

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета

Д.002.204.01 от 20 декабря 2016 г.

Защита диссертации

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Михайловича Сергея Викторовича

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 20 декабря 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. Богданов Ю.И.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
4. Валеев А.С.	д.т.н.	05.27.01т
5. Кокин А.А.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
6. Кривоспицкий А.Д.	д.т.н.	05.27.01т
7. Маишев Ю.П.	д.т.н.	05.27.01т
8. Махвиладзе Т.М.	д.ф.-м.н.	05.27.01фм
9. Мордвинцев В.М.	д.ф.-м.н.	05.27.01т
10. Рудаков В.И.	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 В.Ф. Лукичев (открытие):** У нас сегодня две защиты кандидатских диссертаций. Первая: Михайлович Сергей Викторович «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя». Специальность наша 05.27.01. Работа выполнена в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН. Научный руководитель: Рыжий Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН. Научный консультант: Хабибулин Рустам Анварович, кандидат физико-математических наук, учёный секретарь ИСВЧПЭ РАН. Официальные оппоненты: Гергель Виктор Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и Занавескин Максим Леонидович, кандидат физико-математических наук, начальник отдела прикладных нанoeлектронных структур Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт». Ведущая организация: Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН). Пожалуйста, представьте дело кандидата.

**Ученый секретарь дисс. совета В.В. Вьюрков (знакомство):**

В диссертационном деле диссертанта присутствуют все документы, необходимые для проведения защиты. Краткие биографические данные таковы: закончил Московский инженерно-физический институт в 2009 году, поступил в аспирантуру, закончил аспирантуру МИРЭА в 2012 году. В настоящее время работает младшим научным сотрудником в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук.

Диссертация сопровождалась представлением к защите от предприятия, в котором выполнена работа. Кроме того, результаты диссертации рассматривались на научном семинаре ФТИАН. Было рассмотрение комиссией диссертационного совета. Рекомендованы ведущая организация и оппоненты. И назначена дата защиты. Мы можем приступить к докладу, а с остальными документами, согласно сценарию, я буду знакомить несколько позже.

**Председатель В.Ф. Лукичев:** Так. Пожалуйста. 20 минут.

*(Михайлович С.В. излагает содержание диссертационной работы)*

**Председатель В.Ф. Лукичев (предлагает задать вопросы диссертанту):**  
Вопросы, пожалуйста.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Пожалуйста. Вопросы могут задавать все присутствующие в зале.

**Занавескин М.Л., к.ф.-м.н., официальный оппонент:** У вас в выводах  $F_t = 90$  ГГц. Это внешние измерения или внутренние?

**Михайлович С.В.:** Это внешние измерения.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н., зам. председателя дисс. совета:** Когда вы говорите об аспектном отношении, это что к чему относится?

**Михайлович С.В.:** Длина затвора к толщине барьерного слоя. Геометрические соотношения.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** У меня есть вопрос по методу экстракции параметров. Вы утверждаете, что осуществили быстрое и точное определение параметров модели. А вы оценивали адекватность соответствующих моделей построенных? Что они вообще отвечают вашим экспериментальным данным с достаточной точностью или с недостаточной точностью, и нужно над этим ещё работать?

**Михайлович С.В.:** Нет, они вполне достаточно...

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** А почему? Как вы это обоснуете? Это же количественный критерий, который нужно при статистической обработке применять.

**Михайлович С.В.:** Во-первых, количество моделей транзисторов было построено несколько десятков тысяч. Плюс изучалось, как на эти параметры влияет смещение (подаваемое напряжение), то есть выбор рабочей точки. Например, там очень хорошо определяются ёмкости, которые зависят от напряжения на затворе, из которых можно, например, определить концентрацию в дальнейшем.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Хорошо. А вот, например, вы пишете в таблице №1, что у вас подвижность электронов для первой гетероструктуры, представленной  $2055 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$ , а может, 56, а может, 54. С какой точностью вы вообще экстрагируете такого рода значения? Подвижность, также концентрация. У вас достаточно много данных, и нигде не представлены точности этих данных. Может быть, это не 2000, а 1500 всего на самом деле или 2500. Какая ошибка измерения? Это можно оценить было?

**Михайлович С.В.:** Ну, можно, в принципе, было.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** А почему не оценили? Хорошо. Терминологических замечаний довольно много. Концентрация в физической литературе – это объёмная концентрация не на  $\text{см}^2$ . Да?

**Михайлович С.В.:** Нет, как раз для двумерного газа она слоевая пишется.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Тогда надо было пометить, что поверхностная концентрация. Ну хорошо, а сколько это будет, например, в Ом на квадрат?

**Михайлович С.В.:** Концентрация?

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Не концентрация, а характеристика гетероперехода соответствующей поверхности. Если вы возьмёте подвижность и поверхностную концентрацию, то можете оценить сопротивление в Ом, точнее в Ом на квадрат.

**Михайлович С.В.:** Сопротивление просто измеряется.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Оно измеряется. И сколько оно составляло для омических контактов?

**Михайлович С.В.:** Сейчас я вам покажу таблицу. Вот. 0.5, 0.4, 0.15 Ом\*мм.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Так это объёмное сопротивление, а я говорю о поверхностном сопротивлении. Ваш контакт характеризуется поверхностным сопротивлением сколько-то Ом на квадрат. Простой вопрос, и как-то можно было бы перевести из одной единицы к другой. Работа хорошая, безусловно, но вот мне просто любопытно. Я поскольку не схемотехник. Что, теперь в российской литературе сопротивление тоже так обозначают, на иностранный манер?

**Михайлович С.В.:** Честно говоря, обозначают по-разному, то есть и так, и так.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Хорошо.

**Михайлович С.В.:** Поскольку на данную тему зарубежных работ гораздо больше, чем отечественных, то большинство к терминологии зарубежных работ склоняется. Допустим, даже коэффициент шума, я смотрел в советской литературе его пишут Кш, например, а сейчас его пишут NF или NFmin, то есть noise factor или noise figure.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Ещё, когда вы даёте ссылки, обычно всё-таки в конце автореферата дают списки цитированной литературы, а потом публикации автора. Вы же цитируете прямо в тексте. Кое-где у вас сноски, кое-где у вас прямо в тексте. Ну хорошо. Это придирки просто.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** У меня вот какой вопрос. Вы рассказывали про оптимизационный метод и добавили ещё два члена:  $\Delta K$  и  $\Delta U$ . Почему они называются, вот вы говорите  $K$  – это стабилизационный, а  $U$  – это что?

**Михайлович С.В.:**  $K$  – это устойчивости, а  $U$  – это коэффициент однонаправленного усиления. Это параметры СВЧ.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Я не пойму одного. Ну вот даже у вас с каким-то коэффициентом берётся  $0.0025 \Delta U$ . Вот эту целевую функцию вы из каких соображений?.. Можно ли было добавить ещё каких-то членов?

**Михайлович С.В.:** Можно, но большинство членов очень хорошо определяются из S-параметров. Поскольку все члены пересчитываются из S-параметров, то как правило всегда ими ограничиваются. Но конкретно – K и U. Малое изменение S-параметров приведёт к большому изменению K и U, поэтому они очень плохо определяются при оптимизации просто S-параметров. Я их сюда добавил, чтобы они как можно ближе к реальной модели транзистора были.

**Чуев М.А., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** То есть некая априорная информация, что ли?

**Михайлович С.В.:** Да. Дополнение к S-параметрам.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** А коэффициент тогда из каких соображений? Вы целевую функцию строите на основе – у вас – трёх целей, да? С разными весами получается. Три целевые функции с разными весами образуют... Мы по автореферату смотрим, то, что у вас на странице 12 представлено.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Да. У вас тут  $0.0025 \Delta U$ , а тут другое  $\Delta U$ .

**Михайлович С.В.:** Я здесь просто сократил запись. Да там с весами, действительно. Потому что U, оно на самом деле достаточно большое по порядку величины. И чтобы целевая функция не видела только одно U, но ещё и другие параметры.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Но вы же U в относительных долях, причём квадрат берёте. А K значит. Что такое K, напомните? K большое.

**Михайлович С.В.:** Коэффициент устойчивости. Это коэффициент устойчивой работы транзистора.

**Богданов Ю.И., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Ну хорошо. Спасибо.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Ещё вопросы?

**Чуев М.А., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** У меня тоже вот к этой целевой функции. У Юры (Богданова) был правильный вопрос. У вас нет ошибок в параметрах результирующих, тех, которые вы нашли. И их на самом деле при такой записи целевой функции у вас не будет никогда. Для того чтобы всё это работало и коэффициенты перед разными членами были не произвольными, надо относить все экспериментальные данные к некой ошибке экспериментальной. Тогда не будет произвола ни в коэффициентах. Более того, тогда якобиан по всем параметрам обратным даст вам среднеквадратичные ошибки в

каждый параметр, и не будет вопросов. И в таблице вы их проставите. Но сначала нужно нормировать всё на экспериментальные погрешности.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Владимир Владимирович, что у нас там по сценарию?

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Дальше обзор документов и отзывов.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Пожалуйста. Вы присаживайтесь пока.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** После замечаний должен выступить научный руководитель. Он отсутствует, но он представил положительный отзыв на диссертацию. Поэтому мы можем послушать, при желании, выступление консультанта научного.

**Хабибуллин Р.А., к.ф.-м.н., научный консультант:** Если есть желание, то два слова могу сказать.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Да. Давайте два слова.

**Хабибуллин Р.А., к.ф.-м.н., научный консультант (*выступление научного консультанта*):** Спасибо. Но кроме того, что я научный консультант, я ещё и учёный секретарь Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники, организации, в которой выполнена данная диссертационная работа. И вначале я бы хотел сказать пару слов именно как учёный секретарь. Поскольку 2016 год подходит к концу, мы подводим какие-то итоги работы нашего института. Я могу сказать, что 2016 год оказался очень богат для нас на научные события. Во-первых, летом 2016 года такое событие мирового масштаба – это демонстрация первого в мире инжекционного терагерцевого лазера на графене. Большой вклад в данную работу, в теоретическую часть, сделал Виктор Иванович Рыжий, главный научный сотрудник нашей организации и научный руководитель диссертанта. Второе событие, которое произошло осенью – это демонстрация генерации квантово-каскадного лазера на основе многослойной гетероструктуры. Причём этот лазер был разработан полностью в России, начиная от эпитаксиального синтеза гетероструктуры, которая была выполнена в Академическом университете, постростового процессинга, который мы сделали у себя, и измерений в Институте физики микроструктур. Кроме того, в 2016 году у нас успешно выполнен ряд прикладных научно-исследовательских работ по заказу Минобрнауки. Одна работа опытно-конструкторская, по заказу Минпромторга. Защищены ещё две диссертационные работы. Несмотря на всё это, на фоне таких ярких событий, я считаю, что диссертационная работа Сергея Викторовича смотрится очень удачно и не менее ярко,

чем эти события. Поднятые вопросы в работе, связанные с поиском взаимосвязи высокочастотного коэффициента шума и таких параметров как толщина барьерного слоя и ёмкость затвор-сток, является крайне актуальным, что подтверждает большое количество публикаций в журналах из первого картеля базы данных Web of Science в 2016 году. Поэтому здесь актуальность работы не вызывает никаких сомнений.

Как научный консультант, я бы хотел сказать, что Сергей Викторович продемонстрировал себя как очень целеустремлённый, высококвалифицированный молодой учёный, способный решать достаточно сложные и трудоёмкие задачи, что было сегодня продемонстрировано. Особо хочу отметить большой личный вклад соискателя в диссертацию, поскольку он участвовал практически на всех стадиях, начиная от расчёта аналитических моделей, изготовления самих транзисторов, поскольку Сергей Викторович является высококвалифицированным специалистом в области электронно-лучевой литографии – метода, с помощью которого, собственно, и создаются затворы для данных транзисторов. И, в конечном итоге, измерении S-параметров и коэффициентов шума. Разработанная модель экстракции параметров Сергеем Викторовичем пользуется большой популярностью у нас. Она была внедрена во многие лаборатории и использована в ряде прикладных научно-исследовательских работ. Кроме того, на данный момент мы научились с помощью этой модели определять так называемую скорость инжекции электронов в подзатворную область транзистора. И оказалось, что эта скорость очень сильно зависит и от длины затвора, и от ряда других параметров, что представляет также фундаментальный научный интерес.

Таким образом, считаю, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Михайлович Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

**Вьюров В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Спасибо. Теперь приступим к обзору некоторых документов. Прежде всего, выписка из протокола заседания учёного совета Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, в котором была выполнена работа. В выписке подтверждается актуальность темы, научная новизна, достоверность полученных результатов, положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора, полнота изложения материала в печати. И делается заключение о рекомендации данной работы к защите. Выписка составлена председателем учёного совета, доктором технических наук, профессором Мальцевым и учёным секретарём Хабибуллиным, кандидатом физико-математических наук.



Теперь отзывы, поступившие на диссертацию и автореферат. Главным, в моём обзоре, является отзыв ведущей организации, в качестве которой выступил Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, Черноголовка. Отзыв составлен заведующим теоретической лабораторией, председателем научного семинара «Общая физика», доктором физико-математических наук Зайцевым, и утверждён исполняющим обязанности директора Рощупкиным, доктором физико-математических наук. Отзыв положительный, поэтому зачитывать его целиком не буду. Здесь те же самые положения, выносимые на защиту, подтверждаются, оценка новизны, достоверности полученных результатов, практическая ценность, применение результатов в различных организациях.

Остановимся на замечаниях к диссертационной работе. Первое замечание такое: во введении недостаточно полно изложена история появления материалов, указанных в диссертации, не буду их называть полностью, полевых транзисторов на основе этих материалов, более прогрессивных. И не проведено сравнение с традиционными на арсениде галлия и на кремниевых, кремниевые полевые транзисторы. Ну мы, наверное, на каждое замечание сразу... Как удобнее?

**Михайлович С.В.:** Мне по одному лучше.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Чтобы нам было понятнее. По одному. Да? Ну хорошо.

**Михайлович С.В.:** Во-первых, в обзоре я в основном развитие технологии нитрида галлия сделал. А по поводу сравнения, то сейчас есть много обзорных статей и даже книг, и на некоторые из них я даю ссылки в первой главе.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** То есть эти лучше, которые вы рассматривали в диссертации, по параметрам. Второе замечание: подгонка параметров эквивалентной схемы проведена методом минимизации функционала, представленным в диссертации, с девятнадцатью параметрами, с использованием алгоритмов Нелдера-Мида, Хука-Дживса. Как правило, после тонкой настройки, эти методы находят глобальный минимум функционала. В диссертации и автореферате соискатель пишет о поисках локального минимума. Очевидно, что наилучшему приближению соответствует глобальный минимум функционала.

**Михайлович С.В.:** Тут, наверное, скорее всего, моя неточность. Здесь имеется в виду, что эти алгоритмы применимы в том случае, если есть один минимум. В моём случае локальный минимум является ещё и глобальным. Я брал значения начальных приближений в очень широком диапазоне, разных приближений, порядка нескольких десятков тысяч таких приближений, и смотрел, куда сходится решение. Оказалось, что

там, действительно, есть несколько минимумов. Но если сделать ограничения и первые приближения, которые я делаю, то решение всегда сходится к глобальному минимуму.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Третье замечание. Поскольку флуктуации толщины и состава тонких сегнетоэлектрических слоев AlGaN могут приводить к существенной неоднородности распределения плотности носителей заряда в двумерном газе, было бы интересно оценить влияние толщины барьера на это распределение и, соответственно, на шум.

**Михайлович С.В.:** В работе не стояло задачи исследовать неоднородности структуры в зависимости от толщины барьера.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Хорошо. Четвёртое, последнее замечание. В диссертации отсутствует физический анализ электронных процессов в канале транзистора. Так, например, в работе делается вывод о том, что основным источником высокочастотного шума являются флуктуации дрейфовой скорости. Однако в тексте нигде не обсуждается величина этой скорости и её флуктуаций. Также было бы интересно оценить величину флуктуаций плотности заряда в канале транзистора и их влияние на шум.

**Михайлович С.В.:** Что касается теории электронных процессов в канале, то, судя по литературе, для нитридов она до сих пор окончательно не сформулирована. Она отличается от более развитой теории для арсенидных структур, поскольку в нитридах присутствует поляризация, за счёт которой и образован двумерный электронный газ. И подобная теория могла бы стать основой для отдельной полноценной работы.

Что касается оценок скорости. Скорость можно, например, оценить методом, предложенным в статье дель Аламо. Суть метода заключается в том, что из эквивалентной схемы транзистора вычисляется внутренняя ёмкость затвора, которая равна сумме ёмкостей между затвором, истоком и стоком. И, интегрируя удельное, на единицу площади затвора, это значение по напряжению на затворе, мы получаем плотность заряда непосредственно в области под затвором. А поскольку ток равен произведению скорости на плотность заряда, то отсюда можно легко оценить среднее значение скорости, которое получается порядка  $10^7$  см/сек. Концентрация в рабочей точке получается порядка  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Что касается оценок флуктуаций, то для этого можно взять выражение для спектральной плотности флуктуаций тока внутренней части транзистора со стороны стока. Оно состоит из двух слагаемых. Первое описывает колебания тока, обусловленные колебаниями концентрации электронов, а второе – колебаниями их скорости. И по

оценкам значения этих флуктуаций получаются примерно на шесть порядков меньше их средних значений.

Что касается влияния на шум флуктуаций концентрации электронов, то эти флуктуации практически не вносят вклад в коэффициент шума, поскольку они обусловлены случайными колебаниями напряжения на затворе и полностью коррелируют с флуктуациями тока со стороны затвора. А коэффициент шума в основном обуславливается не коррелируемыми составляющими флуктуаций тока. И со стороны затвора это будут флуктуации тока, обусловленные колебаниями напряжения на затворе, а со стороны стока это, получается, колебания тока за счёт колебаний дрейфовой скорости электронов.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Хорошо. Принимаем эти ответы?

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н., зам. председателя дисс. совета:** Да.

**Чуев М.А., д.ф.-м.н., член дисс. совета:** Да.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Спасибо. Тогда рассматриваем отзывы на авторефераты. Поступило три отзыва. В произвольном порядке. Не сортировал. Поступил отзыв от кандидата физико-математических наук, доцента кафедры «Физика конденсированных сред» МИФИ Васильевского. Отзыв положительный, поэтому мы зачитывать его целиком не будем, а остановимся только на замечаниях. Не приводится информация о ширине затворной секции исследуемых транзисторов – первое замечание. Второе: недостаточно описан итерационный алгоритм поиска минимума целевой функции (например, секущих, касательных и так далее) при экстракции значений элементов малосигнальной шумовой модели полевого транзистора.

**Михайлович С.В.:** Во-первых, что касается ширины затвора. В работе были транзисторы с затвором 2 по 50 микрон, то есть 2 пальца размером 50 микрон. Что касается алгоритмов, то в работе использовались два алгоритма: Нелдера-Мида и Хука-Дживса. В принципе, это достаточно известные стандартные алгоритмы, и о них можно узнать в любой книге, посвящённой численным методам оптимизации.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Всё, спасибо. Так, отзыв представил доктор физико-математических наук, профессор МИСИС Ковалёв. Замечание такое, примыкает к предыдущим замечаниям: «Следует отметить, что автор в своей работе рассматривает влияние ёмкостной связи между затвором и стоком на коэффициент шума, однако из автореферата неясно, учитывалась ли каким-либо образом геометрия затвора».

**Михайлович С.В.:** В таком явном виде геометрия не учитывалась, учитывалась только ёмкость.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Так. Поступил отзыв от доктора физико-математических наук, профессора МИЭТ Ильичёва. Указываются такие недостатки автореферата: «В качестве недостатка автореферата отмечу отсутствие в нём сравнения характеристик, разработанных диссертантом аналого-вычислительных методик с характеристиками методик, представленных в периодической научной литературе, в том числе не только малосигнальных методик, а и методик, отражающих одновременно нелинейное поведение транзистора и его шумовой характеристики. Это представляется важным, так как обсуждаемый базовый материал GaN и приборы на его основе имеют преимущество перед прототипами на основе GaAs лишь в режимах больших сигналов и высоких температур».

**Михайлович С.В.:** Что касается преимущества GaN перед GaAs в области больших сигналов и высоких температур, то на сегодняшний день это утверждение не совсем корректно, поскольку, как я уже сказал, благодаря техническим прорывам последних лет приборы на нитриде галлия сейчас вполне уже могут заменять приборы на арсенидных структурах даже в миллиметровом диапазоне, и не только при высоких, но и при комнатных температурах. Единственное, что они не могут заменить криогенные усилители малошумящие, поскольку в GaN всё-таки течёт достаточно большой ток, и у них очень большое тепловыделение: там уже возникают проблемы просто с охлаждением. А что касается одновременного исследования коэффициента шума и большого сигнала, то в литературе, как правило, такие вопросы не рассматриваются, потому что, когда речь идёт о коэффициенте шума, то всегда имеется в виду, что сигнал маленький и его необходимо различить на фоне шума. А когда сигнал большой, то никакой речи о коэффициенте шума, как правило, не идёт, поскольку большой уровень сигнала всегда различим, хорошо читается на уровне шума.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Спасибо.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Что у нас дальше?

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Дальше выступления оппонентов в том порядке, в каком они...

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Тогда у нас первый оппонент – Гергель Виктор Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники РАН. Пожалуйста.

**Гергель В.А., д.ф.-м.н., официальный оппонент (выступление официального оппонента):** Сразу должен сказать, что мне диссертация и диссертант очень понравились. Говорить об актуальности здесь не нужно, потому что это передний край высокочастотной радиоэлектроники. Если здесь возник вопрос, чем отличается от арсенида галлия – это уникальный случай, когда двумерный электронный газ, подвижный, возник сам из-за разницы в поляризации и напряжения. В то время как в арсениде галлия вы обязательно должны куда-то ввести эти доноры. И, как правило, плотность инверсионного газа в арсениде галлия всегда где-то  $10^{11}$ , а здесь  $10^{13}$ . Потому что с помощью ещё одной прокладки они оказываются в свободном состоянии, а могли бы быть зацепленными за соответствующие связи, ну и вести себя как обычный составной диэлектрический слой. Здесь можно также сказать такую аналогию, что технология ведёт физику за руку. Даже вот эта нобелевская в прошлом году ситуация с голубыми диодами – она была неожиданна, потому что там как-то добавили третью компоненту, которая породила дислокаций мощных, которые, эти дислокации, взяли точечные дефекты, и освободилось место для излучения. Так вот такая же ситуация и здесь – что в арсенид-галлиевой и даже в InP ситуации такой высокой потенциальной токовой отдачи добиться вообще нельзя. Это насчёт актуальности.

Второе, я хочу заметить, что автор очень высокороботоспособен, потому что объём проделанной работы, где он разрабатывал конструкцию и технологию, причём из дюжины экспериментальных образцов... Там были отличия толщин – это само собой, но даже методов и конструкции их формирования, то есть там три альтернативных вещи. То есть он разбирается в этой области. Потом, девятнадцатимерное пространство меня потрясло как неспециалиста в этой области, но я вспомнил, что это вообще и в кремниевой технологии достаточно развитая и широко применяющаяся вещь, потому что там параметризуют вот эти нанометровые транзисторы не тремя, как обычно, или четырьмя, а пятьюдесятью семью и больше параметрами. Набрасывается на этот прибор мощный измерительный комплекс, который эти параметры выдаёт, и тогда их машина подгоняет. И я считаю достоинством диссертанта, что он обладает такими познаниями и ability в этой высокоспециализированной области. И об этом свидетельствует уже первая, вводная глава его диссертации, где говорится и о том, и о том, и о сём. И ввод в проблематику очень удачный. Вторая глава посвящена фактически вот таким, экспериментальным и таким общим описанием вот этой самой многопараметрической ужасной задачи. В ней сравниваются и описываются вот эти технологические способы формирования этих уникальных приборов, в том числе такой экстремальный, на мой взгляд, как двойная эпитаксия, когда сток-истоковые области, которые должны

проникнуть вот на этот самый естественный квантово-размерный слой, делается вторым эпитаксиальным процессом. Третья глава – это просто, на мой взгляд, глубокое обобщение шумовой и усилительной проблематики этих структур, причём как огромной совокупности журнальных зарубежных данных, так и своих измерений. Но все фактические результаты сконцентрированы в четвёртой главе, где вот эти представленные графики и обсуждаются. Довольно убедительно. А то, что здесь много компонентов – это ясно: миллиметровый диапазон, и уже место надо с ёмкостями и индуктивностью сюда было наверх, и тому подобное. Ну и поэтому, значит, вместе с высокой работоспособностью, эрудицией автора и важностью полученных достижений, которые находятся, что называется, на переднем крае этой узкоспециализированной, но важной области радиоэлектроники сверхвысоких частот, он находится на, как говорится, переднем плане, о чём свидетельствует почти десяток его выступлений за последние два года на конференциях, и публикации не только в требуемых ВАК журналах, но и специальных каких-то околооборонных издательствах.

Но, как положено, надо сделать замечания. Я должен сказать, что у меня существенных замечаний нет. Но, поскольку это надо, то вот одну таблицу надо было перенести из середины. Потом там какая-то не вполне обоснованная аппроксимация на нулевую длину затвора. Ну и, как здесь уже говорилось, люди хотят, чтобы вы флуктуацию и числа носителей в канале... Но, как это сказал автор, и я подчеркну, что поскольку вот это естественный, а не индуцированный инверсионный слой, то там как бы... Ну и этот транзистор, он так называемого объединённого типа, то есть уже со сформированной квантовой, специфической, полунеизвестной проводимостью большой, то и по его оценкам, и из общих соображений, должны быть флуктуации и концентрации маленькими, потому что они привязаны, что называется, к кристаллической структуре по масштабам.

Я считаю Сергея Викторовича Михайловича, сделавшего такую замечательную работу как изучение частотных и шумовых параметров наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с различной толщиной барьерных слоёв – вот здесь, мне кажется, можно было и раньше точку поставить: подразумевая, что бывают разные крутизны, такой и такой... Но главное, что, будучи представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, она является научно-квалификационной работой, удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК Российской Федерации, предъявляемого к кандидатским диссертациям, а присутствующий здесь её автор, Михайлович Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени. Благодарю за внимание.

**Михайлович С.В.:** Я согласен с замечаниями.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Хорошо. Тогда у нас выступление второго официального оппонента. Занавескин Максим Леонидович, кандидат физико-математических наук, начальник отдела прикладных нанoeлектронных структур Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт». Пожалуйста.

**Занавескин М.Л., к.ф.-м.н., официальный оппонент (выступление официального оппонента):** Спасибо. Я не буду очень много говорить о работе, до меня по этому поводу много сказали. Скорее я поговорю по поводу актуальности этой работы, потому что мы с Институтом СВЧ РАН очень плотно работаем в Курчатовском. У нас на базе есть свой эпитаксиальный рост как раз нитридных гетероструктур и своя постростовая часть сейчас запущена. Раз уж тут хозяева из института хвастались об успехах: в частности, сейчас у нас совместно с СВЧ РАН идёт первая в стране пластинка на кремнии, гетероструктура нитрида, и сразу 100 миллиметров. То есть такого в стране, я так понимаю, ещё не было. Дай бог, доведём до приличного уровня. Здесь вот в диссертации звучали цифры о барьерных слоях: 10 нанометров. Порядка 11 – это то, что делает «Элма-Малахит», Свешников. На самом деле, у них потолще. Мы проверяли их рентгеновской спектрометрией, у них из-за специфики CVD... Они же циферки этих толщин определяют как бы от балк-материалов, которые они растяг, поэтому у них погрешность определённая есть. А точно они, к сожалению, не получаются – это, я думаю, принципиальное ограничение CVD. Вот MBE мы сейчас добрались до толщин порядка 5 нанометров, и слоёвое сопротивление порядка 250 Ом. К слову, вот эта вот китайская пластина, которая пришла, у неё тоже около 250 Ом, толщина барьерного слоя 6 нанометров. То есть, грубо говоря, это всё не абстрактные нужды, а нужды, до которых, как ни странно, можно сказать, Россия современная вполне дозрела. Осталось только до ума довести. Ну и, конечно, все эти вещи с расчётами моделей транзисторов – это, безусловно, правильные шаги с точки зрения проектирования отдельных микросхем и в дальнейшем возможного построения САПР, и так далее, и так далее. Так что я, наверное, на этом общий обзор закончу.

Замечания к диссертационной работе. Первое связано с тем, что, действительно, гетероструктуры нитридные, они по сути своей к модным топологическим изоляторам приближаются: там канал возникает сам по себе, поэтому мы как «ростовики» очень неплохо знаем, что структуры не всегда равномерны, потому что обеспечить равномерность на большой пластине температуры, и так далее, и так далее. И вот первый вопрос связан как раз с тем, что интересно было бы узнать, как влияет морфология

границы, качество границ по одной пластине на шумовые характеристики приборов, разнесённых по пластине. Второй вопрос – что обычно при изменении S-параметров проводят деэмбеддинг контактных площадок. Из диссертации непонятно, проводилась ли такая процедура. И третий вопрос – ну он, скорее, пожелание, что в эту работу надо уже потихоньку вводить реальные, не из статей зарубежных, а реальные структуры с более тонкими границами барьерных слоёв, более тонкими барьерными слоями.

Но, в любом случае, эти замечания не умаляют достоинства диссертации, поэтому диссертационная работа «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя» удовлетворяет всем требованиям ВАК, а её автор, Михайлович Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01. Спасибо.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Спасибо. Будете отвечать?

**Михайлович С.В.:** Там пожелание и основной вопрос, была ли сделана процедура так называемого деэмбеддинга контактных площадок. Для определения спектральных плотностей эта процедура неприменима, поскольку она работает только для деэмбеддинга именно частотных параметров. А шумовые параметры так преобразовывать нельзя.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Хорошо. Что у нас дальше?

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Дальше у нас общая дискуссия: обсуждаем работу. Выступить могут все присутствующие в зале.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Кто хочет выступить? Ну давайте я сделаю зачин. Чем важна эта работа на мой взгляд? Потому что при разработке новых технологий всегда возникает проблема создания САПР, для которого вы должны создавать так называемые SPICE модели. Это делается и в кремниевой микроэлектронике, да и, в общем-то, практически во всех областях, где мы делаем какую-то схемотехнику, не важно, на чём. Но! Вы можете создавать сколько угодно теорий, вот как мы считаем сейчас квантовые транзисторы, решаем уравнение Шрёдингера совместно с уравнением Пуассона. Но вот когда мы обращаемся к людям: «Как нам сделать SPICE модели?», они говорят: «Вы сначала сделайте технологию, и только после этого у вас появится SPICE модель». Потому что без наличия того, к чему вы хотите её прикладывать... Ну, например, там есть масса вот этих параметров и ёмкостей, и индуктивности, и так далее, и так далее, кроме самого транзистора, которые вы должны



иметь в руках – вот то, что было в этой работе написано: «библиотека». На основе этой библиотеки, конечно, будут создаваться какие-то САПР, и по мере продвижения технологии, ну пусть даже в миллиметровых волнах – в субмиллиметры вряд ли это ведёт. Там уже сверхпроводниковые всякие устройства. И вот этим работа мне очень... Я считаю, что она очень важна. Спасибо.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Есть ещё желающие? Ну тогда я скажу несколько слов. Я, впрочем, уже на семинаре это заявлял, но для нынешнего протокола. Я оценил просто отвагу автора, который не побоялся взять эту тему. Тема шумов обычно как-то отходит на второй план. Всегда работают с более-менее идеальными структурами, преподносят их параметры, перспективы на будущее. А вот как-то шум, хотя он и является важным параметром для проектирования схемы, отходит на второй план. И вот диссертант не побоялся затронуть вот эту очень важную тему, которая требует действительно очень кропотливого анализа. Я согласен с замечаниями, которые наши сотрудники высказали по поводу обработки экспериментальных данных, использования некоей априорной информации для решения обратных задач – вот с этим я согласен, здесь ещё можно что-то уточнить. И хотелось бы, конечно, чтобы в работе было побольше физики, то есть происхождение шумов физическое было как-то раскрыто. Не просто какие-то сопротивления шумят и прочее, а какая-то физика. Ну что-то в замечаниях было указано: флуктуации плотности – на этот вопрос тоже нужно отвечать хотя бы так, как Виктор Александрович, вот так убедительно. Работа, конечно, нам очень понравилась. Опять же, подчёркиваю, что вот мы немножко занимались шумом и поняли, насколько это всё дело сложное и запутанное.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н., зам. председателя дисс. совета:** Хорошо. Кто-нибудь ещё хочет выступить? Я думаю, на этом мы можем завершить дискуссию ввиду отсутствия желающих. Что у нас дальше по расписанию?

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Дальше диссертанту предоставляется заключительное слово.

**Михайлович С.В.:** Благодарю всех, кто помогал идти мне на этом пути: и коллектив института, и руководителя, и оппонентов, и ведущую организацию, которая меня на семинаре забросала вопросами, после которых я стал лучше понимать, что там происходит. Да, и ещё хотел бы отдельно поблагодарить свою жену.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Дальше мы приступаем к голосованию. Предлагается такой состав счётной комиссии: Богданов Юрий Иванович, Чуев Михаил Александрович и Маишев Юрий Петрович. Голосуем. Все единогласно.

Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета: Тогда счётная комиссия приступает к работе.

**Счетная комиссия приступает к работе.**

**Председатель счетной комиссии Ю.И. Богданов (зачитывает результат голосования):** Протокол номер 107 от 20 декабря. Присутствовало на заседании 14 членов учёного совета, из 20. Роздано бюллетеней 14, не роздано 6, в урне оказалось 14. «За» – 14, «против» – нет, недействительных нет.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Хорошо. Кто за то, чтобы утвердить протокол? Единогласно. И теперь мы должны поздравить.

Аплодисменты в зале.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Так, хорошо. Теперь давайте по заключению. У меня замечания есть. Второй абзац: «Разработаны методы экстракции...», последняя строчка: «Метод поиска экстремума целевой функции» – давайте писать правильно: «минимума». И вот второй результат или третий: «Впервые обнаружено монотонное...» Отсюда не совсем понятно: вы всё время рисовали  $1/F^2$  на сопротивление, а здесь при увеличении произведения... Надо просто отредактировать правильно. И вот всё же к вопросу об ошибках. «Для барьера толщиной 11.2 нанометра». Что это за точность, 2 Ангстрема? Просто 11 нанометров. Следующий абзац. «Впервые показано влияние ёмкости...» – вот это просто какая-то беллетристика. Исправьте: не «показана», а «установлена». А всё остальное годится.

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Хорошо. Есть ещё замечания участников диссертационного совета?

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Нет. Тогда есть предложение взять за основу с теми замечаниями, которые мы пометили, и тогда Владимир Владимирович вместе с диссертантом отработает правильные формулировки. Проголосуем за эту основу, что мы её берём. Кто «за»?

**Вьюрков В.В., к.ф.-м.н., секретарь дисс. совета:** Мы принимаем заключение диссертационного совета с отмеченными исправлениями.

**Лукичёв В.Ф., д.ф.-м.н, зам. председателя дисс. совета:** Ещё раз поздравляем диссертанта. Аплодисменты в зале.

Зам. председателя диссертационного совета,  
член-корр. РАН  
Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.

20.12.2016



Лукичев В.Ф.

Вьюрков В.В.