

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу В.А. Малыша “Высокочастотный транспорт в квантово-размерных системах на основе германия и кремния. Бесконтактные методы исследования.”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10.

В последнее время низкоразмерные структуры (полупроводниковые сверхрешетки, квантовые нити и квантовые точки) находят все более широкое применение в устройствах нано- и оптоэлектроники, поэтому изучение систем пониженной размерности составляет одно из наиболее стремительно развивающихся направлений физики полупроводников, имеющее как фундаментальное, так и прикладное значение.

Наиболее существенной особенностью этих систем является размерное квантование энергетического спектра носителей заряда, что приводит к принципиальному изменению их транспортных свойств и целому ряду новых эффектов, ярчайшим из которых является квантовый эффект Холла. Несмотря на то, что этот эффект был открыт уже несколько десятилетий тому назад целый ряд особенностей его проявления в конкретных материалах остаются актуальной темой в настоящее время. В частности, существенный интерес, как с фундаментальной, так и с практической точки зрения, представляют собой исследования материалов на основе соединений кремния и германия, которые составляют основную часть диссертационной работы В.А. Малыша. Дело в том, что структуры  $p\text{-SiGe/Ge/SiGe}$  и системы квантовых точек Ge в Si, выполненные на основе основного материала полупроводниковой электроники, но обладающие при этом возможностью целенаправленного управления их свойствами представляют огромный интерес для приборных приложений. С другой стороны исследования прыжковой проводимости в этих материалах при наличии квантования энергетического спектра носителей заряда на высоких частотах изучены слабо. В этих условиях механизм прыжковой проводимости, исследованный в работе В.А. Малыша, существенно отличается от обычно рассматриваемого в относительно слабых магнитных полях на постоянном токе. Соответственно, полученные им результаты представляют значительный интерес для понимания процессов переноса заряда и определяют значимость фундаментального аспекта проведенных исследований.

Следует отметить, что В.А. Малыш – представитель группы, возглавляемой И.Л. Дричко, одной из крайне немногочисленных групп, проводящих исследования с помощью

уникальной методики – изучение свойств твердых тел путем анализа распространения ультразвуковых волн. Эта особенность резко повышает степень оригинальности результатов рецензируемой диссертации.

Таким образом, в силу выше изложенного следует признать высокую степень актуальности темы диссертационной работы В.А. Малыша.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографии.

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации; сформулированы цель работы, ее научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, и обоснована ее практическая значимость. Также там приведен список конференций, на которых материалы данной диссертации прошли апробацию и упомянуты журналы, в которых опубликованы 5 статей, составляющих ее основу. Данный набор заметно превышает требования ВАК и средний уровень кандидатских диссертаций в настоящее время.

Первая глава посвящена обзору литературы, имеющей непосредственное отношение к теме исследований. Мне весьма понравился этот обзор, в котором в краткой форме при ясном и четком изложении описаны свойства двумерного размерно-квантованного газа электронов в сильном магнитном поле. Эта часть обзора может рассматриваться даже как краткое, вводящее в тематику, пособие для студентов. Также достаточно хорошо изложены вопросы взаимодействия поверхностной волны с электронным газом и современные представления о прыжковой проводимости на переменном токе.

Вторая глава посвящена изложению методики. Содержание этой главы позволяет понять особенности и необходимую организацию измерений проводимости на высоких частотах, а также проблемы, возникающие при желании проводить такие измерения. Описание измерительной установки достаточно подробно, а изложение криогенной части даже излишне подробно.

В третьей главе представлены результаты исследования высокочастотной проводимости  $p$ -SiGe/Ge/SiGe от магнитного поля и температуры, которая определяется транспортом тяжелых дырок. Качество и точность полученных и представленных результатов производят прекрасное впечатление, количество зафиксированных экстремумов проводимости так велико, что и посчитать их трудно. Основным результатом содержания этой главы – определение параметров двумерного газа дырок в указанной структуре, включающих концентрацию, подвижность, транспортное и квантовое времена релаксации, температуру Дингла и эффективную массу. Также показано, что в минимумах проводимости она осуществляется по прыжковому механизму.

В четвертой главе диссертации приведены результаты аналогичных измерений в наклонном магнитном поле. Цель этих измерений определить величину  $g$ -фактора и влияние компоненты магнитного поля, лежащей в плоскости структуры, на величину эффективной массы и  $g$ -фактора. Эта цель успешно достигнута. Важно отметить, что зависимость эффективной массы дырок от продольной (по отношению к плоскости образца) составляющей магнитного поля в данной работе наблюдается впервые. На мой взгляд, это важный результат, который одновременно с учетом влияния ограничения радиуса циклотронной орбиты в продольном поле шириной квантовой ямы делает эту главу украшением диссертации. Однако, мне хотелось бы отметить недостаточную убедительность результатов, представленных на рис. 41, в связи с малым количеством экспериментальных точек.

Очень интересные и неожиданные результаты приведены в пятой главе диссертации. Эти результаты не согласуются с привычной двухузельной моделью, обычно применяемой для описания высокочастотной прыжковой проводимости. Экспериментальные результаты В.А. Малыша спровоцировали необходимость разработки новой модели высокочастотной прыжковой проводимости, которая учитывает образование кластеров из близко расположенных квантовых точек и достаточно хорошо описывает эксперимент. Таким образом, результаты В.А. Малыша привели к созданию теории прыжковой проводимости в системах квантовых точек высокой плотности.

Шестая глава посвящена описанию результатов полученных с помощью новой, микроволновой методики. Применение этой методики было связано с необходимостью проведения экспериментов в более широком частотном диапазоне. Разработку этой методики следует отнести к несомненным заслугам автора диссертации. Из научных результатов, изложенных в этой главе, я могу отметить наблюдение перехода от двухузельной модели описания прыжковой проводимости к кластерной, описанной в предыдущей главе.

Обобщение полученных автором результатов вынесено в заключение.

Следует отметить ряд недостатков в работе В.А. Малыша, однако все эти замечания носят характер пожеланий или предложений для будущей работы, и не меняют общей положительной оценки диссертации.

Замечания по стилю изложения.

1. В пункте 4 основных результатов работы написано, что микроволновая методика не позволяет определять абсолютную величину реальной компоненты проводимости, а в следующей фразе, что с помощью этой методики ее можно определить. Смысл написанного понятен, но изложить это можно лучше, кроме того в основных

результатах желательно не использовать обозначения, которые расшифровываются в тексте.

2. Рис. 30. Непонятно при какой температуре измерена высокочастотная проводимость. Можно указать и на другие стилистические неточности, но делать это не хочется, так как диссертация выполнена при высоком уровне аккуратности.
3. Как я уже отмечал, представленные на рис. 41 данные по зависимости  $g$ -фактора от энергии Ферми (концентрации носителей заряда) нуждаются в проведении дополнительных измерений, поскольку экспериментальных данных в этом случае явно недостаточно.
4. Также хотелось бы понять, чем определяется частота (100 МГц), при которой происходит смена механизма прыжковой проводимости с определяемого двухузельной на кластерную модель.

Указанные замечания не снижают ценности представленной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей собой законченное исследование. Все основные результаты диссертации многократно успешно докладывались на конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. По этим параметрам данная диссертационная работа заметно превышает требования ВАК и средний уровень диссертаций, защищаемых в настоящее время. Автореферат достаточно полно и правильно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа В.А. Малыша отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»,  
доктор . физ.-мат. наук

/Б.А. Аронзон/

Первый заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт»  
по научной работе

/Нарайкин О.С. /