

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
член-корреспондент РАН
С.А. Никитов

13 марта 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

о диссертации Савинова Сергея Александровича “Резонансное туннелирование и процессы усиления и выпрямления терагерцовых волн в наноструктурах с квантовыми ямами”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот электромагнитных волн представляет особый интерес для множества приложений. Использование излучения этого диапазона необходимо для дистанционного экологического мониторинга, глобальных метеорологических наблюдений, в радарных системах, в астрономии космического базирования, в медицине, в лабораторных приборах для молекулярной спектроскопии и во многих других областях. Тем не менее, этот диапазон частот до сих пор остается наименее изученным и используемым в применениях. В основном, это связано с отсутствием компактных, перестраиваемых и достаточно мощных источников, а также перестраиваемых резонансных приемников ТГц излучения.

Экспериментальные и теоретические исследования, развивавшие идеи о возможности инверсии в энергетическом распределении горячих носителей заряда, проводятся уже около 50 лет. В результате этих исследований была реализована лазерная генерация субмиллиметрового и дальнего ИК излучения, главным образом, в кристаллах *p-Ge*. Основной физической причиной, не позволявшей ранее использовать полупроводники с горячими носителями для генерации и усиления волн указанного диапазона, было принципиальное ограничение, обусловленное диффузионным характером разогрева носителей электрическим полем. Даже в таких полупроводниковых приборах, как диоды Ганна и лавинно-пролетные, которые генерировали наиболее высокочастотные колебания, диапазон частот ограничен инерционностью разогрева электронного газа и установления стационарной функции распределения и не превышает 100-200 ГГц. Инверсия в распределении носителей заряда по состояниям разрешенных зон энергий или/и примесных центров позволяет устранить это противоречие, так как частотный диапазон стимулированного излучения связан с энергиями квантов, испускаемых при соответствующих электронных переходах, а не с инерционностью перераспределения носителей по энергиям.

Физика полупроводников последних 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. Их малые размеры приводят к кардинальной перестройке энергетического спектра и к возникновению новых возможностей практического использования полупроводниковых материалов. Хорошей иллюстрацией сказанному являются квантовые каскадные лазеры, работа которых основана на явлении резонансного туннелирования электронов через уровни размерного квантования в квантовых ямах. 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. В диссертационной работе С.А. Савинова теоретически и экспериментально исследованы высокочастотные свойства резонансно-туннельных диодов (РТД). В силу сказанного выше, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, представлены его цель и научная новизна. Приводится краткое содержание диссертации, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен краткий обзор работ, посвященных экспериментальным исследованиям влияния внешнего высокочастотного электромагнитного поля на туннельную проводимость РТД, детектирования электромагнитного излучения а также инерционности переходных процессов в РТД. Проанализированы также теоретические работы, посвященные резонансному туннелированию во внешнем высокочастотном электромагнитном поле.

Во **второй главе** описаны технологические приемы изготовления экспериментальных РТД, которые сопровождалась контрольными измерениями in-situ спектров анизотропного отражения, а также исследованиями поперечного транспорта и спектров фотолюминесценции. Проведенная диагностика с разрешением порядка одного монослоя позволила вырастить структуры GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs/InP с высоким качеством гетерограниц. Приведены состав и структурные параметры полученных РТД. Описана также разработанная диссертантом экспериментальная установка для исследования характеристик РТД и изучения детектирования излучения суб-ТГц диапазона частот (100-200 ГГц).

Третья глава диссертации посвящена теоретическому исследованию отклика резонансно-туннельных структур с одной и двумя квантовыми ямами на внешнее высокочастотное поле в приближении дельта-образных барьеров при нулевом смещении. Рассмотрена модельная система, в которой в структуру инжектируются электроны фиксированной энергии. Выяснена причина низкой эффективности симметричных РТД, заключающаяся в симметрии высокочастотного отклика относительно разности энергий инжектированных электронов и энергии резонансного уровня в квантовой яме. Для двухямных РТД со смещенными по энергии ямами предсказан эффект «энергетической фильтрации» электронов с энергиями вблизи разности энергий резонансных уровней в соседних ямах, что приводит к появлению узкополосного отклика на внешнее переменное поле. Предсказана возможность перестройки частоты узкополосного усиления при изменении энергетического расстояния между уровнями размерного квантования в соседних ямах двухямной структуры. Продемонстрировано значительное увеличение эффективности «квантового» режима усиления в двухямных РТД по сравнению с одноямными, которое должно наблюдаться в ТГц диапазоне частот.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию высокочастотного отклика одно- и двухямных РТД с учетом характеристик, приближенных к реальности, а именно, конечных размеров барьеров, фермиевского распределения электронов по энергиям, приложенного к структуре постоянного электрического поля и его влияния на электронные волновые функции. Изложена методика расчетов на основе решения нестационарного уравнения Шредингера. Результаты этих существенно более строгих расчетов, полученные с помощью численного моделирования, подтверждают основные качественные выводы, полученные в главе 3 в упрощенной модели. Изучено влияние параметров структур (толщины барьеров и квантовых ям, уровня легирования эмиттера и коллектора) и приложенного постоянного поля на форму статических вольтамперных характеристик, на величины динамической проводимости при различных частотах и на области усиления в классическом и квантовом режимах. Конкретные расчеты проведены на примере структур GaAs/AlAs и In_{0,53}Ga_{0,47}As/AlAs/InP. Оценено предельное значение уровня легирования в контактных областях для получения максимального усиления. Определены также оптимальные размеры барьеров и показано, что наиболее выгодны асимметричные барьеры.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования детектирования

суб-ТГц излучения одноямыми и двухямыми РТД при комнатной температуре. Проведено численное моделирование изменения вольтамперных характеристик этих РТД в зависимости от частоты при фиксированной амплитуде высокочастотного поля и от амплитуды поля при фиксированной частоте. Результаты использованы для сравнения с экспериментальными данными. Экспериментально изучены вольтамперные характеристики одноямыных и двухямыных РТД в зависимости от мощности падающего излучения с частотами 111 и 222 ГГц и напряжения смещения. Показано, что при малой падающей мощности выпрямленное напряжение пропорционально второй производной тока по напряжению. При увеличении падающей мощности обнаружено насыщение детектирования. Оценено быстродействие исследованных РТД и показано, что характерные времена не превышают 1 пс.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Наиболее **важными новыми результатами**, полученными автором, представляются следующие:

1. С помощью квантово-механических расчетов проведено сопоставление высокочастотного отклика одноямыных и двухямыных резонансно-туннельных диодов. Показано, что в одноямыных структурах в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот реализуется классический режим усиления, при котором энергия квантов СВЧ поля меньше квантовой ширины уровня в яме РТД. Установлено, что основной вклад в высокочастотную проводимость двухямыных РТД дают электронные переходы между уровнями размерного квантования в соседних квантовых ямах, что приводит к резонансному усилению СВЧ поля при энергии квантов порядка разности энергий этих уровней и к существенному увеличению высокочастотного отклика по сравнению с одноямыными РТД.
2. Предсказана возможность узкополосного усиления и плавной перестройки частоты в двухямыных резонансно-туннельных структурах в терагерцовом диапазоне частот (1÷5 ТГц) при изменении постоянного напряжения, приложенного к структуре. Установлено, что это должно происходить из-за энергетической фильтрации туннелирующих электронов.
3. Экспериментально продемонстрировано преимущество двухямыных структур по сравнению с одноямыными для детектирования излучения суб-ТГц диапазона. Оценена инерционность туннельного тока в исследованных РТД и показано, что времена переходных процессов в меньше 1 пс.

В целом, в работе получен целый ряд **новых** результатов, интересных не только в чисто **фундаментальном** отношении, но и для **практических** целей. Особенно перспективно использование двухямыных РТД для узкополосного усиления и генерации ТГц излучения при комнатной температуре с перестройкой частоты напряжением.

Некоторые замечания по работе.

1. Желательно было бы выяснить или оценить возможное влияние переходов с участием фононов на туннелирование.
2. Представляется целесообразным уточнить физическую природу усиления в двухямыных структурах, а именно, вызвано оно инверсией заселенности резонансных уровней (т.е., лазерным эффектом) или же отрицательной проводимостью РТД.
3. Желательно выяснить природу продемонстрированных в расчете осцилляций высокочастотного отклика, периодичных по обратной частоте, возникающих при большой мощности падающего излучения.
4. На экспериментальных вольтамперных характеристиках исследованных РТД наблюдаются практически вертикальные скачки тока, тогда как расчетные ВАХ имеют плавный характер. В распределенных системах с отрицательной дифференциальной проводимостью типа GaAs с эффектом Ганна такие скачки связаны с образованием электрических доменов. В сосредоточенных системах такое вроде бы невозможно. Тем не менее, наблюдаемые скачки показывают переход системы в некое новое состояние, поэтому было бы интересным исследовать устойчивость РТД к росту малых флуктуаций заряда и поля и выяснить возможность накопления объемного заряда в этих структурах и его влияние на туннельный ток, его инерционность и усиление.

5. Некоторые замечания по оформлению диссертации. В тексте встречаются нерасшифрованные обозначения. Например, на рис. 16 указана величина α - "интенсивность барьеров", которая в дальнейшем тексте не встречается, и что это, не объясняется. В обзоре литературы на стр. 20, по-видимому, та же величина называется "мощность" барьеров. На той же стр. не расшифровано обозначение ω_q , а в формуле (3) - ξ . Не объясняется, что имеется ввиду под терминами "косые" электронные переходы (стр. 45, 47, 48), "многофотонный" тип возбуждения (стр. 52) и "прозрачные" граничные условия (стр. 57). На рис. 20 пунктиром показана электронная прозрачность, но не указана шкала.

Эти замечания, кроме последнего, имеют, в основном, характер пожеланий к дальнейшему развитию работы и не снижают высокой оценки диссертации.

Диссертационная работа С.А. Савинова представляет собой законченную **фундаментальную** работу, в которой получен ряд **новых** результатов, имеющих как несомненную научную, так и практическую значимость. Результаты работы рекомендуется использовать в институтах РАН: ИРЭ, ИФП СО, ИФТТ, ФТИ и др., в которых исследуются явления ТГц диапазона частот, а также в отраслевых институтах, где могут заниматься разработкой источников и приемников излучения ТГц диапазона. Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и известны по докладам на конференциях. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Отзыв обсужден научно-квалификационным семинаром отдела полупроводниковой электроники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (протокол №1 от 10.03.2015).

Председатель семинара

Зав. отделом полупроводниковой электроники ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
д.ф.-м.н.



(М.С. Каган)

Секретарь семинара

Зав. лаб. микро- и нанoeлектроники, д.ф.-м.н.



(В.А. Гергель)

Адрес: 125009 Москва, ГСП-9, Моховая ул., 11, корп. 7

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

Сайт: www.cplire.ru; тел.: +7 (495) 629 3574; факс: +7 (495) 629 3678; e-mail: ire@cplire.ru

Отзыв удостоверяю

Ученый секретарь ИРЭ РАН, к.ф.-м.н



(И.И.Чусов)

1. M.S. Kagan, I.V. Altukhov, S.K. Paprotskiy, A.N. Baranov, R. Teissier, N.D. Il'inskaya, A.A. Usikova, A.D. Buravlev, V.M. Ustinov. Nonresonant Tunneling in Short-Period Superlattices with optical cavities. // *Lithuanian Journal of Physics*. – 2014. – V.54 - №1, p. 50
2. M.S. Kagan, I.V. Altukhov, S.K. Paprotskiy, A.N. Baranov, R. Teissier, N.D. Il'inskaya, A. A. Usikova, A.D. Buravlev, V.M. Ustinov, S.K. Ray. Optical Cavity Effect on Transport in Superlattices. // *OSA Technical Digest* – 2014. Optics InfoBase
3. В.А. Гергель, И.В. Алтухов, А.В. Верховцева, Г.Г. Галиев, Н.М. Горшкова, С.С. Жигальцов, А.П. Зеленый, Э.А. Ильичев, В.С. Минкин, С.К. Папроцкий, М.Н. Якупов. Аналитическая модель механизма электрической неустойчивости в мультибарьерных гетероструктурах с туннельно-непрозрачными барьерами. // *ФТП*. 2014. – Т.48. - №4 - с. 481
4. М.С. Каган, И.В. Алтухов, А.Н. Баранов, Н.Д. Ильинская, С.К. Папроцкий, Р. Тесье, А.А. Усикова. «Проявление эффекта Пёрселла в проводимости короткопериодных сверхрешеток InAs/AlSb». *ФТП* 47, 1489-1492, 2013.
5. I.V. Altukhov, A.N. Baranov, N.D. Il'inskaya, S.V. Khazanova, S.K. Paprotskiy, R. Teissier, and A.A. Usikova. Purcell Effect in Nonresonant Tunneling in Short-Period Superlattices. Proc. 21 International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 133. St.Petersburg, June 24-28, 2013.
6. Гергель В.А., Верховцева А.В., Горшкова Н.М., Якупов М.Н. Механизм электрической неустойчивости в мультибарьерных гетероструктурах. Особенности высокочастотного импеданса. // *Радиотехника и электроника*. – 2012. – Т.57 - №4 - с.481.
7. А.В. Андрианов, А.О. Захарьин, П.С. Алексеев, М.С. Каган, Поляризация терагерцового излучения одноосно сжатого р-германия при электрическом пробое мелкой акцепторной примеси, *ЖЭТФ*, **142**, 1204-1211, 2012.
8. I.V. Altukhov, A.N. Baranov, N.D. Il'inskaya, M.S. Kagan, S.V. Khazanova, S.K. Paprotskiy, R. Teissier, and A.A. Usikova. Purcell effect apparent in vertical transport in short-period superlattices. IEEE Conf. Proceedings 2013, 37rd International Conference on Infrared, Millimetre and Terahertz Waves, IRMMW-THz-2012, Wollongong, Australia, 23-28 September 2012, 1-2.
9. M.S. Kagan, I.V. Altukhov, A.N. Baranov, N.D. Il'inskaya, S.K. Paprotskiy, V.P. Sinis, R. Teissier, and A.A. Usikova, Negative Differential Conductivity in InAs/AlSb Superlattices, *Acta Physica Polonica A*, 2011.
10. I.V. Antonova, P.V. Vinokurov, S.A. Smagulova, M.S. Kagan, S.K. Ray, J. Kolodzey, "Resonant tunneling in Si/SiGe/Si structures with a single quantum well under surface passivation", *J. Appl. Phys.*, **110**, 123710 – 123710-5, 2011
11. I.V. Antonova, E.P. Neustroev, S.A. Smagulova, M.S. Kagan, P.S. Alekseev, S.K. Ray, N. Sustersic, J. Kolodzey. Confinement Levels in Passivated Si/SiGe/Si Structures. *Solid State Phenomena* **156–158**, 541-546, 2010.
12. M.S. Kagan, I.V. Altukhov, A.N. Baranov, N.D. Il'inskaya, S.K. Paprotskiy, V.P. Sinis, and A.A. Usikova, Vertical transport in InAs/AlSb superlattices, Proc. 18th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", 267, 2010.