

## ОТЗЫВ

на автореферат 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.

Диссертационная работа С.А. Савинова посвящена исследованиям в области физики и технологии полупроводниковых наноструктур с целью их применения в области предельно высоких радиочастот субтерагерцового и терагерцового диапазона. Разработка физических принципов усиления, генерации и преобразования электромагнитных волн этого диапазона является одной из проблем, определяющей возможности продвижения современной твердотельной электроники в сторону высоких частот и сверхвысокого быстродействия. Особый интерес в этом отношении представляют исследования квантовых эффектов, типа резонансного туннелирования, характеризующихся чрезвычайно малыми временами переходных электронных процессов, сопоставимыми с быстродействием лучших сверхпроводящих приборов. Широко используемые элементы типа полевых транзисторов, лавинно-пролетных диодов, ганновских генераторов ограничены с высокочастотной стороны частотами порядка сотни гигагерц. Резонансно-туннельные диодные (РТД) структуры свободны от этого ограничения. Таким образом актуальность работ диссертации, посвященной изучению высокочастотных свойств РТД структур в широком интервале частот, представляется несомненной.

Судя по автореферату, автором получен большой массив данных, как теоретических, так и экспериментальных, касающихся высокочастотных свойств РТД структур различной конфигурации с одной и несколькими квантовыми ямами и несколькими барьерами на основе полупроводниковых соединений GaAs/AlAs и InGaAs/AlAs/InP с высоким качеством гетерограниц.

Наиболее интересными и важными из полученных результатов являются следующие:

1. В результате выполненного теоретического расчета показано, что в одноямных структурах в диапазоне суб-ТГц и ТГц частот реализуется классический режим усиления, в то время как высокочастотные свойства двухямных РТД существенным образом

определяются резонансным вкладом электронных переходов между уровнями размерного квантования в соседних квантовых ямах структуры, что приводит к ряду принципиально новых явлений.

2. На основе приближенной теории, а затем в рамках развитой точной квантовой теории в случае двухямных РТД наноструктур предсказан эффект энергетической фильтрации туннелирующих электронов и возможность узкополосного усиления и плавной перестройки частоты в терагерцовом  $1\div 5$  ТГц диапазоне частот посредством варьирования прикладываемого к структуре постоянного напряжения.

3. Экспериментально исследованы процессы детектирования суб-ТГц излучения в РТД структурах и показано преимущество выпрямляющих характеристик двухямных структур по сравнению с одноямными. Оценена инерционность электронных процессов в РТД и показано, что характерные времена переходных процессов в исследованных РТД не превышают величин порядка одной пикосекунды.

К числу замечаний по автореферату можно отнести следующие:

1. Одним из существенных результатов диссертационной работы является физический вывод о том, что верхний резонансный уровень в двухямных РТД оказывается привилегированным, как с точки зрения туннелирования, так и с точки зрения взаимодействия с электромагнитным излучением. Естественно предположение, что в неравновесных стационарных условиях между этими двумя уровнями возможно формирование инверсной заселенности, в чем было бы желательно убедиться с помощью теоретических расчетов, если такие расчеты возможны.

2. Несомненным достоинством работы является теоретическое предсказание ряда новых явлений и возможности реализации в двухямных РТД узкополосного перестраиваемого по частоте усиления в диапазоне терагерцовых частот. Желательно экспериментальное подтверждение этих результатов. Учитывая сложность осуществления такого рода экспериментов, данное замечание скорее следует воспринимать как пожелание дальнейшего развития работ в данном направлении.

Сделанные замечания не меняют общей высокой оценки диссертации. Оценивая работу в целом, можно констатировать, что в ней получен ряд новых и важных результатов, вносящих заметный вклад в физику резонансных квантовых явлений и электронных процессов в полупроводниковых наноструктурах. Новизна и достоверность полученных результатов сомнения не вызывают.

По объему выполненных исследований и значимости полученных результатов диссертационная работа С.А.Савинова удовлетворяет всем 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».

Зав. отделом субмиллиметровой спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН),

доктор физ.-мат. наук



/ Волков А.А. /

119991, Москва, ул. Вавилова, 38

тел.: +7(499)135-7974

e-mail: aavolkov@ran.gpi.ru

12 марта 2015 г.

Подпись А.А. Волкова удостоверяю:

Ученый секретарь ИОФ РАН,

доктор физ.-мат. наук



/ Андреев С.Н. /