

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.347.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНОБРНАУКИ РФ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «25» апреля 2025 г. протокол № 1

О присуждении Малину Тимуру Валерьевичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов» по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников», принята к защите «17» февраля 2025 г., протокол № 2, диссертационным советом 24.2.347.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Минобрнауки РФ, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, приказ о создании диссертационного совета № 766/нк от 05.11.2013 г., приказ об утверждении № 561/нк от 03.06.2021 г.

Соискатель Малин Тимур Валерьевич, «09» сентября 1984 года рождения.

В 2006 г. Малин Т.В. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» с присуждением квалификации инженер по специальности «Физическая электроника».

Соискатель Малин Тимур Валерьевич с 2009 года по настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория №18 (аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии GaN гетероструктур на подложках кремния для силовых и СВЧ транзисторов), в должности младшего научного сотрудника.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 4 выдана в 2024 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 18 (аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии GaN гетероструктур на подложках кремния для силовых и СВЧ транзисторов) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – Мансуров Владимир Геннадиевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, лаборатория № 18 (аммиачная молекулярно-лучевая эпитаксия GaN гетероструктур на подложках кремния для силовых и СВЧ транзисторов), старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Жмерик Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург), лаборатория оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью, главный научный сотрудник.

Гейдт Павел Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г. Новосибирск), лаборатория функциональной диагностики низкоразмерных структур для нанoeлектроники аналитического и технологического исследовательского центра физического факультета, заведующий лабораторией.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет управления и радиоэлектроники» (г. Томск), в своем положительном отзыве, подписанном ведущим научным сотрудником лаборатории интегральной оптики и радиофотоники кафедры физической электроники, доктором технических наук, профессором Трояном Павлом Ефимовичем и заместителем директора по науке передовой инженерной школы электронное приборостроение и системы связи им. А.В. Кобзева, кандидатом технических наук, доцентом Кулиничем Иваном Владимировичем, и утвержденном ректором, доктором технических наук, профессором Рулевским Виктором Михайловичем, **указала, что:** диссертация Малина Т.В. представляет собой законченную научное исследование на актуальную научную тему. Основные результаты работы

полностью опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science. Диссертационная работа Малина Тимура Валерьевича «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов» удовлетворяет требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а её автор, Малин Тимур Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них работ, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК – 2, работ, опубликованных в научных изданиях индексируемых базами Scopus / Web of Science – 4, работ в материалах международных и российских конференций – 6.

Личный вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 80%. Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют. Общий объем опубликованных работ 8,5 п.л.

Перечень наиболее значимых работ соискателя, в которых отражено основное содержание диссертационной работы и ее результатов:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности 1.3.11 - Физика полупроводников:

1. **Малин, Т.В.** Влияние степени нитридации сапфира и обогащения алюминием зародышевого слоя на структурные свойства слоев AlN / Т.В. Малин, Д.С. Милахин, В.Г. Мансуров, Ю.Г. Галицын, А.С. Кожухов, В.В. Ратников, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов, К.С. Журавлёв // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – № 6. – С. 643–650. – DOI: 10.21883/FTP.2018.06.45930.8600.

2. **Малин, Т.В.** Рост Al(Ga)N/GaN гетероэпитаксиальных транзисторных структур: от GaN буфера до SiN пассивации поверхности / **Т.В. Малин**, Д.С. Милахин, В.Г. Мансуров, А.С. Кожухов, Д.Ю. Протасов, И.Д. Лошкарёв, К.С. Журавлёв // Автометрия. – 2020. – Т. 56. – № 5. – С. 44–51. DOI: 10.15372/AUT20200500.

Публикациях научных изданий индексируемых базами Scopus / Web of Science:

3. **Malin, T.** Effect of growth temperature of NH₃-MBE grown GaN-on-Si layers on donor concentration and leakage currents / T. Malin, I. Osinnykh, V.

Mansurov, D. Protasov, S. Ponomarev, D. Milakhin, K. Zhuravlev // Journal of Crystal Growth. – 2024. – Vol. 626. – Art. No. 127459. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2023.127459.

4. **Malin, T.** Influence of substrate nitridation conditions and buffer layer structures on the growth of crack-free GaN layers on silicon substrate grown by ammonia assisted MBE / **T. Malin**, Y. Maidebura, V. Mansurov, T. Gavrilova, A. Gutakovskiy, V. Vdovin, S. Ponomarev, I. Loshkarev, I. Osinnykh, V. Volodin, D. Milakhin, K. Zhuravlev // Thin Solid Films. – 2024. – Vol. 791. – Art. No. 140246. DOI: 10.1016/j.tsf.2024.140246.

5. **Milakhin, D.** Tackling residual tensile stress in AlN-on-Si nucleation layers via the controlled Si(111) surface nitridation / D. Milakhin, T. Malin, V. Mansurov, Y. Maidebura, D. Bashkatov, I. Milekhin, S. Goryainov, V. Volodin, I. Loshkarev, V. Vdovin, A. Gutakovskii, S. Ponomarev, K. Zhuravlev // Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 51. – Art. No. 104817. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104817.

6. **Malin, T.** Electrophysical parameter comparison of 2DEG in AlGaIn/GaN heterostructures grown by the NH₃-МПЭ technique on sapphire and silicon substrates / T. Malin, D. Milakhin, V. Mansurov, V. Vdovin, A. Kozhukhov, I. Loshkarev, I. Aleksandrov, D. Protasov, K. Zhuravlev // Journal of Crystal Growth. – 2022. – Vol. 588. – Art. No. 126669. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2022.126669.

На автореферат поступило 5 отзывов (все положительные):

1) **Мизеров Андрей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки "Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический Университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук", лаборатория нанoeлектроники, ведущий научный сотрудник. Замечания: 1) Необходимо отметить, что после прочтения автореферата остаётся непонятным, чем предложенный в работе оптический метод контроля температуры отличается и/или превосходит стандартный для МПЭ контроль температуры с помощью пирометрии. 2) Также в автореферате недостаточно внимания уделяется исследованиям взаимодиффузии атомов металлов третьей группы и кремния при МПЭ синтезе AlN-нитридных соединений на поверхности Si(111);

2) **Енишерлова Кира Львовна**, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар», лаборатория, начальник. Замечания: 1) В автореферате практически не указан диаметр используемых кремниевых подложек. Поэтому непонятно, диссертанту удалось получить слои без трещин на всем диаметре пластины или только на кусочках 8x8 и 7x7 мм. 2) Говорить о сопротивлении

получаемых слоев GaN а также о токах утечки некорректно, поскольку неизвестно сопротивление самой кремневой подложки, которая может влиять на электрические параметры растущих слоев. Как эти параметры измерялись, в диссертации неясно. Обычно для НЕМТ предполагается, что надо использовать в качестве подложек практически беспримесный кремний, при этом полученный зонной плавкой с минимальным содержанием кислорода и углерода, поскольку все примеси могут диффундировать в растущий слой.

3) В работе ничего не сказано о полярности растущей пленки. Инверсионные домены – это локальные дефекты, как выдерживается полярность - рост пленки в Ga-направлении по всей структуре?;

3) **Катков Андрей Викторович**, PhD, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», центр радиофотоники и СВЧ технологий, ведущий инженер. Замечания: В качестве замечания к работе можно отметить отсутствие в автореферате описания методики оценки напряжений в слоях GaN, выращенных на подложках кремния и сапфира по данным фотолюминесценции (ФЛ), не ясным так же остаётся, почему автор не использовал для определения остаточных напряжений использованный в другой части работы метод КРС;

4) **Лобанов Дмитрий Николаевич**, кандидат физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук", старший научный сотрудник. Замечания: 1) В пункте 4 научной новизны утверждается, что «вне зависимости от остаточных упругих напряжений в эпитаксиальных слоях GaN морфология поверхности слоев определяется исключительно ростовыми условиями». Однако, величина остаточных упругих напряжений в процессе эпитаксии GaN и после остывания структуры различна. На режим эпитаксии влияют первые, а из текста реферата следует, что определялись вторые - уже в выращенной и остывшей структуре. После роста слоя GaN его морфология сформировалась и остаточные упругие напряжения, возникшие в результате остывания никак на неё повлиять не могут (за исключением появления трещин). Исследований упругих напряжений в GaN в процессе его роста в автореферате не упоминается. 2) По-видимому, из-за ограничений на объём автореферата часть важных экспериментальных данных, необходимых для использования в практических целях результатами диссертационной работы, опущены. В частности, для Главы 3 не указаны условия формирования зародышевого слоя AlN и буферных слоёв (температуры и потоки). 3)

Немного удивительными выглядят данные о плотности прорастающих дислокаций в структурах полученных автором (плотность дислокации для подложки кремния составила $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, а для подложки сапфира $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$). Эти цифры близки к рекордным даже для структур, полученных методом MOCVD, в то время как данные о подвижности по сравнению с MOCVD структурами заметно уступают, что вызывает сомнения в точности определения плотности прорастающих дислокаций.

5) **Кукушкин Сергей Арсеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория структурных и фазовых превращений в конденсированных средах, заведующий. Замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается близостью решаемых ими научных задач к тематике диссертационной работы Малина Т.В., их широкой известностью своими достижениями в данной области науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Официальный оппонент д.ф.-м.н., Жмерик В.Н. – известный ученый в области синтеза и исследований свойств Аз -нитридных гетероструктур методом МЛЭ, имеет более 150 статей. Официальный оппонент к.ф.-м.н. Гейдт П.В. – ведущий специалист в области исследования структурных свойств полупроводниковых материалов, имеет более 50 публикаций. Ведущая организация, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет управления и радиоэлектроники», широко известна своими достижениями в области разработки и исследования СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов, формируемых на АзВ_5 гетероструктурах, большая часть которых проводится в кооперации с передовыми полупроводниковыми предприятиями РФ, такими как: АО «НПФ «Микран» и АО «НИИПП».

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана технология роста свободных от трещин слоёв GaN, включающая в себя контролируемую низкотемпературную нитридизацию подложек кремния и предложены конструкции буферных слоёв, снижающих растягивающие напряжения в Аз -нитридных ГЭС;

предложен оригинальный способ контроля температуры на поверхности растущей плёнки, основанный на записи и последующей аппроксимации спектров излучения подложки;

продемонстрирована возможность создания AlGaN/GaN гетероструктур с 2DEG на подложках кремния методом NH_3 -MBE;

определены условия роста (температура роста 800°C ; поток аммиака 200 норм. $\text{см}^3/\text{мин}$) слоёв GaN, выращиваемых методом NH_3 -MBE с гладкой морфологией поверхности, удовлетворяющей приборным применениям.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

продемонстрировано, что процесс нитридации кремниевой подложки играет в подавлении процесса образования трещин в слоях GaN, выращиваемых на кремнии, не менее важную роль, чем выбор конструкции буферного слоя;

впервые приведены экспериментальные доказательства, образования аморфной фазы нитрида кремния на гетерогранице AlN/Si при высокотемпературной ($> 800^\circ\text{C}$) нитридации кремниевой подложки одновременно с образованием SiN-(8×8);

определено влияние аморфных островков нитрида кремния на гетерогранице AlN/Si, образующихся при нитридации кремниевой подложки и последующей эпитаксии слоя AlN, на упругие напряжения в слоях AlN-на-Si;

установлено, что вне зависимости от остаточных упругих напряжений в эпитаксиальных слоях GaN морфология поверхности слоёв определяется исключительно ростовыми условиями;

произведена численная оценка влияния материала подложки на плотность прорастающих дислокаций в слоях GaN, благодаря сравнению плотности дислокаций в слоях GaN, выращенных на кремниевых и сапфировых подложках с применением одинаковых конструкций буферных слоёв и одинаковых условий роста (плотность дислокаций для подложки кремния составила $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, а для подложки сапфира $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$);

проведено сравнение параметров 2DEG в AlGaN/GaN ГЭС, выращенных методом NH_3 -MBE на подложках кремния и сапфира с использованием одинаковых конструкций буферных слоёв ГЭС и условий роста (подвижность электронов 2DEG для сапфировой подложки составила $\sim 1600 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$, для кремниевой подложки $\sim 1200 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$).

Значимость полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработанная технология роста свободных от трещин слоёв нитрида галлия с приборно-пригодной морфологией поверхности на кремниевых подложках методом аммиачной МЛЭ и полученные в ходе разработки технологии результаты представляют интерес для промышленных партнёров (Зеленоградский нанотехнологический центр, АО «НПП «Исток» им. Шокина») молодёжной лаборатории, в которой работает соискатель.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использованные методы характеристики структурных свойств твёрдого тела являются современными и оптимальными для решения поставленных задач;

продемонстрирована воспроизводимость результатов полученных в ходе экспериментальных исследований;

установлено соответствие полученных результатов данным независимых источников по тематике роста A_3 -нитридных слоёв методом аммиачной МЛЭ;

представлены данные о важности полученных результатов и описанных технологий для промышленных партнёров лаборатории, в которой работает соискатель.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследования, анализе современного состояния существующих проблем эпитаксиального роста A_3 -нитридных гетероструктур. В ходе работы в ИФП СО РАН соискатель модернизировал установку Riber CBE/MBE-32P, преобразовав её в установку NH_3 -MBE, а также произвёл перенос технологии роста нитридных слоёв на введённую им в работу установку NH_3 -MBE Riber Compact-21. Автором предложен и реализован оригинальный метод контроля температуры на поверхности растущей плёнки. Эпитаксиальный рост всех исследуемых в рамках диссертации образцов осуществлялся соискателем. Основные результаты диссертации были получены при непосредственном участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Замечание Величко Александра Андреевича «В цели работы у Вас написано разработка физических основ эпитаксии, однако физические основы МЛЭ технологии уже давно разработаны, точнее было бы сформулировать цель написав – разработка технологии эпитаксиального роста ГЭС». Соискатель согласился с данной ремаркой. Соискатель Малин Т.В. аргументировано ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы. Приведем основные вопросы и ответы соискателя: Вопрос от Валерия Павловича Драгунова: «На слайде 12 у Вас приведены электрофизические параметры 2DEG измеренные на ГЭС, выращенных на подложках сапфира и кремния. Начиная с каких значений подвижности 2DEG Вы считаете данный тип ГЭС хорошими в плане подвижности электронов?». Ответ соискателя: «Теоретический предел подвижности, связанный с рассеянием двумерных электронов на фононах составляет около $2000 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$, начиная со значения подвижности $1500 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$ ГЭС мы считаем хорошими». Вопрос от Величко Александра Андреевича: «Знакомы ли Вы с работами, в которых говорится о

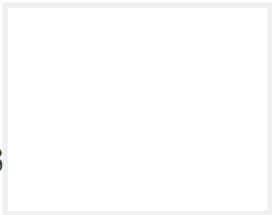
формировании на поверхности Si(111) зародышевого слоя SiC, значительно улучшающего структурные свойства выращиваемых в дальнейшем слоёв Аз-нитридов?». Ответ соискателя: «Да с работами Сергея Арсеньевича Кукушкина по формированию слоёв SiC на поверхности кремния я знаком. В вводной части я упоминал про технологический приём основанный на карбидизации кремниевой поверхности перед ростом, используемый для согласования кремния и начального слоя AlN. Наша группа подобные исследования не проводила. Карбидизация поверхности кремния требует сложной модернизации установки МЛЭ и её доукомплектацию источником углерода». Вопрос Александра Германовича Милёхина: «На слайде 21 у вас в подписи к рисунку присутствует g-SiN, т.е. графеноподобный нитрид кремния, поясните пожалуйста его роль?». Ответ соискателя: «Действительно кристаллическая фаза SiN характеризующаяся формированием на поверхности Si реконструкции (8×8) является графеноподобной и необходима для зарождения вюрцитного зародышевого слоя AlN. В работе было установлено, что наряду с формированием кристаллической фазы SiN на поверхности кремния образуются островки аморфного SiN, однако при температуре нитридизации 700 °С поверхность покрытая этими островками составляет по данным ТЕМ всего около 3%, при повышении же температуры нитридизации до 900 °С доля поверхности покрытой аморфной фазой SiN возрастает до 20%». Вопрос из зала: «Были ли реализованы транзисторы на Ваших ГЭС? Если да, то какие мощностные характеристики были достигнуты?». Ответ соискателя: «Гетероструктуры с 2DEG, выращенные на подложках кремния, сейчас находятся у промышленного партнера нашей лаборатории - ЗНТЦ, пока ВАХ и характеристик транзистора для них не получено. Тестовые транзисторы ранее были сформированы на подложках сапфира и карбида кремния. Типичные параметры по усилению при работе на 10 ГГц составляют 3 Вт на 1 мм затвора».

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные результаты, имеющие существенное значение для развития технологии роста Аз-нитридных гетероструктур методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии и практики синтеза гетероструктур, используемых при создании нитрид галлиевых транзисторов с высокой подвижностью электронов. Диссертация соответствует пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 25 апреля 2025 г. диссертационный совет принял решение за разработку технологии роста свободных от трещин слоёв нитрида галлия, выращиваемых на кремниевых подложках, имеющую существенное значение для развития нитрид галлиевой электронно-компонентной базы, присудить Малину Тимуру Валерьевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

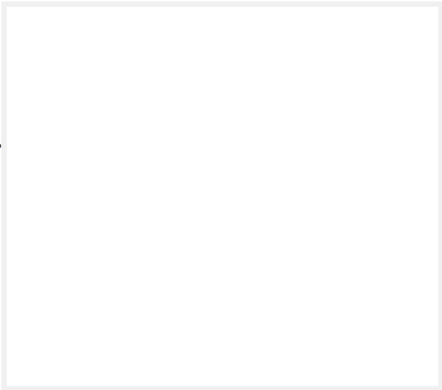
При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введенных на разовую защиту – нет, проголосовали: «за» – 13, «против» – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.2.3



Яков Симхонович Гринберг

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.



Дмитрий Иванович

«25» апреля 2025 г.