

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 29.09.2022 № 7

О присуждении Бушуйкину Павлу Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Оптические и фотоэлектрические свойства нитрида индия» по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств – принята к защите 30 июня 2022 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Бушуйкин Павел Александрович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Физика», освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН (срок обучения 01.09.2014 – 31.08.2018), работает в должности электроника 1 категории лаборатории физики полупроводниковых

лазеров на горячих носителях заряда Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Андреев Борис Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. Журавлёв Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, и.о. заведующего лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений  $A^3B^5$  Института физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук
2. Цырлин Георгий Эрнстович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией эпитаксиальных нанотехнологий Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Фирсовым Дмитрием Анатольевичем, доктором физико-математических наук, профессором Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», и утвержденном Рудским Андреем Ивановичем, доктором технических наук, ректором СПбПУ, указала, что

«В работе развит ряд методов диагностики эпитаксиальных слоев. Так определение красной границы фотопроводимости и поглощения позволяет бесконтактным образом определять концентрацию свободных носителей заряда. Сравнение спектров поглощения и фотопроводимости со спектрами люминесценции позволяет оценить однородность эпитаксиальных слоев. Анализ спектров люминесценции позволяет контролировать формирование локализованных примесных состояний. Определены факторы, препятствующие возникновению стимулированного излучения в слоях InN: неоднородность эпитаксиальных слоев, наличие включений металлической фазы индия, высокая концентрация глубоких примесно-дефектных центров. При исследовании стимулированного излучения определен коэффициент усиления на длине волны около 1,65 мкм, превышающий  $200 \text{ см}^{-1}$  в наиболее чистых образцах при температуре 78 К. Пороговая мощность для лучших образцов составила  $400 \text{ Вт/см}^2$  при температуре решетки 8 К и  $6 \text{ кВт/см}^2$  при 78 К.». В конце отзыва делается заключение, что диссертация Бушуйкина Павла Александровича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (п. 9 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях постановления Правительства РФ)), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 5 работ, все из них в рецензируемых научных журналах:

1. Лобанов Д. Н. и др. Особенности роста InN методом МПЭ с плазменной активацией азота при различных соотношениях потоков элементов III и V групп / Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Андреев Б. А., Бушуйкин П. А., Юнин П.

- А., Скороходов Е. В., Красильникова Л. В. //Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – №. 2. – С. 264-268.
2. Бушуйкин, П.А. Особенности спектров фотовозбуждения эпитаксиальных слоев InN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота / Бушуйкин П.А., Новиков А.В., Андреев Б.А., Лобанов Д.Н., Юнин П.А., Скороходов Е.В., Красильникова Л.В., Демидов Е.В., Савченко Г.М., Давыдов В.Ю. //Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – №. 12. – С. 1594-1598.
  3. Bushuykin, P.A. New photoelectrical properties of InN: Interband spectra and fast kinetics of positive and negative photoconductivity of InN / Bushuykin P.A., Andreev B.A., Davydov V.Yu., Lobanov D.N., Kuritsyn D.I., Yablonskiy A.N., Averkiev N.S., Savchenko G.M., Krasilnik Z.F. //Journal of Applied Physics. – 2018. – Т. 123. – №. 19. – С. 195701.
  4. Andreev, B.A. Towards the indium nitride laser: obtaining infrared stimulated emission from planar monocrystalline InN structures / Andreev B.A., Kudryavtsev K.E., Yablonskiy A.N., Lobanov D.N., Bushuykin P.A., Krasilnikova L.V., Skorokhodov E.V., Yunin P.A., Novikov A.V., Davydov V.Yu., Krasilnik Z.F. //Scientific Reports. – 2018. – Т. 8. – С. 9454.
  5. Андреев Б. А. и др. Излучательные свойства сильно легированных эпитаксиальных слоев нитрида индия / Андреев Б. А., Лобанов Д. Н., Красильникова Л. В., Бушуйкин П. А., Яблонский А. Н., Новиков А. В., Давыдов В.Ю., Юнин П.А., Калинин М.И., Скороходов Е.В., Красильник З. Ф. //Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53. – №. 10. – С. 1395-1400.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**все положительные**):

- 1) Тимошенко Виктор Юрьевич, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости

физического факультета МГУ им. М.И.Ломоносова в отзыве на автореферат отмечает, что в работе впервые получено стимулированное излучение в диапазоне длин волн  $\lambda=1.66-1.89$  мкм на межзонных переходах в планарных волноводных гетероструктурах с активным слоем InN при температурах от 8 до 215 К, а также в спектрах фотолюминесценции эпитаксиальных слоев InN обнаружена новая полоса эмиссии, связанная с излучательными переходами свободных электронов в локализованное акцепторное состояние.

2) Жмерик Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФТИ им. Иоффе дает положительную оценку на автореферат диссертации, в которой «особо следует отметить подробные и оригинальные исследования временных характеристик фотоотклика слоев InN, которые демонстрируют различный знак в зависимости от концентрации электронов в слоях». **Замечания:** 1) В тексте автореферата наряду с использованием общеизвестного параметра «ширина запрещенной зоны», несколько раз используется введенный автором параметр «эффективная ширина запрещенной зоны». Требуется пояснить смысл этого нововведения. 2) На странице 6 т.н. «эффективная» ширина запрещенной зоны на основании измерений спектров фотопроводимости записывается в виде  $E_g(n)$ , что свидетельствует о ее изменении в диапазоне 0.6-0.65 эВ в зависимости лишь от концентрации электронов. Однако на странице 11 приводятся данные, полученные также на основании спектров фотопроводимости, которые свидетельствуют и о температурной зависимости ширины запрещенной зоны для невырожденного InN в 0.62-0.67 эВ. Однако, в первом положении работы, формулирующем результаты исследований этого параметра, приводится единственное значение ширины запрещенной зоны 0.61 эВ для «прямозонного вырожденного полупроводника при концентрации носителей заряда порядка  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>». По мнению автора отзыва, ошибочно называть вырожденным материал с данной концентрацией носителей заряда, и, кроме того, зависимости ширины запрещенной зоны InN от концентрации электронов и температуры измерений должны быть изложены в данном положении более

подробно и тщательно. 3) И, наконец, во втором и третьем положениях диссертации практически не отражены зависимости знака фотоотклика и пороговой мощности стимулированного излучения от степени вырождения слоев InN, которые достаточно подробно анализируются в тексте работы.

3) Ежевский Александр Александрович, профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники физического факультета ННГУ им. Лобачевского в своем отзыве на автореферат диссертации подчеркивает, что к наиболее значимым результатам работы относятся спектры и кинетика фотопроводимости, наблюдение и интерпретация наносекундной отрицательной фотопроводимости, получение стимулированного излучения из планарных структур с достаточно низким порогом возбуждения.

**Замечания:** Существенных замечаний нет. В разделе «Научная новизна и практическая значимость работы» на странице 5 автореферата имеется неудачная формулировка: «Предложен механизм формирования отрицательной фотопроводимости, связанный с уменьшением *подвижности электронов на дополнительных рассеивающих центрах*, возникающих при фотовозбуждении.»

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных изучению физики полупроводников (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Журавлев К.С. – более 10 публикаций, оппонент Цырлин Г.Э. – более 10 публикации, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

**Изучены** оптические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев вырожденного n-InN при различных температурах методами спектроскопии поглощения, фотолюминесценции и фотопроводимости, а также с помощью анализа кинетики фотоотклика.

**Подтверждено**, что спектры фотопроводимости определяются прямыми межзонными переходами в вырожденном полупроводнике с шириной запрещенной зоны равной 0.67 и 0.61 эВ при температурах жидкого гелия и комнатной, соответственно. **Обнаружена** низкоэнергетическая полоса переходов в спектрах спонтанной ФЛ, которая может быть отнесена к рекомбинационным излучательным переходам свободных электронов в локализованное состояние акцептора с энергией ~100 мэВ относительно края валентной зоны.

**Продемонстрирована** быстрая положительная и отрицательная фотопроводимость в нитриде индия с характерными временами от 7 нс. **Доказано**, что абсолютный отрицательный наносекундный фотоотклик в этом материале определяется уменьшением подвижности электронов вследствие их рассеяния на положительно заряженных центрах, возникающих при захвате генерируемых дырок нейтральными центрами рекомбинации.

**Зарегистрировано** стимулированное излучение с длиной волн 1.6-1.9 мкм в монокристаллических эпитаксиальных слоях вырожденного нитрида индия в интервале температур от 6 до 215К при импульсном оптическом возбуждении. **Определено**, что неоднородность эпитаксиальных слоев, наличие включений металлической фазы индия и высокая концентрация примесно-дефектных центров препятствуют возникновению стимулированного излучения. **Сделана** экспериментальная оценка коэффициента усиления для эпитаксиального слоя InN, которая для наименее легированных образцов превышает  $200 \text{ см}^{-1}$ .

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:**

– показано, что при росте эпитаксиальных слоев в металлобогатых условиях возможно появление низкоэнергетической полосы фотолюминесценции, связанной с переходами в акцепторное состояние и препятствующей возникновению стимулированного излучения

– предложен метод определения концентрации свободных носителей в нитриде индия по спектрам фотопроводимости

– полученные результаты исследования влияния концентрации свободных носителей и структурных особенностей в эпитаксиальных слоях InN на возникновение стимулированной эмиссии могут быть использованы для создания на основе этого материала планарных лазерных гетероструктур, работающих в ближнем ИК диапазоне.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

– достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных в ИФМ РАН и других лабораториях методик для их получения

– полученные экспериментальные результаты сопоставляются с расчетами и литературными данными.

**Личный вклад соискателя** состоит в измерении спектров и кинетики фотопроводимости, спектров фотолюминесценции и поглощения, а также в их обработке и интерпретации и развитии методик диагностики гетероструктур с активным слоем нитрида индия. Создание ключевых элементов экспериментальных установок для измерения кинетики фотопроводимости производилось лично автором. Подготовка основных публикаций по выполненной работе проводилась при непосредственном участии соискателя. Вклад автора в исследования стимулированной эмиссии в InN состоял в характеристике структур, в обсуждении и объяснении результатов экспериментов.

**В ходе защиты диссертации** официальным оппонентом К.С. Журавлевым было высказано следующее замечание: «В работе отсутствует обсуждение зависимости ширины полосы стимулированной эмиссии от концентрации равновесных электронов. Каков вклад непрямых в пространстве квазиимпульсов переходов в спектр стимулированной эмиссии? Требуется пояснение различия наклона в зависимости интенсивности стимулированной эмиссии от плотности мощности накачки для образцов с различной концентрацией равновесных электронов.»

Соискатель Бушуйкин П.А в своём ответе согласился с замечанием об отсутствии обсуждения уширения ширины полосы стимулированной эмиссии, пояснив, что не проводились эксперименты, с набором образцов и условий, позволяющих выделить в наблюдаемой зависимости только вклад концентрационного уширения. Для ответа на замечание о характере переходов в режиме стимулированной эмиссии соискатель сопоставил положение линий стимулированного излучения и спектра люминесценции. Показал, что линия



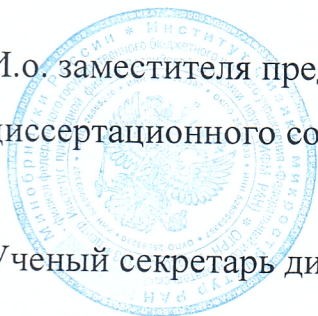
стимулированного излучения, которая совпадает с максимумом в спектре усиления, отслеживает экстремум в спектре спонтанной эмиссии, в котором при высоких уровнях накачки доминируют прямые излучательные переходы. Соискатель сообщил, что зависимость интенсивности стимулированной эмиссии от плотности мощности накачки определяется соотношением усиления и потерь в активных слоях нитрида индия.

На заседании 29.09.2022 г. диссертационный совет, за решение научной задачи исследования спектров и кинетики фотопроводимости, реализации стимулированного излучения в гетероструктурах с активным слоем нитрида индия, имеющей важное значение для развития оптоэлектроники в инфракрасном диапазоне спектра, принял решение присудить Бушуйкину П.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.2. — электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против 0.

И.о. заместителя председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета



Гавриленко В.И.

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 29.09.2022 г.