

## О Т З Ы В

официального оппонента

о диссертации С.К. Папроцкого «Транспортные явления в объемном Ge и наноструктурах на основе Si, GaAs и InAs, перспективных для генерации ТГц излучения».

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного излучения, соответствующий длинам волн 30-1000 мкм, до сих пор остается наименее изученным и используемым в приложениях. Фактически, это последний неосвоенный участок шкалы электромагнитных волн. В основном, это связано с отсутствием малогабаритных, перестраиваемых и достаточно мощных источников ТГц излучения. Применение ТГц излучения чрезвычайно перспективно для решения диагностических задач в биологии и медицине, для астрономических исследований и изучения быстрых процессов в газах и твердых телах. Кроме того, использование ТГц излучения перспективно в технике дистанционного контроля и системах безопасности, а также для защиты окружающей среды (анализ атмосферных загрязнений). Поэтому разработка новых ТГц источников, пригодных для практического использования, является безусловно актуальной задачей.

Физика полупроводников последних двух десятилетий фактически стала физикой полупроводниковых структур пониженной размерности. Исследования таких структур стали чрезвычайно интересными с научной точки зрения и перспективными для применений благодаря значительному прогрессу полупроводниковой технологии. Квантово-размерные и селективно легированные структуры с размерами менее 30 нм имеют дискретный энергетический спектр, уровни которого отстоят друг от друга на десятки мэВ, что соответствует ТГц и суб-ТГц диапазону частот. Хорошей иллюстрацией сказанному являются квантовые каскадные лазеры, работа которых основана на явлении резонансного туннелирования электронов через уровни размерного квантования в квантовых ямах. На их разработку выделяются в настоящее время большие человеческие и финансовые ресурсы. Другая возможность генерации и детектирования излучения ТГц и суб-ТГц диапазонов, которая в настоящее время привлекает большой интерес исследователей, возникает в резонансно-туннельных структурах с квантовыми ямами. Перспективными для реализации ТГц генерации являются также сверхрешетки.

Диссертационная работа С.К. Папроцкого посвящена как раз экспериментальным исследованиям явлений переноса и ТГц излучения в трех системах: объемном p-германии

при одноосном сжатии, напряженных квантово-размерных структурах Si/SiGe и сверхрешетках InAs/AlSb и GaAs/AlAs. Общим для этих систем является перспектива их использования в качестве источников ТГц излучения. В силу сказанного выше, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении дана общая характеристика работы: обоснована ее актуальность, изложены цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор работ, посвященных исследованиям стимулированного ТГц излучения в кристаллах одноосно сжатого p-Ge, легированного Ga, и в напряженных структурах Si/SiGe/Si с одиночной квантовой ямой SiGe, обнаруженного той же группой, в которой работает диссертант. Рассмотрены также альтернативные ТГц источники: резонансно-туннельные диоды и квантовые каскадные лазеры.

Во **второй главе** изложены результаты исследования кинетики установления тока одноосно деформированного германия p-типа при приложении импульсного напряжения. По этим данным непосредственно определены зависимости коэффициентов ударной ионизации и рекомбинации для мелкой акцепторной примеси. Наиболее интересными результатами этой главы представляются обнаруженная немонотонная зависимость скорости рекомбинации от электрического поля, которую автор объяснил влиянием ударной ионизации на захват, а также обнаруженное проявление эффекта Френкеля-Пула в ионизации мелкой примеси в сильно компенсированных образцах.

**Третья глава** посвящена исследованию природы стимулированного ТГц излучения из внутренних напряженных структур SiGe/Si. Ранее было установлено, что ТГц генерация возникает за счет стимулированных оптических переходов между основным и возбужденным состояниями акцепторов в квантовой яме. Однако механизм возникновения внутрицентральной инверсии до работ диссертанта оставался невыясненным. С помощью изучения динамики установления проводимости и временных зависимостей интегральной интенсивности ТГц излучения этих структур установлено, что существенную роль в возбуждении ТГц генерации играет инжекция электронов из контактов в высокоомную подложку n-Si. Убедительное подтверждение роли инжекции было получено с помощью зондовых измерений. Было обнаружено, что в результате нестационарной монополярной инжекции образуется пакет концентрации носителей, который движется по образцу с некоторой скоростью дрейфа, по направлению которого можно определить знак носителей заряда (в данном случае это оказались электроны). В результате этих исследований в

диссертации выяснен механизм возникновения инверсии заселенности акцепторных состояний в квантовых ямах SiGe.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям проводимости короткопериодных сверхрешёток InAs/AlSb и GaAs/AlAs и влияния оптического ТГц резонатора на туннельный перенос электронов. Эти исследования продиктованы необходимостью разработки полупроводниковых источников ТГц излучения, работающих при комнатной температуре. ТГц лазеры, известные к началу данной работы, могли работать только при низких температурах. Представлены также результаты измерений диаграммы направленности ТГц излучения в дальней зоне для квантового каскадного лазера с волноводом на поверхностных плазмонах.

Наиболее интересным результатом этой главы является обнаруженное диссертантом влияние оптического ТГц резонатора на туннельный ток в сверхрешетках. В режиме нерезонансного туннелирования обнаружено возникновение на вольтамперных характеристиках периодических по напряжению максимумов, которые автор связывает с эффектом Парселла - увеличением вероятности оптических переходов в резонаторе и подавлением этих переходов вдали от резонансов. Насколько нам известно, влияние эффекта Парселла на электронный транспорт обнаружено впервые.

Влияние ТГц резонатора обнаружено также для сверхрешёток GaAs/AlAs в режиме резонансного туннелирования, когда образуются электрические домены. А именно, обнаружено, что при изменении параметров резонатора меняется пороговое поле образования доменов. Это связывается с существованием переменного поля достаточно большой амплитуды, которое за счёт детектирования на сильной нелинейности вольтамперной характеристики вызывает появление дополнительного постоянного поля в образце. Этот результат указывает на возбуждение оптического ТГц резонатора за счёт отрицательной проводимости сверхрешетки с электрическими доменами.

В заключении суммируются полученные в диссертационной работе научные результаты.

Таким образом, в диссертационной работе С.К. Напроцкого получен целый ряд **новых** и очень интересных результатов. Их **достоверность** обусловлена использованием апробированных методик, перекрестным характером проведенных измерений, сопоставлением с результатами других авторов и с расчетами. **Положения**, вынесенные на защиту, четко сформулированы и **обоснованы** на основе результатов диссертационной работы. Полученные результаты, помимо несомненного **фундаментального** интереса, имеют явную **практическую** направленность. Особенно перспективно в этом отношении

продемонстрированное возбуждение распределенного ТГц резонатора сверхрешеткой при комнатной температуре.

Некоторые замечания по работе.

1. В ионизации примесей в германии существенную роль может играть лавинное размножение носителей. Этот вопрос в диссертации не обсуждается.
2. Предложенная в главе 3 качественная модель возникновения инверсии заселенности примесных уровней за счет инжекции выглядит достоверной, однако требует, вообще говоря, подтверждения соответствующим количественным расчетом.
3. Для уверенной интерпретации опыта с возбуждением резонатора за счет отрицательного динамического сопротивления доменов желательны дополнительные эксперименты с резонаторами различной геометрии и, разумеется, спектральные измерения.

Все эти замечания имеют, в основном, характер пожеланий к дальнейшему развитию работы и не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом. Диссертация С.К. Папроцкого представляет собой законченную фундаментальную научную работу в актуальном направлении физики полупроводников. Результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и известны по многочисленным докладам на конференциях. Диссертационная работа С.К. Папроцкого удовлетворяет всем требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.


Официальный оппонент:

заведующий лабораторией Эпитаксиальных микро- и наноструктур  
ФГБУН Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,  
кандидат технических наук

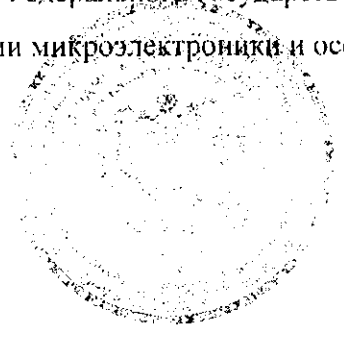
  
(С.Ю. Шаповал)

Отзыв удостоверяю

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН)

  
(А. Н. Редькин)

19 октября 2015 г.



ФИО: Шаповал Сергей Юрьевич

Учёная степень: кандидат технических наук

Специальность: 05.27.01 твердотельная электроника и микроэлектроника

Почтовый адрес: 142432, г. Черноголовка, МО, ул. Академика Осипьяна, д. 6

Телефон: 8-496-524 41 41

Адрес электронной почты: [shapoval@ipim.ru](mailto:shapoval@ipim.ru)

Наименование организации: ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН

Учёное звание: старший научный сотрудник (от 21 февраля 1992 г.)

Должность: заведующий лабораторией Эпитаксиальных микро- и наноструктур