-148.
- [58] Оболенский С.В. "Спектроскопия глубоких уровней в n-GaAs на основе анализа ВАХ полевых транзисторов' // Тез. докл. Росс. конф. "Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость 98", Лыткарино, 1-3 июня 1998. –М.: СПЭЛС-НИИП, 1998, с.157-159.
- [59] Оболенский С.В., Китаев М.А., Трофимов В.Т., и др. "Характеристики полевого транзистора с гетеробуфером" / //Тез. докл. Росс. конф. "Полупроводники-2001", 10-14 сентября 2001. –Н.-Новгород: ИФМ РАН, 2001, с.153.
- [60] Демарина Н.В., Оболенский С.В., Фефелов А.Г. "Влияние протонного излучения на вольт-амперные характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки" //Тез. докл. межд. конф. "Микроэлектроника и информатика", Зеленоград, 15-18 февраля 1997. –Зеленоград: МИЭТ, 1997, с.22.
- [61] Демарина Н.В., Оболенский С.В., Китаев М.А., Фефелов А.Г. "Управление характеристиками полевого транзистора с затвором Шоттки ИК–излучением" //Тез. докл. межд. конф. «Микроэлектроника и информатика», Зеленоград, 15-18 февраля 1997. –Зеленоград: МИЭТ, 1997, с.23.
- [62] Оболенский С.В. "Внутренняя структура кластера радиационных дефектов при нейтронном облучении GaAs" //Тез. докл. XXXII межд. конф. "Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами", Москва, 27-29 мая 2002. –М.: МГУ, 2002, с.186.
- [63] Оболенский С.В. "Улучшение характеристик полевого транзистора при инжекции атомов Au затвора в GaAs, стимулированной нейтронным облучением" // Тез. докл. XXXI межд. конф. «Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами», Москва, 26-28 мая 2001 – М.: МГУ, 2001, с.153.
- [64] Оболенский С.В. "Сравнение процессов дальнодействующего геттерирования при ионном и лазерном облучении транзисторных структур" //Тез. докл. XXXI межд. конф. "Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами", Москва, 26-28 мая 2001. – М.: МГУ, 2001, с.152.

Simulation of the characteristics of submicron GaAs field-effect transistors with radiation-induced defects

S.V.Obolensky²

Nizhni Novgorod State University, 23 Gagarin Ave., Nizhni Novgorod 603950, Russia

Introduction

Further development of semiconductor electronics is associated with reducing the size of the effective regions for active elements (diodes and transistors), which to date has reached the values of 0.1 μ m and less. The fundamental change in the physical processes underlying electron mobility in such structures has made it possible to extend the cut-off frequencies to a higher limit, reduce the switching energy, and decrease the length of the data transmission lines in integral circuits (IC).

In recent years the interaction between various types of photon and corpuscular radiation and the components of radioelectronic apparatus (ICs and discrete semiconductor devices) has become a subject of growing research. The importance of these investigations is attributed, on one hand, to the problem of the radiation resistance of military and space systems and, on the other hand, to the development and ever increasing application of the radiation technological processes for fabrication and testing of semiconductor devices. The use of mathematical models not only allows for savings in time and materials required for apparatus development, but often is the only possible means that helps understand and visualize the physical processes going on in submicron structures of semiconductor devices under the impact of radiation [1-24].

Exposure to irradiation gives rise to defects and ionization in a semiconductor. Radiation-induced defects can be arbitrarily divided into point defects (vacancy and atom in interstitial position), defect complexes (for example, vacancy-impurity atom), and radiation defects clusters (RDC), i.e., aggregations of point defects and their complexes forming under the action of fast neutrons, cosmic protons and heavier particles. The tendency for the active regions of submicron semiconductor devices to decrease is physically limited by a) the inhomogeneity and finite number of charged point centers (impurity ions, defects, etc.) in the devices: b) the size of extensive space-charge regions (SCR) (p-n transitions, Schottky barriers, RDC, etc.) which are determined by the extent of doping of semiconductor layers. The latter is most important for advanced devices with the lengths of the active regions reaching 0.1 μ m and less.

In structures of reduced dimensions a radiation impact leads to radical changes in the physics underlying the device operation, which are due to a number of factors:

1) the characteristic spatial scale of electric field variation is comparable with the relaxation lengths of the energy and electron pulse and the electron mean free path;

2) the characteristic dimensions of the device operation regions are comparable with the distance between the radiation defects clusters;

² Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

3) the characteristic dimensions of the device operation regions are comparable with those of RDC;

4) ionizing radiation heats up the electron gas that has no time to cool off in transit through the device operation region;

5) under neutron irradiation the proton-insulating regions of ICs undergo a structural change, which affects the current flow processes and photosensitivity;

6) interaction between ionizing radiations (particularly, laser's) and nanometer metal objects has some specific features;

7) the radiation technological processes (for example, gettering) largely alter electrophysical properties of a semiconductor, which has a noticeable effect on formation of radiation-induced defects in submicron devices;

8) the electrons accelerated to energies of 0.5...1 eV by high electric fields (~ 100 kW/cm) in submicron devices are able to penetrate RDC, which calls for a radically different approach to modeling of the radiation resistance for these devices.

Absorption of radiation in the interface areas of submicron structures is specific. The differences in atomic weights, density, the photons /fast particles interaction cross-sections give rise to nonequilibrium processes at the interfaces, which both enhance and weaken the radiation effect. The characteristic lengths at which such effects exhibit activity are comparable with the sizes of active regions in up-to-date devices ($\sim 0.05...0.1$ µm), therefore, irregularities in the defect formation and ionization, electron gas heating and springing of quantum-size structures RDC lead to qualitative changes in the process of current flow through the active regions of a device. Although the lengths of the active regions in such devices compare well with the length of a collision-free path of electrons and, seemingly, the radiation defects should not have any impact on device operation, this influence does show up at certain values of the electric field strength as improvement in the characteristics of submicron devices.

The situation is different at the interfaces between a semiconductor and a metal object of nanometer dimensions. Despite the random character of interaction between radiation and multilayer compositions, the nanometer-size areas adjoining the faces of extended metal objects have RDC arranged in an ordered fashion along at least two of the three coordinates due to a higher fluence. This circumstance brings about essential changes in the electron transport in such regions. One has to take account of not just the processes going on near two-dimensional objects (interfaces), but of one-dimensional objects too, i.e., extended faces of metal contacts, RDC chains, etc. The mathematical models have to be modified to ensure adequate description of the physical processes in submicron devices, optimization of the latter's design (for radiation stability also), and processing of the experimental and tests data.

A number of mathematical models have been developed for a study on a charge carrier transport in semiconductor material and for simulation of the radiation absorption in multilayer structures, including models based on the method of particles (involving the Monte-Carlo method). Yet, the radiation resistance of submicron semiconductor devices has so far been designed with simplified simulation techniques, by substituting the device to be studied for an equivalent circuit. Such an approach is justified when applied to devices having micron topology norms, but it fails to account for the above physical effects stemming from the submicron dimensionality of the active regions.

To analyze the processes in submicron devices will take a combination of physical and topological modeling (a quasi hydrodynamic approximation) involving the method of particles based on Monte-Carlo technique. The major advantage offered by such a combination is a possibility to carry out a complex analysis of the processes of ionization, defect formation and electron transport in multilayer nanometer structures. Owing to the physical-topological models of semiconductor devices, that in some approximation simulate the real transport of charge carriers, it is possible, by changing the electron flow conditions, to model the above processes thus gaining an insight into the electrons interaction with varying-in-time nanometers structures of RDC. Such work has never been done on submicron devices yet.

Lack of a unified approach to modeling of a complex radiation effect on submicron semiconductor devices and the difference in the experimental data on radiation resistance for submicron devices of domestic and foreign manufacturers call for development of a complete system of design and experimental techniques. Two-dimensional and three-dimensional nonstationary simulation of the charge carriers transport as affected by quanta and fast particles, and calculations of a heat distribution in semiconductor structures enable one to study the dynamics of the processes of charge carrier concentration/energy redistribution, the electric field and electric currents determined by the above factors. The latter is particularly important in processing of the experimental results, when measured time dependences of currents and voltages imply complex processes of interaction of the electron gas with the crystal lattice and radiation.

The proposed theoretical method for analyzing radiation effects on devices is supposed to enable 1) design of a spatial structure of RDC and their space distribution both in uniform material and in multilayer compositions; 2) modeling of collision-free electron motion and the processes of collisions with the radiation defects, hindering this motion; calculation of the electron energy distribution functions and the energy valley occupation; 3) using the results of theoretical calculations and experimental data for the initial and boundary conditions; 4) design of the static and dynamic parameters of semiconductor devices and radioelectronic systems in general.

Experimental investigations of the above processes require that a complex approach be taken to a parameter analysis of materials, multilayer structures and devices. For one test object it is advisable to make the entire variety of measurements in order to determine as many parameters as possible for both material and device. Such an approach has never been used before because of a different spatial scale (characteristic lengths) of the processes.

The objective of this work is to develop the methods and means for the design and experimental modeling of physical processes in submicron GaAs semiconductor devices, taking into account the dimensionality and radiation effects [25-69].

Study of the electrophysical characteristics of epitaxial GaAs structures in submicron semiconductor devices under irradiation

To acquire initial data for developing the models of submicron devices, a study was carried out on the process of interaction between radiation and submicron semiconductor structures. The theoretical estimates and models available in literature [3-8, 10-19] were specified based on the experimental data and results of computer-aided experiments of recent years. A model for a radiation defect cluster as a formation partly transparent for high-energy charge carriers (0.3...1 eV) has been developed [30,33,58,62,63].

In the course of calculations 300 collision cascades were designed for each energy of a primary atom: 10, 25, 50, 100, 200 and 400 keV. In each cascade, the radiation defects subclusters (RDSC) were counted taking into account their size- and mean-intersubcluster-distance distributions (Fig.1, page 207). The result of the above procedures shows that neutron irradiation of GaAs and Si gives rise to formation of RDC in semiconductors, with the characteristic size of subclusters being close to 10 nm and the distances between them varying as 10...40 nm in GaAs and 30...80 nm in Si. Since the mean free path of hot electrons (energies above 0.3 eV) is shorter than 5...10 nm, their collisions with subclusters should be considered separately.

Fig.1, page 207. Size distribution of subclusters in a collision cascade for different initial energies of a primary atom. The data are given for Ga implanted in GaAs [50].

With a view to modeling the processes of rapid recovery of submicron device parameters after the action of a neutron radiation pulse we studied the processes of a stable RDC region formation in GaAs. Unlike silicon, GaAs is characterized by practically immobile vacancies and a much wider variety of point defects complexes. Therefore, at the final stage of formation, a cluster's shape and the charge which specifies the field in the space-charge region of radiation defects subclusters will be determined by rearrangement of the defects complexes around a relatively stationary and stable core. On average, 2...10 stable subclusters are formed in RDC by irradiation of GaAs with neutrons of 1.5 MeV energy. The space-charge regions of subclusters merge into one large aggregation preventing movement of low-energy electrons, whereas electrons with energies above 0.2-0.7 eV can penetrate between the subclusters. As the distance between subclusters varies within a broad range, practically every cluster has a "hole" through which a hot electron can penetrate into RDC (Fig.2, page 207).

Fig.2, page 207. Mean distance between electron-opaque subcluster regions as a function of electron energy in n-GaAs: dopant concentration $6 \cdot 10^{17}$ cm⁻³ – (-); 10^{15} cm⁻³ – (--). Figures indicate the energy of the Ga primary atom (in keV). D is the size of the gap between clusters, at which quantum reflection becomes significant [50].

To enable modeling of ionization currents in submicron devices under gamma radiation, we studied the process of electron gas heating through generation of primary electrons (30...500 keV) by gamma quanta (50...5000 keV) and a subsequent generation of secondary electrons with the energies 0.2...1 eV [36]. It is shown that the resulting energy distribution function of electrons at the time of γ -irradiation can be approximated with a 10...20% accuracy by the well-known expression for the Maxwellian distribution. The latter allows application of a quasihydrodynamic approximation to analysis of the processes arising in submicron devices exposed to γ -irradiation, thus accounting for the variation of the electron gas energy that brings about a change in the spatial distribution and rate of charge carriers as well as in the high-frequency and static parameters of device on the whole.

Based on the results of modeling the processes of interaction between radiation and submicron semiconductor structures it has been shown that due to mechanical stresses, the proximity of metal-semiconductor interfaces, the nanometer thickness of transition and active layers, the impurity-defect system of the structure in submicron devices differs from that of micron-size samples. An experimental approach to analysis of the processes taking place in submicron GaAs devices under irradiation is proposed.

The structure and the parameters of test samples were picked with regard to the variety of the processes to be analyzed, and structures were divided into major and minor ones. The samples were selected so as to differentiate between the processes under study, i.e., in some samples the dominating effects were those related to changes in the concentration and mobility of charge carriers, while in others the effects of a ballistic motion of electrons prevailed. An optimal device for such measurements is a Schottky-gate field effect transistor (Schottky-gate FET). Analysis of its current-voltage and capacity-voltage characteristics yields both the profiles of electron density distribution and electron mobility across the structure, and the dependence of the charge-carrier velocity on electric field. All of the above, and the fact that quasi ballistic Schottky-gate FET with the effective length of the gate under 30 nm are available with the author of hereof determined the choice of a semiconductor structure of the Schottky FET type as the main object for experimental research [47, 48, 52, 54].

To compare the effects arising in submicron and micron devices we studied a FET structure with the gate lengths varying as 30 nm, 250 nm, 330 nm, 500 nm, 700 nm, 2 μ m, 10 μ m, 20 μ m, and 50 μ m. The temperature influence on measurement results was accounted for by using different FET – high-power ones with about 150°C working temperature in the channel, and low-noise FET with a practically room temperature in the channel. The transistor width varied from 25 to 4800 μ m with the width of one section varying in a 12-1000 μ m range. For detailed experiments we used transistor structures with the gate having 3...5 different lengths, the measurement results were compared only for one structure. The structures were compared based on averaged data. Additional measurements were taken on Schottky diodes, test elements for measuring contact and metallization resistance, on samples of crystals and structures used for IR spectroscopy, ellipsometry, and Hall effect measurements.

Static measurements of the sample characteristics were conducted on I-V meter L2-56 and C-V meter E7-12 and E7-14. Capacitance spectroscopy of the deep levels was carried out on a special setup enabling measurements during temperature scanning in a 77 K – 300 K range. Besides, a method of nonstationary current spectroscopy was specially developed for analyzing the process of fast relaxation of deep levels after the action of pulsed radiation. High-frequency measurements of the Schottky-gate FET characteristics (amplification and noise factors, output power) were conducted in the conventional technique.

Investigations into the processes of fast recovery of submicron FET characteristics under pulsed radiation were carried out on KAVKAZ, Argument etc. systems available with the NIIIS research institutes (End User 2). A study was done on the effect of a gamma-radiation pulse on GaAs FET with the channel length of 10; 1; 0.5; 0.25 and 0.1 m. The gamma pulse duration was 20...30 ns, the dose rate reached $3 \cdot 10^{10}$ G/s¹, the average quantum energy being 1MeV. A photocurrent was detected in the field effect transistor at- and immediately after the irradiation impact (Fig.3). Besides, photocurrent was detected in a interdigital photodetector [25, 54-57]. Due to a short lifetime in the proton-insulating GaAs layer, the photodetector response was of the same form as the gamma radiation pulse.

Fig.3, page 209. Load voltage of FET with a 0.1 μ m channel length (upper branch) and photodetector voltage (lower branch) under simultaneous irradiation by X-ray quanta: upper branch – 500 mV/point; lower branch – 200 mV/point; time scan –250 ns/point. The arrow indicates the instance of the radiation impact. The noise prior to irradiation instance is due to the electromagnetic field of the x-ray setup.

Analysis of the measurement results has revealed two deep levels responsible for durable (to 100 μ s) changes of current in the transistors. The position and depth of the layers were in agreement with the capacitance spectroscopy data. The experimental dependence is favorably approximated by the sum of two exponents of different signs corresponding to two kinds of defects. The coefficients preceding the exponents were used to calculate the concentrations-, and the characteristic recharge times - the depth of the energy level of the defects. The obtained results are as follows: $E_c = 0.8$ eV for 10^{14} cm⁻³ concentration, $E_c = 0.4$ eV for $3 \cdot 10^{15}$ cm⁻³ concentration.

At a second stage of measurements the transistor current was measured versus time under the action of a neutron radiation pulse (Fig.4, page 209) with the fluence on order of $3 \cdot 10^{14}$ cm⁻². The process of rearrangement of the radiation-induced defects complexes within a millisecond range was detected. By analyzing the resulting I-C characteristics of the transistors, which were taken every 5 ms after the impact of a neutron pulse, it was possible to estimate the depth of the levels corresponding to the radiation effects in the forbidden band. Analysis of the experimental data and the calculation results have both shown restructuring of the RDC shell to be taking place.

Fig.4, page 209. Relaxation of I-C characteristics of submicron FET after irradiation with a neutron pulse. Upper branch is the voltage proportional to the FET drain current: gate-source voltage U = -1 V; drain-source voltage is sawtooth-like, 0...5 V; time-base -2 ms/point. Lower branch is a signal from neutron radiation detector.

The characteristic time of the restructuring process is 5...15 ms over which the radiation defects concentration decreases by an order of magnitude.

With a view to analysis of the effects produced by complex radiation on submicron devices, a study was carried out on RDC formation processes in a semiconductor with a high concentration of point radiation defects under proton- and, following it, neutron irradiation of GaAs. Since the samples resistance is high at large doses and fluences of irra-

 $^{^{1}}$ 1 G/s = 100 rad/s

diation, the measurement technique providing highest precision proved to be an optically induced current spectroscopy of deep levels of the radiation effects. For measurements, we studied a photosensitive element that structurally is a interdigital system of electrodes based on a GaAs semi-insulating substrate with an epitaxial undoped layer $(10^{14} \text{ cm}^{-3})$, irradiated with 3 doses of protons $0.1...2 \,\mu\text{Cl}$ each and varying in energy as 30, 60 and 90 keV. The interelectrode distance varied within a $5...50 \,\mu\text{m}$ range. The interdigital structure consisted of $10...50 \,\mu\text{m}$ (a pin length was $0.1...1 \,\mu\text{m}$ for a width of $10...25 \,\mu\text{m}$). The proton-insulating region of a thickness reaching down to $1.2 \,\mu\text{m}$ from the surface reduced the dark resistance of the structures by more than an order of magnitude. Such layers are used for insulating the FET contact areas against one another and against the active regions of the transistor.

Dependences of the interdigital photodetector current on wavelength under irradiation are shown in Fig.5, page 210. A reduction in the photosensitivity by neutron irradiation is associated with the potential well for the holes, existing in the RDC region. It is responsible for the capture and fast recombination of holes through the defect levels in the vicinity of a radiation defects cluster. The current spectroscopy analysis (Fig.6, page 210) has shown the protons-induced defect complexes (shallow levels in the forbidden band) to restructure under neutron irradiation into larger RDC. The photosensitivity of samples to quanta with the energies approaching the fundamental absorption edge in this case was only slightly dependent on the dose of gamma-irradiation (to 10^5 G) and on the fluence of neutron radiation (to 10^{14} cm⁻²). Such structures have been successfully used as radiationresistant photodetectors. High performance and high radiation resistance of the IC photoswitch based on a interdigital structure and FET, which is used as a commutator element.

Fig.5, page 210. Dependencies of photocurrent for i-GaAs interdigital structure with proton-irradiated $(1.4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ dose per energy of 30; 60; and 90 keV})$ active region, irradiated by fast neutrons (\leq En> = 1 MeV) and gamma-quanta (\leq E γ > = 1 MeV). Fig.6, page 210. The spectra of optically induced current spectroscopy of photoresistance after irradiation impact: initial samples – 1; a 10⁴ G dose of gamma quanta and 10¹⁴ cm⁻² neutron fluence – 4; a 10⁵ G dose of gamma quanta – 3; a 10² G dose of gamma quanta and 10¹³ cm⁻² neutron fluence – 4. On top: depth and type of level in the forbidden band of GaAs.

Modeling of charge carrier transport in submicron GaAs semiconductor structures under proton, gamma and neutron irradiation

When the active region of submicron semiconductor devices shrinks to lengths of 50...500 nm, the effects of ballistic and quasiballistic transport of electrons in highlyinhomogeneous electric fields come into particular prominence [1,22,23]. In this case, a radiation resistance analysis is supposed to involve two- or three-dimensional approximation and account for a number of new effects arising from heating of the electron gas under irradiation and scattering of the carriers on the radiation-induced defects. To analyse the radiation effects on submicron semiconductor devices, we used a quasihydrodynamic method (QHM) for describing the charge carriers transport [1,22,24,35,37,39,40,42,45, 46,53,59-61]. The Monte-Carlo method was used to determine the variation of the energy/pulse relaxation times, the average energy and the drift velocity of electrons, and also other parameters of semiconductor material exposed to irradiation [32,36,63].

By averaging over the ensemble of electrons we simulated the processes of collisionfree electron transport in short GaAs structures, which were interrupted by scattering on the phonons, dopant ions and by intervalley transitions.

An additional mechanism of small-angle scattering, involving the Brooks-Herring (and also Conwell-Weiskopf) interaction potential was introduced to account for the point defects. The charge carriers interaction with RDSC was regarded as an elastic scattering on the impurities enclosed in the space-charge region, with a randomizing angular distribution. According to the RDSC size calculation results, the size of the area blocking the electron flow depended on the energy of an incoming electron.

The data on the mean distances between subclusters and the average amount of subclusters in a collision cascade were used for estimating subcluster concentration. Besides, we used the experimental estimate of the point defects concentration, $N_{pd} = K_t(F_n) \cdot F_n$, where N_{pd} is the point defects concentration, F_n the neutron radiation fluence. The value of coefficient K_{pd} (F_n) is about 50 cm⁻¹. The average concentration of subclusters was picked based on the original experimental data that were in agreement with the measurement results provided by other authors:

 $N_{dr} = K_{dr}(F_n) \cdot F_n$, where N_{dr} is the concentration of disordered regions. For fluence values of $10^{14} \dots 10^{16}$ cm⁻² the cluster concentration is $10^{13} \dots 10^{15}$ cm⁻³, so the coefficient $K_{dr}(F_n) \approx 0.2$ cm⁻¹. The values for K_{pd} and K_{dr} were specified by varying these coefficients so as to have the calculated values of electron concentration and mobility fit the experimental- and deep level spectroscopy data. For different samples and experimental conditions these quantities varied as: $K_{pd} \approx 41 \dots 63$ cm⁻¹ and $K_{dr} \approx 0.16 \dots 0.24$ cm⁻¹.

Briefly, the results of modeling the radiation-affected electron transport can be summarized as follows. In the case of scattering at point defects, the rise in their concentration causes an increase in the Debye screening length, i.e., the scattering remains to be smallangle but the average distance between the scattering centers decreases, which results in a higher scattering frequency. This distinction between the processes of scattering on radiation defects and on atoms of ionized impurity (in which case the scattering frequency does not change, while the mean angle of scattering increases) is the reason why, for the same concentrations of impurity atoms (10^{16} cm⁻³) and point defects, the dependences of the drift velocity and the momentum relaxation times differ by 10...15%.

Figs 7 (page 212) and 8 (page 212) demonstrate the dependences of a drift velocity, mobility and relaxation times of the electron energy and momentum in GaAs before- and after proton irradiation. Despite a small-angle pattern of the electron scattering on charged radiation defects, a largely increased frequency of the scattering causes a decrease in the mean free path and, following it, a drastic reduction in the mobility and drift velocity. On the other hand, a decreasing rate of building up energy by the electrons means there is less probability of emission from optical phonons and intervalley transitions, so, the energy relaxation time increases. The experimental data were obtained by analysis of the current-voltage characteristics of proton-irradiated (20...100 keV) FET.

A study was done on variation of a drift velocity burst in submicron structures. The influence of point defects on the burst amplitude is reduced with an increasing strength of

the electric field. For fields under 25 kV/cm in structures of a 250 nm length the presence of point defects in a concentration comparable with that of the doping impurity causes suppression of the velocity burst. In GaAs structures not exposed to radiation the same effect takes place when a sample length exceeds 1000 nm. At fields of about 100 kV/cm (working field strengths in submicron FET) the effect of velocity burst shows up even at defect concentrations being 2...5 times higher, which determines a higher radiation resistance of submicron FET.

Fig.7, page 212. Drift velocity v (-) in GaAs, mobility μ (---) in GaAs and (-) Si as a function of electric field strength for different proton dosage: $D_p = 0 \text{ cm}^{-2} - 1$; $D_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} - 2$; $D_p = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} - 3$. The analytical result is shown by \Box , the experimental data – by Δ . Impurity concentration: $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in GaAs and 10^{17} cm^{-3} in Si.

Fig.8, page 212. Energy relaxation time τ (-) in GaAs and pulse relaxation time τ (---) in GaAs and (-) in Si as functions of the mean energy of electrons for different proton doses: $D_p = 0 \text{ cm}^{-2} - 1$; $D_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; $D_p = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; experimental data are shown by Δ , \Box . Impurity concentration: $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in GaAs and 10^{17} cm^{-3} in Si.

We investigated the influence of neutron irradiation on the electrophysical parameters of n-GaAs varying in a dopant concentration as 10^{15} and 10^{17} cm⁻³, which corresponds to the doping levels in a buffer layer and a field-effect transistor channel.

Dependences of the electron mobility and velocity in GaAs on electric field, as well as dependences of the energy / momentum relaxation times on electron energy in the neutron-irradiated samples and in samples unaffected by radiation have been calculated (Fig.9, page 214) and experimentally measured.

Fig.9, page 214. Dependences of the drift velocity (-) and mobility (---) of electrons in GaAs and Si on electric field: without irradiation -1 and 2; after irradiation with neutron fluence of 10^{15} cm⁻² - 3 and 4. Dopant concentration: 10^{15} cm⁻³ - 1 and 3; 10^{17} cm⁻³ - 2 and 4. Experimental data: \Box , Δ , ∇ , o, •, \Diamond .

As with the proton irradiation effect, scattering on the radiation defects clusters reduces the momentum relaxation time, the mobility and velocity of electrons with energies lower than 0.4 eV (Figs.9, 10, page 214). Due to a randomizing character of scattering on the disordered regions the back-scattered electrons are decelerated by the electric field. This process is to a certain extent similar to the energy release through generation of an optical phonon, which compensates for the influence of point defects and determines a weak sensitivity of the energy relaxation time to the neutron irradiation fluence.

Fig.10, page 214. Electron energy, τ (---), and pulse, τ (-), relaxation times versus mean energy of electrons in GaAs and Si: without irradiation – 1 and 2; after irradiation with neutron fluence of 10^{15} cm⁻² – 3 and 4. Dopant concentration: 10^{15} cm⁻² – 1 and 3; 10^{17} cm⁻² – 2 and 4. Experimental data are shown by \Box , Δ , o, \bullet .

Variation of the energy / momentum relaxation times brings about a change in the valley population. The influence of such changes is biggest on the runaway effect. A rise in the energy relaxation time within the electron energy range to 0.3 eV even at low electric fields of 2...4 kV/cm causes the electron energy to increase until intervalley scattering is launched. The effect sensitivity to the radiation defects shows up through an increase

(1.5-fold) in the electric field strength, which corresponds to the maximal stationary drift velocity of electrons in the neutron-irradiated material (Fig.9).

Fig.11, page 214. Electron mean energy as a function of the electric field duration: GaAs unaffected by radiation -1 and 3; GaAs irradiated by 10^{15} cm⁻² fluence of neutrons -2 and 4; GaAs irradiated by a proton dose of $2 \cdot 10^{14}$ cm⁻² - 5 and 6. Electric field strength: 3.2 kV/cm - 1.2 and 5; 2 kV/cm - 3.4 and 6.

The effect of ionizing radiation on electron transport in submicron structures was considered for structures both unexposed- and exposed to neutron irradiation. Calculations were performed for uniform structures of 100, 250, 500 and 1000 nm length, having 10^{14} cm⁻³ dopant concentration. Fig.12 (page 215) shows mean drift velocity and energy of electrons as functions of the electric field strength under gamma-irradiation.

Fig.12, page 215. Theoretical dependencies of the average velocity (-) and energy (---) of electrons on electric field strength in the absence of radiation and under gamma-quanta irradiation in a structure of 100 nm length.

At E<4 kV/cm the electron energy doubles under the radiation impact, which results in a 5-fold increase in population of the L-valley (Fig.13, page 215). The mean drift velocity of electrons decreases with the appearance of nonequilibrium carriers. On one hand, this occurs due to increasing population of the upper valleys, which are characterized by a high effective mass, on the other hand – through a decrease in the drift velocity in either valley. The experimental findings showed good agreement with theory.

Fig.13, page 215. Hot electrons distribution over the Γ , L – conduction band valleys of a 100 nm-length GaAs structure as a function of the electric field under irradiation with a gamma-quanta flux: 0 G/s – 1; 5·10⁹ G/s – 2; 10¹⁰ G/s – 3.

The effect of ionizing radiation on structures with radiation-induced defects was studied on a 1000 nm-length structure. Generation of nonequilibrium carriers results in a higher mean energy of electrons and a greater probability of intervalley scattering. Scattering on the defects, on the contrary, reduces the mean free time and the average energy acquired by electrons over the free path, and increases the population in the Γ -valley. As a result, the presence of radiation defects causes the mean drift velocity to increase at a gamma-irradiation instance 2-fold and more in fields over 80 kV/cm (Fig.14, page 215). As these are the working strengths of electric field for submicron FET, the above result is important in terms of predicting irreversible **failures** through uncontrolled rise in the current at irradiation.

Fig.14, page 215. Mean drift velocity of electrons (100 nm length of structure) versus electric field strength before (-) and after (---) neutron irradiation $(2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2})$ without and in the presence of gamma irradiation.

A rigorous approach to the quasi-hydrodynamic approximation is possible only given the Maxwellian energy distribution of electrons. According to the calculations, both – prior to neutron irradiation and after the impact – the electron energy distribution in the Land X valleys is of the Maxwellian type, and in the Γ valley it differs from the Maxwellian distribution only in high fields, when the population of this valley is low. In modeling of gamma-irradiation the electron energy distribution function was calculated for a structure of 100 nm length and a field strength of 20 kV/cm at which the maximal value of electron drift velocity in a structure was achieved. When the dose is increased from $5 \cdot 10^9$ to $5 \cdot 10^{10}$ G/s, the fraction of "hot" electrons increases from 8.5 to 85% of the concentration of equilibrium electrons. On the whole, the type of a distribution function at gamma irradiation is close to Maxwellian distribution.

The basic equations defining charge carrier transport in a quasi-hydrodynamic approximation are the Poisson equations, the continuity, energy balance and charge carrier momentum equations, and also expressions for the densities of current and electron energy flux [24], see (1), page 216. Here V is the potential; n is the electron concentration; N_+ , N_- are the concentrations of positively and negatively charged ions (donors, acceptors, radiation defects); *j*, *j*₁ are the densities of the electron current and total current; *j*_w is the density of the electron energy flux; W, W_0 are the nonequilibrium and equilibrium energy of electron, respectively; τ_w is the energy relaxation time; τ_p is the momentum relaxation time; m is the effective electron mass; *D* the diffusion coefficient of electrons; υ is the electron fluence; q the electron charge modulus; *G* is the coefficient of charge carrier generation under irradiation (allowed for only at the time of irradiation); *R* the recombination coefficient (allowed for only at and immediately after the irradiation impact); W_e is the mean energy of a generated electron (allowed for only at the action of irradiation).

The effects of nonlocal heating of gas in highly inhomogeneous electric fields, arising in the channels of submicron field-effect transistors under irradiation determine the acceleration and deceleration velocities of electrons in transit along the transistor channel. These processes are appropriately taken into account by introduction into the quasihydrodynamic model of the balance equations for energy and momentum whose coefficients depend on a radiation impact.

When simulating ionization processes that are responsible for production of electronhole pairs, set (1) has to be extended to include similar expressions for the hole current and energy flux densities, and also the continuity equation for the hole component of current. Since the hole mobility in GaAs is by an order of magnitude lower than electron mobility, and the hole concentration is comparable with the electron concentration in the transistor channel at dose rates above 10^{11} G/s, including the velocity burst effects and other features of nonstationary and nonlocal variation of the holes energy week influence on the results of transistor parameters calculation. Yet, the hole charge, just as the recombination processes, was taken into account in designing electric field distribution in the FET channel under gamma irradiation.

Although a FET gate is isolated by a Schottky barrier, dielectric layers are used for passivation of the open surface of GaAs. The experimental results have shown that charge accumulation in dielectric layers may cause a change in the I-C characteristics of FET by 5...10%, which is due to a high doping level in the channel of submicron transistors in question. To provide adequate description of the FET processes, the model was completed with a mechanism taking account of charge accumulation on the GaAs surface. By introducing additional charge into the boundary nodes of the calculation mesh it was possible to simulate the near-surface bend of the conduction bands, i.e., increase the FET channel conductivity.

Fig.15 (page 218) shows the results of calculations of the electron velocity dependence on coordinate, obtained with the Monte-Carlo method within the quasihydrodynamic and drift-diffusion approximations. A comparison is made between the coordinate dependencies for GaAs unaffected and affected by neutron radiation for three different patterns of electric field distribution. For convenience, the same form of a model function was used to describe a dependence of the electric field strength on coordinate. This is the function describing the Gaussian distribution. The field amplitude in all cases was 90 kV/cm, and the parameters that in the Gaussian distribution define the mean value and dispersion were scaled to be 10^2 , 10^3 , 10^4 nm. For lengths over 10 μ m at a 90 kV/cm field the coordinate dependence of the velocity, as determined within the drift-diffusion model, is close to the calculation accuracy yielded by the Monte-Carlo method. At fields under 20 kV/cm, which is the case for FET with the channel longer than $2...3 \mu m$ at conventional voltage of 5 V, the results obtained within the drift-diffusion model correlate with the Monte-Carlo simulations, when the channel length exceeds 3 μ m. The quasihydrodynamic approximation provides an adequate description of the effects in FET with all of the above lengths and values of neutron fluence, whereas the truncated quasihydrodynamic model serves this purpose for gate lengths over 1 µm.

Fig.15, page 218. Electron velocity as a function of coordinate, calculated for a bell-like distribution of the electric field: DD stands for drift-diffusion approximation; QH denotes quasi-hydrodynamic approximation; QH denotes truncated quasi-hydrodynamic model (i.e., without the energy balance equation); MC stands for the Monte-Carlo method. DD, QH and MC show the curves obtained without neutron irradiation; QH(Fn) and MC(Fn) – the curves after neutron irradiation.

Theoretical and experimental study of radiation effects in GaAs submicron Schottky-gate field-effect transistors

A theoretical and experimental study of the effects induced in submicron Schottkygate field-effect transistors by irradiation was carried out in order to evaluate the transistor resistance to radiation [24,26,37,40,42,45,48,60,63]. An optimal mathematical model was selected by determining the applicability limit of the drift-diffusion and quasihydrodynamic approximations. The effect of neutron irradiation on the characteristics of n-GaAs transistors with the gate length varying as 10 μ m; 5 μ m; 1.5 μ m; 0.75 μ m; 0.5 μ m; 0.25 μ m; 30 nm was investigated (Fig.16, page 219). In the latter case the length of the transistor channel is determined by the size of the gate space charge region and, depending on gate and drain voltage, is equal to 50...150 nm.

Fig.16, page 219. Microphotograph of the cross-section of FET with a V-groove in the gate region (V-FET), obtained with the scanning electron microscope JEOL facility (IPM RAS). Doping of the GaAs layers: n⁻ buffer -10^{14} cm⁻³, n channel $-6 \ 10^{17}$ cm⁻³; n⁺ contact layer -10^{9} cm⁻³. Gate metallization: Au with a W sublayer. The V-gate tip curvature radius is 15 nm.

Measurements were taken on a saturation current, output power and FET gain coefficient at the working frequencies (see the Table on page 220). It was shown that the drift-

diffusion model provides adequate description of the effects in transistors with the gate length above $1...2 \ \mu m$.

Table, page 220. Experimental measurements of FET characteristics. In brackets are the values calculated within the quasi-hydrodynamic model

Channel length, µm /Gate width, µm

Neutron fluence, x 10^{15} H /cm²

Working frequency, GHz / Limiting amplification frequency, GHz

Calculated value of charge carrier concentration in FET channel before

and after irradiation, x 10^{17} cm⁻³

Saturation current before and after irradiation, mA

Power gain at the working frequency before and after irradiation, dB

Output power at the working frequency before and after irradiation, mW

The quasi-hydrodynamic model was checked by comparing the results of the calculations of FET parameters degradation by neutron irradiation (see the Table), taking into account dependencies of the energy/momentum relaxation times on neutron fluence and without this effect. The difference between the calculations and the experimentally measured I-C characteristics of FET after irradiation was more than 60% for the model ignoring the relaxation times degradation and under 20% with the account of this effect (see the Table). We also measured dependencies of the drain current in a transistor (Lg = 30 nm) exposed to gamma irradiation on the IGUR facility. It was found out that the theoretical and experimentally measured dependencies differ by 20%.

Investigation was carried out into a negative differential conductivity (NDC) of a normally off quasi-ballistic V-FET. At a positive bias of 0...0.4 V on the gate and 0.5...1.5 V on the drain, which correspond to the transistor NDC, a generation occurred at frequencies of 32...38 GHz. A spread in the generation frequency for transistors based on the same semiconductor structure was about 1GHz for a 20 MHz bandwidth of a generated signal. The signal power was 1 mW per 1 mm gate width, its amplitude reaching a maximum at a drain voltage of 0,7 V and decreasing 2-3-fold with a change in the voltage to 0.5 V (or to 1.5 V). The efficiency of the electron frequency tuning to a varying drain voltage is 1 GHz/V.

High-frequency characteristics of FET under ionizing irradiation were studied with a light-emitting diode (40 mW, 0.55 μ m) incorporated into the measuring facility. Under the irradiation impact the power gain increased by 0.1...0.3 dB, which was attributed to a better match between the V-FET and the measuring system. A generated signal bandwidth showed a weak dependence on radiation power, and the generation frequency decreased by 20...30 MHz. At a voltage of 0.5 V the generation mode was switched on by irradiation.

After a neutron irradiation treatment (<E>=1 MeV) the transistors were divided into two unequal groups. In one group (80...90% of samples tested) the FET transconductance was observed to reduce to half of its original value and the gain decreased 1.5-3 times at fluence values of $5 \cdot 10^{15}$ cm⁻². After neutron irradiation with a 10^{15} cm⁻² fluence the generated signal characteristics remained unchanged, and at fluence of $5 \cdot 10^{15}$ cm⁻² the signal amplitude decreased by 60%. In the second group (10...15 of samples tested) the FET high-frequency parameters were found to improve 1.3...1.5 times. This effect is dealt with in Chapter 4.

The reasons behind the effects of NDC and high-frequency generation were studied within a 2D quasi-hydrodynamic model. It was shown that the generation relates to intervalley transitions and is due to a decrease in the length of the ballistic electron transport with an increasing longitudinal electric field in the V-FET channel. The latter circumstance leads to a lower mean velocity of the electrons and drain current on the whole at a higher drain voltage. The size of a sample area in which intervalley transitions can possibly be realized is determined by the ratio of electron velocity to frequency of the intervalley transitions. For GaAs electrons it compares in the order of magnitude with the length of a V-FET channel (50...100 nm). Since the conductivity of the n+ region lying near the contact changes resistance through the action of neutron fluence of about 10^{16} cm⁻², and the intervalley transition process is in itself insensitive to irradiation at fluence values below $3...5 \cdot 10^{15}$ cm⁻², the radiation resistance of a V-FET based generator is much higher than that of the classical Gunn diode. This conclusion has been substantiated within the quasi-hydrodynamic model.

Experimental and theoretical study of a high-frequency noise in a V-FET under irradiation was carried out. For experiments, of the available set of transistors we picked FET with an optimal gate width for either frequency range: 200 μ m (gate-source input capacity C_{gs}= 0.15 pF) for 12 GHz, 100 μ m (C_{gs}=0.08 pF) for 37 GHz, 50 μ m (C_{gs}=0.05 pF) for 60 GHz. The FET saturation current was about 7 mA (for a 50 μ m gate width). The regions of the gate- and drain voltage values at which the generation and transistor gain coefficient occurred did not overlap. The noise factor minimum was recorded in normally off transistors by applying a positive bias voltage of +0,1-0,3 V to the gate. Simulations have shown this to be attributed to a virtual injector emerging in the source region at power supply. Fig.17 (page 222) is diagram of the conduction band bottom in FET active area with the injection region (marked), which supplies high-energy electrons into the transistor channel. The Schottky-contact-formed potential barrier and the channel-bufferlayer potential barrier link up producing a characteristic saddle-like structure of the injector. The injector form is determined by the dopant distribution profile and by the voltage applied to the gate and drain contacts, which allows for controlling the transistor current.

Fig.17, page 222. Position of the conduction band bottom in the active region of FET with a V-shaped groove: x is the coordinate along the transistor channel; y is the coordinate directed from surface into the structure depth.

The electrons fly into the injector with a random sense of velocity vector and, when traveling through it, get reflected by the walls. The longitudinal field causes a change in the angular distribution of the electrons coming out of the injector, such that the distribution maximum coincides with the injector axis, and the angle of electrons injection into the channel is $50...60^{\circ}$ to the buffer layer – channel interface.

Fig.18 (page 223) shows electron mean energy as a function of coordinate for an optimal and non-optimal trajectory of electron movement. Since voltage applied to the transistor drain is 2...3 V, the channel length (determined by SCR of the gate) is 0.15...0.2 μ m. The electron gas energy maximum falls on the drain edge of the gate, which is be-

cause the electric field is highest in this area. Irradiation by a flow of gamma-quanta causes heating of the electron gas.

Fig.18, page 223. Mean electron energy as a function of coordinate in V-FET under gamma-irradiation: non–optimal trajectory of movement – 1; optimal trajectory – 2. $W_{\Gamma-L}$ is the energy of intervalley transition; W_{OP} is the energy of optical phonon.

The coordinate of the intervalley scattering maximum (Figs.19, page 223, and 20, page 223) in the absence of irradiation coincides with that of the peak of the energy dependence on distance. In the interval; $0.2...0.4 \mu m$ there is a possibility for intervalley transitions that lead to formation of a static domain. By irradiation of structure with a flow of gamma-quanta the domain shifts by 70...90 nm closer to the source. This occurs through a change in the electron distribution at generation of nonequilibrium carriers. An increase in the electron energy in the injector region reduces intensity of the impurity scattering in the region with the coordinates $0...0.15 \mu m$. The frequency of impurity scattering largely depends on the valley containing the electron, which conditions a higher intensity of the impurity scattering in the impurity scattering in the static domain area.

Fig.19, page 223. Scattering intensity as a function of the coordinate along the optimal trajectory of electron movement in V-FET at gamma-irradiation: intervalley scattering -1; impurity scattering -2; optical phonon scattering -3

Fig.20, page 223. Scattering intensity versus coordinate along the nonoptimal trajectory of electrons movement in V-FET under gamma-irradiation: intervalley scattering -1; impurity scattering -2; optical phonon scattering -3.

The above processes at dose rates of 10^9 G/s degrade the noise factor (F) 1.5-fold with the electron gas heating taken into account, and leave F practically unchanged when the heating is ignored (i.e., only changes in the concentration of charge carriers are included). This can be explained by the fact that the Y-parameters of FET start changing dramatically only when ionized electrons have contributed essentially in the channel conductivity, i.e., at dose rates over 10^9 G/s. At the same time, a change in the drain current dispersion which is responsible for the noise shows up earlier because the mean energy of the electron gas is higher than it was before the irradiation.

The quasi-hydrodynamic model was used to investigate the processes of recovery of the FET high-frequency response after the action of gamma- and neutron pulses (fast annealing). Based on the results of experimental study on a time dependence of the deep levels concentration after a pulsed radiation impact, it was shown that the FET characteristics recover within 3...30 ms after a neutron radiation pulse of $10^{14}...10^{15}$ cm⁻² fluence and within 10...50 µs after a pulse of gamma radiation with a dose rate of $10^{10}...10^{11}$ G/s.

Nonequilibrium processes at metal-semiconductor interface in GaAs submicron Schottky-gate field-effect transistors

An important aspect in the problem of radiation resistance simulation is multilayer composition of semiconductor structures used in up-to-date submicron devices. Radiation effects are strongest in structures where electrons move along interfaces, since any modification of the latter tells on the entire electron path. A combination of materials with different densities and atomic weights leads to disbalance in the radiation absorption at an interface. If earlier this was the case only for ionization processes in the interface-adjacent areas (a higher dose rate effect?), with the structures in use currently, that feature a layer thickness of about 10 nm and interfaces of about 1 nm, one should account for the non-equilibrium process of defect formation (amplification fluence effect). The effect of a higher dose rate and a higher fluence on the radiation resistance of a quasi-ballistic FET with the channel length of $0.01...0.1 \,\mu$ m has been studied [36,48,63].

The processes induced by gamma-irradiation in FET with Al and Au gate of $0,25 \,\mu$ m length were compared theoretically and experimentally. The amplification coefficient and noise factor of FET under gamma-irradiation were calculated theoretically. It was shown that the effect of an increased dose rate reduces the radiation resistance of the Au gate transistor 2...3 times. Neutron irradiation of multilayer compositions causes injection of heavier atoms from the neighboring layers thus inducing a amplification fluence effect in a semiconductor. To estimate the number of atoms knocked out of a higher-density material into that with a lower density, we took into account the atoms concentration in matter and the ratio of the fast neutrons – Au, Ga (As) atoms interaction cross-sections (2-4 depending on neutron energy). Due to a difference in the free paths of atoms flying out of a neighboring material, the interface areas may feature both an increase and a decrease in the defects concentration. Appreciable changes in the defect concentration are observed at distances less than 100 nm from the interface (Fig.21, page 225), and the value of defect concentration may change manifold as compared to that in the material depth.

Fig.21, page 225. Distribution of the radiation defects concentration across the GaAs layer under irradiation of the material-GaAs type two-layer compositions with fission-spectrum neutrons.

Neutron irradiation of multilayer structures induces back-scattering of the secondary atoms and canalization of atoms in the lighter material layers. The latter brings about a change in the spatial distribution of the defects and facilitates an increase of the defect concentration in the layers of lighter materials, for example, in the Ti sublayer and in the close-lying GaAs layer of the gate composition Au-Ti-GaAs.

Formation of radiation defects clusters in the V-FET channel at the Au gate interface has been investigated. The Au atoms driven out of the gate into the adjacent GaAs layer by neutron irradiation largely contribute to RDC concentration in the transistor channel. The size of the space-charge region of clusters will depend on the doping level of a semiconductor adjacent to metal. As the gate tip curvature radius (10...15 nm) is comparable with the RDC dimensions, it so happens that tightly-packed RDC form an ordered chain in the transistor channel under the gate tip across the electron current lines. Therefore, neutron irradiation of V-FET structures may give rise to self-consistent formation of electron-transparent reach-through holes in RDC.

The latter effect leads to a spatial redistribution of the current density. Since electrons injection into the channel is made possible by reducing the injector barrier with the longitudinal field of the channel, it will proceed opposite the quantum-size holes, i.e., where the longitudinal field is not blocked by the RDC region. Therefore, the current distribution in the FET channel will become three-dimensional, which means a higher probability of a fly ballistic electron through a hole. The spread in the hole sizes, resistance and, hence, in the quantity of the electrons injected into a hole will determine the magnitude of the FET parameter variation.

Calculations of a point defects concentration, mean distances between RDC, and a cluster's SCR diameter have shown that at neutron fluence values above $3 \ 10^{15}$ cm⁻² it is possible that the mean distance between RDSC will compare with the electrons wavelength, which will be followed by formation of a specific structure in the V-FET channel, that will upgrade the transistor performance (Fig.22, page 226). The depth of the effect is about 50 nm.

Fig.22, page 226. Defects distribution into the depth of Au-Ti-GaAs structure by injection of Au ions with a 100 keV energy in GaAs, obtained with the Monte-Carlo method. Gate and channel cross-section views from the source side. Symbol \otimes indicates the direction of electron transport towards the source through nanosize holes between RDC (shown by dash). Space-charge regions of gate and buffer layer, forbidden for electron transport, are shown by dash-dot line.

It is possible to upgrade the FET parameters by applying the controlling field of the gate to current-conducting holes from all sides, as is the case in goffered-gate FET. Since the hole sizes are on order of the electron wavelength, some of the holes, given a certain bias voltage on gate, feature a quantum-size motion of charge carriers, which in some cases increases the transistor transconductance. According to the calculations, the presence of holes causes the FET transconductance to increase 1.5...2 times and more.

It was found out experimentally that after neutron irradiation the transconductance of the I-C curves for some V-FET increased, which resulted in a higher amplification coefficient of the transistor. Unlike the neutron irradiation effects, the impact of protons on the structure does not cause the radiation defects to produce quantum-size holes, and FET characteristics are decreasing monotonously with a higher fluence.

Analysis of the parameters variation for the entire set of FET in question, which varied in the gate length, has shown an irradiation-induced decrease in the channel length to values on order of RDC dimensions to cause an appreciable dispersion of the FET parameters, such that these parameters can be upgraded in some cases (given short channel lengths). This dependence is explained by the essential inhomogeneities in distribution of the defects in FET with small active regions.

In [59] was studied amplification fluence effect in a low-noise field-effect transistor on the base of GaAs/AlGaAs heterostructure with a broadband buffer layer.

A GaAs/AlGaAs heterostructure with a modulated doping for a Schottky-gate fieldeffect transistor has been developed. The V-shaped FET created on its base demonstrated super high working characteristics for a doped-channel device. The transconductance of the I-V characteristic reached 550 mS/mm and the high-frequency response compared with the characteristics of HEMT. It was shown theoretically that the effect of selfconsistent formation of RDC in the channel of such a transistor will improve the latter's parameters, this improvement being more substantial owing to the energy-barrier isolation of the buffer layer, than in V-FET based on ordinary homostructure.

Nanometer modification of submicron GaAs structures was investigated with the method of electrodynamic localization of optical radiation. In the conventional technique for reducing the sizes of elements down to nanometers, which involves basic optical principles, it is critical that the radiation wavelength be decreased correspondingly, so that it remains smaller than the sizes of the element under modification. For nanometer objects

such an approach implies having to do with the x-ray wavelengths, which is highly complicated technically and costly. On the other hand, it is known that low-frequency radiation (say, 50 Hz) is nearly always used in regions of a much smaller scale than a wavelength. The effects occurring in these regions are described within the classical electrodynamic approach rather than based on the optical principles. Energy localization is effected by means of extended metal objects with one size being much smaller than a wavelength (for example, a wire, a screen, etc.). The sameness of nature of electromagnetic and optical radiation implies that the electromagnetic principles of alternating field localization are also applicable to the optical range. We propose an electrodynamic method for localization of optical radiation in regions much smaller than a wavelength, which is similar to the technique involving antennas. This approach enabled modification of material properties in nanometer-size regions using laser radiation at a wavelength largely in excess of the modified region dimensions, which is important for semiconductor nanoelectronics manufacturing.

Transistors with the gate length larger than- and on order of wavelength.

A study carried out on laser irradiation effects (quanta energy less than GaAs forbidden band width) on field-effect transistors with the gate length varying from 10 nm to 0.5 μ m and the structure irradiated from both face and rear sides has shown that the transistor characteristics undergo similar changes. It is accounted for by a low absorption of radiation in GaAs and a smooth structure of the optical field that is varying on a scale comparable with a wavelength. The theoretical estimate of the average temperature of pulsed heating of the channel was 200...300°C. The characteristics change due to generation and temperature-induced diffusion of atoms in the FET channel area and also through trapping of electrons, induced by laser irradiation. Dependence of the rate of transistor parameters variation on radiation power has a threshold character. When power was reduced to 2 mJ per pulse, the FET characteristics remained unchanged.

Transistors with the effective gate length shorter than wavelength.

By laser irradiation of V-gate FET from the face side the variation of their parameters is similar to what happens in long-channel transistors. Irradiation from the backside, due to diffraction at the wedge-like gate and localization of the released energy within the channel area, brought about a qualitatively different modification of the structure. As shown by analysis of the current-voltage and capacity-voltage characteristics, the region of the most effective energy release was near the gate tip, with the dimensions much smaller than the laser wavelength (1.06 μ m). The average temperature of the channel heating, as calculated from the experimental data on the drain current and transistor gate at an irradiation instance, was 100...400°C. It should be noted that the value of heating temperature had a weak influence on the radiation effect. FET having NDC on the I-C curves exhibited, depending on an extent of the structure modification, either full or partial suppression of generation. This is a positive effect because it contributes to the transistor gain stability [29,35,41,63,61].

Transistors with the effective gate length shorter than the radiation wavelength, pretreated with neutron irradiation $(3...6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2})$. After the neutron irradiation, V-gate FET exhibited the same amplification and generation capabilities, but the absolute values of the parameters were different, as shown above. A single-pulse impact of laser radiation caused total suppression of the negative differential conductivity in the structures, although they retained their amplification properties (at a somewhat worse level than before the irradiation). By irradiation of FET with a single pulse of a power reduced by 80...90%, their drain current increased and the generation remained, which was interpreted as modification of holes between RDC.

The influence of radiation technological processes on the radiation resistance of GaAs submicron field-effect transistors

To upgrade the radiation resistance and high-frequency characteristics of submicron FET was propose using the radiation technological processes such as magnetron deposition of gate with a successive irradiation of transistor by a local electron beam, and electron-beam long-range gettering. It is shown that by using magnetron deposition towards barrier metallization one can improve the characteristics of submicron FET, including its radiation resistance, through modification of the metal-semiconductor interface in a layer of about 2...5 nm, which leads to a change in the gate-source, gate-drain I-C characteristics and reduces nonlinear distortions of the device. The effect of an electron-beam irradiation of the gap between the gate and the drain of a high-power submicron FET on high-frequency response and radiation stability of the transistor has been studied theoretically and experimentally. Examination of the distribution of microplasmas, based on the data for electroluminescence in the visible range has shown that, owing to a higher uniformity of the current distribution in the transistor channel and to a change in the threshold voltage the FET gets upgraded for both high-frequency response and radiation stability. The theoretical results have been confirmed by experiment.

A brief analysis of the experimental results obtained in a study of the aging processes in FET has been done [27,28,34,38,43,44,49,64]. The effects in question include transistor burning, sudden failures, gradual degradation of the parameters; the channel surface influence on the FET parameters, and the substrate/ buffer layer effects on a time stability of FET have been investigated. It is shown that ways of upgrading stability of submicron FET and integral circuits on their base rely on the same requirements as used for upgrading the radiation resistance of the transistors.

A research was conducted on improvement of a submicron FET radiation resistance by long-range ion-beam gettering (by Ar and H ions). It was shown that this operation upgraded the transistor characteristics owing to the restructuring and recombination of the defects at the interfaces of semiconductor layers in the channel area. The dopant distribution profile was observed to induce more abrupt and the electron mobility to increase (Fig.23, page 229), which led to a 10...30% rise in the transistor transconductance. The spread in the source-gate and gate-drain breakdown voltage decreased, which resulted in a higher yield of quality transistors. Analysis of the maps of the FET parameters distribution over the substrate area has revealed an optimal combination of the gettering ions types. The biggest positive effect showed up by Ar irradiation, a lesser one was observed under complex Ar-H ions irradiation, and hydrogen irradiation produced a negative effect

by degrading the FET parameters. The result of the complex radiation impact is explained by the RDC restructuring under irradiation with ions of varied masses.

Fig.23, page 229. Depth distribution profiles averaged over 30 measurement results: mobility -1 and 1'; electron concentration -2 and 2'; after gettering -1' and 2'.

The effects of the ion-beam- and laser radiation $(1.06 \ \mu m, 30 \ J$ in a 10 ns long pulse), generating elastic waves, on the characteristics of GaAs Schottky-gate field-effect transistors (FET) have been compared. The identity of the long-range gettering processes induced in the structures by ion-beam and laser irradiation indicates that variation of the structure parameters occurs through generation of elastic waves, which arise on the rear, substrate side of the structure and propagate through the substrate towards the transistor side.

The radiation resistance of GaAs Schottky-gate FET after ion-beam gettering was investigated. The character of the changes observed in the structure parameters by ion-beam gettering shows that the latter effect reduces the concentration of crystallographic defects which tell negatively on the mobility and concentration of charge carriers in the semiconductor layers of the compositions in question. The obtained results provide evidence that preliminary ion bombardment facilitates relaxation restructuring of the components of the impurity-defect composition in either layer forming the transistor structure and in the interface areas. One effect of this process is a lower concentration of background impurity and antistructural defects, responsible for deep levels formation under neutron irradiation. It is shown that the radiation resistance of submicron FET subjected to the ion-beam gettering procedure is increased two times and over for both the static (transconductance) and the high-frequency (amplification coefficient) parameters (Fig.24, page 229).

Fig.24, page 229. Dependencies of FET power gain on neutron radiation fluence, averaged over 15 samples: not subjected to gettering -1; preliminary gettering -2.

Conclusions

- A theoretical and experimental method for simulating effects of neutron, proton, and gamma-radiation on submicron (down to 0.05...0.1 µm) semiconductor devices is proposed. The method is based on a complex model that enables: 1) analysis of the processes of formation and stabilization of radiation defect clusters and point defects, ionization in multilayer (nanometer thickness of layers) solid state structures; 2) simulating the processes of quasiballistic electron transport in submicron structures with radiation-induced defects and designing parameters of semiconductor materials; 3) accounting for the irregularities of energy release through absorption of radiation, that give rise to nonequilibrium effects at the interfaces between the nanometer layers in the solid state structure of devices; 4) simulation of the static and high-frequency characteristics of submicron semiconductor devices under irradiation, including nonstationary processes at the time- and immediately after a radiation pulse.
- The dominating mechanisms behind degradation of the electrophysical parameters of submicron GaAs structures under irradiation have been identified. It is shown that, owing to a high mean energy, electrons can penetrate between some parts (subclusters) of the radiation defects clusters (RDC). Based on the Monte-Carlo simulation results and generalization of the experimental data (known from literature and obtained origi-

nally), the characteristic dimensions, distribution and form of the radiation defect clusters in Si and GaAs were determined, the characteristic dimensions of space charge regions were calculated. Analysis of the RDC stabilization processes revealed a threshold for a stable subcluster formation in RDC. It is shown that an RDC consists of subclusters with characteristic sizes of 4...15 nm, the separation between them is 3...20 nm. The latter factor allows for penetration of hot electrons between subclusters in RDC, which conditions the dominance of this effect in the quasi–ballistic FET unlike in devices with micron design rules where the governing mechanisms is a variation of the concentration and mobility of electrons.

- A model of the charge-carrier transport in submicron semiconductor structures with radiation defects of various dimensions (from point to nanometer opaque clusters of radiation defects) has been developed based on the Monte-Carlo method, taking into account heating of the electron gas at the time of irradiation with a gamma-quanta flow and in high electric fields (~100 kW/cm) characteristic for submicron devices. The radiation–induced changes in the dependences of the energy /pulse relaxation times and the electrons diffusion coefficient were calculated. Simulations of electron transport in submicron field-effect transistors have shown the electron gas to heat up due to generation of nonequilibrium charge carriers under irradiation of semiconductor structures measuring less than the energy relaxation length (under 0.5 μm); this heating affects electron transport in such structures. The electron distribution function in this case is close to the Maxwellian form, and the mean energy of the ionized electrons is 0.24 eV. It is shown that this effect is strongest in the solid state structures of transistors with the channel length of 0.05...0.1 μm, in which ionized electrons do not have the time to cool off before they are pulled into the contacts.
- Two-dimensional nonstationary physical-topological models of submicron field-effect transistors have been developed within a quasi-hydrodynamic approximation including the radiation effect. A three-dimensional model of heat transfer in the structures of submicron multisection average-power FET was also developed. Based on these models, the methods have been designed for simulating a degradation of the frequency and noise characteristics of field-effect transistors. A model of submicron field-effect transistors, combining the Monte-Carlo technique, the quasi-hydrodynamic approximation and the equivalent circuit method has been worked out. The above models are realized as a numerical simulation software. Experimental checkup of the model has shown that the optimal combination of the methods allows for high-accuracy (20%) calculation of physical processes in submicron GaAs structures and semiconductor devices, including effects induced by the neutron, proton, and gamma irradiation of the above structures.
- Theoretical calculations have shown that in simulation of the effects in submicron GaAs structures of FET it is critical to take account of the changes in the electron energy and momentum relaxation times and also of the electron gas heating induced by proton, neutron and gamma-irradiation of structures. A comparative analysis of the radiation resistance of FET with the channel length varying as 0.1; 0.25; 0.5; 1; 5 and 50 µm was carried out. It is shown that the local-field approximation provides an adequate description of the effects in field-effect transistors with a channel length of 3...4 µm and over, while the quasi-hydrodynamic approximation is valid for any length of a

channel. The nonstationary processes arising in submicron transistors at- and immediately after a radiation impact have been simulated. It is shown that recovery of the high-frequency characteristics of FET is largely influenced by the processes of recharging the deep energy levels introduced in the submicron structures of transistors during processing and by neutron and proton irradiation.

- Dose rate and fluence enhancement effects in the multilayer compositions of the neargate node in submicron field-effect transistors with characteristic layer thickness in the range 5...50 nm have been studied theoretically and experimentally. It is shown that the Au of the gate causes nonequilibrium processes to occur at the Au-GaAs interface, which enhance the inhomogeneity of energy release 3...4 times. Nonuniformity of the defect formation process and the fluence enhancement effect under neutron irradiation of quasiballistic FET were found to be responsible for nano-size holes appearing amidst the radiation defects in the transistor channel. Restructuring of the electron movement through a defect structure may in some cases bring about improvement of the transistor parameters by a factor of 1,5...2 owing to the quantum-mechanical processes of the electron transport through the nanometer-scale holes.
- To meet the desired radiation resistance standards, a long-range ion-beam gettering technology has been developed towards increasing the radiation resistance of submicron field-effect transistors. A study on the influence of anion-beam and laser long-range gettering of the electrical properties of GaAs n+nn- structures with Schottky-gate FET has shown that similarity of the gettering processes on exposure to ion-beam and to laser radiation depends on the similarity between the mechanisms of elastic waves generation in a semiconductor structure, leading to modification of the epitaxial layer-substrate -and metal-semiconductor interfaces in the structures of interest. A complex neutron-laser irradiation of submicron structures in quasi–ballistic FET with the channel length of 0.05...0.1 μm provides for a specific structuring of radiation defects in the transistor channel, such that the negative differential conductivity of the transistor is maintained and its high-frequency characteristics are improved.
- A complex technique for investigating electrophysical parameters of FET submicron structures is proposed. This method allowed obtaining reliable data and evaluating the contribution made by inhomogeneities and interfaces in the processes of interaction between the radiation and the structures. The effect of pulsed gamma- and neutron irradiation on the nonstationary processes of generation, fast annealing, restructuring and recharging of dissimilar defects, causing a 2...10-fold variation of the structure parameters, was studied experimentally. Specific proton treatment of GaAs towards application of such a structure as radiation-resistant photodetector is proposed. A study was carried out into the effects of complex proton-neutron- and gamma-proton radiation on the parameters of radiation-resistant photodetectors. It is shown that restructuring of the deep levels in the structure helps keep the photosensitivity unchanged within a fluence range to 10¹⁴ cm⁻².
- Experimental investigation of the processes arising in submicron and quasi-ballistic field-effect transistors under proton, neutron and gamma-irradiation has been carried out. Measurements were made to evaluate degradation of the static (I-C characteristics,

steepness, capacitance) and dynamic (gain and noise factor) parameters of submicron transistors (including FET with a $0.05...0.1 \mu m$ channel length) under irradiation.

- It is shown experimentally that the radiation sensitivity of a quasi-ballistic FET (0.05...0.1 μ m channel length) in the intervalley generation mode is by an order of magnitude less than that of a classical Gunn diode. In the amplification mode this transistor has demonstrated resistance to neutron irradiation up to 3...5 $\cdot 10^{15}$ cm⁻², to gamma-radiation dose up to 10^5 G, and to dose rates of gamma-irradiation above 3 10^{10} G/s.
- Based on the experimental data it is shown that the optical radiation diffraction at the tip of a V-shaped gate of a quasi-ballistic FET makes possible localization of the radiation energy release in regions much smaller than the radiation wavelength, and modification of the transistor channel including when it contains radiation-induced defects.
- The technology for magnetron deposition of a high-power submicron FET gate, followed by further electron irradiation treatment of the GaAs surface between the gate and the sink, which upgrades the high-frequency response and radiation resistance of the transistor 2 and more times, has been approved experimentally.
- Experimentally approved is the long-range ion-beam gettering technique enabling 2...3-fold improvement of high-frequency parameters and radiation resistance of high-power submicron field-effect transistors.

The results obtained through this work have been used at the Nizhni Novgorod State University in preparing a course of lectures on "Solid-state electronics", "Simulation of semiconductor devices", and laboratory works within the "Physics of semiconductor devices" program.

This investigation was supported by the NATO in the framework of the "Science for Peace" Project SfP–973799 with the universities of Nizhni Novgorod and Eindhoven as partners.

References

- [1] Pozhela Yu., Physics of fast transistors. -Vilnus: Mokslas, 1989, 264 P.
- [2] Agakhanyan T.M., Astwatsaturian E.R., Skorobogatov P.K. Radiation effects in integral circuits. –Moscow: Energoatomizdat, 1989, 256 P.
- [3] Vavilov V.S. The effect of radiation on semiconductors. –Moscow: Fizmatgiz, 1963, 264 P.
- [4] Vavilov V.S., Kekelidze N.P., Smirnov L.S. The radiation effects on Semiconductors. –Moscow: Nauka, 1988, 192 p.
- [5] Vavilov V.S., Ukhin N.A. Radiation effects in semiconductors and semiconductor Devices. –Moscow: Atomizdat, 1969, 311 p.
- [6] Konopleva R.F., Ostroumov V.N. High-energy charged particles interaction with germanium and silicon. –Moscow: Atomizdat, 1975, 128 p.
- [7] Vinetsky V.L., Kholodar G.A. The radiation physics of semiconductors. Kiev: Naukova duhmka, 1979, 332 p.
- [8] Korbett G., Bourgouen J. Defect formation in semiconductors. //in: Point defects Solids /Ed. Boltaks B.I. –Moscow: Mir, 1979, 379 p.

- [9] Korshunov F.P., Bogatyryov V.Yu., Vavilov V.A. Radiation effects on integral circuits. –Moscow: Nauka i tekhnika, 1986, 254 p.
- [10] Deans D., Vinyard D. Radiation effects in solid matter. -Moscow: Izd. Inostr. lit., 1960, 243 p.
- [11] Lung D. Radiation defects in AIII BV compounds //Point defects in solids /Ed. Boltaks B.I. –Moscow: Mir, 1979, 379 p.
- [12] Konopleva R.F., Pitvinov V.L., Ukhin N.A. Peculiarities of the radiation defects in semiconductors, induced by high-energy particles. –Moscow: Atomizdat, 1971, 176 p.
- [13] Vavilov V.S., Gorin B.M., Danilin N.S. et al., Radiation methods in solid state electronics. –Moscow: Radio i sviaz, 1990, 184 p.
- [14] Physical processes in semiconductors after irradiation. /Ed. Smirnov L.S. Novosibirsk: Nauka, 1977, 253 p.
- [15] Golland A. State-of-the-art research of point defects in metals. Selected aspects //Point defects in solid matter /Ed. Boltaks B.I. – Moscow: Mir, 1979, 379 p.
- [16] Astwatsaturian E.R., Gromov D.V., Lomako V.M., Radiation effects in GaAs based devices and integral circuits. – Minsk: Universitetskoye, 1992, 219 p.
- [17] Thompson M. Defects and radiation induced damage in metals. Moscow: Mir, 1971, 367 p.
- [18] Biersak J.P. "Computer simulation of sputtering" //Nuclear instruments and Methods in physics research. 1987. No.1. P.21–36.
- [19] Zulig R. Radiation effects in GaAs based IC //Gallium arsenide in Microelectronics /Ed. N. Einsprook, U.Wissman. Moscow: Mir, 1988, P.501–547.
- [20] Pershenkov V.S., Popov V.D., Shalnov A.V. Surface radiation effects in IC Elements. –Moscow: Energoatomizdat, 1988, 256 p.
- [21] Ladygin E.A. Radiation effects on electronic devices. –Moscow: Sov. Radio, 1980, 224 p.
- [22] Shour M. Modern devices on GaAs basis. –Moscow: Mir, 1991, 632 p.
- [23] GaAs field-effect transistors. /Ed. Di Lorenzo D.V., Candelwall D.D. –Moscow: Radio i sviaz, 1988, 496 p.
- [24] Obolensky S.V. "The applicability limit for local-field and quasi-hydrodynamic approximations in theoretical and experimental evaluation of the radiation resistance of submicron semiconductor devices" //Izv.vuzov: Elektronika. 2002. No.6. P.31–38.
- [25] Obolensky S.V. "Nonadditivity of defect formation by a successive proton and neutron irradiation of GaAs" //FizKHOM. 2001. No.2. P.5–6.
- [26] Obolensky S.V., Kitayev M.A. "Field-effect transistor with a 30-nm gate" //Pis'ma V ZhTF. 2000. No.10. P.13–16.
- [27] Obolensky S.V., Skupov V.D. "Peculiarities of a long-range interaction effect in GaAs transistor structures under combined irradiation with varied-mass ions" //Pis'ma v ZhTF. 2003. No.2. P.30–34.
- [28] Obolensly S.V., Skupov V.D. "Effect of ion-beam gettering on the parameters of GaAs transistor structures under neutron irradiation" //Pis'ma v ZhTF. 2000. No.15. P.1–5.

- [29] Kozlov V.A., Obolensky C.V., Kitayev M.A. "Nanometer modification of matter by Electrodynamical localization of optical radiation" //Pis'ma v ZhTF. 2001. No.19. P.32–38.
- [30] Obolensky S.V. "The structure of a radiation defects cluster under neutron Irradiation of a semiconductor" //2-nd SfP-973799 Workshop Poceeding April, 2002. //Ed. Yakimov A.V. - Nizhny Novgorod: TALAM, 2002, P.155–165.
- [31] Kiselyov V.K., Obolensky S.V., Skupov V.D. "The influence of the internal getter in silicon on the Au-Si structure parameters" //ZhTF. 1999. No.6. P.129–131.
- [32] Demarina N.V., Obolensky S.V. "Electron transport in nanometer GaAs structures under irradiation" //ZhTF. 2002. No.1. P.66–71.
- [33] Demarina N.V., Obolensky S.V., Skupov V.D. "Novel method for study of fast relaxation of radiation defects in semiconductor materials" //Izvestia RAN: ser. Fizitcheskaya. 2000. No.11. P.2162–2167.
- [34] Obolensky S.V., Skupov V.D. "The long-range interaction effect by irradiation of Semiconductor structures with internal interfaces" //Surface. 2000. No.5. P.75–79.
- [35] Obolensky S.V., Kitayev M.A. "Research of the generation processes in a ballistic field-effect transistor" //Microelectronics. 2001. No.1. P.10–15.
- [36] Demarina N.V., Obolensky S.V. "Heating of electron gas in submicron structures by fast electrons injected in metal" //FizKHOM. 2001. No.1. P. 20–23.
- [37] Obolensky S.V., Pavlov G.P. "The influence of neutron and cosmic radiation on the parameters of a Schottky-gate field-effect transistor" //FTP. 1996. No.3. P.413–420.
- [38] Obolensky S.V., Skupov V.D., Fefelov A.G. "The long-range interaction effect in ion-irradiated GaAs transistor structures" //Pis'ma v ZhTF. 1999. No.16. P.50–54.
- [39] Obolensky S.V., Kitayev M.A. "Negative differential conductivity of a quasiballistic field-effect transistor" //Microelectronics. 2001. No.6. P.459–465.
- [40] Obolensky S.V., Demarina N.V. "Modeling of Ionizing Irradiation Influence on Schottky-Gate Field-Effect Transistor" //Microelectronics Reliability. 1999. No.8. P.1247–1263.
- [41] Kozlov V.A., Obolensky S.V., Kitayev M.A., Demarina N.V. "The effect of optical radiation on a ballistic nm-gate field-effect transistor" //Mikrosistemnaya tekhnika (Microsystem engineering) 2001. No.4. P.26–28.
- [42] Obolensky S.V., Demarina N.V. "Simulation of the ionizing irradiation effect on a Schottky-gate field-effect transistor" //Zarubezhnaya radioelectronika: uspekhi sovremennoy radioelektroniki (Advances in international radioelectronics). 1997. No.4. P.66–80.
- [43] RF patent for invention No.2176422, "A means of gettering processing of epitaxial Layers insemiconductor structures", issued 28/06/01. //Kiselyov V.K., Obolensky S.V., Skupov V.D.
- [44] RF patent for invention No.2156520, "A means for controlling a structural quality of monocrystal semiconductor wafers", issued 21/04/00. //Kiselyov V.K., Obolensky S.V., Skupov V.D.
- [45] Obolensky S.V., Demarina N.V., Kitayev M.A. "Simulation of the ionizing radiation effect on a Schottky-gate field-effect transistor" //Vestnik, The Upper-Volga Branch

of the RF Technologies Academy: "High technologies in radioelectronics" series. 1997. No.1. P.128–133.

- [46] Obolensky S.V., Pavlov G.P. "The pulse radiation influence on MESFET" //Fundamental investigation of new materials and processes in substance /Ed. by Tikhonov A.N., Sadovnichi W.A., Tretiakov Yu.D. – M: MSU. 1996. P.17–18.
- [47] Obolensky S.V. "Determination of the electrophysical constants of GaAs under Irradiation" //2-nd SfP-973799 Workshop Proceedings April, 2002. /Ed. Yakimov A.V. -N.Novgorod: TALAM, 2002, P.146–155.
- [48] Obolensky S.V. "Simulation of field-effect transistor parameters by a neutronirradiation-induced injection of Au-gate atoms into GaAs" //2-nd SfP-973799 Workshop Proceedings April, 2002. /Ed. Yakimov A.V. – Nizhni Novgorod: TALAM, 2002, P.134–142.
- [49] Obolensky S.V. "Identity of the long-range gettering processes by ion- andlaser irradiation of transistor structures" //2-nd SfP-973799 Workshop Proceedings April 2002. /Ed. Yakimov A.V. – N.Novgorod: TALAM, 2002, P.142–146.
- [50] Obolensky S.V. "The structure of a radiation defects cluster under neutron irradiation of semiconductors" //2-nd SfP-973799 Workshop Proceedings April 2002. /Ed. Yakimov A.V. – N.Novgorod: TALAM, 2002, P.155–165.
- [51] Obolensky S.V., Demarina N.V., Kozlov V.A., Kitayev M.A. Optical radiation effect on a ballistic nm-gate field-effect transistor //"Nanophotonics-2000": Proceedings of International Workshop, Nizhni Novgorod, 23-27 March 2000, Nizhni Novgorod, IPM RAS. 2000. P.250–253.
- [52] Obolensky S.V., Kitayev M.A., Fefelov A.G. The influence of neutron and proton radiation on electron velocity in n–GaAs //"Radiation physics of solids": Proceedings of VIII Intern.Workshop, Sevastopol, 1-4 June 1998. – Moscow: MGIEM. 1998. P.161–165.
- [53] Obolensky S.V., Demarina N.V. Simulation of radiation resistance of Gunn diode //Science for industry. 1998. No.12. P.12–16.
- [54] Obolensky S.V. Current spectroscopy of deep levels in n-GaAs through analysis of the C-V characteristics of field-effect transistors //Novel industrial technologies. 2001. No.2-3. P.29–32.
- [55] Asmolova N.F., Kiselyov V.K., Obolensky S.V. Conversion of the X-ray radiation spectrum for processing uses //Novel industrial technologies. 2001. No.2-3. P.24–25.
- [56] Investigation into the characteristics of a photocontrolled GaAs photoswitch /Kiselyov V.K., Obolensky S.V., Semyin G.N., Trufanov A.N. //Novel industrial technologies. 2001. No.2-3. P.47–49.
- [57] Investigation into the characteristics of a GaAs photoswitch /Kiselyov V.K., Obolensky S.V., Semyin G.N., Trufanov A.N. //VANT: "Radiation effects on radio-electronic apparatus" series. 2001. No.1-2. P.145–148.
- [58] Obolensky S.V. Deep level spectroscopy of n-GaAs through analysis of the C-V characteristics of field-effect transistors //Radiation resistance of electron systems – "Resistance '98" All-Russian Conference Summaries of reports, Lytkarino, 1-3 June, 1998. – Moscow: SPELS-NIIP. 1998. P.157–159.

- [59] Characteristics of a field-effect transistor with heterobuffer /Obolensky S.V., Kitayev M.A., Trofimov V.T., et al. //Summaries of reports, "Semiconductors –2001" All-Russian Conference, Nizhni Novgorod, 10-14 September 2001. Nizhni Novgorod: IPM RAS. 2001. P.153.
- [60] Demarina N.V., Obolensky S.V., Fefelov A.G.. Effect of proton radiation on the current-voltage characteristics of a Schottky-gate field-effect transistor //"Microelectronics and computer science" Intern. Conference, Summaries of reports: Zelenograd, 15-18 February 1997. – Zelenograd, MIET. 1997. P.22.
- [61] IR-radiation control of Schottky-gate field-effect transistor parameters /Demarina N.V., Obolensky S.V., Kitayev M.A., Fefelov A.G. // Microelectronics and computer science" Intern. Conf. Summaries of reports, Zelenograd, 15-18 February 1997. – Zelenograd: MIET. 1997. P.23.
- [62] Obolensky S.V. Internal structure of a radiation defects cluster under neutron irradiation of GaAs // "The physics of charged particles – crystals interaction": Proceedings of XXXII International Conference, Moscow, 27-29 May 2002, –Moscow: MGU. 2002. P.186.
- [63] Obolensky S.V. Upgrading a field-effect transistor parameters through injection of Au-gate atoms into GaAs, stimulated by neutron irradiation //"The physics of charged particles- crystals interaction": Proceedings of XXXII Intern. Conf., Moscow, 26-28 May 2001, –Moscow: MSU. 2001. P.153.
- [64] Obolensky S.V. Comparison between the long-range gettering processes under ion and laser irradiation of transistor structures //"The physics of charged particlescrystals interaction": Proceedings of XXXII Intern. Conf., Moscow, 26-28 May 2001. –Moscow: MSU. 2001. P.152.