

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 13.06.2024 № 4 _____

О присуждении Европейцеву Евгению Андреевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Кинетика экситонной фотолюминесценции в квантовых ямах в системе (Al,Ga,In)N» по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» принята к защите «04» апреля 2024 г., протокол № 3, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки 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 директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Европейцев Евгений Андреевич, 1988 года рождения, в 2011 г. окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского по направлению «Нанотехнология». В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории «Оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью» Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Торопов Алексей Акимович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник – заведующий лабораторией квантовой фотоники ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Научный консультант – Шубина Татьяна Васильевна

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. **Шалыгин Вадим Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 4 замечания:

- 1) Комментируя кривую затухания ФЛ монослойной КЯ на рис. 3.2(с), автор утверждает, что основной вклад в ФЛ дает медленная компонента с постоянной времени более 10 нс, а быстрая компонента имеет постоянную

времени менее 150 пс и дает лишь трёхпроцентный вклад. К сожалению, автор не демонстрирует явно разложение кривой затухания на две экспоненты и результирующую подгоночную кривую. Более того, экспериментальная кривая затухания построена не в полулогарифмическом масштабе, а в линейном. Это не позволяет судить о том, насколько в данном случае адекватно описанное автором биэкспоненциальное разложение.

- 2) Сложную кинетику ФЛ монослойной КЯ при температурах выше 150 К (рис. 3.5) автор связывает с увеличивающимся вкладом безызлучательной рекомбинации. Из текста на стр. 63 не ясно, о каком механизме безызлучательной рекомбинации идет речь. Не понятно также, чем обусловлен резкий рост постоянной времени быстрой компоненты кривой затухания в интервале температур от 70 до 140 К (рис. 3.5(b)).
- 3) На панелях рисунка 1.3 с анизотропной валентной зоной не указаны кристаллографические направления.
- 4) Вместо термина «энергия фотонов» в тексте диссертации несколько раз ошибочно используется термин «энергия излучения» (стр. 59–70).

В отзыве отмечено, что сделанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую высокую оценку работы

2. Цацульников Андрей Фёдорович, доктор физико-математических наук, заместитель директора НТИЦ Микроэлектроники РАН, дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 4 замечания:

- 1) К методологическим недостаткам можно отнести отсутствие информации по плотности возбуждения при измерении ФЛ по практически всем приведенным экспериментальным данным, что не позволяет оценить плотность возбужденных носителей в КЯ, и, соответственно, вклад в ФЛ механизмов рекомбинации более высоких степеней, например, Оже-рекомбинации.
- 2) Эксперименты проводились при подбарьерном возбуждении, однако, спектры поглощения (или возбуждения) структур не были сняты и, таким образом, не понятно, происходит ли поглощение носителей только в КЯ или также в матрице AlN. Очевидно, что подобные измерения спектров поглощения на образцах с одиночной КЯ сильно затруднены, но помимо образцов с одиночными КЯ была выращена структура с множественными КЯ $100 \times \{\text{GaN}/\text{AlN}\}$, на которой такие исследования возможны.
- 3) С ростом температуры выброс носителей из слабо локализованных состояний (а возможно и транспорт носителей из состояний матрицы) может приводить к их захвату в состояния с большей энергией локализации, и, следовательно, к увеличению эффективности излучения и S-образной температурной зависимости максимума излучения. Таким образом, возникает вопрос, насколько сильно транспорт носителей влияет на температурное поведение ФЛ? Кроме того, для подтверждения вывода о роли именно рекомбинации через состояния темных экситонов было бы интересно провести исследования ФЛ тонких КЯ GaN/AlN в магнитном поле.

- 4) В пятой главе автор на основе сопоставления структурных и излучательных свойств микроколонок с КЯ InGaN/GaN делает вывод, что УФ, синяя и зелёная полосы ФЛ происходят из неполярных, полуполярных и полярных КЯ, соответственно. Разница в спектральном положении синей и УФ полос излучения объясняется квантоворазмерным эффектом Штарка, учитывая одинаковую толщину полуполярных и неполярных КЯ. Однако, вхождение индия в эпитаксиальные слои зависит как от полярности поверхности, так и от оптимальных технологических условий роста InGaN, которые могут отличаться для поверхностей различной полярности. Таким образом, содержание индия и толщины КЯ в полярной, полуполярной и неполярной КЯ может быть различным. Проводились ли оценки таких эффектов в данной работе?

В отзыве указано, что отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают высокий уровень диссертационной работы.

Ведущая организация Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН) предоставила положительное заключение на диссертацию. Заключение подготовлено старшим научным сотрудником ИФМ РАН, к. ф.-м. н., Лобановым Дмитрием Николаевичем и директором ИФМ РАН, д. ф.-м. н., Новиковым Алексеем Витальевичем, и утверждено директором Института прикладной физики РАН, д. ф.-м. н., академиком РАН Денисовым Григорием Геннадьевичем. В заключении указано, что содержание диссертации отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников», а соискатель Европейцев Е.А. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

В отзыве содержится 8 вопросов и замечаний:

- 1) В первом пункте научной новизны диссертации указывается, что «..КЯ GaN/AlN... наибольший внутренний квантовый выход ФЛ при комнатной температуре – 75% - наблюдается на длине волны ~ 235-240 нм в ямах толщиной 1-1.5 МС.» Однако, в тексте диссертации величина 75% не возникает. На рисунке 3.7а показана зависимость внутреннего квантового выхода для КЯ GaN/AlN разной толщины. К сожалению, расчёт этой величины в тексте диссертации не приведён, хотя подробно рассматривается неприменимость определения внутреннего квантового выхода по соотношению интенсивностей ФЛ при комнатной температуре и низких температурах (формулы 1.17) для сверхтонких ям GaN/AlN.
- 2) В Главе 3 для расчёта эффективного времени излучения используется равновесное («Больцмановское») распределение экситонов по уровням (формула 3.9). Однако в диссертации не обсуждается обоснованность использования данного приближения в реализуемых в эксперименте неравновесных условиях.
- 3) В Главе 3 для описания безызлучательной рекомбинации феноменологически вводится энергетический уровень (стр. 67), единственным параметром которого является его энергетическое положение. Однако для модельных

- расчётов кроме значения энергии уровня необходимо также знать скорость (или время) безызлучательной рекомбинации, которая в работе не приведена.
- 4) Уравнения, описывающие экспериментальные данные на рис. 3.11, содержат значительное число подгоночных параметров. Насколько достоверны численные оценки, сделанные на основе такой «подгонки», в частности отношение $\Gamma_A/\Gamma_{AF} \sim 1/22$, расщепление между светлыми и тёмными экситонами 61 мэВ, которое существенно выше 42 мэВ, указанных для 1МС КЯ GaN на стр. 68 и т.д.
 - 5) В Главе 4 для оценки внутренней квантовой эффективности КЯ $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ по формуле (4.1) был взят предэкспоненциальный фактор из работы [107], полученный для квантовых ям GaN/ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$, выращенных на подложках GaN. Насколько обосновано использование данного значения предэкспоненциального фактора в диссертации не поясняется.
 - 6) Очевидно, что экспериментально полученная для 300К высокая внутренняя квантовая эффективность в 80% для квантовых ям $Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.7}Ga_{0.3}N$ толщиной 1.4 нм при подбарьерном возбуждении связана с высокой степенью локализации экситонов в квантовой яме при комнатной температуре. Согласно диссертации в исследованных структурах даже при 300К подавлены как активация экситонов в барьер, так и движение экситонов в плоскости квантовой яме к дефектам. Но, к сожалению, величины и масштабы флуктуаций потенциала, приводящих к «латеральной» локализации в диссертации не обсуждаются.
 - 7) В диссертации мало данных об исследованиях структурного совершенства квантовых ям как GaN/AlN, так и $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$, хотя локальные изображения ПЭМ и говорят о высоком качестве образцов. В частности, рентгеноструктурный анализ позволил бы оценить плотность прорастающих дислокаций, которые в значительной степени определяют масштабы необходимой локализации экситонов для получения высокого внутреннего квантового выхода.
 - 8) В Главе 5 (пункт 5.2) при анализе как спектральных, так и временных характеристик ФЛ КЯ InGaN/GaN разной полярности делается упор на наличие (в полярных), ослабление (в полуполярных) и отсутствие (в неполярных) встроенного поля. Однако, хорошо известно, что вероятность встраивания In при росте на плоскостях разных полярностей может отличаться в разы (см., например, [J. Vac. Sci. Technol. A 30, 041513 (2012)]), что может привести к различию в составе КЯ на разных гранях. Однако состав КЯ на плоскостях разной полярности в диссертации не обсуждается. Также в диссертации указывается на различие в толщинах КЯ (стр. 49) на гранях одной полярности. Влияние указанных выше факторов может усложнить интерпретацию представленных в диссертации экспериментальных данных.

В отзыве отмечено, что приведенные замечания не имеют принципиального значения и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На защите на все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 5 отзывов:

- 1) **Отзыв д.ф.-м.н. Кусраева Юрия Георгиевича**, руководителя Отделения физики твёрдого тела ФТИ им. А.Ф. Иоффе (194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26). Отзыв положительный, содержит следующий комментарий:
“В качестве скорее пожелания на будущее, чем недостатка работы, хотелось бы отметить отсутствие обобщенного анализа свойств 2D систем с большим обменным взаимодействием, которой способствовал бы лучшему пониманию весомости полученных результатов.”
- 2) **Отзыв д.ф.-м.н. Гиппиуса Николая Алексеевича**, профессора Сколковского института науки и технологий (121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30 стр.1). Отзыв положительный, без замечаний.
- 3) **Отзыв д.ф.-м.н. Комкова Олега Сергеевича**, и.о. заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники (МНЭ), профессора кафедры МНЭ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (197022, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф, Санкт-Петербург). Отзыв положительный, без замечаний.
- 4) **Отзыв д.ф.-м.н. Кривобока Владимира Святославовича**, старшего научного сотрудника лаборатории новых материалов для ИК фотоники ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) (119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53). Отзыв положительный, без замечаний.
- 5) **Отзыв д.ф.-м.н. Максимова Михаила Викторовича**, ведущего научного сотрудника, зав. Лабораторией нанофотоники Академического университета им. Ж.И. Алферова (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, к. 3, лит. А). Отзыв положительный, без замечаний.

Публикации. Личный вклад автора.

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Личный вклад соискателя заключается в том, что он создал установку для исследования фотолюминесценции с высоким пространственным и временным разрешениями в ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн, провел эксперименты по изучению излучательных свойств АЗ-нитридных гетероструктур с квантовыми ямами, проанализировал результаты измерений и выполнил необходимые расчеты, участвовал в обсуждении результатов и подготовке их к публикации, а также в написании статей. Постановка задач и целей осуществлялась совместно с научным руководителем и научным консультантом.

Соискатель принимал участие в апробации работ на следующих российских и международных конференциях:

- 1) 4th International school and conference "Saint-Petersburg Open 2017" (Saint-Petersburg, 2017);
- 2) XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019);
- 3) 34th International conference on the physics of semiconductors (Montpellier, France, 2018);
- 4) XXVI международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2022).

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 8 статей, индексируемых в базах данных Web of Sciences и Scopus. Среди опубликованных статей по теме диссертации наиболее важными являются следующие:

1. А.А. Toropov, E.A. Shevchenko, T.V. Shubina, V.N. Jmerik, D.V. Nechaev, E.A. Evropeytsev, V. Kh. Kaibyshev, G. Pozina, S. Rouvimov, S.V. Ivanov. // *AlGaIn nanostructures with extremely high room-temperature internal quantum efficiency of emission below 300 nm* // *Journal of Electronic Materials* **46**, 7, 3888–3893 (2016).
Личный вклад – экспериментальное исследование излучательных свойств гетероструктур, анализ результатов.
2. А.А. Toropov, E.A. Evropeytsev, M.O. Nestoklon, D.S. Smirnov, T.V. Shubina, V.Kh. Kaibyshev, G.V. Budkin, V.N. Jmerik, D.V. Nechaev, S. Rouvimov, S.V. Ivanov, B. Gil. // *Strongly confined excitons in GaN/AlN nanostructures with atomically thin GaN layers for efficient light emission in deep-ultraviolet* // *Nano Lett.* **20**, 158 (2019).
Личный вклад – экспериментальное исследование излучательных свойств гетероструктур, анализ результатов.
3. Е.А. Европейцев, Ю.М. Серов, Д.В. Нечаев, В.Н. Жмерик, Т.В. Шубина, А.А. Торопов // *2D экситоны в множественных одномонослойных квантовых ямах GaN/AlN* // *Письма в ЖЭТФ* **113**, 8, 507-513 (2021).
Личный вклад – экспериментальное исследование излучательных свойств гетероструктур, анализ результатов, участие в написании статьи.
4. E. Evropeytsev, D. Nechaev, V. Jmerik, Y. Zadiranov, M. Kulagina, S. Troshkov, Y. Guseva, D. Berezina, T. Shubina, A. Toropov. // *Single-exciton photoluminescence in a GaN monolayer inside an AlN nanocolumn* // *Nanomaterials* **13**, 2053 (2023).
Личный вклад – экспериментальное исследование излучательных свойств гетероструктур, анализ результатов, участие в написании статьи.
5. E.A. Evropeytsev, D.R. Kazanov, Y. Robin, A.N. Smirnov, I.A. Eliseyev, V.Yu. Davydov, A.A. Toropov, S. Nitta, T.V. Shubina, H. Amano. // *State-of-the-art and prospects for intense red radiation from core-shell InGaIn/GaN nanorods* // *Sci. Rep.* **10**, 19048 (2020).
Личный вклад – экспериментальное исследование время-разрешённой фотолюминесценции гетероструктур, анализ результатов, участие в написании статьи.

Диссертационный совет отмечает, что рассмотренная диссертация является законченной работой, полученные соискателем результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, и на своем заседании 13 июня 2024 г. принял решение присудить Европейцеву Евгению Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 19 человек из 25 членов совета, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали:

За присуждение Европейцеву Евгению Андреевичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 17.

Против – нет.

Недействительных бюллетеней – нет.

Не проголосовал: - нет.

Из 2 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Европейцеву Евгению Андреевичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

«за» – 2 .

«против» – нет.

«воздержались» – нет.

«не голосовал» – нет.

Итого: из 19 членов совета, участвовавших в очно-заочном голосовании –

«за»: 19

«против»: нет

«испорченных бюллетеней»: нет

«воздержались»: нет

«не проголосовал»: нет

Зам. председателя диссертационного совета,

академик РАН

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д. ф.-м. н.

13 июня 2024 г.

Ивченко Евгениус Левович

Сорокин Лев Михайлович