

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  
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 19.12.2024 № 10

О присуждении Минтаинову Михаилу Александровичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Анализ связей вольт-амперных характеристик и фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов» по специальности 1.3.11. – Физика полупроводников принята к защите «17» октября 2024 г., протокол №7, 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, утверждённым 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75.

Соискатель Минтаинов Михаил Александрович, 20.06.1983 года рождения, в 2007 г. окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)”» по направлению «электроника и микроэлектроника». В настоящее время занимает должность научного сотрудника в лаборатории наногетероструктурных излучателей и фотоприёмников 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 – Калюжный Николай Александрович**

кандидат физико-математических наук, в.н.с., зав. лаб. наногетероструктурных излучателей и фотоприёмников Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

1. **Жуков Алексей Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, руководитель департамента физики НИУ «Высшая школа экономики» (г. Санкт-Петербург), дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 3 замечания:

1. В работе следовало бы более детально обсудить, каким образом создаются структуры с различным контролируемым дисбалансом фототоков.
2. В диссертации на рисунке 44 представлена зависимость распределения плотности тока растекания для различного числа субэлементов. Видно, что существует некоторая замечательная точка, в которой все кривые сходятся. Что это за точка?
3. Автор предложил новый метод получения ВАХ генераторной части, основанный на анализе связи между интенсивностью электролюминесценции субэлементов и

напряжением фотопреобразователя. Интересно узнать, как этот метод работает для непрямозонных субэлементов, например, для Ge.

В отзыве отмечено, что сделанные замечания не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных результатов, не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации.

2. **Скачков Александр Федорович**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе АО «Сатурн» (г. Краснодар), дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 3 замечания:

1. Несмотря на то, что основной сферой применения каскадных фотоэлектрических преобразователей является космическая отрасль, в работе очень малое внимание уделено влиянию описанных эффектов на работу каскадных солнечных элементов в условиях космического пространства, хотя, очевидно, это влияние должно быть значительным. Например, радиационное повреждение субэлементов изменяет дисбаланс токов в каскадном солнечном элементе, а также влияет на эффект люминесцентной связи, так как интенсивность электролюминесценции падает при возникновении дефектов в слоях фотоактивных p-n переходов. Целесообразным видится проведение исследований с целью практической апробации данных подходов при проведении радиационных испытаний каскадных СЭ, что позволит оптимизировать структуру многокаскадных СЭ с учетом требований на начало и конец срока активного существования.
2. При экспериментальной проверке применимости модели расчёта ВАХ МП СЭ с учётом влияния эффекта ЛС, автором не приведены данные об условиях измерения ВАХ солнечных элементов: спектр падающего излучения (AM0/AM1,5), температура СЭ. А также отсутствует информация о способе получения дисбаланса фотогенерированных токов в GaInP/GaAs/Ge.
3. Очевидно, что в основе работы лежит огромное количество экспериментальных исследований и разработок по созданию гетероструктур фотопреобразователей методом МОС-гидридной эпитаксии. Информация об этом есть в тексте диссертации, но отсутствует в автореферате. В свое время, при проведении совместных научно-исследовательских работ АО «Сатурн» и ФТИ им. А. Ф. Иоффе по разработке технологии роста многокаскадных гетероструктур для солнечных элементов космического назначения, ряд технологических решений, полученных в ходе исследований, нашел свое применение при становлении промышленной технологии изготовления СЭ со средним значением КПД 25% и максимальным значением 27% при AM0 1367 Вт/м<sup>2</sup>. В ходе дальнейших работ, нашим предприятием был сделан акцент на проведении исследований в области материаловедения: поиску оптимальных режимов эпитаксиального наращивания гетероструктур, а также разработке их новой послойной конфигурации, что позволило достичь значений КПД на уровне 30% (AM0 1367 Вт/м<sup>2</sup>). Т.е. это означает, что позднее в основе исследований, проводимых нашими организациями, лежали несколько различные подходы. В связи с этим, хотелось бы знать, каким образом аналитические результаты, включенные в данную диссертационную работу, повлияли на технологические разработки эпитаксиальных гетероструктур, которые проводились в ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Вероятно, в автореферате стоило бы отразить «обратную связь» наиболее важных результатов диссертации с технологическими исследованиями.

В отзыве отмечено, что указанные замечания ни в коей мере не снижают высокой научной ценности диссертационной работы и не ставят под сомнение основные научные результаты и сделанные выводы.

**Ведущая организация** — Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» — предоставила положительное заключение на диссертацию. Заключение подготовлено проректором по науке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова д.ф.-м.н., доцентом Мухиным Иваном Сергеевичем и утверждено исполняющим обязанности ректора СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, к.х.н., доцентом Александром Рудольфовичем Наумовым. В заключении указано, что по актуальности поставленных задач, объему выполненных исследований, научной и практической значимости полученных результатов, представленная работа полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

В отзыве содержится 3 замечания:

1. Очевидно, что соискатель в ходе работы проанализировал очень большой пласт экспериментальных данных для фотоэлектрических преобразователей различной конструкции и назначения. Однако, несмотря на такую связь с экспериментальной работой, в заключительных разделах как диссертации, так и автореферата, практически отсутствуют какие-либо численные значения, которые бы показали практический вклад исследованных эффектов и особенностей на характеристики конкретных приборов.
2. Из текста диссертации и автореферата остается неясным, оказывает ли эффект электролюминесцентной связи, т. е. возникающее в р-п переходах широкозонных субэлементов дополнительное излучение с последующим его поглощением в указанных субэлементах, положительное влияние на приборные характеристики фотоэлектрических преобразователей.
3. В диссертационной работе практически нет сведений об оборудовании (как измерительном, так и ростовом эпитаксиальном), на котором проводились эксперименты, положенные в основу диссертации. Очевидно, что полученные результаты не зависят непосредственно от конкретных установок, но стоило уделить этому вопросу больше внимания в методическом разделе.

В отзыве отмечено, что данные замечания носят частный характер и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей собой комплексное и законченное исследование.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обусловливался их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. В ходе защиты на все замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

**На автореферат поступило 7 отзывов:**

1) **Отзыв к.ф.-м.н. Пушко Сергея Вячеславовича**, главного конструктора по фотоэнергетике ООО «Бюро 1440» (РФ, 123022, г. Москва, Столярный пер., д. 3, к.14, помещение ИИ), отзыв положительный.

В отзыве содержится 2 замечания:

1. Предложен и экспериментально апробирован метод измерения вольт-амперной характеристики генераторной части многопереходного солнечного элемента, основанный на измерении взаимозависимости трех величин ток-напряжение-интенсивность электролюминесценции. При этом не конкретизировано, что подразумевается под величиной «интенсивность электролюминесценции» и какова размерность этой величины. Например, может иметься в виду плотность потока фотонов или плотность мощности.
2. На стр.12 автореферата сказано: «Другим рассмотренным в работе эффектом, возникающим в генераторной части МП СЭ (многопереходного солнечного элемента), является эффект люминесцентной связи». Из контекста не понятно, какой именно эффект является «предыдущим».

В отзыве указано, что содержание автореферата позволяет заключить, что по актуальности, научной новизне и практической значимости обсуждаемая диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор М.А. Минтаиров заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. — «Физика полупроводников».

2) **Отзыв д.т.н. Реброва Сергея Григорьевича**, главного научного сотрудника, и **Янчура Сергея Викторовича**, начальника группы бортовой энергетики Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (РФ, 125438, г. Москва Онежская ул., д. 8), отзыв положительный.

В отзыве содержится 1 замечание:

1. В автореферате не уточняется, в каких программных продуктах, использующихся для конструирования и создания МП СЭ, применялись разработанные модели и методики анализа работы МП СЭ.

В отзыве указано, что замечание не влияет на положительную оценку представленной работы.

3) **Отзыв д.т.н. Надирадзе Андрея Борисовича**, профессора, заведующего кафедрой электроракетных двигателей, энергетических и энергофизических установок Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), отзыв положительный.

В отзыве содержится 1 замечание:

1. Из автореферата не ясно, по каким критериям осуществляется деление ВАХ на сегменты и как достигается монотонность ВАХ при ее сегментной аппроксимации.

В отзыве указано, что предложенные в автореферате материалы по уровню поставленных задач, методам их решения, представленным результатам и защищаемым положениям соответствуют требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

4) **Отзыв д.ф.-м.н. Комкова Олега Сергеевича**, доцента, заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (РФ, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф), отзыв положительный, без замечаний.

5) **Отзыв д.ф.-м.н. Лунина Леонида Сергеевича**, профессора, г.н.с. лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ электроники и фотоники Федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН (РФ, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41), отзыв положительный.

В отзыве содержится 3 замечания:

1. К сожалению, в автореферате отсутствует зонная схема, демонстрирующая локализацию паразитных потенциальных барьеров в многопереходном гетероструктурном СЭ.
2. В автореферате нет ни одного численного значения для параметров вольт-амперных характеристик и фотовольтаических зависимостей, хотя все разработанные методики и описанные эффекты базируются на большом количестве экспериментальных данных.
3. На шкалах рис. 1 и рис. 2 не указана размерность величин, есть только названия.

В отзыве указано, что диссертационная работа характеризуется высоким научным уровнем и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

6) **Отзыв д.ф.-м.н. Ратушного Виктора Ивановича**, профессора, заведующего кафедрой физико-математических дисциплин Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (РФ, 347360, г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94), отзыв положительный.

В отзыве содержится 2 замечания:

1. Отсутствие схематических изображений архитектуры многопереходных СЭ затрудняет понимание текста в тех местах, где идет речь о субэлементах, туннельных диодах и других частях гетероструктур.
2. Автор использует в тексте автореферата большое количество нетипичных сокращений.

В отзыве указано, что замечания носят скорее редакционный характер и не снижают научной и практической ценности работы.

7) **Отзыв к.т.н. Кочуры Сергея Григорьевича**, доцента, заместителя генерального конструктора по электрическому проектированию и системам управления космическими аппаратами, **Опенько Сергея Ивановича**, начальника отделения, главного конструктора электрического проектирования и испытаний космических аппаратов, и **Нестершина Михаила Владиленовича**, начальника отдела бортовых систем электропитания Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетова» (РФ, 662972, Красноярский край, г. Железнодорожск, ул. Ленина, зд. 52), отзыв положительный.

В отзыве содержится 2 замечания:

1. В разделе, описывающим результаты Главы 3, сказано: «В этом случае эффект встречной фото-эдс проявляется на ВАХ как дополнительное линейное сопротивление, незначительно зависящее от мощности падающего излучения». При этом не приведена численная оценка этой «незначительности».
2. В работе не рассмотрены подходы по обеспечению радиационной стойкости многокаскадных солнечных элементов, хотя методы, предложенные в работе, вполне могут быть применены к изучению влияния радиации на характеристики многопереходных солнечных элементов.

В отзыве указано, что отмеченные недостатки не снижают качества достигнутых результатов и научно-прикладной значимости выполненных автором диссертационных исследований.

### **Публикации. Личный вклад автора.**

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Личный вклад соискателя заключается в том, он проводил работы по получению и обработке экспериментальных данных, моделированию характеристик МП СЭ и планированию экспериментов, требуемых для апробации научных гипотез, вошедших в положения диссертации.

Соискатель докладывал результаты работы на следующих российских и международных конференциях:

1. 10-я всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2008);
2. 11-я всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2009);
3. 27-я Европейская конференция и выставка по фотовольтаической солнечной энергетике EU PVSEC (Франкфурт, 2012);
4. 9-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-9 (Миядзаки, 2013);
5. 11-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-11 (Экс-ле-Бен, 2015);
6. 31-я Европейская конференция и выставка по фотовольтаической солнечной энергетике EU PVSEC (Гамбург, 2015);
7. Международная конференция Saint-Petersburg OPEN 2015 (Санкт-Петербург, 2015);
8. 12-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-12 (Фрайбург, 2016);
9. Международная конференция Saint-Petersburg OPEN 2016 (Санкт-Петербург, 2016);
10. Международная конференция Saint-Petersburg OPEN 2017 (Санкт-Петербург, 2017);
11. Международная конференция Физика.СПб/2017 (Санкт-Петербург, 2017);
12. 14-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-14 (Пуэртоллиано, 2018);
13. 35-я Европейская конференция и выставка по фотовольтаической солнечной энергетике EU PVSEC (Брюссель, 2018);
14. Международная конференция Saint-Petersburg OPEN 2018 (Санкт-Петербург, 2018);
15. 15-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-15 (Фес, 2019);
16. Международная конференция Физика.СПб/2021 (Санкт-Петербург, 2021);
17. 17-я международная конференция по концентрированным фотоэлектрическим системам CPV-17 (Виртуальный формат, 2021);
18. Международная конференция Физика.СПб/2023 (Санкт-Петербург, 2023).

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 30 печатных работ, в том числе: 9 изданы в рекомендованных ВАК научных журналах, из них 4 – в журналах, входящих в квартиль Q1 по Web of Science и Scopus, 16 – в статьях специальных выпусков рецензируемых журналов, публикующих труды международных конференций, 3 – в сборниках тезисов международных конференций и 2 – в сборниках тезисов всероссийских конференций.

Основные публикации:

1. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, V.G. Dubrovskii, N.A. Kalyuzhnyy "Using electroluminescence of subcells for obtaining fundamental resistive-less dark IV characteristic of multi-junction solar cells" // Sol. Energy Mater. Sol. Cells, v. 245, 2022, p. 111863. Личный вклад – разработка методики получения безрезистивной ВАХ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
2. S.A. Levina, V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev "Cascade optical coupling and quantum efficiency measurements of MJ SCs" // Sol. Energy Mater. Sol. Cells, v. 213, 2020, p. 110560. Личный вклад – разработка методик оценки вклада люминесцентной связи при измерениях спектральных характеристик СЭ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
3. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, «Аномалии в фотовольтаических характеристиках многопереходных солнечных элементов при сверхвысоких концентрациях солнечного излучения» // Письма ЖТФ, т. 45, 21, 2019, с. 37-39. Личный вклад – разработка методик анализа ВАХ СЭ при высоких уровнях засветки, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
4. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный «Противодействующий фотовольтаический эффект в верхней межгенераторной части трехпереходных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов» // ФТП, т. 53, 11, 2019, с. 1568-1572. Личный вклад – разработка модели для описания эффекта встречной фото-эдс, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
5. M.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, A. Luque "The segmental approximation in multijunction solar cells" // IEEE J. Photovoltaics, v. 5, 4, 2015, p. 1229-1236. Личный вклад – разработка сегментной модели ВАХ МП СЭ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
6. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный «Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов» // ФТП, т. 49, 5, 2015, с. 682-687. Личный вклад – разработка концепции дисбаланса токов, генерируемых субэлементами МП СЭ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
7. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, Р.А. Салий, В.М. Лантратов «Разностный способ получения темновой вольт-амперной характеристики и ее виды для остаточной (негенерирующей) части многопереходного солнечного элемента» // ФТП, т. 48, 5, 2014, с.671-676. Личный вклад – разработка методик получения безрезистивной ВАХ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
8. T. Sogabe, A. Ogura, C.Y. Hung, V.V. Evstropov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Y. Okada "Experimental characterization and self-consistent modeling of luminescence coupling effect in III-V multijunction solar cells" // Appl. Phys. Lett., v. 103, 26, 2013, p. 263907. Личный вклад – разработка методики анализа люминесцентной связи в МП СЭ, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
9. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов «Фотоэлектрическое определение последовательного сопротивления многопереходных солнечных элементов» // ФТП, т. 46, 8, 2012, с. 1074-1081. Личный вклад – разработка методики определения сопротивления СЭ, обсуждение 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 19 декабря 2024 г. принял решение присудить Минтаирову Михаилу Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – Физика полупроводников.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 18 человек из 23 членов совета, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали:

За присуждение Минтаирову Михаилу Александровичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 15.

Против – нет.

Недействительных бюллетеней – нет.

Не проголосовали: – нет.

Из 3 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Минтаирову Михаилу Александровичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали: «за» – 3.

«против» – нет.

«воздержались» – нет.

«не голосовали» – нет.

Итого: из 18 членов совета, участвовавших в очно-заочном голосовании, –

«за»: 18

«против»: нет

«испорченных бюллетеней»: нет

«воздержались»: нет

«не проголосовали»: нет

Председатель диссертационного совета  
академик РАН

Ивченко Еугениус Левович

Ученый секретарь диссертационного совета  
д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

19 декабря 2024 г.