

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.07, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 26 декабря 2019 года публичной защиты диссертации Копьева Виктора Васильевича «Влияние встроенных электрических полей на перенос носителей заряда в излучающих структурах InGaN/GaN» по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 18 из 24 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников:

- | | |
|--|----------|
| 1. Багров В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, председатель диссертационного совета, | 01.04.02 |
| 2. Киреева И. В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь диссертационного совета, | 01.04.07 |
| 3. Бордовицын В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.02 |
| 4. Войцеховский А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.10 |
| 5. Давыдов В. Н., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник | 01.04.10 |
| 6. Дитенберг И. А., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.07 |
| 7. Ивонин И. В., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель председателя диссертационного совета, | 01.04.10 |
| 8. Коротаев А. Д., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.07 |
| 9. Коханенко А. П. доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, | 01.04.10 |
| 10. Мельникова Н. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.07 |
| 11. Потехаев А. И., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.07 |
| 12. Старенченко В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.07 |
| 13. Толбанов О. П. доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.10 |
| 14. Тюменцев А. Н., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.07 |
| 15. Чумляков Ю. И, доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.07 |
| 16. Шаповалов А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.02 |
| 17. Шаратов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.02 |
| 18. Эрвье Ю. Ю., доктор физико-математических наук, | 01.04.10 |

Заседание провел председатель диссертационного совета, доктор физико-математических наук, профессор Багров Владислав Гаврилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить В. В. Копьеву ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.07,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.12.2019 № 28

О присуждении **Копьеву Виктору Васильевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Влияние встроенных электрических полей на перенос носителей заряда в излучающих структурах InGaN/GaN»** по специальности **01.04.10 – Физика полупроводников** принята к защите 17.10.2019 (протокол заседания № 24) диссертационным советом **Д 212.267.07**, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Копьев Виктор Васильевич**, 1991 года рождения.

В 2019 году соискатель очно окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» с выдачей диплома об окончании аспирантуры.

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории неравновесных процессов в полупроводниковой электронике; по совместительству – в должности ассистента кафедры полупроводниковой электроники в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре полупроводниковой электроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, **Прудаев Илья Анатольевич**, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория неравновесных процессов в полупроводниковой электронике, заведующий лабораторией; кафедра полупроводниковой электроники, доцент.

Официальные оппоненты:

Смирнов Серафим Всеволодович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, профессор

Николаев Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, лаборатория физики профилированных кристаллов, ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**», г. Томск, в своем положительном отзыве, подписанном **Олешко Владимиром Ивановичем** (доктор физико-математических наук, отделение материаловедения, профессор) и **Клименовым Василием Александровичем** (доктор технических наук, профессор, отделение материаловедения, заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры) указала, что светодиодные структуры на основе InGaN/GaN нашли широкое применение в области освещения, подсветки и индикации. Свойства

структур на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN интенсивно изучаются на протяжении последних двух десятилетий. Большая часть работ направлена на изучение характеристик структур на основе InGaN/GaN при комнатных температурах и выше, однако для области криогенных температур транспорт носителей заряда в подобных структурах исследован недостаточно. В. В. Копьевым установлены критерии применения методики измерения квантовой эффективности с использованием импульсных источников возбуждающего излучения; обнаружены участки отрицательного дифференциального сопротивления в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN с толщиной барьеров GaN 6 нм; установлено, что в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN присутствует, по крайней мере, три разрешенных уровня энергии; обнаружено, что в области температур от 160 до 220 К и в области напряжений более 3 В транспорт носителей носит баллистический характер; обнаружено, что в области температур от 160 до 220 К и в области напряжений менее 3 В транспорт носителей возможно описать с учетом туннелирования дырок из примесных состояний Mg по структурным дефектам в GaN в область множественных квантовых ям. Результаты исследования имеют фундаментальное и прикладное значение, вносят существенный вклад в развитие физических представлений о переносе носителей заряда в наногетероструктурах на основе нитридных соединений. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность изготовления резонансно-туннельных диодов и квантово-каскадных лазеров с использованием сверхрешеток InGaN/GaN. Результаты работы позволят разработать технологии управления свойствами структур на основе нитрида галлия с целью их оптимизации.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых российских научных изданиях опубликовано 7 работ (все статьи опубликованы в научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science), в сборниках трудов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science, опубликовано 3 работы, в прочем научном журнале опубликовано 2 работы, в сборниках трудов международной и всероссийских научных конференций опубликовано 5 работ. Общий объем публикаций – 4,29 а.л., авторский вклад – 1,09 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Прудаев И. А. Температурная зависимость квантового выхода структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN при фото- и электролюминесценции / И. А. Прудаев, И. С. Романов, **В. В. Копьев**, С. Б. Ширапов, О. П. Толбанов, С. С. Хлудков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7. – С. 30–32. – 0,23 / 0,04 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Prudaev I. A. Temperature Dependence of the Quantum Efficiency of Structures with Multiple Quantum Wells InGaN/GaN Under Photo- and Electroluminescence /, I. A. Prudaev, I. S. Romanov, **V. V. Kop`ev**, S. B. Shirapov, O. P. Tolbanov, S. S. Khludkov // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56, № 7. – P. 757–759.

2. Прудаев И. А. Температурная зависимость квантового выхода светодиодных структур InGaN/GaN при высокой плотности тока / И. А. Прудаев, **В. В. Копьев**, И. С. Романов, В. Н. Брудный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 53–56. – 0,33 / 0,08 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Prudaev I. A. Temperature Dependence of Quantum Efficiency of InGaN/GaN LED Structures at High Current Density / I. A. Prudaev, **V. V. Kopyev**, I. S. Romanov, V. N. Brudnyi // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, № 5. – P. 641–645. – DOI: 10.1007/s11182-015-0545-2.

3. Романов И. С. Влияние толщины барьеров светодиодных гетероструктур (0001) InGaN/GaN/Al₂O₃ на их оптические характеристики / И. С. Романов, И. А. Прудаев, В. Н. Брудный, **В. В. Копьев**, В. А. Новиков, А. А. Мармалюк, В. А. Курешов, Д. Р. Сабитов, А. В. Мазалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 110–113. – 0,35 / 0,04 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Romanov I. S. Effect of the barrier thickness on the optical properties of InGaN/GaN/Al₂O₃ (0001) LED heterostructures / I. S Romanov, I. A. Prudaev, V. N. Brudnyi, **V. V. Копьев**, V. A. Novikov, A. A. Marmalyuk, V. A. Kureshov, D. R. Sabitov, A. V. Mazalov // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, № 7. – P. 996–1000.

4. Прудаев И. А. Влияние баллистической утечки на температурную зависимость квантового выхода светодиодов на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN / И. А. Прудаев, **В. В. Копьев**, И. С. Романов, В. Л. Олейник // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 2. – С. 240–246. – 0,76 / 0,19 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Prudaev I. A. On the effect of ballistic overflow on the temperature dependence of the quantum efficiency of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes / I. A. Prudaev, **V. V. Копьев**, I. S. Romanov, V. L. Oleynik // Semiconductors. – 2017. – Vol. 51, № 2. – P. 232–238.

5. Романов И. С. Внутренняя квантовая эффективность светодиодных структур при различных распределениях носителей заряда по квантовым ямам InGaN/GaN / И. С. Романов, И. А. Прудаев, **В. В. Копьев** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 9–11. – 0,31 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Romanov I. S. Internal Quantum Efficiency of Led Structures at Various Charge Carrier Distributions Over InGaN/GaN Quantum Wells / I. S Romanov, I. A. Prudaev, **V. V. Копьев** // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, is. 2. – P. 211–215. – DOI: 10.1007/s11182-018-1387-5.

На автореферат поступило 3 положительных отзыва. Отзывы представили: 1. **В. И. Туев**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, *с замечанием*: участки отрицательного дифференциального сопротивления обнаружены только для структур с значениями толщины барьеров GaN 3 и 6 нм, что автор объясняет наличием трех уровней

размерного квантования. Из последующего изложения неясно, как действует указанный механизм при значениях толщины большего значения. 2. **Ю. П. Яковлев**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, *без замечаний*. 3. **К. С. Журавлев**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., и.о. заведующего лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений A_3B_5 , института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, *без замечаний*.

В отзывах отмечается, что гетероструктуры на основе квантовых ям InGaN/GaN широко используются для создания светодиодов, лазеров и фотоприемников видимого и ультрафиолетового длин волн. До начала исследований В. В. Копьева не было представлено модели, которая смогла бы корректно описать транспорт носители заряда в светодиодных структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN в области криогенных температур. В. В. Копьевым обнаружены участки отрицательного дифференциального сопротивления в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN с толщиной барьеров 6 нм; показано, что наличие встроенных полей приводит к появлению баллистического транспорта носителей над квантовыми ямами InGaN/GaN в p -область; установлен механизм инжекции дырок из примесных акцепторных состояний Mg за счет туннелирования по дефектным состояниям в GaN при температурах ниже 220 К. Полученные результаты расширяют представление о физических процессах переноса носителей заряда в наногетероструктурах на основе нитридных соединений при наличии сильных встроенных полей спонтанной и пьезоэлектрической поляризации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **С. В. Смирнов** является известным специалистом в области физики полупроводников, в частности в области изучения свойств светодиодных структур; **В. И. Николаев** хорошо известен экспериментальными исследованиями свойств полупроводников на основе нитридных соединений; в **Национальном исследовательском Томском политехническом университете** работают

высококвалифицированные специалисты, известные своими достижениями в области физики полупроводников и, в частности, в области исследования свойств структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны критерии применения методики измерения квантовой эффективности светодиодов на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN с использованием импульсных источников возбуждающего излучения;

предложен нетрадиционный подход к описанию физического механизма транспорта носителей заряда в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN с учетом наличия сильных встроенных полей спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в широком диапазоне температур, который основан на переносе «горячих» электронов над областью квантовых ям InGaN/GaN, а также туннелировании дырок с примесных состояний Mg, находящихся в области *p*-GaN, в область множественных квантовых ям;

доказано, что в области криогенных температур в гетероструктурах со сверхрешеткой In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN с толщиной барьерного слоя 6 нм присутствует не менее трех уровней размерного квантования в пределах одного периода сверхрешетки, что связано с наличием сильных встроенных полей с напряженностью порядка 1 МВ/см полей в области барьеров GaN.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано что, предложенные модели транспорта и инжекции носителей из примесных состояний Mg и над квантовыми ямами InGaN/GaN вносят существенный вклад в расширение представлений процессов, протекающих в активной области светодиодных структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN в области криогенных температур;

применительно к проблематике диссертации результативно использована упрощенная аналитическая модель переноса заряда в активной области светодиодов, учитывающая ток, ограниченный пространственным зарядом

при монополярной инжекции электронов с захватом на ловушки, позволяющая объяснить экспериментальные данные до температур выше 35 К;

раскрыты причины снижения квантовой эффективности в области криогенных температур с увеличением напряжения прямого смещения, связанные с ростом баллистического тока в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN;

изучены электрические и оптические свойства монополярных и светодиодных структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками InGaN/GaN.

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

разработаны экспериментальные установки и методы измерения электрических и оптических характеристик гетероструктур в широком диапазоне температур;

представлены новые данные, подтверждающие возможность изготовления резонансно-туннельных диодов и эффективных квантово-каскадных лазеров с использованием сверхрешеток InGaN/GaN.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Результаты работы могут быть использованы в Академическом университете им. Ж.И. Алфёрова (г. Санкт-Петербург), Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» (г. Москва), Национальном исследовательском Томском государственном университете, а также в других научных и образовательных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены при помощи прецизионных источников-измерителей, температура образца задавалась при помощи высокоточной автоматизированной криогенной установки; *показана* воспроизводимость результатов исследования на множестве образцов при различных условиях;

идея базируется на общеизвестном факте о том, что в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN существуют дополнительные, встроенные электрические поля, обусловленные явлениями пьезоэлектрической и спонтанной поляризации;

установлено качественное согласие авторских результатов с соответствующими экспериментальными данными, представленными в многочисленных источниках.

Научная новизна работы заключается в том, что автором впервые обнаружены участки отрицательного дифференциального сопротивления на прямых и обратных вольт-амперных характеристиках для наногетероструктур на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN в диапазоне температур от 11 до 220 К; впервые установлено, что наряду с термически активированной инжекцией носителей заряда в область множественных квантовых ям InGaN/GaN в формирование вольт-амперной характеристики светодиодных структур дает вклад инжекция дырок из примесных состояний Mg, находящихся в области *p*-GaN; обнаружено, что в режиме электролюминесценции снижение температуры приводит к росту утечек при постоянной плотности тока для структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN.

Личный вклад соискателя состоит в: непосредственном участии в определении цели и постановке задач исследования, анализе и обсуждении полученных результатов, формулировке выводов и научных положений, выносимых на защиту, подготовке научных публикаций по теме диссертации. Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично либо в соавторстве, когда соискатель принимал активное участие на всех этапах выполнения.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные модели переноса носителей заряда в монополярных и светодиодных структурах с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ с учетом наличия сильных электрических полей спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, имеющие

существенное значение для развития технологий управления свойствами светодиодных структур на основе нитрида галлия с целью их оптимизации.

На заседании 26.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Копьеву В. В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета



Багров Владислав Гаврилович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Киреева Ирина Васильевна

26.12.2019