

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета

Д.002.204.01 от 17 мая 2016 г.

Защита диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук Ячменева Александра Эдуардовича

Председатель совета – академик РАН Орликовский А.А.

Зам. председателя – член-корреспондент РАН Лукичев В.Ф.

Ученый секретарь – к.ф.-м.н. Вьюрков В.В.

Заседание диссертационного совета Д.002.204.01 по присуждению ученых степеней при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте Российской академии наук (ФТИАН РАН)

от 17 мая 2016 г.

Председатель на заседании – д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН Лукичев В.Ф.

Ученый секретарь - к.ф.-м.н. Вьюрков В.В.

Присутствуют следующие члены диссертационного совета:

1. Лукичев В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
2. Вьюрков В.В.	к.ф.-м.н.	01.04.10фм
3. Бердников А.Е.	д.т.н.	05.27.01т
4. Богданов Ю.И.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
5. Валеев А.С.	д.т.н.	05.27.01т
6. Кокин А.А.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
7. Кривоспицкий А.Д.	д.т.н.	05.27.01т
8. Маишев Ю.П.	д.т.н.	05.27.01т
9. Махвиладзе Т.М.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
10. Мордвинцев В.М.	д.ф.-м.н.	05.27.01т
11. Рудый А.С.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
12. Сарычев М.Е.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
13. Хренов Г.Ю.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
14. Чуев М.А.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Сегодня защита кандидатской диссертации: Ячменев Александр Эдуардович “Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова” по специальности 05.27.01 на соискание степени кандидата физико-математических наук. Работа выполнена в ИСВЧПЭ РАН, научный руководитель Рыжий Виктор Иванович, научный консультант Пономарев Дмитрий Сергеевич. Официальные оппоненты: профессор МГУ им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н. Кульбачинский Владимир Анатольевич и доцент НИЯУ МИФИ к.ф.-м.н. Васильевский Иван Сергеевич. Ведущая организация – МИРЭА.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Вначале вехи жизненного пути Александра Эдуардовича: закончил МИФИ в 2004 г. Поступил в аспирантуру ИСВЧПЭ РАН в 2005 г. И закончил в 2008 г. В настоящее время там же работает в должности научного сотрудника. Имеет 1 патент, 20 статей в научных журналах. По теме диссертации 14 и 8 из них удовлетворяют требованиям ВАК. Диссертация была представлена в наш совет, была рассмотрена комиссией по диссертационной работе. Комиссия признала диссертацию готовой к защите, достойной получения степени. Были предложены оппоненты и ведущая организация. С остальными документами будет знакомство после доклада. Все

документы, необходимые для защиты, в деле докторанта имеются. Пожалуйста, 20 минут.

**Докторант выступает с докладом.**

**В.Ф. Лукичев, д.ф.-м.н.** Спасибо! Переходим к вопросам. Вот мой вопрос. Когда говорили про колебания, а это фактически автоколебания, как маятник на стержне с трением, когда вы закручиваете до какой-то амплитуды, потом он срывается – такой процесс. Вы сказали, что это связано с разогревом электронов. У вас в самой работе теория этого явления описана или она представлена только качественно?

**А.Э. Ячменев** Она представлена качественно, это на самом деле довольно сложная теория и в общем она может стать основой для отдельной работы. У меня представлены ссылки на похожие работы, в которых можно такое поведение посмотреть, но разработка модели, описывающей возникновение таких колебаний в изготовленных структурах это нетривиальная задача.

**В.Ф. Лукичев, д.ф.-м.н.** До вас кто-нибудь занимался такими нитями на вицинальных террасах?

**А.Э. Ячменев** Да. Подобного направления работы только-только начались примерно в начале 90-х годов, а первые работы, посвященные высаживанию именно атомов олова вдоль краев террас, проводились в 1994 г., но посвящены они были исключительно гомоэпитаксиальным структурам. Какого-то дальнейшего развития они не получили, ни в виде РНEMT структур, ни, тем более, в виде каких-то приборов на базе полученных структур. И эти работы были качественными, в них не уделялось внимания именно механизму формирования нанонитей.

**Л. С. Федичкин, к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической физики МФТИ.** Почему выбрали именно олово?

**А.Э. Ячменев** Олово имеет очень большой атомный радиус, отличающийся на 40% от атомов галлия и благодаря этому олово обладает очень хорошей сегрегационной способностью, оно очень легко образует оловянные слои, расслаивается. Именно поэтому с ним довольно сложно работать, требуется подбор специальных условий, чтобы этот эффект сегрегации минимизировать. Выбрав неоптимальную температуру при, например, объемном легировании можно получить слой, в котором олово будет сосредоточено вверху. То есть оно “всплывает”.

**Л. С. Федичкин** Т.е. нити на нем легче вырастить?

**А.Э. Ячменев** Нет, нити сложнее, чем объемное легирование. Потому что требуются дополнительные операции как по предварительной подготовке поверхности, так и подбор

условий для того, чтобы это олово образовало нужную форму нитей и выстроилось вдоль краев террас.

**М.А. Чуев, д.ф.-м.н.** Вы очень коротко про структурные исследования рассказали, чем вы подтверждаете, что у вас нити выросли? Это связано с первым утверждением, касающимся подбора оптимальных условий. Вы смотрели только электронную дифракцию и все? Можете на рисунке показать, что вы видите?

**А.Э. Ячменев** *In situ* это вообще единственный метод, позволяющий определить формирование нанонитей. На рисунке нижняя картинка соответствует картине дифракции после высаживания атомов олова и здесь мы видим характерное расщепление зеркального рефлекса. На рисунке А рефлекс представляет собой просто один тяж. Лучшего качества была картина только на флуоресцентном экране непосредственно во время работы.

**М.А. Чуев, д.ф.-м.н.** Нужно сравнить картины дифракции для структур без террас, с террасами 3 градуса и с террасами 0.3 градуса, чтобы понимать, где эффект наблюдается и насколько хороша структура. Допустим, расщепление есть, но это могут быть какие-то искривленные объекты, возможно даже в среднем сохраняется какой-то брэгговский стержень, но насколько хороши нити? Вы этого не видите совсем. Приведенные картинки малоинформативны.

**А.Э. Ячменев** Эти картинки как минимум говорят о том, что после высаживания олова картина меняется. До начала легирования расщепления никакого не происходит. Расщепление наблюдается именно после начала легирования и если атомы олова просто планарно располагаются вдоль ступеней и на самих террасах, то никакого расщепления произойти не должно.

**М.А. Чуев, д.ф.-м.н.** Я бы посоветовал дать какие-то сечения и на них показать: здесь один пик, здесь какое-то расщепление, а на таких снимках видно очень мало. А второе – это работа по моделированию, потому что надо сравнить идеальные нити, разорванные нити. Разорванные нити все равно будут приводить к какому-то расщеплению, значит нужно проанализировать, насколько хорошо эти нити выросли. Самый простой способ – какую-то электронную микроскопию использовать, чтобы подтвердить структуру нитей.

**А.Э. Ячменев** Совершенно справедливое замечание, я попробую развернуто ответить, потому что такой вопрос встречается практически повсеместно. Дело в том, что в конструкции рабочих структур атомы олова находятся внутри кристалла, поэтому для такой структуры ни исследования атомно-силовой микроскопией, ни тунNELьная микроскопия ничего не дадут. Мы увидим только поверхность, где никакого олова нет. Просвечивающая электронная микроскопия не может обеспечить достаточного разрешения, чтобы на сечении было можно увидеть слой с концентрацией атомов,

составляющей долю монослоя от концентрации матричного вещества. В данном случае на картине ПЭМ будет просто один слой арсенида галлия без какого-либо олова. В принципе, есть соображения, как такого рода измерения можно было бы провести. Для этого после высаживания атомов олова мы не проводим зарашивание в такой конфигурации, но поскольку олово – это металл и на воздухе он моментально окисляется, то высаженные атомы олова закрываются пассивирующим слоем атомов мышьяка в режиме не эпитаксии, а осаждения. И этот образец должен попасть на установку структурных структурных исследований, где имеется возможность, во-первых, проводить измерения в вакууме, а, во-вторых, нагрева образца для удаления слоя мышьяка. В этом случае можно говорить о возможности определить реальную конфигурацию нанонитей. Но даже в этом случае полученный результат не будет соответствовать реальной структуре, поскольку зарашивание в какой-то мере эту конфигурацию нитей меняет. Хотя бы даже такие измерения были бы очень интересны, но не получилось найти экспериментальный стенд, где можно было бы провести измерения в указанных условиях.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Можно ли как-то увеличить анизотропию в структурах?

**А.Э. Ячменев** Смотря о каких структурах мы говорим. Для увеличения анизотропии в РНЕМТ можно попробовать увеличить концентрацию легирования, что должно привести к увеличению заряда нанонитей и еще более сильному экранированию электронного газа в канале. Для гомоэпитаксиальных увеличить анизотропию сложнее, измеренный коэффициент анизотропии близок к расчетному. Единственный эффективный способ – с помощью затворного потенциала. При моделировании такая возможность исследовалась и результаты расчетов подтверждают увеличение анизотропии при закрывании затвора.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Температура зарашивания гарантирует, что эти примеси олова активированы? Иначе будут просто глубокие центры, которые не дадут электроны. Температура достаточна? В соединениях А3В5 проблема с легированием состоит в том, что больших концентраций достичь невозможно из-за того, что примесь не растворяется. А здесь если посчитать получается огромная концентрация. Это все согласуется с известными сведениями о легировании А3В5?

**А.Э. Ячменев** Это все согласуется, если учесть, что концентрация легирования это концентрация атомов олова, которую мы высаживанием на поверхность, а концентрация электронов – это то, что там реально осталось. Если посмотреть на таблицу, здесь концентрация электронов на порядок меньше, чем концентрация легирования.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Это средняя концентрация, а в нитях концентрация получается огромная.

**А.Э. Ячменев** В нитях она получается огромная, если исходить из того, что все высаженные атомы расположились вдоль краев террас.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Но это невозможно при таких концентрациях, они как-то сдвинуты, все равно концентрация получается гигантская.

**А.Э. Ячменев** Концентрация электронов получается типичная, для сравнения вот параметры кремниевого РНЕМТ.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Т.е. это косвенное подтверждение того, что примеси активируются?

**А.Э. Ячменев** Энергия активации довольно невысока, поэтому примесь не просто активируется, даже более того, во время высаживания олова температура подложки сравнима с температурой молекулярного источника олова, т.е. активно происходит реиспарение атомов олова во время легирования.

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Предоставляем слово научному консультанту.

#### **Выступление научного консультанта Д.С. Пономарева.**

Хочется отметить, что Александр этой тематикой занимается достаточно давно, он, я бы сказал, признанный эксперт, несмотря на свой молодой возраст, в области создания квантовых гетероструктур и с молекулярно-лучевой эпитаксией Александр работает, если не ошибаюсь больше десяти лет. Он начал с изоморфных структур, также делал метаморфные, РНЕМТ, т.е. вся номенклатура эпитаксиальных структур, включая низкотемпературный рост полупроводниковых соединений, он ими занимался. Поэтому тема диссертации была выбрана не случайно, т.к. этой тематикой начал заниматься Алексей Петрович Сеничкин, наш бывший зам. директора, ныне покойный. С Александром они эту тематику начинали еще в начале 2000-х годов и сейчас она перетекла в защиту диссертационной работы. Я считаю, что работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и, учитывая его квалификацию прежде всего в области создания гетероструктур, его научную заинтересованность, амбициозность и активность, которую он проявлял при написании диссертационной работы, считаю, что он заслуживает присуждения звания кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Разрешите познакомить с другими документами в деле диссертанта и отзывами, поступившими на диссертацию и автореферат. Выписка из протокола заседания ученого совета ИСВЧПЭ РАН. Выписка подписана председателем ученого совета, заслуженным деятелем науки РФ, д.т.н., профессором Мальцевым П.П. и заверена ученым секретарем, к.ф.-м.н. Хабибулиным Р.А. В выписке подтверждается

актуальность выбранной темы для исследований, научная новизна, достоверность полученных результатов, правильность формулировки положений, выносимых на защиту, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора, соответствие диссертации выбранной специальности, полнота изложения. И в заключении говорится, что работа рекомендуется к защите в диссертационном совете.

Отзыв ведущей организации. В качестве ведущей организации выступал институт МИРЭА, отзыв заверен проректором по инновационному развитию Рагудкиным, составлен заведующим кафедрой, академикон РАН, д.ф.-м.н. Сиговым, а также ученым секретарем Юрасовым. Отмечаются достоинства диссертации и все необходимые рекомендации по использованию материалов диссертации. Подтверждается научная новизна. Отзыв положительный, т.е. диссертант заслуживает присвоения искомой научной степени. Но в диссертационной работе имеются недостатки. Из текста работы не совсем ясно утверждение, что протекание тока в структурах осуществляется именно по нанонитям, а не по объему полупроводника. Второе замечание: было бы полезно реальную геометрию нанонитей в структуре, например, с помощью измерений СТЭМ. Третье замечание: в главе 3 в конструкции РНЕМТ не поясняется назначение слоя GaAs после InGaAs, хотя такая конструкция не является типичной. Последнее замечание: во второй главе приведены рисунки, однако не указаны ссылки на цитируемую литературу, из которой они были заимствованы.

**А.Э. Ячменев** Сначала отвечу на замечание по конструкции РНЕМТ структуры, в замечании речь идет о слое нелегированного GaAs, который действительно не является необходимым для формирования гетероперехода. Но у нас он фактически является стандартным, потому что, как я показывал при измерении спектров фотолюминесценции, индий также склонен к сегрегации, хотя и в гораздо меньшей степени, чем олово. И этот слой, который технологически выращивается в тех же условиях, что и InGaAs уменьшает сегрегацию индия и улучшает качество гетероперехода. Про сканирующую туннельную электронную микроскопию я говорил, в такой геометрии исследования ничего не дадут, кроме поверхности GaAs, которая интересна в гораздо меньшей степени и на поверхности которой всегда присутствуют окислы галлия, которые сильно влияют на морфологию и дадут шероховатость поверхности даже больше высоты вицинальной террасы. Касаемо замечания, что не вполне ясно, где протекает ток – по нанонитям или по объему полупроводника. В случае РНЕМТ структур ток действительно протекает в квантовой яме InGaAs, все электроны из дельта-слоя располагаются именно в квантовой яме. Но для

гомоэпитаксиальных структур ток протекает именно по дельта-слою, поскольку потенциальная яма образуется зарядом активированных атомов олова.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Все отзывы на автореферат положительные, поэтому остановимся только на указанных в них замечаниях.

Отзыв поступил от ВРИО директора ИПТМ РАН, д. ф.м.н. Рощупкина. Указаны такие замечания: из текста автореферата следует, что автор не проводил Холловские измерения гомоэпитаксиальных структур. Методически было бы правильно включить такие измерения в работу. Также к замечанию по автореферату следует отнести лингвистику изложения, далее приводится некие неудачные две фразы, которые по мнению составителя отзыва являются неудачными в автореферате.

**А.Э. Ячменев** По поводу Холловских измерений гомоэпитаксиальных образцов. Такие измерения действительно не приведены, но в гомоэпитаксиальных образцах из-за преобладающего рассеяния на ионах примеси подвижность носителей достаточно низкая и не превышает  $2000 \text{ см}^2/\text{Вс}$  при типичной концентрации двухмерных электронов порядка  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Из-за низкой анизотропии Холловские измерения в таких образцах проводить корректно и для оценки такие измерения проводились, но в работу эти результаты не включены, потому что какой-то полезной информации они не дадут. Эти структуры являлись необходимым этапом для получения РНЕМТ.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Отзыв на автореферат представил д.т.н., профессор, директор научного центра “Фотоника и ИК-техника” МГТУ им. Баумана Карасик. Замечание: к сожалению, из автореферата не ясно, проводились ли экспериментальные исследования возможности создания болометра на горячих электронах на основе гомоэпитаксиальных структур с нанонитями атомов олова или авторы ограничились теоретическим рассмотрением данной проблемы.

**А.Э. Ячменев** В рамках диссертационной работы было проведено только теоретическое рассмотрение на качественном уровне, потому что эта идея по применению гомоэпитаксиальных структур она достаточно новая. В диссертации рассмотрена только принципиальная возможность изготовления такого рода приборов, но работа над этой темой после диссертации не заканчивается и в дальнейших планах есть задача попытаться сделать какой-то экспериментальный прототип прибора.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Отзыв заведующего лабораторией ИРЭ им. Котельникова д.ф.-м.н., профессора Гергеля. Указано такое замечание: из автореферата неясно, какую температуру заращивания для гомоэпитаксиальных структур использовал автор. Также не вполне четко обоснован выбор угла разориентации подложки.

Использование подложек с меньшей шириной террасы, разориентированных на 0,4 градуса, могло бы дать большую плотность квазиодномерных каналов.

**А.Э. Ячменев** Действительно, при выборе материала для выполнения работы делались оценки, какие подложки для этого могут лучше подойти. Анализировался угол разориентации как 0,3, так и 0,4 градуса. На подложках с углом разориентации 0,4 градуса ширина террасы составляет порядка 400 Å. В конечном счете было выбрано значение 0,3 градуса, на котором несколько меньше плотность одномерных каналов, но проще исключить взаимодействие между каналами и уменьшить возможно перекрытие волновых функций электронов. То есть степень анизотропии и без того небольшая на подложках 0,3 градуса будет еще меньше для подложек 0,4 градуса. Температура заращивания для гомоэпитаксиальных структур составляла 470 С.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Поступил отзыв от заведующего лабораторией ИПТМ РАН, д.ф.-м.н., профессора Мордковича. Замечание: автореферат не содержит данных, позволяющих сравнить характеристики разработанных приборов на РНEMT с их традиционными аналогами.

**А.Э. Ячменев** Мне не очень понятно, что именно имел в виду рецензент, потому что приведенные параметры, а именно максимальная частота усиления по мощности и коэффициент усиления на 10 ГГц позволяют сравнить значения с аналогами. Топология транзистора приведена, длина затвора приведена, вот на рисунке как раз приводится сравнение коэффициента усиления с аналогами.

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Приступаем к выступлениям оппонентов.

**Профессор МГУ им. Ломоносова Кульбачинский Владимир Анатольевич.** Добрый день. Диссертационная работа Ячменева посвящена созданию и исследованию на вицинальной поверхности GaAs определенных структур с предполагаемыми одномерными каналами. Для этой цели было решено много разных технологических задач: калибровка источника, специальная подготовка поверхности и прочее. Работы эти очень интересные и актуальные. С моей точки зрения тема работы актуальна. Работа реально является продолжением работ, которые в 90-е годы мы начали с Алексеем Петровичем Сеничкиным. Мы впервые декорировали оловом вицинальную поверхность с разными углами разориентации, но тогда мы брали только гомоэпитаксиальные структуры. Мы наблюдали сильную анизотропию в зависимости от концентрации олова, в зависимости от угла разориентации, температуры, измеряли вольт-амперные характеристики. С этой точки зрения эта работы мне была интересна, куда продвинулся Александр Эдуардович. Здесь приводятся технологические приемы, как все это было

сделано. Добавлены гетероэпитаксиальные псевдоморфные структуры с оловом. Должен сказать, что олово очень интересно, потому что, с одной стороны оно хорошо сегрегирует и это экспериментально наблюдали, а, с другой стороны технологически довольно сложный материал, потому что при заращивании олово всплывает и его можно на вицинальной поверхности просто потерять. Я некоторые замечания скажу в конце, а некоторые непосредственно во время рассказа. Сделано в работе довольно много и работу я рассматриваю как квалификационную и в конце скажу результат этого рассмотрения. Во-первых, все это было выращено, технологически отработано и исследовано. Исследовался эффект Холла при азотной и комнатной температуре, фотолюминесценция, вольт-амперные характеристики приблизительно до 11 кВ/см. Колебания тока очень интересный результат. И были в конце концов сделаны транзисторы, что очень любопытно. Диссертация построена классически, есть первая глава – обзорная. Потом идет методическая вторая глава и, внимательно прочитав вторую главу, я хотел найти в ней описание методики измерения. Потому что напряжения очень высокие, возможен перегрев электронной системы. Во-первых, сама методика измерения ВАХ импульсная и во второй половине она не приведена. Во-вторых, никаких оценок перегрева, длина импульса, скважность – я не нашел. Поэтому ВАХ интересные, но должны быть обоснованы, что это реальные электронные характеристики. Должен сказать, что и в четвертой главе, где приводятся результаты измерений, тоже ничего не говорится об этой методике. Главы 3,4 – это сами результаты. Здесь автор все это прекрасно представлял, что олово всплывает, сегрегирует и прочее. Неплохо, как мне кажется, методически описал и результаты опубликованы в ряде статей, они вполне нормальные. Далее автор утверждает, что он готовит специальным образом подложку, что это очень важно и тут опять хотелось бы увидеть фотографию подложки до подготовки и после, если утверждается, что поверхность стала лучше. Хотелось бы увидеть какую-то морфологию, статистику: длины ступеней, ширины террас, распределение по длине и ширине. Таких фотографий я не нашел и, похоже, таких измерений без олова не делалось. Мне кажется, их надо было бы провести. Дальше автор пишет о калибровке источника, оптимальных режимах роста и формирования, потом о высаживании олова. И тут уже звучало, что когда высажено олово, то кроме фотографии дифракции быстрых электронов ждешь каких-то других измерений. Есть рентген, есть синхротронные источники, есть просвечивающая электронная микроскопия, тунNELьная микроскопия, методы сейчас доступны. Ждешь какого-то подтверждения, что есть каналы. Но кроме дифракции быстрых электронов я ничего не нашел. Причем дифракция показывает некую структуру, но является ли это каналами трудно сказать. Последняя четвертая глава – это измерения

электрофизических свойств и некоторые расчеты. Здесь я тоже бы ждал каких-то расчетов, как должны проявиться одномерные каналы и уровни, которые в них есть на электрофизических характеристиках. Но автор привел только профиль, фактически только решение уравнения Пуассона, а хотелось бы видеть зонную структуру и как она меняется при изменении некоторых параметров, как это скажется на характеристиках. Следующий раздел мне очень понравился, потому что был сделан реальный конкретный прибор, он работал. Очень хорошие характеристики при определенной ориентации. Высокие частоты, до 150 ГГц все это работает. Это действительно некое практическое применение, продвижение вперед, учитывая специальность, по которой защищается автор. И в конце работы даются выводы. Теперь отдельные замечания. Меня поразила такая фраза “Измерения эффекта Холла проводятся разрушающим методом”. Хотелось бы услышать, что это значит. Далее бросается в глаза, что есть литография, все возможности имеются, однако автор предпочел мерить эффект Холла в геометрии Ван дер Пау. Непонятно, зачем так делать, если образцы заведомо обладают анизотропией. Несмотря на замечания, я рассматриваю работу как квалификационную и автор свою квалификацию показал: рассмотрел литературу, написал внятно и понятно, обоснованно. В отзыве я указал, где результаты можно будет использовать. Статьи опубликованы, выступления на конференциях были. Положения, которые он вынес на защиту, доказаны. Диссертационная работа “Физико-технологические основы формирования систем проводящих нанонитей из атомов олова” удовлетворяет требованиям п. 9 положения о присуждении ученых степеней ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. А ее автор Ячменев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

**А.Э. Ячменев** Непонятно, что значит, что Холловские измерения проводятся разрушающим методом. Это просто означает, что для проведения таких измерений необходимо либо в геометрии Ван дер Пау расколоть пластину, чтобы подготовить образец необходимого размера, т.е. первоначальная целостность образца нарушается. И даже в геометрии Холловского мостика необходимо вытравить меза-изоляцию, что точно так же нарушает первоначальное состояние образца. По поводу проведения измерений в геометрии Ван дер Пау при наличии возможности сделать Холловские мостики. Действительно, образцы с отсутствующей анизотропией, в частности № 261, измерялись в геометрии Ван дер Пау. Это связано с очень большим объемом экспериментальной работы и изготовление Холловских мостиков требует для каждого образца требует

проведения операций фотолитографии, последующего проявления и т.д. Чтобы немного сэкономить ресурсы измерения проводились в геометрии Ван дер Пау. Замечание по поводу отсутствия методики измерения ВАХ. Дело в том, что в тексте диссертации приведено, что ВАХ измерялись с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов Sony Tektronix 370A, который по сути является стандартом для проведения такого рода измерений и этот прибор в принципе не имеет настроек скважности импульсов. В нем только есть возможность проводить измерения с различной длительностью импульсов: 80 мкс и 300 мкс. Первый режим является стандартным режимом измерений и никаких причин изменять эти настройки и увеличивать длительность импульса не было. И сама методика, таким образом, заключалась в изготовлении омических контактов специальной топологии, которая приведена в работе и проведении измерений на указанном приборе, все параметры измерений также в работе приведены. Других настроек прибор не имеет. По поводу перегрева в случае гомоэпитаксиальных структур измерения проводились на грани теплового пробоя и индикатором перегрева служил лавинный пробой. Про структурные измерения я уже говорил, что это очень нетривиальная задача. Даже просто провести исследование подложки без эпитаксиальной структуры, чтобы оценить реальную геометрию вицинальных граней. С учетом высоты вицинальной ступени в 2,8 А поверхностные окислы в GaAs имеют слой толщиной несколько монослоев. То есть просто посмотреть чистую подложку никакой полезной информации не даст. Подложку нужно сначала специальным образом подготовить, необходимо удалить окислы галлия. При стандартной процедуре термического удаления окислов на поверхности образуются глубокие кратеры, которые необходимо зарастить, “выгладить” поверхность. И после этого можно было бы увидеть края вицинальных террас только в случае закрывания поверхности пассивирующим слоем для предотвращения реакции с кислородом из воздуха. Про возможность увидеть конфигурацию нанонитей с помощью проведения рентгеновских исследований – я не сталкивался с какими-то экспериментальными данными, в которых слои толщиной в долю монослоя, а концентрация олова здесь составляет меньше 0,1 монослоя атомов GaAs, исследовали с помощью рентгеновской дифракции. Про микроструктурные исследования пассивированной поверхности с помощью микроскопии я говорил – экспериментальный стенд с возможность нагрева в вакууме найти не получилось. Если такой вариант появится, мы обязательно структурные измерения проведем.

**Доцент НИЯУ МИФИ, к. ф.-м.н. Васильевский Иван Сергеевич.** Добрый день, уважаемые коллеги. Я неформально выскажусь по этой работе. Работа интересная и

достаточно комплексная, серьезная работа, преимущества которой как раз порождают ряд недостатков вследствие ее такой избыточной широты. Действительно, тема, поставленная как задача этой работы, весьма интересная для физики и технологии низкоразмерных систем задача. А именно получение систем низкой размерности способом самоорганизации снизу-вверх при молекулярно-лучевой эпитаксии. Формирование квазиодномерных каналов или систем промежуточной размерности между 1D и 2D, как я считаю в случае данной работы, где двумерный канал был промодулирован потенциальным профилем распределенных в пространстве нанонитей олова расширяет возможности и подходы в зонном дизайне гетероструктур для современной наноэлектроники. Другой аспект – использование атомов олова в отличие от кремния. Эти два подхода легли в основу постановки задачи данной работы. Олово интересно тем, что, как мелкий донор, в отличие от кремния не имеет порога амфотерности на уровне  $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а это значит, что можно достичь гораздо более высокого уровня легирования в системах с донорной примесью олова, что тоже позволяет сильно увеличить плотность двумерного электронного газа, промодулированного таким одномерным потенциалом. Далее структура работы состоит из пяти вех. Во-первых, это методология процесса осаждения, ее отработка для формирования именно для квазиодномерных цепочек олова. На мой взгляд, наиболее доказательным признаком того, что действительно сформированы именно такие цепочки сочетание высокой подвижности электронов в структурах со спейсером (HEMT структурах) и высокой концентрации при наблюдаемом коэффициенте анизотропии в двух перпендикулярных направлениях образца. Если бы такая примесь олова сегрегировала до поверхности, то мы не видели бы такой высокой подвижности, характерной для HEMT структур, где транспорт осуществляется в квантовой яме. А если бы условия были таковы, чтобы возможно проявилась диффузия этой примеси, то поскольку спейсер дает экспоненциально вклад в подвижность электронов, то мы бы увидели резкий спад этой подвижности. Поэтому, на мой взгляд, сам факт наблюдения достаточно высокой анизотропии даже при комнатной температуре и достаточно высокой подвижности электронов в EMT структуре как раз и является ответом на то, что действительно получилось сформировать ориентированные цепочки нанонитей атомов донора. Потому как по проценту заполнения узлов решетки это меньше 1% и рентгено-дифракционными способами такое количество вещества обнаружить невозможно. Можно было бы обнаружить профиль залегания методом вторично-ионной масс-спектроскопии и, конечно, это было бы хорошо увидеть в данной работе. Следующей вехой был переход от образцов с однородной матрицей к образцам с квантовой ямой, гетероструктурным образцам и комбинация отработанной уже

технологии эпитаксии с НЕМТ структурой. В данном случае базовая НЕМТ структура – это рабочая лошадка СВЧ электронной технологии, которая в этой организации устоялась, структура хорошо отработанная. Поэтому это говорит в пользу того, что сравнительный анализ мог производиться корректно, потому что заменялся фактически один слой в структуре, это дельта-слой примеси кремния на примесь олова. Но в данном случае вицинальная поверхность являлась изюминой этой работы. И следующая веха – это нетривиальный шаг, требующий усилия большой команды, это реализация приборных характеристик на данном материале, т.е. это следующий шаг в продвижении результатов. И то, что были получены интересные данные, наблюдалась анизотропия приборных характеристик тоже в двух перпендикулярных направлениях. Это показывает нам влияние вот такого ориентированного рельефом потенциала на перенос электронов это большой плюс в плане шага к практической реализации. Дальше у диссертанта возникла идея использования подобных структур в болометре на горячих электронах. Фактически, это реализация хорошо известной *bib* структуры (blocked impurity band), используемой в фотодетекторах, но где локализация в пространстве реализуется за счет продольной модуляции потенциала в такой структуре. К сожалению, дальше самого обсуждения идея и расчета зонной структуры она не была реализована ввиду достаточно особой ее специфики. Наконец, токовые осцилляции, которые наблюдались, это как дополнительный результат исследования. Было констатировано наблюдение и обсужден механизм, известный механизм, который приводит к возникновению таких колебаний, но модели отдельной не было представлено. В итоге мы видим, на мой взгляд, достаточно широкую, комплексную работу с хорошей предпосылкой в актуальности и внятном практическом применении. Есть существенная новизна этой работы, поскольку такая комбинация донорных нанонитей олова и НЕМТ структуры ранее реализована не была. И то, что такие новые данные были получены и даже были продемонстрированы приборные характеристики это большой, хороший результат. Вместе с тем есть ряд замечаний, в основном они касаются обратной стороны широты работы, соответственно где-то страдала глубина проработки отдельных моментов. А именно в расчете потенциала, как уже говорил предыдущий оппонент, не было учтено размерное квантование носителей тока, что для таких концентраций стоило бы сделать, это влияет на ширину потенциала, глубину квантовой ямы и немного меняет весь потенциальный профиль структуры. Далее в образцах №217-218 не было проведено измерение эффекта Холла, хотя в этих образцах не такая высокая анизотропия. И, на мой взгляд, методически было бы правильно измерить температурные зависимости коэффициента анизотропии и сопротивления в двух направлениях, потому что тогда можно было бы увидеть переход к локализации в

направлении, перпендикулярном к нитям и оценить энергию потенциального рельефа. Такое еще замечание, что приведенные концентрации олова имеют слоевую концентрацию  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  сильно расходятся с концентрацией двумерного электронного газа, хотя олово хороший донор и концентрация двумерного газа, как ожидается в случае его правильного встраивания не должна так радикально отличаться от концентрации примеси. Может быть, здесь не учтена реэвапорация олова, но этот вопрос для меня остался открытым. И нет в приборной части статических характеристик ВАХ транзисторов, изготовленных на РНЕМТ структурах в двух перпендикулярных направлениях, только динамические характеристики. Очевидно, эти измерения проводились, как и в любом тесте, но хотелось бы их увидеть, потому что по ним видны параметры напряжения отсечки, крутизна и прочие стандартные параметры, которые позволяют всесторонне характеризовать прибор. Это все замечания, которые я отмечаю по работе. Они касаются в основном глубины проработки и модели, которые используются при описании. Они не затрагивают основные выводы и положения, сделанные в работе и не умаляют тот экспериментальный материал, важный и качественный, который был представлен в работе. Автореферат соответствует содержанию работы, результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в ведущих журналах ВАК, в том числе зарубежных. По совокупности сказанного, я считаю, что диссертационная работа является актуальной и значимой, а полученные данные достоверны. Выводы обоснованы, работа является законченной диссертационной работой и удовлетворяет всем требованиям о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, а автор Ячменев Александр Эдуардович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

**А.Э. Ячменев** Сначала отвечу по поводу того, что концентрация атомов олова существенно превышает значения, используемые в стандартных РНЕМТ, легированных кремнием и что может быть не учитывается эффект реиспарения олова. Именно такая завышенная доза олова и учитывает эффект реиспарения, потому что во время легирования температура подложки для увеличения сегрегационной способности составляет 620 градусов, в то время как температура эффузионной ячейки порядка 650 градусов, что означает, что скорость реиспарения очень и очень высока. Плюс критическое значение имеет температура заращивания тех атомов олова, которые все-таки остались и встроились в решетку на краях террас или остались на поверхности террасы. Для РНЕМТ структур температура заращивания ненамного, но выше, чем для

гомоэпитаксиальных структур и составляет 500 градусов, что на 30 градусов выше гомоструктур. И эта температура критически влияет на всплытие олова. В частности, образец №275, который имеет концентрацию порядка  $1,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , но стандартную температуру заращивания всего лишь 580 градусов. Концентрация электронов в нем чуть меньше, чем на два порядка меньше, чем в остальных. Несмотря на то, что по конструкции и составу он точно такой же. Образец №260, в котором температура заращивания 500 градусов имеет концентрацию больше, чем на порядок. Поэтому такие концентрации при легировании обусловлены компенсацией этих процессов, происходящих с атомами олова как непосредственно во время легирования, так и во время заращивания. По поводу недостаточно точной модели, не учитывающей размерное квантование при оценке возможности изготовления болометра на горячих электронах. В рамках диссертации только такая оценка, но сама работа будет продолжаться и в планах есть задача провести расчет с решением уравнения Шредингера, получить подзоны размерного квантования, волновые функции и сделать более корректную оценку применимости. По эффекту Холла в гомоэпитаксиальных образцах мы проводили оценку. Из-за преобладающего рассеяния на ионах не было обнаружено никаких особенностей, подвижность в них около  $1950 \text{ см}^2/\text{Вс}\cdot\text{с}$  и концентрация примерно  $2,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  на обоих образцах, поэтому эти данные не приведены. Наконец, почему отсутствуют статические характеристики. Как сказал оппонент, изготовление прибора – сама по себе нетривиальная задача, требующая вовлечения довольно большого числа людей и выделения большого времени. А изготовление прибора, обеспечивающего наилучшие или максимально возможные характеристики задача еще более сложная и в рамках диссертационной работы не ставилась задача изготовить прибор, имеющий лучшие характеристики, измерить все возможные параметры и привести их в работе. Приведенными измерениями была показана перспективность применения подобных структур для приборов и я думаю с этой точки зрения эти измерения задачу выполнили. Видно, что потенциал у таких структур есть. А изготовление прибора с хорошей крутизной, достаточной плотностью тока – это отдельная задача.

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Во время дискуссии могут выступить все присутствующие.

**В.В. Вьюрков, к.ф.-м.н.** Хочу сказать, что работа мне понравилась. Такая интересная необычная структура. Может быть ожидание было большее от нее, получить какую-то практическую пользу, но какая-то полезность очевидная заключается в том, что можно на ее основе сделать болометр. В отличие от известных болометров на горячих электронах в этой структуре в связи с тем, что анизотропия хоть и небольшая, но это открывает шанс

сделать болометр, который чувствителен к поляризации излучения. Из-за того, что концентрация различается в перпендикулярных направлениях, будет какая-то частотная зависимость. Это расширяет возможности болометров, потому что такой спектрально-чувствительный болометр без специальных вступительных приспособлений и поляризаторов я не знаю. Еще звучали слова, что будет размерное квантование проводимости. То есть размыщение поворачивает в сторону квантовых нитей, но здесь вряд ли следует ожидать одномерную структуру. Понятие низкой размерности, оно только в квантовой механике. Если нет поперечного квантования, тогда нельзя говорить о низкой размерности. Скорее всего здесь не будет поперечного квантования, потому что примеси располагаются хаотично, нерегулярно. Если бы они строго выстраивались в цепочку, там можно было бы ожидать размерное квантование и это была бы квантовая нить. Здесь вряд ли это получится. Но, тем не менее, в перспективе было бы интересно сравнить квантовый расчет с решением уравнения Шредингера с классическим. Мне работа нравится, я вижу ее очень интересные перспективы. Обсуждалась на защите главная проблема, что эти нити невидимы. На структурах это довольно распространенное явление, приходится по каким-то косвенным данным судить. Увидеть не удалось, но я считаю, что анизотропия поляризации – это очень сильное свидетельство того, что атомы олова там выстраиваются в цепочку. Олово является очень хорошей мелкой примесью, т.е. при комнатной температуре атомы все ионизированы. А здесь если видим анизотропию, то это означает, что там яма образуется, значит атомы олова скапливаются в цепочки. Поэтому я считаю, что наблюдение анизотропии является очень сильным косвенным свидетельством того, что там действительно происходит выстраивание в цепочки.

**М.А. Чуев, д.ф.-м.н.** Я выступлю еще раз по поводу реальной структуры. Во-первых, некоторая справка по чувствительности рентгеновских методов. На синхротроне сейчас меряются отдельные наночастицы, 5-10 нм – это всего лишь 10000 или 100000 атомов. Я не предлагаю везти ваши структуры на синхротрон, но прямо здесь стоит мини-синхротрон, трубка с очень большой мощностью. И попробовать провести измерения в полной аналогии с электронами вдоль и поперек и сравнить наблюдаемые дифракционные картины. Дальше все это моделируется и получается ответ, насколько хороша структура или насколько она отличается от идеальной. А по поводу наблюдаемых характеристик вопрос очевиден: чтобы двигаться к какому-то улучшению характеристик, надо знать, что ты имеешь, знать реальную структуру. А анизотропия будет всегда, если есть скос. Структуры сложные, многослойные, надо реальную структуру как-то мерить.

**В.Ф. Лукичев, д.ф.-м.н.** Буквально на прошлой неделе я был на конференции, где обсуждались проблемы в основном кремниевой наноэлектроники и был обзор от

компании Global Foundries, это бывшая AMD, где они разбирали все аспекты технологии микроэлектроники. Начиная от литографии и заканчивая травлением, получением приборов, геометрией приборов и т.д. Эти споры закончились на том, что IBM изготовила кристалл по технологии 7 нм. И все время обсуждение идет по технологии сверху-вниз. Т.е. наносите слои, проводите травление, имплантацию и т.д. В представленной работе A3B5 материалы это немного другая и частотная область и по мощностям. Я хотел бы подчеркнуть, что в этой работе ведутся работы по исследованию структур снизу-вверх. Это молекулярная эпитаксия, высаживание на ступеньках каких-то структур. Масса других примеров типа кополимеров, когда два кополимера нагреваются, они выстраиваются в какие-то самоорганизованные системы. Почему я считаю эту работу важной. Все развитие физики, наноэлектроники должно идти по всем направлениям. Это очень важно, что пусть сейчас мы обсуждаем какие-то неизготовленные практически приборы, те же болометры или еще что-то, но первые шаги должны быть именно такие, с этого надо начинать. Я считаю, что это важный момент, это дополняет общую картину этого мира.

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Спасибо! Предоставим диссертанту заключительное слово.

**А.Э. Ячменев.** В первую очередь я хотел бы поблагодарить своего научного руководителя, Рыжия Виктора Ивановича за постановку задачи и всестороннюю помошь при выполнении работы и обсуждении результатов. Также хотелось бы поблагодарить директора института ИСВЧПЭ РАН Гамкрелидзе Сергея Анатольевича и научного руководителя института Мальцева Петра Павловича за предоставленную возможность выполнить работу на качественном уровне, используя современное научное оборудование. Хотел бы выразить благодарность научному консультанту Пономареву Дмитрию Сергеевичу и моему коллеге Бугаеву Александру Сергеевичу за огромную помошь как при выполнении некоторых этапов работы, так и при обсуждении результатов. Отдельно хотелось поблагодарить оппонентов Кульбачинского Владимира Анатольевича и Васильевского Ивана Сергеевича за то, что смоги найти время прочитать работу, приехать на защиту и выразить свое мнение. И также выражаю благодарность всем своим коллегам и друзьям, которые тем или иным образом имели отношение к выполнению работы или обсуждению полученных результатов. Спасибо.

**Ученый секретарь Вьюрков В.В.** Предлагается следующий состав комиссии по голосованию: Чуев Михаил Александрович, Маишев Юрий Петрович и Кривоспицкий Анатолий Дмитриевич.

**Председатель Лукичев В.Ф.:** Прошу голосовать. Все за этот состав. Прошу комиссию приступить к работе.

**Проводится тайное голосование.**

**Председатель счетной комиссии Кривоспицкий А.Д.** сообщает результаты голосования: роздано было 14 бюллетеней, все оказались в урне, все за, против нет. Замечаний никаких нет.

**Председатель Лукичев В.Ф.** Прошу утвердить итоги голосования. Протокол счетной комиссии принят единогласно. Давайте поздравим диссертанта с успешной защитой.

**Аплодисменты в зале.**

**Председатель Лукичев В.Ф.** Приступаем к обсуждению заключения диссертационного совета. Какие есть замечания по проекту заключения?

**М.А. Чуев** Мне кажется, что результаты диссертации должны быть изложены более сжато и четко.

**Ю.И. Богданов.** У меня тоже нет возражений по содержанию, В проекте я отметил незначительные замечания.

**Председатель Лукичев В.Ф.** Прошу В.В. Вьюркова внести предложенные исправления по оформлению заключения совета. Поскольку существенных замечаний нет, прошу голосовать по существу заключения совета. Все за. Спасибо! На этом закрываю заседание. Разрешите еще раз поздравить диссертанта.

**Аплодисменты в зале.**

Зам. председателя диссертационного совета  
член-корр. РАН

Лукичев В.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.

Вьюрков В.В.

16.06.2016