

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02  
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ  
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 8.10.2020 г. № 11

О присуждении Нечаеву Дмитрию Валерьевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур (Al,Ga)N/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ( $\lambda < 300$  нм)»** по специальности 01.04.10 – физика полупроводников принята к защите 18 июня 2020 г., протокол №7(II), диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом ВрИО Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе №. 75.

Соискатель Нечаев Дмитрий Валерьевич, 1987 года рождения, в 2011 году завершил обучение в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по специальности «приборы и системы лучевой энергетики» и поступил в аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе, год окончания – 2015, в настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

Научный руководитель — Жмерик Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. **Мармалюк Александр Анатольевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой квантовой электроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), начальник научно-технического центра акционерного общества «Научно-исследовательский институт “Полюс” имени М.Ф.Стельмаха» (117342, г. Москва, ул. Введенского 3, корп.1);
2. **Сутурин Сергей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии твердого тела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26) –

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** - Институт физики микроструктур (ИФМ) Российской академии наук (603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, Академическая ул., д.7) - в своем положительном заключении, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником отдела физики полупроводников Лобановым Дмитрием Николаевичем и утвержденном и.о. директора ИФМ РАН, доктором физико-математических наук Гавриленко Владимиром Изяславовичем, отметил, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и вносит значительный вклад в развитие ультрафиолетовой оптоэлектроники. В отзыве содержится 5 замечаний:

- 1) В практической значимости работы (стр. 8) утверждается, что для

гетероструктур с квантовыми ямами  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  на сапфировых подложках «Пороговые характеристики являются одними из минимальных, полученных на гетероподложках любой эпитаксиальной технологией». Однако при сравнении с данными, приведёнными в Главе 1 (литературный обзор) на стр. 32 величины порогов отличаются почти на порядок для  $\lambda \sim 260$  нм (480 кВт/см<sup>2</sup> в диссертации и 61 кВт/см<sup>2</sup> в литературе).

2) В разделе 4.4 «Ограничение распространения прорастающих дислокаций» Главы 4 демонстрируется эффективность введения 3D вставок GaN для фильтрации дислокаций в AlN слое. Несмотря на достаточно подробное рассмотрение процессов релаксации упругих напряжений опущено обсуждение оптимальности выбираемых толщин и периодичности этих 3D вставок для снижения плотности прорастающих дислокаций.

3) В Главе 5 пункт 5.2 «P-i-n фотодиоды на основе AlGaIn:Mg» никак не обсуждается выбранный дизайн фотодиода, для которого использовалось формирование p-области с поляризационным легированием. Также в данной части диссертации нет сравнения полученных характеристик фотодиодов с достигнутым мировым уровнем.

4) В Главе 5 пункт 5.6 «Источники спонтанного УФ излучения с электронной накачкой» к сожалению не приводятся теоретические оценки эффективности преобразования энергии электронного пучка в энергию УФ излучения, хотя процесс этот сложный и многостадийный. Поэтому сложно оценить достигнутые параметры источников, обсуждаемых в этом пункте. Приведённые зависимости параметров УФ излучения от тока и энергии пучка электронов также слабо комментируются.

5) К недостаткам диссертации можно отнести отсутствие в Главе 5 схем измерения оптических характеристик структур, что затрудняет оценку достигнутых в диссертации параметров приборных структур.

В отзыве указано, что диссертационная работа Д.В. Нечаева «Плазменно-активированная молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур  $(\text{Al,Ga})\text{N}/\text{c-Al}_2\text{O}_3$  для оптоэлектронных приборов среднего ультрафиолетового диапазона ( $\lambda < 300$  нм)» представляет собой законченное научное исследование по актуальным проблемам и задачам в области технологии и физике полупроводниковых

приборов на основе нитридов третьей группы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, соответствующей всем требованиям, предъявляемым к оформлению диссертационной работы на соискание степени кандидата физико-математических наук в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Представленные в отзыве замечания нисколько не снижают значимость диссертационной работы, а ее автор – Нечаев Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливался сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания были даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 6 отзывов, все отзывы **положительные**:

- 1) Отзыв кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории наноэлектроники «СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова» (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, лит. А) **Мизерова Андрея Михайловича**, отзыв положительный, без замечаний.
- 2) Отзыв кандидата физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника центра «Полупроводниковые технологии и лазеры» Института физики НАН Беларуси (220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 68-2) **Павловского Вячеслава Николаевича**, отзыв положительный, 1 замечание:
  - а) По автореферату работы можно сделать несколько замечаний, касающихся ошибок оформления, которые не снижают общей положительной оценки.
- 3) Отзыв доктора физико-математических наук, профессора кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5) **Зубкова Василия Ивановича**, отзыв положительный содержит 2 замечания:
  - а) На с.15 автореферата сообщается, что «разработаны электро-оптические

преобразователи на основе фотокатодов с отрицательным электронным сродством (ОЭС), работающие в солнечно-слепой области в диапазоне от 226 до 280 нм». Как достигалось состояние ОЭС – классически нанесением монослоя оксида цезия или с использованием собственных свойств поверхности гетероструктуры?

б) В автореферате недостаточно подробно описан метод эпитаксии с повышенной миграцией адатомов с точки зрения механизма, приводящего к формированию крупнозернистой морфологии поверхности зародышевых слоев AlN.

4) Отзыв кандидата физико-математических наук, научного сотрудника Института полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН (630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 13) **Александрова Ивана Анатольевича**, отзыв положительный, содержит 2 замечания:

а) В автореферате и тексте диссертации недостаточно подробно описаны условия нитридации подложек сапфира и механизмы формирования полярности выращиваемых эпитаксиальных структур.

б) Из текста не ясно, каким образом реализована синхронизация измерений  $\alpha$ -параметра решетки с вращением образца, что важно для истинного *in situ* контроля.

5) Отзыв доктора физико-математических наук, заместителя директора по научной работе НТЦ микроэлектроники РАН (194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26) **Цацульникова Андрея Федоровича**, отзыв положительный, содержит 1 замечание:

а) В ряде иллюстраций автореферата характеристики полученных гетероструктур указаны в относительных единицах, что несколько затрудняет их сопоставление с мировыми результатами.

б) Отзыв доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории спектроскопии твердого тела Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе (194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26) **Давыдова Валерия Юрьевича**, отзыв положительный, без замечаний.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен большой комплекс фундаментальных и технологических задач, являющихся актуальными для современной физики полупроводников и ультрафиолетовой оптоэлектроники; в частности:

- 1) В технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота разработаны импульсные методы роста бинарных и тройных соединений (Al,Ga)N, обеспечивающие атомарно-гладкую морфологию поверхности в условиях сильного обогащения атомами III.
- 2) Продемонстрировано существенное преимущество эпитаксии с повышенной миграцией адатомов для роста зародышевых слоев AlN/*c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обеспечивающей наименьшую генерацию прорастающих дислокаций по сравнению с другими методами в широком диапазоне параметров роста.
- 3) Развита оригинальный метод фильтрации прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN/*c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> путем введения множественных тонких 3D вставок слоев GaN, обеспечивающих эффективный наклон прорастающих дислокаций с последующим усилением их взаимодействия между собой.
- 4) Исследованы и развиты методы поляризационного *p*-легирования слоев AlGaN:Mg и субмонослойной дискретной эпитаксии, успешно применяемые для роста активных областей ультрафиолетовых фотоприемных и светоизлучающих приборов в технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота.

**Практическая значимость** результатов состоит в следующем:

- 1) Разработан комплекс средств статистического анализа картин дифракции отраженных быстрых электронов, позволяющий с учетом большого объема принимаемой информации прецизионно *in situ* контролировать *a*-постоянную решетку растущего слоя.
- 2) С помощью технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота получены опытные образцы солнечно-слепых фотодетекторов среднего ультрафиолетового диапазона с демонстрацией

мирового рекорда фоточувствительности среди фотокатодов с ОЭС в 27 мА/Вт на длине волны 226 нм (на основе соединений III-N).

- 3) Метод субмонослойной дискретной эпитаксии позволяет формировать квантовые ямы AlGaN с внутренней структурой в виде набора монослойных квантовых дисков GaN, на основе которых были созданы гетроструктуры для получения стимулированного излучения в диапазоне длин волн от 258 до 290 нм с пороговыми плотностями мощности от 480 до 150 кВт/см<sup>2</sup>, соответственно.
- 4) Монослойные квантовые ямы GaN/AlN с резкими гетерограницами и подавленным квантово-размерным эффектом Штарка были использованы для создания мощного источника спонтанного ультрафиолетового излучения (импульс: 150 мВт; непрерывная работа: 28 мВт) на длине волны 235 нм с электронной накачкой.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим фундаментальное значение.

**Достоверность и надёжность результатов.** Основные положения и выводы диссертации экспериментально и теоретически обоснованы. Все полученные результаты прошли апробацию различными независимыми современными диагностическими средствами. Они многократно обсуждались на различных российских и международных конференциях.

**Апробация работы.** Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались на 8, 9, 10, 11 Всероссийской конференции Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы (СПб. 2011, М. 2013, СПб. 2015, М. 2017); 17, 18 Международной конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Япония 2012, США 2014); 12 Международной конференции по нитридным полупроводникам (Франция, 2017); 18 Международном симпозиуме «Нанозифика и наноэлектроника» (Ниж. Новгород 2014); 11 Российской конференции по физике полупроводников (СПб, 2013); 17 Международной конференции по росту кристаллов и эпитаксии (Польша 2013); 17, 19 Европейской конференции по

молекулярно пучковой эпитаксии (Финляндия 2013, СПб. 2017); 4 Международном симпозиуме по росту AlN-нитридов (СПб. 2012); Международной зимней школе по физике полупроводников (Зеленогорск 2011); Конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада "ФизикА.СПб" (СПб 2010, 2017); Осеннем собрании европейского общества исследования материалов (Польша, 2017); 19 Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (СПб. 2017).

В ходе научной деятельности было опубликовано несколько десятков статей в рецензируемых журналах, 12 из которых составляют содержание диссертационной работы. Наиболее важными являются следующие (в скобках указан личный вклад автора):

- 1) Д.В. Нечаев, В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, П.С. Копьев, С.В. Иванов, Контроль упругих напряжений в гетероструктурах III-N методом дифракции отраженных быстрых электронов в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии // ПЖТФ 38(9) 96 (2012). (Развиты алгоритмы анализа картин дифракции отраженных быстрых электронов. Апробация алгоритмов во время роста слоев GaN/AlN, а также сверхрешеточной гетероструктуры {GaN/AlN}/AlN. Подготовка статьи)
- 2) D.V. Nechaev, P.N. Brunkov, S.I. Troshkov, V.N. Jmerik, S.V. Ivanov, Pulsed growth techniques in plasma-assisted molecular beam epitaxy of  $Al_xGa_{1-x}N$  layers with medium Al content ( $x= 0.4-0.6$ ) // J.Crys.Growth 425, 9 (2015). (Разработаны импульсные методы роста тройных соединений AlGaN с атомарно-гладкой морфологией поверхности в сильных Ga-обогащенных ростовых условиях, подготовка статьи)
- 3) D.V. Nechaev, P.A. Aseev, V.N. Jmerik, P.N. Brunkov, Ya.V. Kuznetsova, A.A. Sitnikova, V.V. Ratnikov, S.V. Ivanov, Control of threading dislocation density at the initial growth stage of AlN on c-sapphire in plasma-assisted MBE // J.Crys.Growth 378, 319 (2013). (Исследования механизмов роста зародышевых слоев AlN на подложках с-сапфира с целью подавления генерации прорастающих дислокаций, подготовка статьи)
- 4) S.V. Ivanov, D.V. Nechaev, A.A. Sitnikova, V.V. Ratnikov, M.A. Yagovkina,



- N.V. Rzhetskii, E.V. Lutsenko, V.N. Jmerik, Plasma-assisted molecular beam epitaxy of Al(Ga)N layers and quantum well structures for optically pumped mid-UV lasers on c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Semicond. Sci. Tech.* 29, 084008 (2014). (Разработка методов фильтрации прорастающих дислокаций в буферных слоях AlN за счет введения множественных вставок слоев GaN. Демонстрация стимулированного излучения из квантовых ям AlGaN в диапазоне от 258 до 289 нм. Подготовка статьи.)
- 5) Н.В. Кузнецова, Д.В. Нечаев, Н.М. Шмидт, С.Ю. Карпов, Н.В. Ржеуцкий, В.Е. Земляков, В.Х. Кайбышев, Д.Ю. Казанцев, С.И. Трошков, В.И. Егоркин, Б.Я. Бер, Е.В. Луценко, С.В. Иванов, В.Н. Жмерик, Солнечно-слепые Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x>0.45) p-i-n-диоды с поляризационно-легированным p-эмиттером // *ПЖТФ* 42(12) 57-63 (2016). (Развитие поляризационного p-легирования слоев AlGaN:Mg, определение минимально необходимого градиента состава, подготовка статьи.)
- 6) D.V. Nechaev, E.A. Evropeytsev, A.N. Semenov, S.I. Troshkov, V.I. Egorkin, V.E. Zemlyakov, M.V. Rzhetski, E.V. Lutsenko, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, V.N. Jmerik. Ultraviolet light-emitting diodes and photodiodes grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy // *J. Phys.: Conf. Ser.* 993, 012037 (2018). (Демонстрация опытного образца светодиода среднего ультрафиолетового диапазона, изготовленного с применением ранее развитых технологических методик. Подготовка статьи к публикации.)
- 7) V.N. Jmerik, D.V. Nechaev, A.A. Toropov, E.A. Evropeytsev, V.I. Kozlovsky, V.P. Martovitsky, S. Rouvimov and S.V. Ivanov, High-efficiency electron-beam-pumped sub-240-nm ultraviolet emitters based on ultra-thin GaN/AlN multiple quantum wells grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy on c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Appl. Phys. Exp.* 11, 091003 (2018). (Исследование метода субмонослойной дискретной эпитаксии для формирования квантовых ям GaN монослойной толщины в буферных слоях AlN для гетероструктур с электронной накачкой. Подготовка статьи к публикации)

На заседании 8 октября 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Нечаеву Д.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационного совета в количестве 23 человек, из них 16 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Нечаеву Дмитрию Валерьевичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 23.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета,  
акад. РАН,

д. ф.-м. н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета,

д. ф.-м. н.

Сурис Роберт Арнольдович

Сорокин Лев Михайлович

8 октября 2020 г.