

Отзыв официального оппонента

о диссертационной работе 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.

Актуальность. Разработка новых твердотельных источников и приемников излучения терагерцового диапазона является актуальной проблемой физики твердого тела. В этом диапазоне, лежащем между оптикой и микроволнами, оказываются малоэффективными традиционные, хорошо зарекомендовавшие себя подходы как стороны высоких, так и низких частот. В то же время освоение терагерцового диапазона востребовано как с точки зрения создания инструментария для фундаментальных исследований, так и для различных приложений: спектроскопии, мониторинга окружающей среды, систем безопасности. Развитые в последнее время методы молекулярно-пучковой эпитаксии полупроводниковых структур с возможностью контроля состава и толщин выращиваемых слоев на атомарном уровне позволяют конструировать приборные структуры, исходя непосредственно из принципов квантовой механики и зонной теории твердого тела. Одно из активно развиваемых в последние годы направлений развития полупроводниковой терагерцовой электроники связано с использованием эффекта резонансного туннелирования в квантоворазмерных структурах. Продвижение в сторону терагерцовых частот со стороны СВЧ диапазона сопряжено с необходимостью преодоления ряда проблем, связанных с миниатюризацией резонаторов, падением их добротности и т.п. В этой связи возрастает значение адекватного описания высокочастотных свойств резонансно-туннельных структур с целью оптимизации их энергетических спектров и конструкций для создания эффективных генераторов и детекторов излучения этого диапазона. Рецензируемая диссертация посвящена развитию теоретических методов описания и экспериментальному исследованию субтерагерцового и терагерцового отклика резонансно-туннельных полупроводниковых гетероструктур, что, несомненно, является актуальной проблемой.

Новизна, обоснованность и достоверность полученных результатов. В цикле цитируемых в диссертации работ В.Ф.Елесина была разработана квантовая теория резонансного туннелирования электронов при взаимодействии с высокочастотным электромагнитным полем, которая предсказывала резкое повышение эффективности

резонансно-туннельных диодов при переходе к «квантовому» режиму усиления $\omega t > 1$, что как раз соответствует терагерцовому диапазону частот. В то же время в этой теории использовался целый ряд модельных приближений (δ -образные барьеры, инжекция моноэнергетическим пучком электронов и только со стороны эмиттера, отсутствие приложенного постоянного электрического поля), что не позволяло прогнозировать высокочастотные свойства реальных резонансно-туннельных структур. Но даже оставаясь в рамках таких модельных представлений, соискатель сумел получить ряд новых результатов (Глава 3), из которых наиболее существенным представляется идея энергетической фильтрации инжектируемых электронов в двухямной структуре, что, по сути, позволяет повысить степень инверсии и величину коэффициента усиления. Эта идея была развита в Главе 4, где в рамках последовательного квантовомеханического подхода, учитывающего влияние постоянного электрического поля на электронные состояния с помощью численного решения нестационарного уравнения Шредингера, был проведен анализ особенностей резонансного туннелирования и высокочастотного отклика как для одноямных, так и для двухямных резонансно-туннельных структур различных дизайнов с учетом конечной ширины и высоты барьеров и фермиевских распределений электронов в эмиттере и коллекторе. Показано, что одноямные резонансно-туннельные структуры могут быть оптимизированы для реализации классического режима усиления (энергия квантов излучения меньше ширины уровня размерного квантования в квантовой яме), в то время как в случае квантового режима усиления использование двухямных структур (где имеет место эффект энергетической фильтрации инжектируемых электронов) позволяет на порядок увеличить коэффициент усиления по сравнению с одноямной резонансно-туннельной структурой.

Последняя глава диссертации посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию детектирования ТГц излучения в резонансно-туннельных структурах. Насколько известно оппоненту, это единственная отечественная работа, в которой субтерагерцовый отклик в резонансно-туннельных структурах исследуется экспериментально. Выполненные исследования отклика в режимах как слабого, так и сильного поля излучения продемонстрировали неплохое согласие с результатами проведенных расчетов. Сопоставление измеренной величины отклика на двух частотах позволили оценить инерционность переходных процессов в исследованных структурах не хуже 1 пс, что показывает перспективность их использования в терагерцовой оптоэлектронике.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений и обеспечивается использованием апробированных теоретических методов,

современного экспериментального оборудования и методик измерений (последние подробно описаны в главах 2, 5 диссертации).

Научная и практическая значимость работы несомненна. Развитые теоретические методы описания и предложенные дизайны одно- и двухямных структур могут быть использованы при конструировании структур и приборов для генерации и детектирования излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов. Измеренные транспортные характеристики структур при воздействии излучения субтерагерцового диапазона, сделанная оценка инерционности переходных процессов дают представления о реальных достижимых характеристиках приборов, от которых можно отталкиваться в дальнейшем.

По диссертации имеется ряд замечаний.

1. Хотя в диссертации содержится достаточно обширный перечень публикаций предшественников, представляется, что он все же недостаточно полон. В качестве примера укажем на работы отечественных и зарубежных авторов, посвященных предложениям использовать в резонансно-туннельных диодах структуры с двумя и более квантовыми ямами для генерации излучения:

- В.Я.Алешкин, Ю.А.Романов. ФТП т.24, в.1, с.131-135 (1990)

- A.Kastalsky, V.J.Goldman, J.H.Abeles. Appl. Phys. Lett., **59**, N21, 2636 (1991).

2. Используемая автором модель не учитывает непараболичность зонной структуры (уравнение (6)). Известно, что для барьеров AlGaAs это может приводить к заметным ошибкам в вычислении их прозрачности (ширин уровней), поскольку дно Г-долины в AlAs почти на 1 эВ выше чем в GaAs.

3. Автору следовало бы обсудить пределы применимости использованного приближения в главе 4, в котором поле в структуре диода одинаково.

4. В целом диссертация написана хорошим научным языком и аккуратно оформлена. Вместе с тем, отметим ряд неточностей и опечаток:

- в формуле (2) вероятно допущена опечатка, поскольку коэффициент усиления должен иметь размерность обратной длины;

- на стр. 40, третий абзац, допущена опечатка; кривая высокочастотного отклика является антисимметричной (а не симметричной как в диссертации) функцией по энергии относительно параметра δ ; это видно из рис. 17.

- строго говоря, формула (5) на стр.49 описывает амплитуду высокочастотного тока, а не высокочастотный ток как в тексте;

- на стр. 21 ссылки на работы Голанда, Пашковского ([62-66]) не соответствуют списку литературы;
- на стр. 31 присутствует незаконченная и непонятная фраза «Измеренный ток при низкой температуре $T = 4.2$ К спектр ФЛ наборам полос при энергиях»;
- на стр. 33 на рис.12 нет гистерезиса ВАХ, а в тексте он обсуждается;
- пропущена ссылка ([]) в последнем абзаце на стр.96.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую достаточно высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий теоретический и методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием, содержит решения ряда научных задач важных для развития физики конденсированного состояния. Полученные автором результаты достоверны, выводы и положения обоснованы. Автореферат и опубликованные в рецензируемых научных изданиях (список ВАК) статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Результаты работы прошли апробацию на многочисленных российских и международных научных конференциях и симпозиумах.

Таким образом, диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Савинов Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
заместитель директора по научной работе
заведующий отделом физики полупроводников
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Институт физики микроструктур Российской академии наук
доктор физ.-мат. наук, профессор
Гавриленко Владимир Изяславович
603950, Нижний Новгород, ГСП-105, ИФМ РАН
Тел.: +7 (831) 417 94 62, эл.почта: gavr@ipmras.ru

23.01.2015

Подпись В.И.Гавриленко заверяю.

Ученый секретарь ИФМ РАН
к.ф.-м.н.



Blaf

Гавриленко

Д.А.Рыжов

Список публикаций официального оппонента Гавриленко В. И. за последние 5 лет по теме диссертации Савинова С.А. «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.

1. V.V. Popov, D.M. Yermolaev, K.V. Maremyanin, V.E. Zemlyakov, N.A. Maleev, **V.I. Gavrilenko**, V. A. Bepalov, V. I. Yegorkin, V. M. Ustinov, S. Yu. Shapoval. Detection of terahertz radiation by tightly concatenated InGaAs field-effect transistors integrated on a single chip. Appl. Phys. Lett. v.104, 163508 (2014).
2. D.M. Yermolaev, K.M. Marem'yanin, N.A. Maleev, V.E. Zemlyakov, **V.I. Gavrilenko**, V.V. Popov, S.Yu. Shapoval. Terahertz detector with series connection of asymmetric gated transistors. Journal of Physics: Conference Series v.486, 012016 (2014).
3. D.M. Yermolaev, K.M. Marem'yanin, D.V. Fateev, S.V. Morozov, N.A. Maleev, V.E. Zemlyakov, **V.I. Gavrilenko**, S.Yu. Shapoval, F.F. Sizov, and V.V. Popov, "Terahertz detection in a slit-grating-gate field-effect-transistor structure", Solid State Electronics, 86C, pp. 64-67 (2013).
4. Д.Г. Павельев, Ю.И. Кошуринов, А.С. Иванов, А.Н. Панин, В.Л. Вакс, **В.И. Гавриленко**, А.В. Антонов, В.М. Устинов, А.Е Жуков. Экспериментальное исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцовом диапазоне частот. ФТП, т.46, вып.1, с.125-129 (2012).
5. Крыжков Д.И., Морозов С.В., Гапонова Д.М., Сергеев С.М., Курицын Д.И., Маремьянин К.В., **Гавриленко В.И.**, Садофьев Ю.Г. Диагностика квантовых каскадных структур оптическими методами в ближнем инфракрасном диапазоне. ФТП, т.46, вып.11, с.1440-1443 (2012).
6. V.V. Popov, D.M. Ermolaev, K.V. Maremyanin, N.A. Maleev, V.E. Zemlyakov, **V.I. Gavrilenko**, S.Yu.Shapoval. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array. Appl. Phys. Lett. v.98, 153504 (2011).
7. А.А. Ластовкин, А.В. Иконников, **В.И. Гавриленко**, А.В. Антонов, Ю.Г. Садофьев. Исследование перестройки частоты импульсных квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона. Известия ВУЗов. Радиофизика, т.LIV, №8-9, стр.676-683 (2011).
8. К.В. Маремьянин, Д.М. Ермолаев, Д.В. Фатеев, С.В. Морозов, Н.А. Малеев, В.Е. Земляков, **В.И. Гавриленко**, В.В. Попов, С.Ю. Шаповал. Широкоапертурный детектор терагерцового излучения на основе транзисторной структуры GaAs/InGaAs со щелевым решеточным затвором большой площади. Письма ЖТФ, т.36, вып.8, стр.39-47 (2010).
9. Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин, В.Ю. Паневин, Г.А. Мелентьев, А.Н. Софронов, Л.Е. Воробьев, А.В. Андрианов, А.О. Захарьин, В.С. Михрин, А.П. Васильев, А.Е. Жуков, Л.В. Гавриленко, **В.И. Гавриленко**, А.В. Антонов, В.Я. Алешкин. Излучение и фотопроводимость в квантовых ямах GaAs/AlGaAs n-типа: роль резонансных состояний. ФТП т.44, вып.11, с.1443-1446 (2010).
10. А.В. Иконников, А.А. Ластовкин, К.Е. Спирин, М.С. Жолудев, В.В. Румянцев, К.В. Маремьянин, А.В. Антонов, В.Я. Алешкин, **В.И. Гавриленко**, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, Ю.Г. Садофьев, N. Samal. Терагерцовая спектроскопия узкозонных гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgTe/CdTe. Письма в ЖЭТФ, том 92, вып.11, с.837-841 (2010).