На правах рукописи

ОБОЛЕНСКАЯ ЕЛИЗАВЕТА СЕРГЕЕВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИБАЛЛИСТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕРАГЕРЦОВЫХ ДИОДАХ НА ОСНОВЕ GaAs/AlAs СВЕРХРЕШЕТОК

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: **Павельев Дмитрий Геннадьевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты: **Бутин Валентин Иванович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова»

Харитонов Игорь Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, профессор Московского института электроники и математики имени А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Ведущая организация: **АО «Ангстрем»**

Защита состоится «23» декабря 2020 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте https://diss.unn.ru/1064

Автореферат разослан «____»_____ 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.166.01,
кандидат физико-математических наук Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию процессов квазибаллистического транспорта носителей заряда в перспективных диодах на основе малопериодных (менее 20 периодов) GaAs/AlAs сверхрешеток (СР): 1) при комнатной температуре; 2) при нагреве протекающим током; 3) после облучения нейтронами и сопутствующим гамма-излучением.

Особенности данных приборов: 1) использовались GaAs/AlAs СР с концентрацией электронов и доноров около 10^{18} см$^{-3}$, в одном периоде СР было 18 монослоев GaAs и 4 монослоя AlAs, ширина единственной минизоны составляла 24 мэВ; 2) малое число периодов СР, определяющее малую длину рабочей области диодов (30-100 нм); 3) наличие переходных слоев в структуре СР, определяющее процессы ввода и вывода электронов из контактов в СР; 4) малые (менее 1 мкм^2) сечения диодов и малое (6 периодов) количество периодов в СР, определяющее необходимость корректного учета сопротивления контактов и переходных областей диодов; 5) теоретически и экспериментально проводилось сравнение квазибаллистических СР с СР с большим количеством периодов (до 100) аналогичных как по составу одного периода, так и по конструкции переходных слоев, а также геометрии и химическому составу контактов СР.

Особенностями физических процессов транспорта электронов в СР являются: 1) квазибаллистический транспорт электронов в структурах с малым числом периодов; 2) «разрыв»[1] минизоны; 3) наличие доменообразования в СР с большим числом периодов при больших полях; 4) нагрев СР протекающим током; 5) возникновение радиационных дефектов в СР в результате гамма-нейтронного облучения.

Для анализа указанных эффектов впервые предложен метод моделирования транспорта электронов в GaAs/AlAs СР диодах с помощью комплекса аналитической и численных моделей в квазигидродинамическом приближении и на основе метода Монте-Карло с учетом сопротивления переходных слоев сверхрешеток, их нагрева протекающим током, влияния гамма-нейтронного облучения. Впервые установлена эффективность функционирования диодов в режиме «разрыва» минизоны в исследуемых диодах вплоть до предельной частоты равной 5.3 ТГц (для 6-периодной СР). Впервые теоретически и экспериментально рассмотрено влияние радиационного воздействия на процессы транспорта электронов в указанных СР, в том числе с учетом нагрева структур протекающим током. Предложена методика сопоставления параметров диодов в импульсном (фронт менее 10 нс, длительность импульса 30 нс) и непрерывном режимах работы.

В результате проведенных исследований сопоставлены значения паразитных сопротивлений приконтактных областей диодов на основе СР с разным количеством периодов, что впервые позволило определить величину падения напряжения на одном периоде сверхрешетки для всех особых точек на

---

[1] «Разрыв» минизоны происходит в том случае, когда на одном периоде сверхрешетки падает напряжение больше, чем отношение ширины минизоны СР к заряду электрона.

вольт-амперных характеристиках диодов. Теоретически и экспериментально впервые показано, что на частотах до 5.3 ТГц малопериодные сверхрешетки в составе гармонических смесителей имеют существенные преимущества по сравнению с многопериодными, т. е. содержащими 50−100 и больше периодов. Впервые проведена оптимизация конструкции квазибаллистических СР и показано, что их эффективность работы во многом определяется переходными областями, расположенными на краях СР.

Для детального измерения вольт-амперных характеристик исследуемых диодов на основе СР был разработан специальный стенд для измерений импульсных ВАХ до и после радиационного облучения в диапазоне температур от -160 ºС до +160 ºС. На импульсных и статических вольт-амперных характеристиках с нагревом и без него, наблюдались два экстремума, которые были сопоставлены с характерными параметрами, реализуемыми при функционировании диодов в ТГц измерительном стенде.

Принцип действия диодов Ганна, основан на объемных свойствах однородного полупроводника и связан с междолинными переходами электронов. В сверхрешетках возникают колебания тока (вызванные «блоховскими» осцилляциями), аналогичные колебаниям в диоде Ганна, с образованием доменов. Поэтому, для сравнения с СР, были исследованы планарные диоды Ганна.

На основе серии измерений получены данные об изменении вольт-амперных характеристик диодов на основе сверхрешеток GaAs/AlAs и GaAs планарных диодов Ганна в результате радиационного облучения в диапазоне флюенса нейтронного излучения 10^{12}–10^{15} см$^{-2}$, найден уровень радиационной стойкости исследуемых диодов.

Актуальность и степень разработанности темы исследований

В настоящее время проблемой электроники ТГц диапазона является создание активных полупроводниковых приборов, которые перестраиваются в широком диапазоне частот и могут быть использованы в качестве источников и приемников электромагнитного излучения с рабочими частотами 1-10 ТГц. Отсутствие доступных приборов сдерживает возможности использования этого диапазона для решения задач спектроскопии, космической связи и т.п.

Аппаратура для радиоастрономии и космической связи требует использования радиационно-стойких полупроводниковых элементов, выдерживающих воздействие быстрых частиц и квантов космического пространства. Исследуемые терагерцовые диоды могут использоваться в специальной аппаратуре, в космосе, т.к. являются более радиационно-стойкими по сравнению с другими приборами а также могут найти применение для: мониторинга концентрации тяжелых органических молекул, например в медицинских приложениях (онкология, стоматология), метеорологии, системах безопасности (поиск и обнаружение взрывчатых веществ), инфракрасной астрономии и т.п.

Имеющиеся в настоящий момент электронные приборы (как полупроводниковые, так и вакуумные) позволяют создавать указанные выше виды аппаратуры, работающие в диапазоне частот до 1 ТГц.

Одними из первых были разработаны электровакуумные импульсные источники излучения мВт-мощности, такие как лампа обратной волны (ЛОВ), оротрон. Более мощные источники (до десятков кВт) — лазер на свободных электронах (ЛСЭ), гиротрон. В статье [1] описывается гиротрон, выдающий 1,5 кВт мощности на частоте 1 ТГц в импульсе длительностью 50 мкс. КПД при этом составляет 2,2 %. Новосибирский терагерцовый ЛСЭ — самый мощный в мире источник терагерцового излучения со средней мощностью 500 Вт [2]. В качестве ТГц источников с недавнего времени используются линейные ускорители и синхротроны [3, 4]. В работе [5] представлен импульсный источник ТГц излучения большой мощности (средней — 20 Вт, а в пике — ~1 МВт).

Указанные выше приборы имеют большие массы и объемы аппаратуры от ~ 0.1-1 м^3 с учетом блока питания. Непосредственно генераторы имеют размеры 5-50 см и диаметром 1-20 см и весом более 0.1-1 кг. Кроме того, излучение вышеперечисленных источников является тормозным, оно исходит от электронов, ускоренно движущихся в электрическом или магнитном поле специальной конфигурации в вакуумной камере.

Источником ТГц излучения малой мощности является квантовый оптический генератор (лазер). В 2002 г. был создан первый ТГц квантово-каскадный лазер, работающий на частоте 4,4 ТГц и выдающий мощность 2 мВт [6]. В [7] получено, что диоды Ганна на основе нитрида галлия GaN могут использоваться для генерации до 0.7 ТГц. В работе [8] теоретически исследуется эмиссия ТГц излучения от Джозефсоновских переходов между сверхпроводниками при подаче тока вследствие нестационарного эффекта Джозефсона.

Основные преимущества полупроводниковых лазеров, в сравнении с другими излучателями, относительная дешевизна, простота накачки и компактность конструкции источников. Но полупроводниковые лазерные диоды имеют низкую когерентность пучка, а также необходима стабилизация мощности, длины волны, ширины полосы излучения, поскольку изменения значений всех этих величин могут нести на себе измерительную информацию. Системы с джозефсоновскими переходами характеризуются чрезвычайно низким энерговыделением и малыми временами процессов переключения, но им необходимо охлаждение. Традиционные «объемные» диоды Ганна [7] имеют низкую радиационную стойкость (к нейтронному облучению $< 10^{13}$ см$^{-2}$).

Диапазон частот 1…3 ТГц освоен значительно слабее, а источники терагерцового излучения, работающие выше 3…5 ТГц, пока не созданы. В работе [9] получено, что для GaN диодов Ганна возможна генерация до 0.3-0.4 ТГц. Для диодов Шоттки были получены частоты порядка 2 ТГц [10]. В [11] получено, что резонансно-туннельные диоды могут достигать частот около 1 ТГц при мВт мощностях. В [12] разработан утроитель на основе

гетеробарьерного варактора (InGaAs / InAlAs / AlAs на InP подложке), получена выходная мощность более 1 мВт (входная мощность 40 мВт) и относительная полоса пропускания мощности 9% на частоте 630 ГГц.

Разработка терагерцовой аппаратуры требует создания средств компьютерного моделирования, позволяющих создавать терагерцовые источники излучений и сигналов. Хотя в литературе [13, 14] уже были исследованы планарные диоды терагерцового диапазона частот, на основе сильно легированных GaAs/AlAs-сверхрешеток, однако исследование радиационного и теплового воздействий для указанных структур проведено не было.

В [15, 16] был исследован транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии, а в [17, 18] описан предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов. Для учета радиационного влияния на динамику междолинных переходов в субмикронных приборах в [15, 17] в модель вводилась зависимость времен релаксации энергии и импульса электронов от флюенса нейтронного облучения, полученная ранее в [18] путем моделирования процессов переноса электронов в GaAs структурах методом Монте-Карло с учетом рассеяния электронов на радиационных дефектах различной структуры и размера. В [19, 20] теоретически и экспериментально исследована работа HEMT до и после радиационного воздействия. Исследование радиационного воздействия теоретически и экспериментально для терагерцовых диодов на основе СР проведено не было.

В [21] была разработана тепловая модель мощных полевых транзисторов, а в [22] проведено моделирование тепловых полей в мощных InAlAs / InGaAs полевых транзисторах 0.1...0.3 ТГц диапазона частот. Моделирование тепловых полей для терагерцовых диодов на основе СР проведено не было.

В [22] был проведен анализ процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов при попадании быстрого нейтрона в область пространственного заряда полупроводникового диода. Результаты работы показали, что анализ зависимостей тока диода от времени в момент попадания в него быстрого нейтрона даст возможность уточнить характерные временные константы процессов формирования и стабилизации кластеров радиационных дефектов. Требуемое разрешение детектора, составляющее доли и единицы пикосекунд, могло бы быть обеспечено благодаря использованию техники терагерцового детектирования. В силу сложности задачи пока подобные детекторы не созданы. Для их разработки необходимо подробно исследовать влияние радиации на диоды на основе сверхрешеток, которые являются перспективными для создания терагерцовых детекторов. Кроме того, указанные приборы могут быть использованы в качестве генераторов, смесителей и умножителей как в терагерцовом диапазоне частот, так и ниже в диапазоне 1…100 ГГц, где они могут применяться, например, в радиолокационной технике.

В настоящее время не существует единого комплекса физико-топологической модели и методики проведения моделирования транспорта электронов в полупроводниковых структурах терагерцовых диодов на основе СР с учетом переходных слоев структур, нагрева диодов протекающим током и радиационного воздействия.

Ранее в [23] был разработан стенд для измерения импульсных ВАХ полевых транзисторов, транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) и биполярных транзисторов. Возможности применения данной аппаратуры для измерения ВАХ терагерцовых приборов исследованы не были.

В [24] были исследованы импульсные ВАХ ТГц диодов Шоттки, но для диодов на основе СР аналогичные измерения ранее не проводились. В этой работе с точки зрения проведения экспериментальных исследований анализа влияния разогрева диодов протекающим током измерены импульсные вольт-амперные и переходные характеристики диодов с длительностями импульса от единиц наносекунд до секунд. Это позволило получить экспериментальные данные о влиянии нагрева диодов на их отрицательную дифференциальную проводимость и на эффективность преобразования сигналов исследуемыми диодами.

В [25] были проведены измерения импульсных вольт-амперных характеристик AlGaN / GaN HEMT транзисторов в зависимости от геометрии, температуры (от 300 до 15 К) и условий эксплуатации. Однако, импульсные ВАХ для терагерцовых полупроводниковых приборов с учетом радиационного воздействия не были исследованы. В диссертационной работе был разработан специальный экспериментальный стенд для измерений импульсных ВАХ до и после радиационного облучения в диапазоне температур от -160 ºС до +160 ºС.

В [26] представлено моделирование переноса электронов методом Монте-Карло в сверхрешетке $(GaAs)_{12}/(AlAs)_{12}$, но не были рассмотрены структуры с малым числом периодов. В диссертационной работе был проведен анализ процессов транспорта электронов в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток с помощью комплекса методов на основе квазигидродинамического приближения и метода Монте-Карло. Впервые теоретически и экспериментально показано, что на частотах до 5.3 ТГц малопериодные сверхрешетки в составе гармонических смесителей проявляют существенные преимущества по сравнению с многопериодными, т. е. содержащими 50−100 и больше периодов.

Цель диссертации

Построение физико-топологических моделей и проведение экспериментальных исследований транспорта электронов в терагерцовых диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток с учетом гамма- и гамма-нейтронного воздействия.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка физико-топологических моделей и методологии проведения моделирования транспорта электронов в полупроводниковых структурах терагерцовых диодов с учетом сопротивления переходных слоев структур,

нагрева диодов протекающим током и нейтронного облучения.

2. Анализ и сравнение процессов транспорта электронов в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток.

3. Разработка тепловой модели и исследование статических и импульсных характеристик терагерцовых диодов в диапазоне температур от -160 ºС до +160 ºС.

4. Исследование радиационной стойкости диодов на основе GaAs/AlAs сверхрешеток и их сравнение с другими приборами.

Научная новизна

1. Впервые предложен метод моделирования транспорта электронов в GaAs/AlAs СР диодах с помощью комплекса аналитической и численных моделей в квазигидродинамическом приближении и на основе метода Монте-Карло с учетом сопротивления переходных слоев сверхрешеток, их нагрева протекающим током, влияния гамма-нейтронного облучения.

2. Впервые теоретически и экспериментально установлена эффективность функционирования диодов в режиме «разрыва» минизоны в диодах на основе 6-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток вплоть до предельных частот работы диодов равных 5.3 ТГц.

3. Впервые теоретически и экспериментально проведен анализ процессов транспорта электронов в диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток с учетом нагрева структур протекающим током в импульсном и непрерывном режимах.

4. Впервые теоретически и экспериментально рассмотрено влияние гамма-нейтронного облучения на диоды на основе GaAs/AlAs сверхрешеток.

Практическая значимость работы

1. Разработана компьютерная программа для проведения моделирования транспорта электронов в GaAs/AlAs сверхрешетках терагерцовых диодов.

2. Теоретически и экспериментально было показано, что диоды на основе малопериодных (≤ 6) СР, обладают рекордной частотой автогенерации 200-250 ГГц

3. Разработан стенд для измерений импульсных ВАХ в диапазоне температур от -160 ºС до +160 ºС, с помощью которого, измерены параметры первого и второго экстремумов на ВАХ диодов на основе СР и проведено их сопоставление с характерными параметрами, реализуемыми при работе диодов в ТГц измерительном стенде, что позволило исследовать работу диодов в режиме «разрыва» минизоны.

4. Определены уровни радиационной стойкости к гамма- и гамма-нейтронному облучению диодов на GaAs/AlAs сверхрешетках (до 10^{15} см$^{-2}$, 10^{7} рад) и планарных GaAs диодов Ганна (до 10^{14} см$^{-2}$, 10^{6} рад).

На защиту выносится:

1. Комплекс методов на основе квазигидродинамического приближения и метода Монте-Карло для расчета параметров СР диодов, позволяющий учитывать сопротивление переходных слоев СР, нагрев диодов протекающим током и влияние радиационного воздействия.

2. Модель функционирования квазибаллистического диода на основе 6-периодной СР в режиме «разрыва» минизоны, который имеет рекордные предельные частоты работы (до 5.3 ТГц согласно экспериментальным данным и до 10 ТГц согласно теории).

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения температуры в структурах диодов на основе СР позволившие зарегистрировать изменение отрицательной дифференциальной проводимости (до 3 раз) диодов в составе умножителя терагерцового сигнала.

4. Экспериментальные и теоретические результаты исследований уровня радиационной стойкости диодов на GaAs/AlAs сверхрешетках к гамма-нейтронному облучению, согласно которым ток снижается на 50 % при флюенсе нейтронов 10^{15} н/см^2 (расчет) и не менее $5 \cdot 10^{14}$ н/см^2 и дозе гамма-излучения 10^6 рад (эксперимент).

Личный вклад автора

В работе по исследованию квазибаллистического транспорта электронов в терагерцовых диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток вклад автора является определяющим с точки зрения постановки задачи, проведения измерений и расчетов, анализа полученных результатов. В работах по развитию экспериментального метода исследования параметров структур вклад автора является определяющим с точки зрения разработки и апробации методов. Все расчеты и экспериментальные исследования параметров структур до и после облучения, результаты которых представлены в диссертации, проведены автором. Облучение структур и приборов проводилось специалистами РФЯЦ ВНИИТФ в г. Снежинск. Исследуемые структуры изготавливались в НПП «Салют» (г. Нижний Новгород) и ИФМ РАН. Полупроводниковые структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ФТИ РАН им. Иоффе (г. Санкт-Петербург). Изготовление диодов на основе СР выполнялось на кафедре квантовой радиофизики и электроники в ННГУ.

Публикации и апробация результатов

Основные результаты диссертации отражены в 48 публикациях, в том числе, в 15 статьях в реферируемых журналах (9 статей, опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science), 29 тезисах и трудах научных конференций и семинаров: участник XVIII научной конференции по радиофизике; XXII и XXIII нижегородских сессий молодых ученых (естественнонаучные дисциплины); всероссийских научно-технических конференций «Стойкость-2011», «Стойкость-2012», «Стойкость-2013», «Стойкость-2014», «Стойкость-2016», XXIII, XXII, XXI, XX, XIX, XVII международных конференций «Нанофизика и наноэлектроника», всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2014), III Международной научно-технической конференции «Современная элементная база, VI и VII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации».

Внедрение научных результатов

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

Результаты и методики, полученные в работе, используются в НПП «Салют» и в филиале Федерального государственного унитарного предприятия "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" "Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова".

Результаты диссертации использованы в учебном процессе (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского) при подготовке учебных курсов «Электроника», «Твердотельная электроника», «Электроника и схемотехника», «Полупроводниковая электроника» и «Спецлаборатории по физической электронике». Также результаты были использованы при подготовке лабораторного практикума по курсам «Электроника», «Твердотельная электроника», «Электроника и схемотехника», «Полупроводниковая электроника»; при подготовке методического пособия «Измерение импульсных вольт-амперных характеристик планарных диодов Ганна (Практикум)» (для студентов магистратуры радиофизического факультета ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 03.04.03 «Радиофизика»).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 153 страницы, включая 99 рисунков, 17 таблиц и список цитируемой литературы из 78 наименований.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации основных результатов диссертации.

Первая глава представляет из себя обзор литературных данных по диодам на основе сверхрешеток и диодам Ганна. В главе обосновывается выбор структур для исследований. Короткие структуры диодов, в которых проявляется эффект всплеска скорости, позволяют достигать *терагерцовых* частот. Особый интерес представляют структуры, где возможен квазибаллистический характер движения электронов, что позволяет дополнительно повысить быстродействие.

В **п. 1.1** приведена общая информация по физике исследуемых приборов, объектами для изучения были выбраны диоды на основе сверхрешеток и диоды Ганна.

В **п. 1.2** приведена информация о моделировании методом Монте-Карло и о квазигидродинамическом приближении. В **п. 1.2.1** приведены краткие сведения об аналитических моделях расчета параметров исследуемых структур. В **п. 1.2.2** приведена информация о квазигидродинамическом приближении с учетом радиационного воздействия. В **п. 1.2.3** описаны особенности проведения моделирования методом Монте-Карло с учетом радиационного воздействия.

В **п. 1.3** рассмотрены основные экспериментальные методики анализа параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе. В **п. 1.3.1** кратко описаны методы измерения вольт-фарадных характеристик и определения профиля легирования. В **п. 1.3.2** приведена информация о нагреве исследуемых диодов и методах измерения импульсных вольт-амперных характеристик. В **п.1.3.3** рассмотрены особенности измерений после радиационного воздействия.

В **п. 1.4** приводится описание радиационной стойкости исследуемых структур. В **п. 1.4.1** рассматривается радиационная стойкость полевых транзисторов с двумерным электронным газом. В **п. 1.4.2** приводится радиационная стойкость диодов Ганна планарных и «объемных». В **п. 1.4.3** приводится информация о радиационной стойкости туннельного диода.

Вторая глава посвящена особенностям физико-топологических моделей исследуемых планарных диодов Ганна и диодов на основе сверхрешетки.

В **п. 2.1** описываются тестовые объекты, использующиеся в работе. Представлены данные по исследуемым структурам, которые будут определять граничные и начальные условия для проведения расчетов. Рассматриваются планарные диоды Ганна и диоды на основе сверхрешетки.

В **п. 2.2** представлены математические модели для расчетов параметров исследуемых диодов. В **п. 2.2.1** описана модель Кронига-Пенни для расчета уровней в минизоне сверхрешеток. В **п. 2.2.2** приведено квазигидродинамическое приближение для описания транспорта электронов в исследуемых диодах с учетом радиационного воздействия. В **п. 2.2.3** описывается моделирование методом Монте-Карло с учетом радиационного воздействия. В **п. 2.2.4** описывается математическая модель для расчета распределения температуры в структурах диодов.

В третьей главе приведены результаты расчетов транспорта электронов в исследуемых диодах. Расчет был проведен с помощью метода Монте-Карло и квазигидродинамической модели, которые представлены в главах 2 и 1.

В **п. 3.1** приведены результаты расчетов зонной диаграммы СР (рис. 1). Впервые установлена эффективность функционирования диодов в режиме «разрыва» минизоны в квазибаллистических диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток вплоть до предельной частоты (5.3 ТГц для 6-периодной СР).

В **п. 3.2** приведены результаты расчетов транспорта электронов в СР на основе квазигидродинамического приближения (рис 2 и рис. 3). Проведено сравнение особенностей транспорта электронов и механизма возникновения

стабильных колебаний тока в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs.

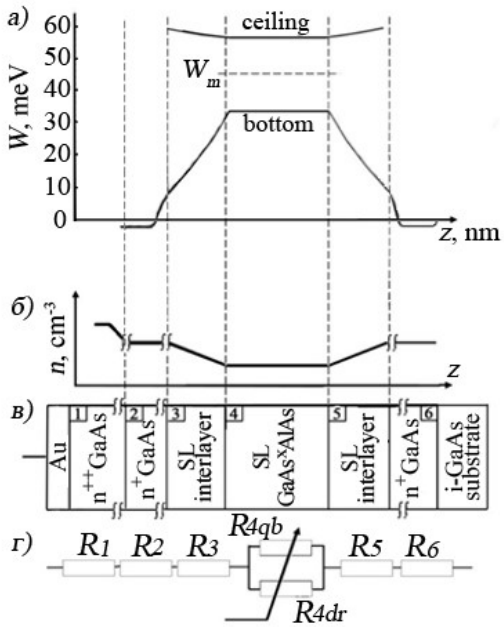
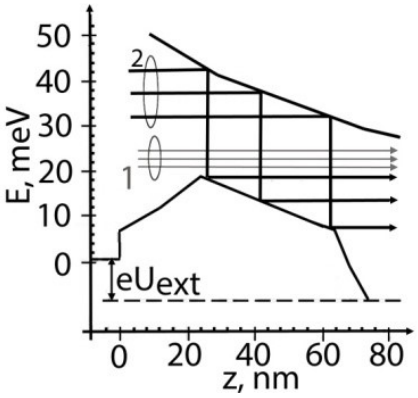
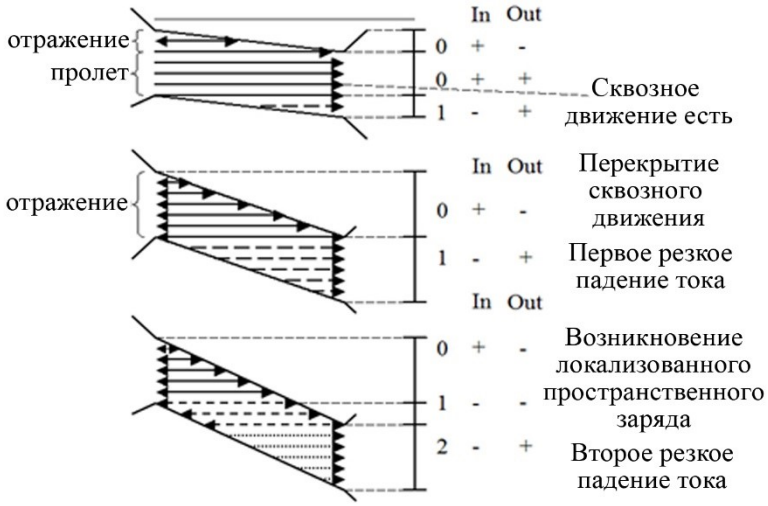


Рис. 1. Зонная диаграмма, состав слоев и эквивалентная схема исследуемых диодов: а) зонная диаграмма минизоны с учетом переходных слоев, W_m - обозначение середины минизоны; б) концентрация доноров в сверхрешетке; в) описание слоев диодной структуры (4 - активная область СР, 3 и 5 – переходные слои, состоящие из чередующихся слоев AlAs и GaAs с толщинами 1x28, 2x24 и 3x21 монослоев указанных полупроводников; г) эквивалентная схема, R_1-R_6 – сопротивления слоев, где R_{4qb} описывает квазибаллистическое движение, R_{4dr} – дрейфовое



а)



б)

Рис. 2. а) Зонная диаграмма диодной структуры под напряжением. Показаны траектории двух типов электронов: 1 – движущиеся квазибаллистически, т.е. испытывая только малоугловые упругие столкновения и 2 – претерпевающие рассеяния с потерей энергии и отражения от потолка минизоны.

б) Схема движения электронов в диодной гетероструктуре. Для различных внешних напряжений на зонной диаграмме выделены характерные процессы квазибаллистического транспорта электронов прерываемого взаимодействием с потолком минизоны и рассеянием

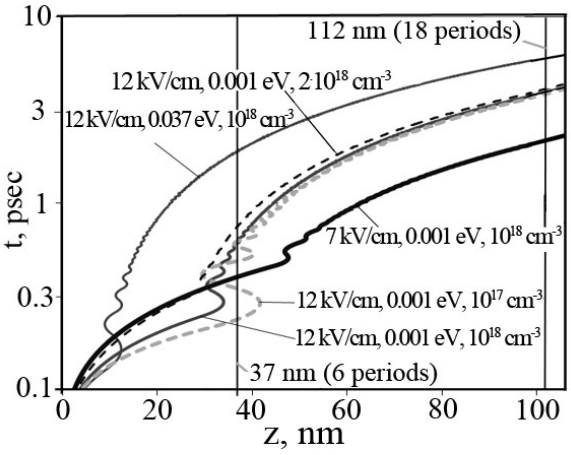


Рис. 3. Результат расчета зависимости координаты электрона от времени в квазигидродинамическом приближении. Решались уравнения баланса энергии и импульса в заданном поле. Моделировалось движение усредненного электрона типа 1 (стартовая энергия 0.001 эВ) или типа 2 (стартовая энергия 0.037 эВ) в постоянном поле для различных концентраций легирующей примеси

С помощью квазигидродинамичекой модели для различного соотношения монослоев в СР были рассчитаны средняя скорость, пороговое поле (поле при котором начинается участок отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ) и время пролета электроном исследуемой структуры. Установлена необходимость уменьшения длины исследуемых СР, так как это позволяет увеличивать предельную частоту работы исследуемых диодов.

В **п. 3.3** приведены результаты моделирования переноса электронов в СР методом Монте-Карло. Результаты моделирования показали, что одним из важных аспектов создания терагерцовых диодов на основе СР с малым числом периодов является определение оптимального положения и ширины минизоны СР. В силу малой длины сверхрешетки средняя скорость носителей заряда внутри СР зависит от энергии инжектируемых электронов, что существенно сказывается на быстродействии диодов. С другой стороны, ширина и положение минизоны обусловливают количество инжектируемых в СР электронов, что в совокупности с их скоростью определяет величину электрического тока и выходную мощность.

Сокращение количества периодов СР до 6-ти приводит к тому, что важным становится начальный участок движения, когда электроны инжектируются из контакта в активную область СР, где сосредоточено большое продольное поле. В этом случае квазибаллистический характер движения может распространяться на большую часть активной области СР так, что средняя скорость электронов может быть до 3.5 раз выше, чем в длинных СР. Указанные результаты расчетов в данной работе подтверждаются расчетом средней скорости электронов в СР (рис. 4).

В табл. 1 приведено сравнение режимов работы исследуемых диодов на основе СР, где 1 и 2 max – первый и второй максимумы тока на ВАХ (врезка рис. 14). Для сравнения условий возникновения автогенерации в СР с различным количеством периодов было предложено использовать аналог критерия Кремера: $nL > (3\varepsilon v_s m^*/e^2\tau_p)$, где n – концентрация электронов, L - длина диода, m^* – масса электрона, v_s - средняя скорость электронов, ε - диэлектрическая проницаемость, τ_p - время релаксации импульса, e – заряд электрона. Исключение из критерия Кремера подвижности и использование эффективной массы и времени релаксации импульса позволяют учесть

квазибаллистический характер движения электронов в СР с малым числом периодов. Конкретные значения времен релаксации вычислялись с помощью моделирования методом Монте-Карло [16-18].

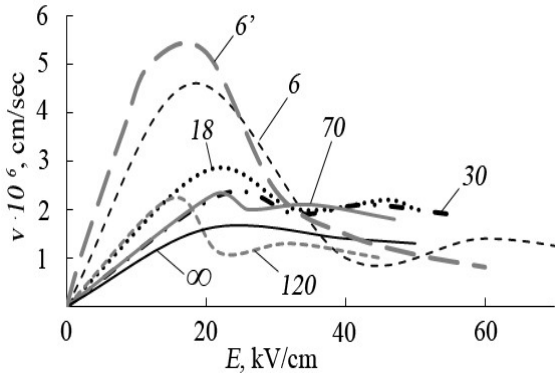


Рис. 4. Расчетная зависимость средней скорости электронов от напряженности электрического поля в активной области исследуемых диодов: ∞ – расчетная зависимость (расчет проводился в приближении бесконечной СР), 6' – расчет методом Монте-Карло (для 6-периодной СР), остальные линии - расчет из экспериментальных ВАХ. Цифрами на рисунке указано количество периодов СР в диодах

Таблица 1. Сравнение режимов работы исследуемых диодов на основе СР. *1 max* и *2 max* – значения соответствующие максимальным значениям тока (врезка рис. 14). В последней строке приведен расчет с использованием аналога критерия Кремера

Параметр	Точка на ВАХ	Количество периодов СР				
Количество периодов СР	-	6	18	30	70	120
Ширина минизоны СР, мэВ	-	25±3	25±3	25±3	25-35	25-35
Плотность тока	1 max, 10^5 А/см^2	1.7	2.8	3.2	0.48	0.31
	2 max, 10^5 А/см^2	1.4	2.2	2.17	0.4	0.188
	1max/2 max	1.21	1.27	1.47	1.2	1.65
Напряжение на одном периоде СР	1 max, мВ	11	12	14	13	10
	2 max, мВ	57	29	27	22	21
	1max/2 max	0.19	0.41	0.52	0.6	0.48
Время пролета СР	1 max, пс	0.7	4.1	5.9	18	33
	2 max, пс	2.7	5.1	8.6	20	56
	1max/2 max	0.52	0.8	0.69	0.9	0.58
Напряженность электрического поля	1 max, кВ/см	18	20	22	21	15
	2 max, кВ/см	60±20	46±5	43±3	35±2	32±2
	1max/2 max	0.194	0.434	0.512	0.6	0.469
Скорость электронов	1 max, 10^6 см/сек	4.6	2.8	2.2	2.4	2.23
	2 max, 10^6 см/сек	1.4	2.2	2.1	2.1	1.3
	1max/2 max	3.28	1.27	1.05	1.13	1.72
nL / $(3\varepsilon\upsilon_s m^*/e^2\tau_p)$	1 max	1.3 (0.9*)	8	11.2	7	9
	2 max	10	11	20	8	25

* - *значение для скорости, вычисленной методом Монте-Карло*

Результаты расчетов с использованием предложенного аналога критерия Кремера показывают, что с уменьшением количества периодов в СР диодов

разница правой и левой частей приведенного неравенства снижается, так что для диодов с 6-периодной СР они совпадают. Поэтому возникновение стабильной генерации в эксперименте наблюдается только при напряжениях второго максимума на ВАХ в 1.5-2 раза выше, чем у диодов с большим количеством периодов в СР, где аналог критерия Кремера выполняется строго уже при напряжениях смещения, соответствующих первому максимуму.

Характерное время пролета (таблица 1) 6-периодной СР составляет менее 1 пс, что позволяет говорить о возможности построения генераторов с частотами генерируемых сигналов 1 ТГц и выше с использованием режима, реализующего «разрыв» минизоны.

В **п. 3.4** представлены результаты расчета распределения температуры в структурах диодов.

Для описания и расчета нагрева диодов протекающим током использовалась тепловая эквивалентная схема, представленная на рисунке 5, где указаны 4 тепловых сопротивления (S_0, S_1, S_2, S_3), соответствующие четырем областям в диоде. Внешние границы области S_0 - это границы активной области, форма которой близка к цилиндру. Внешние границы областей S_1, S_2 показаны пунктиром: S_1 - четверть сферы, S_2 - половина сферы. Область S_3 (подложка) представляет собой параллелепипед, через который тепло отводилось к балочным выводам диода (золото) и далее в теплоотвод (латунь).

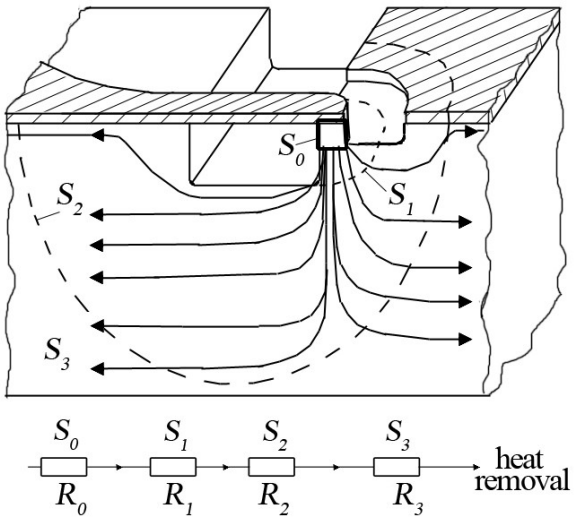


Рис. 5. Тепловая модель исследуемого диода на основе сверхрешетки. Указаны 4 области диода: цилиндр S_0, четверть сферы S_1, половина сферы S_2 и параллелепипед S_3, которые соответствуют четырем тепловым (R_0, R_1, R_2, R_3) сопротивлениям на эквивалентной схеме. Стрелками отмечено направление теплового потока, возникающего за счет выделения тепловой энергии при протекании электрического тока по областям S_0 - S_3. Затем тепло отводилось к балочным выводам диода и далее в теплоотвод

По результатам расчета по тепловой модели были получены тепловые сопротивления каждой области, которое для области S_0 (цилиндр) составило $1.4 \cdot 10^3$ °С/Вт, для S_1 (четверть сферы) - $12.7 \cdot 10^3$ °С/Вт, для S_2 (половина сферы) – $3.5 \cdot 10^3$ °С/Вт, для S_3 (параллелепипед) – $1.04 \cdot 10^3$ °С/Вт. Данные результаты получены для напряжения питания 2 В и тока диода 25 мА, которые использовались для процедуры отжига радиационных дефектов протекающим в диоде током. Температура нагрева области S_0 составляла 150-200 °С.

Отметим, что при работе диода в составе умножителя терагерцового сигнала [13, 14], когда величина рассеиваемой мощности на диоде имеет

величину 5-10 мВт, температура нагрева активной области диода составляет примерно 100-150 °С, что влияет на работу исследуемого диода. При работе в качестве детектора терагерцового сигнала выделяемая мощность значительно меньше и разогревом диода можно пренебречь.

В **п. 3.5** описано моделирование радиационной стойкости исследуемых диодов. Впервые теоретически и экспериментально рассмотрено влияние радиационного воздействия на диоды на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток.

Обычно, уровень радиационной стойкости – это уровень радиационного воздействия, при котором происходят отклонения параметров прибора за пределы указанные в техническом задании. Процент изменения параметров определяется требованиями к устройству, в котором используется диод. В данной работе, критерием для определения уровня радиационной стойкости являлось снижение тока после радиационного воздействия на 50%.

С помощью известного алгоритма SRIM [27] получено, что при попадании в ядро атома гетероструктуры одного быстрого нейтрона (1 МэВ), возникают атомы отдачи, которые формируют кластеры радиационных дефектов. Каждый кластер состоит из 10^2 - 10^4 точечных дефектов, объединившихся в комплексы. Количество кластеров дефектов зависит от уровня облучения и может составлять от единиц до 10^3 штук в активной области диода (рис.6). Характерные размеры стабильных кластеров слабо отличаются от размеров, которые получаются в ходе расчетов по SRIM в силу малых коэффициентов диффузии дефектов при комнатных температурах [18].

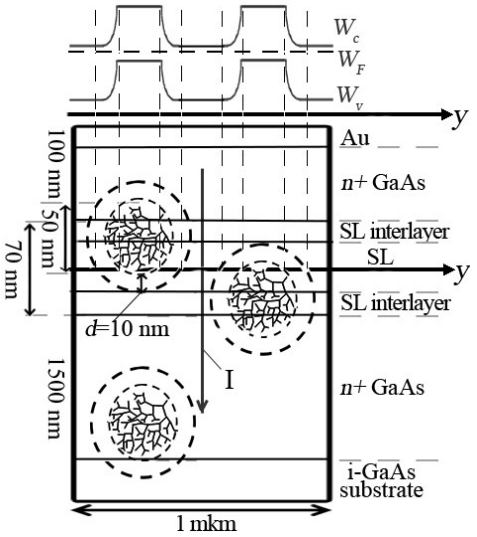


Рис. 6. Схематичное изображение кластеров радиационных дефектов в исследуемом диоде на основе сверхрешетки, а также вид зонной диаграммы кластеров дефектов согласно модели Госсика [29]. Указана ширина области пространственного заряда вокруг кластеров радиационных дефектов d=10 нм

Кластеры радиационных дефектов образуются в активной области диода и согласно модели Госсика такой кластер, за счет наличия области пространственного заряда (ОПЗ), препятствует движению электрона (рис.6). Соответственно ток будет протекать в области между субкластерами радиационных дефектов (СКРД). Поскольку размеры диода в вертикальном направлении намного больше, чем размеры и расстояние между СКРД, то в диоде их убирается большое количество. Такой тип транспорта электронов в сверхрешетках ранее не изучался.

Был проведен расчет размеров, концентрации и расстояний между кластерами радиационных дефектов (табл. 2). Из результатов расчета видно, что при флюенсах облучения ~10^{13} см$^{-2}$ величина амплитуды тока уменьшается примерно на 10%.

Таблица 2. Размер, концентрация и расстояния между кластерами дефектов, а также доля поперечной площади диода, блокированной кластерами дефектов в зависимости от флюенса нейтронов. ***Примечание*** * - на проекции изображения кластеров на плоскости поперечного сечения активной области диода нет зазоров между кластерами [18]

Флюенс нейтронов, н/см^2	Концентрация СКРД, см$^{-3}$	Среднее количество кластеров в сверхрешетке (Среднее количество кластеров в активной области диода)	Расстояние между краями СКРД для горячих электронов, нм	Доля поперечной площади диода, блокированной кластерами радиационных дефектов, %
10^{12}	$2\cdot10^{11}$	0 (0)	1640	0 (0)
10^{13}	$2\cdot10^{12}$	2 (8)	724	3 (10)
10^{14}	$2\cdot10^{13}$	12 (30)	298	15 (41)
10^{15}	$2\cdot10^{14}$	57 (142)	101	37 (90)
$3\cdot10^{15}$	$6\cdot10^{14}$	117 (292)	49	77 (100)
$6\cdot10^{15}$	$1{,}2\cdot10^{15}$	188 (470)	24	100 (100)*
$6.5\cdot10^{15}$ отказ	**$1{,}3\cdot10^{15}$ отказ**	**200 (500) отказ**	**0 отказ**	**Кластеры касаются друг друга**

Принцип действия диодов Ганна, основан на объемных свойствах однородного полупроводника и связан с междолинными переходами электронов. В сверхрешетках возникают колебания тока (вызванные «блоховскими» осцилляциями), аналогичные колебаниям в диоде Ганна, с образованием доменов. Поэтому, для сравнения с СР, были исследованы планарные диоды Ганна. В **п. 3.6** приведены результаты сравнения процессов генерации в диодах Ганна и диодах на основе СР. Был проведен расчет концентрации электронов от координаты в структуре, на рисунке 7 показано сравнение нормированных ВАХ исследованных диодов Ганна различной конструкции. На рисунке 8 показана зависимость амплитуды и частоты генерируемого сигнала от напряжений питания и управления для диодов с одной квантовой ямой до и после облучения. Получено, что квантовые ямы выигрывали за счет больших (в 1.2 - 1.5 раза) подвижности и средней скорости электронов. Кроме того, увеличение количества ям также дает выигрыш в повышении отрицательной дифференциальной проводимости.

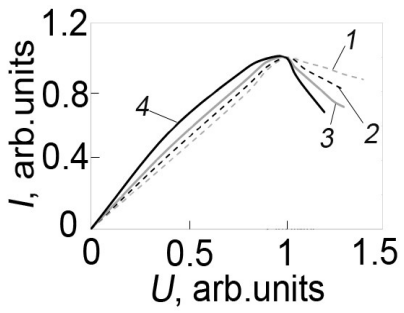


Рис. 7. Расчетные ВАХ диодов: нормированные на значение тока и напряжения в максимуме: *1* – одна классическая яма, *2* – одна квантовая яма, *3* – две классические ямы, *4* – две квантовые ямы

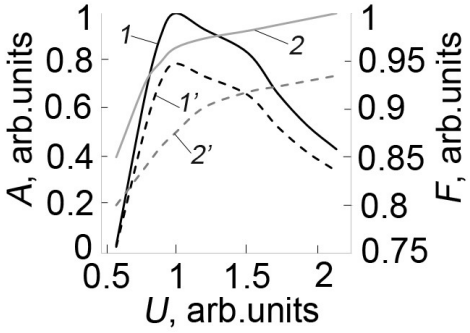


Рис. 8. Зависимость амплитуды *A* (*1, 1'*) и частоты генерации *F* (*2, 2'*) от напряжения питания до (*1, 2*) и после (*1', 2'*) нейтронного облучения спектра деления с флюенсом $1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальных установок, рассмотрены полученные результаты измерений. В конце главы приведено сравнение исследуемых структур друг с другом, с точки зрения результатов расчета и эксперимента.

В **п. 4.1** описывается установка для импульсных измерений вольт-амперных характеристик (рис. 9, рис. 10). Впервые теоретически и экспериментально проведен анализ процессов транспорта электронов в диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток с учетом нагрева структур протекающим током в импульсном и непрерывном режимах.

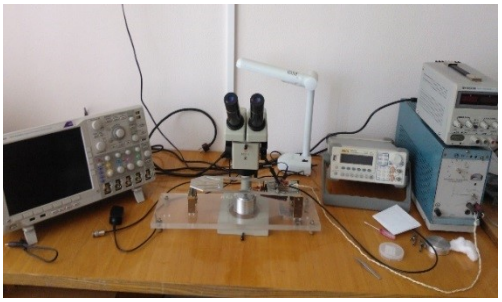


Рис. 9. Фотография экспериментальной установки

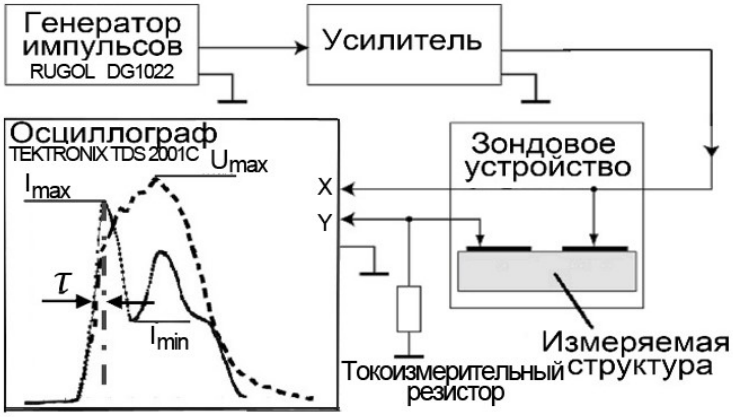


Рис. 10. Блок схема экспериментальной установки

Для детального измерения вольт-амперных характеристик исследуемых диодов был разработан специальный стенд. Подбирались такие параметры импульсов напряжения, чтобы минимизировать нагрев диодов протекающим током (длительность импульса подаваемого напряжения на диод составляла 50 нс и фронта импульса менее 10 нс, нагрев структур не более 5-20 ºС). Наблюдались ступеньки на импульсных и статических вольт-амперных

характеристиках с нагревом и без него, которые были сопоставлены с характерными параметрами реализуемыми диодами при их функционировании в ТГц измерительном стенде.

В **п. 4.2** описывается установка для измерений вольт-фарадных характеристик (рис. 11). Были проведены измерения при низких температурах. Это достигалось помещением структур в жидкий азот.

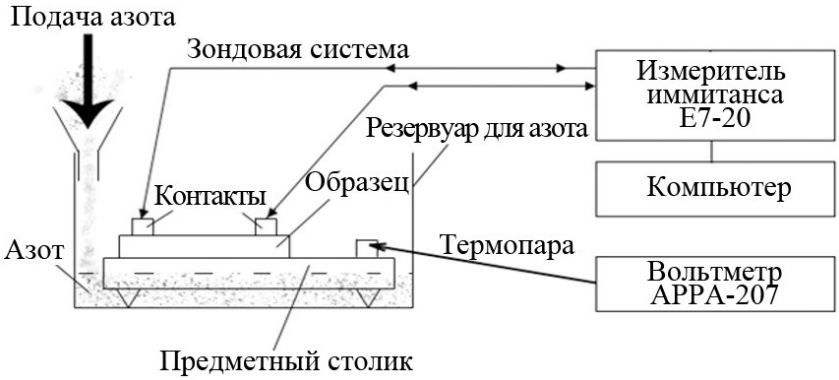


Рис. 11. Измерительная схема. Данные с измерителя иммитанса Е7-20 передавались на компьютер, где уже потом вручную происходила обработка результатов

Для сравнения с СР, были исследованы планарные диоды Ганна. В сверхрешетках возникают колебания тока (вызванные «блоховскими» осцилляциями), аналогичные колебаниям в диоде Ганна (вызванные междолинными переходами электронов), с образованием доменов. В **п. 4.3** приведены результаты экспериментальных исследований. В **п.4.3.1** приведены результаты для структур с двумерным электронным газом. В **п.4.3.2** приведены результаты эксперимента для планарных диодов Ганна (рис.12).

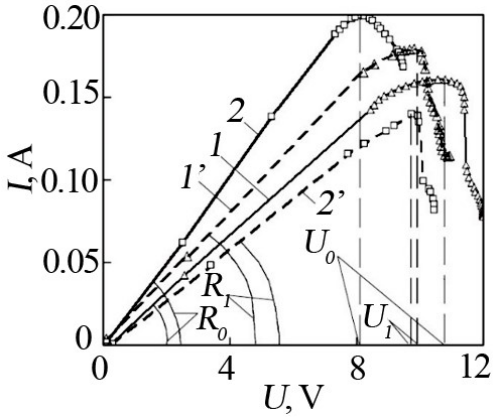


Рис. 12. Вид импульсных вольт-амперных характеристик диодов на структурах 1 (1, 1') и 2 (2, 2') до (1, 2) и после (1', 2') облучения нейтронами со средней энергией 14 МэВ. Обозначения: U_0 и U_1 – напряжения соответствующие максимальным токам диодов до и после облучения, R_0 и R_1 – сопротивления диодов на начальном участке ВАХ до и после облучения соответственно

Наблюдался как нормальный, т.е. известный из литературы характер поведения ВАХ диодов, когда сопротивление после облучения увеличивалось, так и аномальный характер, когда сопротивление диодов снижалось, т.е. параметры структур, с точки зрения перспективности изготовления СВЧ диодов Ганна, улучшались.

Сопоставление измеренного и рассчитанного уровня радиационной

стойкости диодов с литературными данными показывает, что уровень стойкости планарных диодов Ганна на *1-2 порядка больше*, чем для объемных диодов Ганна классической конструкции.

В **п.4.3.3** приведены результаты экспериментальных исследований диодов на основе сверхрешеток. В **п.4.3.3.1** рассмотрены вольт-амперные характеристики диодов на основе сверхрешеток (рис. 13). При использовании прямоугольных импульсов, за счет низкой (1/2000) скважности, удавалось избежать нагрева исследуемых структур (температура нагрева составляла не более чем 5-20 °С). В случае пилообразного сигнала осуществлялась плавная регулировка температуры образца.

Благодаря специальной калибровке задержки импульсов в сигнальных линиях измерительного стенда удалось минимизировать искажения получаемой ВАХ. На врезке (рис. 13) представлены результаты расчета сопротивления для разных участков вольт-амперной характеристики (ВАХ).

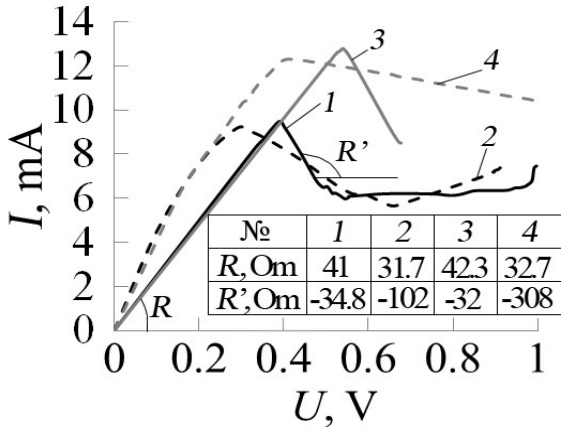


Рис. 13. ВАХ исследуемых структур. 1,2 – результаты измерений 6-периодных СР, 3,4 – результаты измерений 18-периодных СР. 1, 3 – вид зависимости прямоугольного импульса длительностью 50 нс (скважность 1/2000), 2,4 – пила. (Период следования измерительных импульсов: 1,3-100 мкс; 2,4 – 100 мс.) На врезке представлены результаты расчета сопротивления для разных участков вольт-амперной характеристики (ВАХ), где в первой строке указан номер (№) кривой, R - сопротивление начального участка ВАХ, R' – сопротивление участка отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) на ВАХ

На рис. 14 сопоставлены типичные экспериментальные ВАХ диодов. Видно, что присутствует сходство между ВАХ для диодов с разным количеством периодов активной области СР (наличие 1-го и 2-го экстремумов). На рисунке 14 видно, что второй максимум для 6-периодной СР в 3-4 раза больше по напряжению, чем первый, в то время как для остальных диодов только в 1.5-2 раза, несмотря на то, что конструкции диодов подобны. Учет влияния сопротивления контактов приводит к еще большему сдвигу ВАХ вправо.

В **п. 4.3.3.2** приведено сравнение процесса транспорта электронов и формирования домена в диоде Ганна и сверхрешетках. Расчет в рамках данной работы показал, что характерное время пролета 6-периодной СР квазибаллистическими электронами составляет 10^2 до 10^3 фс в зависимости от

напряженности поля в СР, следовательно, предельные частоты генерации исследуемых структур 8…12 ТГц.

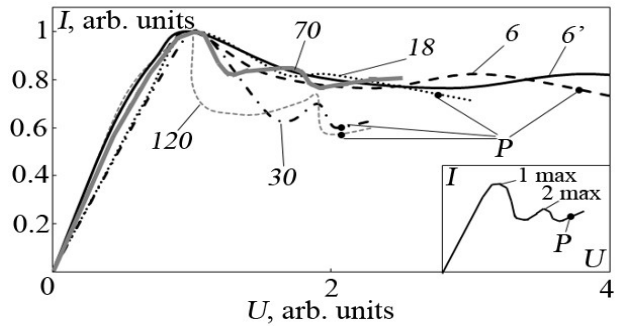


Рис. 14. Сравнение экспериментальных вольт-амперных характеристик диодов. Цифрами на рисунке указано количество периодов СР в диодах. 6' – расчетная ВАХ для диодов на основе СР с 6-ю периодами без влияния сопротивлений контактов. 'P' – рабочая точка по напряжению смещения для которой наблюдалась устойчивая генерация ТГц сигнала. На врезке показана схема вольт-амперной характеристики для исследуемых диодов, указаны первый (*1 max*) и второй (*2 max*) максимумы тока

В **п. 4.3.3.3** приведены результаты исследования диодных структур в гармонических смесителях в диапазоне частот 0.2-5.3 ТГц (рис. 15) [13, 14]. Этот эксперимент не проводился в рамках данной работы, но был использован для калибровки модели Монте-Карло.

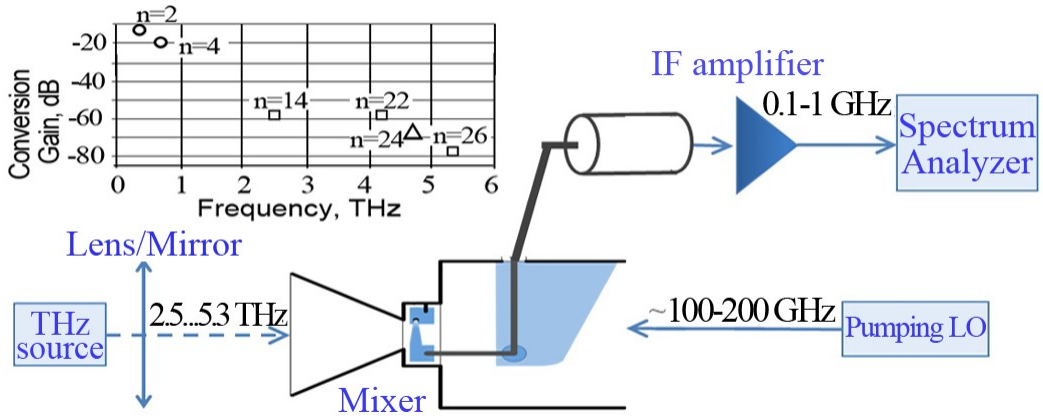


Рис. 15. Схема преобразования сигнала в гетеродинном приемнике с гармоническим смесителем [13, 14] на основе исследуемого диода. На врезке представлена зависимость коэффициента преобразования от частоты сигнала для диодной структуры на 6-периодной сверхрешетке. Указанная зависимость измерялась с использованием нескольких источников терагерцового сигнала: частотной гребенки, возбуждаемой фемтосекундным лазером (n=2,4); газового лазера на CH_3OH (n=14, 22, 26); и квантово-каскадного лазера (n=24). Цифры (2,4…26) на врезке указывают номера используемых гармоник гармонического смесителя с накачкой от гетеродина на частоте 0.1 – 0.2 ТГц

В **п. 4.3.3.4** приведены результаты исследования влияния радиационного воздействия на исследуемые диоды. На рис. 16 представлена типичная вольт-амперная характеристика диодов до и после гамма- и гамма-нейтронного

облучения, а также после дополнительного отжига протекающим током. Для отрицательных напряжений смещения ВАХ диодов подобна приведенным на рисунке 16. Видно, что амплитуда тока снизилась на 10% в результате возникновения субкластеров радиационных дефектов, что согласуется с результатами расчетов. Однако использованная в данной работе математическая модель не смогла предсказать неожиданные изменения ВАХ при низких напряжениях.

Возникновение порогового напряжения «отпирания» диода *U'*, связанное с изменением свойств его контактов, не приводит к катастрофическому отказу диодов – область отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ диодов сохраняется, т.е. функционально диод после облучения работоспособен и может использоваться в радиационно-стойких детекторах и умножителях терагерцового диапазона частот. Эксперимент показал слабую зависимость изменений тока диодов от величины дозы, а в некоторых случаях при увеличении дозы облучения влияние радиации уменьшалось.

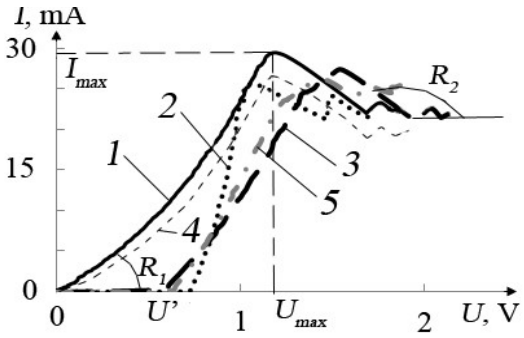


Рис. 16. Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемых диодов [82] на основе 30-периодной сверхрешетки до и после радиационного воздействия: 1 – до радиационного воздействия; 2 – после радиационного воздействия гамма-нейтронным облучением с флюенсом 10^{13} н/см^2 и дозой гамма-квантов 10^5 рад; 3 – после радиационного воздействия гамма-нейтронным облучением с флюенсом 10^{13} н/см^2 и дозой гамма-квантов 10^5 рад и отжига; 4 – после радиационного воздействия (расчет) гамма-нейтронным облучением с флюенсом 10^{13} н/см^2 и дозой гамма-квантов 10^5 рад; 5 - после радиационного воздействия дозой гамма-квантов 10^5 рад. Для гамма-облучения с уровнями 10^6 и 10^7 рад кривые ВАХ имеют вид аналогичный приведенной. Отмечены характерные параметры диодов: I_{max}, U_{max} – ток и напряжение, соответствующие максимуму; *U'* – пороговое напряжение при котором появляется заметный ток (после радиационного воздействия); R_1 – дифференциальное сопротивление начального участка вольт-амперной характеристики; R_2 – дифференциальное сопротивление участка отрицательной дифференциальной проводимости вольт-амперной характеристики

На сопротивление участка отрицательной дифференциальной проводимости R_2 влияют только те кластеры радиационных дефектов, которые попали в сверхрешетку, а на сопротивление начального участка ВАХ R_1 все кластеры, попавшие в активную область диода. Поэтому изменение сопротивления R_2 меньше, чем R_1. Рассчитан уровень радиационной стойкости к нейтронному облучению диодов на основе GaAs/AlAs сверхрешеток, который составил 10^{15} н/см^2.

Сопоставление измеренного и рассчитанного уровня радиационной стойкости диодов с литературными данными показывает, что уровень стойкости планарных диодов Ганна на *1-2 порядка больше*, чем для объемных диодов Ганна классической конструкции [28-31]. Полученные результаты говорят о перспективности применения планарных диодов Ганна и диодов на основе СР в аппаратуре специального назначения. Высокий уровень радиационной стойкости исследуемых диодов позволит использовать их в качестве детекторов радиационного излучения и проводить измерения параметров физических процессов взаимодействия излучения с веществом с характерным разрешением.

Было проведено сравнение экспериментальной и расчетной радиационной стойкости исследуемых диодов с другими известными из литературы приборами [31, 32], такими как СВЧ полевые транзисторы типа HEMT и диоды Ганна (табл.3).

Таблица 3. Сравнение уровней радиационной стойкости к нейтронному облучению (н/см^2) исследуемых диодов с другими СВЧ диодами и транзисторами [31, 32]

		Процент изменения тока прибора		
		10%	30%	50%
Диоды на основе сверхрешеток	Расчет	$0.1\text{-}0.3\cdot10^{14}$	$0.8\text{-}1\cdot10^{15}$	$0.5\text{-}2\cdot10^{15}$
	Эксперимент	$0.1\cdot10^{14}$	-	-
HEMT (эксперимент) [31, 32]		$1\text{-}3\cdot10^{14}$	$1\text{-}3\cdot10^{14}$	$1\text{-}2\cdot10^{15}$
Диоды Ганна (эксперимент)		$0.1\text{-}0.3\cdot10^{14}$	$0.1\text{-}0.3\cdot10^{14}$	$0.2\text{-}1\cdot10^{14}$

В случае СР диодов нельзя считать дефекты точечными, так как размер кластера радиационных дефектов сравним с размером активной области исследуемого диода, поэтому объемными концентрациями (как доноров, так и дефектов) пользоваться можно только для грубых оценок.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые предложен метод моделирования транспорта электронов в GaAs/AlAs СР диодах с помощью комплекса аналитической и численных моделей в квазигидродинамическом приближении и на основе метода Монте-Карло с учетом сопротивления переходных слоев сверхрешеток, их нагрева протекающим током, влияния гамма-нейтронного облучения.

Практически значимо, что разработана компьютерная программа для проведения моделирования транспорта электронов в GaAs/AlAs сверхрешетках терагерцовых диодов. Получены сравнительные характеристики диодов на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток: паразитные сопротивления контактов ($2\cdot10^{-7}$ Ом·см^2) и переходных областей сверхрешеток ($1.67\cdot10^{-8}$ Ом·см^2), удельного падения напряжения на одном периоде сверхрешетки для второго экстремума (для диода на основе 6-периодной СР превышает отношение ширины минизоны к заряду электрона).

Предложен комплекс методов на основе квазигидродинамического приближения и метода Монте-Карло для расчета параметров СР диодов, позволяющий учитывать сопротивление переходных слоев СР, нагрев диодов протекающим током и влияние радиационного воздействия. Таким образом положение №1 выносимое на защиту доказано.

2. Впервые теоретически и экспериментально установлена эффективность функционирования диодов в режиме «разрыва» минизоны в диодах на основе 6-периодных GaAs/AlAs сверхрешеток вплоть до предельных частот работы диодов равных 5.3 ТГц. Проведенное в данной работе сравнение режимов работы диодов показывает, что при увеличении напряжения смещения выше второго максимума на ВАХ среднее напряжение на СР таково, что на одном периоде падает напряжение выше, чем отношение ширины минизоны к заряду электрона. Это приводит к «разрушению» («разрыву») минизоны.

Практически значимо, что теоретически и экспериментально было показано, что диоды на основе малопериодных (≤ 6) СР, обладают рекордной частотой автогенерации 200-250 ГГц. Исходя из сопротивления и емкости активной области диода, определённых согласно эквивалентной схеме, предельная частота работы: $1/(2\pi RC) \approx 3$ ТГц. Впервые проведена оптимизация конструкции сверхрешеток и показано, что эффективность работы малопериодных сверхрешеток во многом определяется переходными областями, расположенными на краях СР. Ширина минизоны СР составила 24 мэВ.

Предложена модель функционирования квазибаллистического диода на основе 6-периодной СР в режиме «разрыва» минизоны, который имеет рекордные предельные частоты работы (до 5.3 ТГц согласно экспериментальным данным и до 10 ТГц согласно теории). Таким образом положение №2 выносимое на защиту доказано.

3. Впервые теоретически и экспериментально проведен анализ процессов транспорта электронов в диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток с учетом нагрева структур протекающим током в импульсном и непрерывном режимах.

Практически значимо, что разработан стенд для измерений импульсных ВАХ в диапазоне температур от -160 ºС до +160 ºС, с помощью которого, измерены параметры первого и второго экстремумов на ВАХ диодов на основе СР и проведено их сопоставление с характерными параметрами, реализуемыми при работе диодов в ТГц измерительном стенде, что позволило исследовать работу диодов в режиме «разрыва» минизоны.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения температуры в структурах диодов на основе СР позволили зарегистрировать изменение отрицательной дифференциальной проводимости (до 3 раз) диодов в составе умножителя терагерцового сигнала. Таким образом положение №3 выносимое на защиту доказано.

4. Впервые теоретически и экспериментально рассмотрено влияние гамма-нейтронного облучения на диоды на основе GaAs/AlAs сверхрешеток.

Практически значимо, что определены уровни радиационной стойкости к

гамма- и гамма-нейтронному облучению диодов на GaAs/AlAs сверхрешетках (до 10^{15} см$^{-2}$, 10^7 рад) и планарных GaAs диодов Ганна (до 10^{14} см$^{-2}$, 10^6 рад). Показано, что возникновение порогового напряжения «отпирания» диода, связанное с изменением свойств его контактов, не приводит к катастрофическому отказу диодов – область отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ диодов сохраняется, т.е. функционально диод после облучения работоспособен и может использоваться в радиационно-стойких детекторах и умножителях терагерцового диапазона частот. Проведено сравнение радиационной стойкости изучаемых диодов друг с другом, а также с другими приборами известными из научной литературы.

Экспериментальные и теоретические результаты исследований уровня радиационной стойкости диодов на GaAs/AlAs сверхрешетках к гамма-нейтронному облучению показали, что ток снижается на 50 % при флюенсе нейтронов 10^{15} н/см^2 (расчет) и не менее $5 \cdot 10^{14}$ н/см^2 и дозе гамма-излучения 10^6 рад (эксперимент). Положение №4 выносимое на защиту доказано.

Цель работы - построение физико-топологических моделей и проведение экспериментальных исследований транспорта электронов в терагерцовых диодах на основе GaAs/AlAs сверхрешеток с учетом гамма- и гамма-нейтронного воздействия достигнута.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Оболенская Е.С., Чурин А.Ю., Оболенский С.В., Мурель А.В., Шашкин В.И. Радиационная стойкость планарных диодов Ганна с дельта-легированным слоем // Физика и техника полупроводников, т. 49, вып. 11, с. 1507-1515, 2015. (Obolenskaya E. S., Churin A. Yu., Obolensky S. V., Murel A. V., Shashkin V. I. On the radiation resistance of planar Gunn diodes with δ-doped layers // Semiconductors, v. 49, p. 1459-1467, 2015.)

А2. Оболенская Е.С., Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Неженцев А.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Медведев Г.В. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик HEMT структур и полевых транзисторов. Физика и техника полупроводников, т.50, вып.12, с.1599-1604, 2016. (Obolenskaya E.S., Tarasova E.A., Khananova A. V., Obolenskii S.V., Zemlyakov V.E., Egorkin V. I., Nezhentsev A. V., Sakharov A. V., Tsatsulynikov A. F., Lundin V. V., Zavarin E. E., Medvedev G. V. Theoretical and Experimental Studies of the Current–Voltage and Capacitance–Voltage of HEMT Structures and Field-Effect Transistors // Semiconductors, v. 50, № 12, p. 1599-1604, 2016.)

А3. Оболенская Е.С., Тарасова Е.А., Чурин А.Ю., Оболенский С.В., Козлов В.А. Исследование генерации СВЧ сигналов в планарном диоде Ганна с учетом радиационного облучения // Физика и техника полупроводников, т. 50, вып. 12, с. 1605-1609, 2016. (Obolenskaya E. S., Tarasova E. A., Churin A. Yu., Obolensky S. V., Kozlov V. A. Microwave-Signal Generation in a Planar Gunn Diode with Radiation Exposure Taken into Account // Semiconductors, v. 50, № 12, p. 1579-1583, 2016.)

A4. Оболенская Е.С., Иванов А.С., Павельев Д.Г., Козлов В.А., Васильев А.П. Сравнение особенностей транспорта электронов и субтерагерцовой генерации в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs // Физика и техника полупроводников, т. 53, вып. 9, с. 1218-1223, 2019. (Obolenskaya E. S., Ivanov A. S., Pavelyev D. G., Kozlov V. A., Vasilev A. P. Comparison of the Features of Electron Transport and Subterahertz Generation in Diodes Based on 6-, 18-, 70-, and 120-Period GaAs/AlAs Superlattices // Semiconductors, v. 53, № 9, p. 1192-1197, 2019.)

A5. Оболенская Е.С., Павельев Д.Г., Васильев А.П., Козлов В.А., Оболенский С.В., Устинов В.М. Оптимизация параметров сверхрешетки для диодов терагерцового диапазона частот // Физика и техника полупроводников, т. 51, вып. 11, с. 1493-1497, 2017. (Pavelyev D. G., Vasilev A. P., Kozlov V. A., Obolenskaya E. S., Obolensky S. V., Ustinov V. M. Optimization of the Superlattice Parameters for THz Diodes // Semiconductors, v. 51, № 11, p. 1439-1443, 2017.)

A6. Obolenskaya E. S., Pavelyev D.G., Kozlov V. A., Obolensky S.V., Ustinov V.M., Vasilev A.P. Increase of self-oscillation and transformation frequencies in THz diodes // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, v. 8, № 2, p. 231-236, 2018.

A7. Е.С. Оболенская, Д.Г. Павельев, А.П. Васильев, В.А. Козлов, Ю.И. Кошуринов, С.В. Оболенский, В.М. Устинов. Диодные гетероструктуры для приборов терагерцового диапазона частот // Журнал Радиоэлектроники, № 1, 2016, с. 1-14.

A8. Оболенская Е.С., Павельев Д.Г., Васильев А.П., Козлов В.А., Кошуринов Ю.И., Оболенский С.В., Устинов В.М. Моделирование транспорта электронов в малопериодных GaAs/AlAs сверхрешетках для терагерцового диапазона частот // Физика и техника полупроводников, т. 50, вып. 11, с.1548 - 1553, 2016. (Pavelyev D. G., Vasilev A. P., Kozlov V. A., Koschurinov Yu. I., Obolenskaya E. S., Obolensky S. V., Ustinov V. M. Simulation of Electron Transport in GaAs/AlAs Superlattices with a Small Number of Periods for the THz Frequency Range // Semiconductors, v. 50, № 11, p. 1526-1531, 2016.)

A9. Оболенская Е.С, Павельев Д.Г., Васильев А.П., Козлов В.А. Радиационная стойкость терагерцовых диодов на основе GaAs/AlAs сверхрешеток // Физика и техника полупроводников, т. 52, вып. 11, с. 1337-1345, 2018. (Pavelyev D. G., Vasilev A. P., Kozlov V. A., Obolenskaya E. S. Radiation Resistance of Terahertz Diodes Based on GaAs/AlAs Superlattices // Semiconductors, v. 52, № 11, p. 1448-1456, 2018.)

A10. Оболенская Е.С., Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Козлов В.А., Оболенский С.В. Транспорт горячих носителей заряда в Si, GaAs, InGaAs и GaN субмикронных полупроводниковых структурах с нанометровыми кластерами радиационных дефектов // Физика и техника полупроводников, т. 51, вып. 11, с. 1489-1492, 2017. (Obolenskaya E. S., Zabavichev I. Yu., Potekhin A. A., Puzanov A. S., Obolensky S. V., Kozlov V. A. Transport of Hot Charge Carriers in Si, GaAs, InGaAs, and GaN Submicrometer Semiconductor Structures with

Nanometer-Scale Clusters of Radiation-Induced Defects // Semiconductors, v. 51, № 11, p. 1435-1438, 2017.)

A11. Оболенская Е.С., Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Васин А.А., Тарасова Е.А., Хананова А.А., Линев А.В., Иванов А.Б., Пузанов А.С., Оболенский С.В. Применение физико-топологического моделирования для анализа радиационной стойкости серийных полупроводниковых приборов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, № 4, 2018, с. 10-17.

A12. Оболенская Е.С., Чурин А.Ю., Оболенский С.В., Мурель А.В., Шашкин В.И. Радиационная стойкость планарных диодов Ганна. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, № 2, 2015, с. 33-36.

A13. Оболенская Е.С., Оболенский С.В., Тарасова Е.А. Особенности анализа вольт-фарадных характеристик транзисторов Шоттки при оценке уровня радиационной стойкости. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, № 4, 2012, с. 9-11.

A14. Оболенская Е.С., Венедиктов М.М., Киселев В.К., Оболенский С.В. Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок. Журнал радиоэлектроники, № 1, 2017, с. 1-17.

A15. Оболенская Е.С., Оболенский С.В., Тарасова Е.А. Тепловая модель мощных полевых транзисторов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, № 4, 2012, с. 12-14.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glyavin M.Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G.Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // Physical Review Letter, 2008, v.100, 015101.

2. Кулипанов Г.Н. Лазеры на свободных электронах: новый этап развития // Наука в Сибири, 2010, № 50 с. 2785.

3. Carr G. L., Michael C. Martin, Wayne R. McKinney, Jordan K., George R. Neil, Williams G. P. High-power terahertz radiation from relativistic electrons // Nature, 2002, v.420, p. 153-156.

4. Mathis Y.-L., Gasharova B., Moss D. Terahertz Radiation at ANKA, the New Synchrotron Light Source in Karlsruhe // Journal of Biological Physics, 2003, v. 29, p. 313-318.

5. Carr G.L., Martin M.C., Mckinney W.R., Jordan K., Neil G.R., Williams G.P. Very High Power THz Radiation Sources // Journal of Biological Physics, 2003, v. 29, p. 319-325.

6. R. Köhler, Alessandro Tredicucci, Fabio Beltram, Harvey E. Beere, Edmund H. Linfield, A. Giles Davies, David A. Ritchie, Rita C. Iotti, Fausto Rossi. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // Nature, 2002, v. 417, p. 156-159.

7. Alekseev E., Pavlidis D. GaN Gunn diodes for THz signal generation // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2000, v. 3, p. 1905-1908.

8. Masashi Tachiki, Shouta Fukuya, Tomio Koyama. Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions // Physical Review Letters, 2009, v.102, № 12, 127002.

9. Ahid S. Hajo, Oktay Yilmazoglu, Franko Kueppers, Armin Dadgar, Thomas Kusserow. Reliable GaN-based THz Gunn diodes with side-contact and field-plate technologies // IEEE Access, 2020, v.8, p.84116-84122.

10. Bishop W.L., Marazita S. M., Wood P. A. D., Crowe T. W. A Novel Structure and Fabrication Process for Sub-Quarter-Micron THz Diodes // Seventh International Symposium on Space Terahertz Technology, March 12-14, University of Virginia, Charlottesville, 1996, p.511-524.

11. Feiginov M. Frequency Limitations of Resonant-Tunnelling Diodes in Sub-THz and THz Oscillators and Detectors // Journal of infrared, millimeter and terahertz waves, 2019, v.40, p.365-394.

12. Johanna Hanning. HBV diodes for THz applications. Design of a heterostructure barrier varactor frequency tripler for a 630 GHz output: thesis for the degree of Master of Science in Wireless and Photonics Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.

13. Павельев Д.Г., Демарина Н.В., Кошуринов Ю.И., Васильев А.П., Семенова Е.С., Жуков А.Е., Устинов В.М. Характеристики планарных диодов терагерцового диапазона частот, на основе сильно легированных GaAs/AlAs-сверхрешеток // Физика и техника полупроводников, 2004, т. 38, вып.9, с.1141-1146.

14. Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С., Панин А.Н., Вакс В.Л., Гавриленко В.И., Антонов А.В., Устинов В.М., Жуков А.Е. Экспериментальное исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцовом диапазоне частот // Физика и техника полупроводников, 2012, т. 46, вып.1, с. 125-129.

15. Демарина Н.В., Оболенский С.В. Электронный транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии // Журнал технической физики, 2002, № 1, с. 66-71.

16. Волкова Е.В., Оболенский С.В. Экспериментальное исследование структуры кластеров радиационных дефектов в GaAs с помощью квазибаллистических электронов // Физика и химия обработки материалов, 2005, №3, с.29.

17. С.В. Оболенский. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиационной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов. // Изв. ВУЗов: Электроника, 2003, №6, с.31-68.

18. Оболенский С.В. Моделирование структуры кластера радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном облучении // Известия ВУЗов: Электроника, 2003, №4, с.49-55.

19. Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. Моделирование мощных HEMT при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников, 2012, т. 46, вып. 12, с.1587-1592.

20. Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Свешников Ю.Н., Егоркин В.И., Иванов В.А., Медведев Г.В., Смотрин Д.С. Исследование распределения электронов в GaN и GaAs структурах после gamma-нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников, 2016, т. 50, вып. 3, с. 331-338.

21. Тарасова Е.А., Оболенский С.В. Моделирование тепловых полей в мощных InAlAs / InGaAs полевых транзисторах 0.1...0.3 ТГц диапазона частот // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 5, с.348-353.

22. Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Павельев Д.Г. Высокочастотное детектирование процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах. // Физика и техника полупроводников, 2015, т. 49, вып.12, с.1585-1592.

23. Charles P Baylis, Dunleavy L.P. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements // High Frequency Electronics, 2004, p.64-69.

24. Subash Khanal, Tero Kiuru, Juha Mallat, Antti V. Räisänen, Tapani Närhi. New verification routine for pulsed I–V and transient current measurement setup applied to a THz Schottky diode // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, 2013, Nuremberg, Germany, p.1279-1282.

25. Laurent T., Sharma R., Torres J., Nouvel P., Blin S., Palermo C., Varani L., Cordier Y., Chmielowska M., Faurie J.-P., Beaumont B. Measurement of Pulsed Current–Voltage Characteristics of AlGaN/GaN HEMTs from Room Temperature to 15 K // Acta Physica Polonica A, 2011, vol.119, p.196-198.

26. Warren G.J., Brand S., Abram R.A., Kelsall R.W. Simulation of electron transport in a $(GaAs)_{12}/(AlAs)_{12}$ superlattice // Semiconductor Science and Technology, 1991, v. 6, № 8, p. 784-789.

27. J.P. Biersak. Computer simulations of sputtering. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 1987, v.27, № 1, p. 21-36.

28. Gossik B.R. Disordered region in semiconductors bombarded by fast neutron // J.Appl. Phys., 1954, № 9, p. 1214-1218.

29. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. - Вильнюс: Мокслас, 1989.

30. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973.

31. Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. - М.: Сов.радио, 1980.

32. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. - Минск. Наука и техника, 1978.