

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от «01» июля 2022 г. № 7

о присуждении Смирнову Константину Яковлевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона с фотокатодом на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 27.04.2022 г., протокол № 6 Диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель: Смирнов Константин Яковлевич, 1993 года рождения, окончил в 2016 году магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», а в 2021 году окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича».

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича».

Научный руководитель: Давыдов Вадим Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича», профессор кафедры фотоники и линий связи.

Официальные оппоненты:

1. Жуков Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, НИУ ВШЭ в Санкт-Петербурге: Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук, департамент физики (руководитель департамента, профессор) **представил на диссертацию и автореферат положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1) В работе нет упоминания о лавинных рpn диодах, которые обладают внутренним усилением и могут иметь высокую чувствительность в ближнем ИК-диапазоне. Было бы желательно сопоставить их возможности с развиваемым в работе подходом.

2) Следует пояснить, какой физический смысл имеет в формуле (1.2) произведение мощности излучения на площадь. Возможно, речь идет о плотности мощности на единицу поверхности?

3) Размер фоточувствительной области прибора (Рис. 3.6) составляет 0.2 x 2 мм, а ранее (Рис. 1.7) расчеты проводились для размера ячейки 12.5 x 12.5 мкм. В чем причина столь значительно отличия размеров.

4) В заключительной главе диссертации (Рис. 4.6, 4.7, 4.9 и 4.10) приведены экспериментальные данные для света с длиной волны 1.1 мкм, а данные для 1.54 мкм, для которой выполнялось моделирование, отсутствуют. Было бы желательно обсудить и эту длину волны.

2. Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович, кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН), отделение твердотельной электроники, лаборатория физики полупроводниковых приборов **представил на диссертацию и автореферат положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1) В главе 3, автор справедливо замечает, что «разработка ЭЧПЗС является сложной технологической задачей, включающей в себя проработку топологии кристалла и реализацию дорогостоящего технологического цикла», однако, в пункте 1.3 приведены параметры уже готового макета прибора с ЭЧПЗС, что наводит на мысль о существовании реальных прототипов таких ПЗС.

2) В пункте 1.5 автор делает упор на перспективность применения разрабатываемого прибора в системах активно-импульсного ночного видения. При этом подавляющее число полученных в диссертации результатов связано с исследованием InP/InGaAs/InP фотокатода и макетов приборов на его основе в режиме непрерывной облученности.

3) В рамках постановки задач, выполняемых в ходе выполнения диссертации указано следующее: «определение по результатам исследований направлений для совершенствования технологий и обновления существующей элементной базы с целью улучшения характеристик разрабатываемых приборов». Однако, в тексте диссертации автор практически не упоминает о методах дальнейшего улучшения полученных им результатов.

4) В диссертации несколько раз встречается термин «Обнаружительная способность», заявляется о высоких показателях данного параметра, свойственных разрабатываемому фотодетектору. Однако, в диссертации не приведено ни численных значений заявленного параметра, ни методики его расчета.

Ведущая организация Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт» (Технический университет), г. Санкт-Петербург, **в своем положительном заключении**, подписанном заведующим кафедрой теоретических основ материаловедения, Сычевым Максимом Максимовичем, доктором технических наук, утвержденном ректором Шевчиком Андреем Павловичем, указала, что диссертация Смирнова К.Я. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 (01.04.01), и отметила следующие замечания:

1) Полученные автором результаты испытаний изготовленного макета демонстрируют большой разброс чувствительности от диода к диоду. С чем он связан и как его можно преодолеть?

2) Неясно, почему не проведены модельные испытания разрешающей способности устройства путем подачи излучения на отдельные «пиксели».

3) В диссертации предложен метод очистки поверхности фотокатодной гетероструктуры до получения «высокой степени атомарной чистоты», приводятся сравнительные результаты с использованием предложенного метода и классических методов обработки фотокатодов. Однако, не ясно, на чем основывается вывод об увеличении степени чистоты поверхности, поскольку данных о каких-либо исследованиях на этот счет в диссертации нет.

Соискатель имеет 23 (двадцать три) опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 18 (восемнадцать) работ, опубликованных в рецензируемых научных

изданиях. Из них 4 (четыре) работы входят в перечень ВАК РФ, 14 публикаций входит в базу SCOPUS, 1 (один) патент на изобретение, а также 4 (четыре) публикации в материалах всероссийских и международных научных конференций. К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. Айнбунд М.Р., Глебов Д.Л., Забродский В.В., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Николаев А.В., Пашук А.В., **Смирнов К.Я.**, Фролов В.М. Гибридный многоканальный фотоприемник для спектрального диапазона 1-1,6 мкм //Прикладная физика. 2018. №6. С. 54-59.
2. Айнбунд М.Р., Гарбуз А.В., Дементьев А.А., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Пашук А.В., **Смирнов К.Я.**, Чернова О.В. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов //Успехи прикладной физики. 2018. №6(6). С. 514-517.
3. Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., **Смирнов К.Я.** Оптический метод контроля состояния текущих сред с низкой прозрачностью и крупными включениями //Измерительная техника. 2019. № 6. С. 37-43.
4. **Smirnov K.J.**, Medzakovskiy V.I., Davydov V.V., Vysoczky M.G., Glagolev S.F. High sensitive InP emitter for InP/InGaAs heterostructures //Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 917(6). P. 062019.
5. Myazin N.S., **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Logunov S.E. Spectral characteristics of InP photocathode with a surface grid electrode //Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 929(1). P. 012080.
6. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Glagolev S.F., Rodygina N.S., Ivanova N.V. Photocathodes for near infrared range devices based on InP/InGaAs heterostructures //Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038(1). P. 012102.
7. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Tushavin G.V., Glagolev S.F. Temperature investigations of InP/InGaAs based photocathodes //Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech 2018). 2018. Vol. 209. P. 11.
8. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Tushavin G.V., Glagolev S.F. High speed near-infrared range sensor based on InP/InGaAs heterostructures //Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124(2). P. 022014.
9. **Smirnov, K.J.**, Davydov, V.V., Batov, Y.V. InP/InGaAs photocathode for hybrid SWIR photodetectors //Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1368(2). P. 022073.
10. Dyumin, V., **Smirnov, K.**, Davydov, V., Myazin, N. Charge-coupled Device with Integrated Electron Multiplication for Low Light Level Imaging //Proceedings of the 2019 IEEE

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От Денисова Дмитрия Геннадьевича, кандидата технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», доцента кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы». Замечание:

- В автореферате в структуре методологического аппарата, возможно, стоило бы добавить разделы: ведущая идея и методы теоретических экспериментальных исследований, использованные при реализации диссертационной работы.

2. От Иваньшина Владимира Алексеевича, доктора физико-математических наук, АО «ВАКУУММАШ», ведущего специалиста отдела главного конструктора. Замечание:

- В качестве замечаний к оформлению автореферата можно отметить лишь недостаточно чёткое и наглядное представление зависимостей, показанных на рисунках 5 и 7, что несколько затрудняет их идентификацию и понимание.

3. От Кононовой Натальи Александровны, кандидата технических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», руководителя отдела геометрических измерений. Замечание:

- К недостаткам представленного автореферата можно отнести избыточный объем текстового материала. Основное содержание работы целесообразно было бы отразить более емко, уделяя большее внимание тезисам, непосредственно раскрывающим защищаемые положения.

4. От Непомнящего Олега Владимировича, кандидата технических наук, профессора, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», заведующего кафедрой «Вычислительная техника». Замечания:

- На мой взгляд, в тексте автореферата следовало бы детально выделить положения научной новизны исследований, указав те несомненные преимущества, которые то или иное положение предоставляет.

- Некоторые рисунки, например Рис. 4 и 5 имеют плохо видимые надписи, которые без особого ущерба могут быть увеличены.

5. От Полякова Петра Александровича, доктора физико-математических наук, профессора, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова». Замечание:

- Представлено очень много материала, что показывает большой объем проведенных исследований. Но при переходе к технологиям изготовления ГФП в главе 4 подробно о самой технологии ничего не написано. Все дано очень кратко. Этот момент всегда интересует многих, кто разрабатывает такие приборы. И его следовало бы описать более подробно, сократив описание других разделов, например, теоретическое описание физических процессов, связанных с фотокатодом. Это можно описать несколькими предложениями.

6. От Семашко Вадима Владимировича, доктора физико-математических наук, профессора, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, ведущего научного сотрудника лаборатории Нелинейной оптики. Замечаний нет.

7. От Татаурщикова Сергея Сергеевича, кандидата технических наук, АО «ЦНИИ «Электрон», заместителя генерального директора по научной работе, Замечание:

- На рисунке 2 представлены расчетные кривые, сравнивающие разрабатываемый гибридный фотоэлектронный прибор, серийно-производимую камеру GA1280JS и сочлененный прибор. При этом возникают вопросы, во-первых, целесообразности сравнения фоточувствительного модуля, представленного в работе, и конечного устройства - камеры. Во-вторых, непонятно, что это за «сочлененный прибор», это устройство на основе GaAs (в этом случае сравнение некорректно) или описанной в работе фотокатодной гетероструктуры (тогда возникает вопрос о физической возможности создания такого прибора).

Все отзывы положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается большим опытом работы в областях физики и технологии материалов электронной оптики, в частности, полупроводниковых фотоэмиссионных структур.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Обоснована теоретически и **подтверждена** экспериментально перспективность использования фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP в качестве основной части

неохлаждаемых фотоприемных систем коротковолнового инфракрасного диапазона на базе внешнего фотоэффекта.

Реализована конструкция вакуумного фотоэлектронного прибора, чувствительного в инфракрасном диапазоне (0,9-1,7 мкм).

Выделены преимущества указанной конструкции перед существующими аналогами для заданного спектрального диапазона;

Предложена новая методика получения поверхности атомарной чистоты фотокатодных структур на основе InP, посредством совмещения параметров методов химической и термической обработки.

Реализована конструкция фотокатода для коротковолнового инфракрасного диапазона на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP с показателями максимальной квантовой эффективности более 5% в режиме непрерывного облучения.

Получен макет фоточувствительного прибора с внешним фотоэффектом, чувствительный в инфракрасном диапазоне (0,9-1,7 мкм), и обеспечивающий распределение чувствительности по координате.

Разработаны и реализованы на экспериментальном стенде новые методики измерений параметров фотоэлектронных гибридных приборов с InP/InGaAs/InP гетероструктурами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. **Предложена** технология изготовления фотокатода для спектрального диапазона 0,9-1,7 мкм способного работать в непрерывном режиме облученности при низком уровне термоэмиссии в условиях комнатной температуры. Это позволяет проектировать на его основе приборы с внешним фотоэффектом для заданного спектрального диапазона.

2. **Подтверждена** (результатами экспериментальных исследований) обоснованность и целесообразность применения электронно-чувствительного кремниевого детектора на основе линейного массива p-n-диодов в рамках вакуумных фотоэлектронных приборов с внешним фотоэффектом для обеспечения эффективной регистрации коротких импульсов излучения с длительностью менее 10 нс.

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

Разработана и реализована конструкция прибора с фотокатодом для ИК диапазона (0,9-1,7 мкм) для фотоприемных систем, решающих задачи событийной осведомленности и наблюдения объектов в реальном времени с возможностью цифрового вывода информации. Внедрение указанной конструкции, согласно полученным в

диссертационной работе экспериментальным данным, позволит существенно превзойти существующие обзорные системы для заданного спектрального диапазона по ряду параметров, включая предельную дальность обнаружения. Внедрены новые оригинальные технические решения в конструкцию фотодетектора, обеспечивающие внутреннее усиление в приборе первичных фотоэлектронов (в 10 раз и более). Предложенная конструкция кардинально отличается от существующих отечественных инфракрасных приборов на основе электронно-оптических преобразователей, которые не обладают спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн свыше 1.1 мкм. На макете фотодетектора с линейным массивом p-i-n-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов было получено значительное для неохлаждаемых ИК приборов быстродействие (единицы нс) в совокупности с высокой чувствительностью.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Научные результаты и выводы, содержащиеся в диссертационной работе, подтверждаются использованием общеизвестных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментальных исследований и численных расчетов с использованием корректных допущений и приближений. Достоверность экспериментальных данных подтверждается использованием метрологически поверенного современного научно-исследовательского лабораторного оборудования. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическими оценками, а также с данными, полученными из литературных источников, на которые в работе имеются ссылки.

Личный вклад соискателя заключается в:

- постановке цели и формулировке задач исследования;
- обосновании выбора гибридного вакуумного прибора с фотокатодом и преобразователем фотоэлектронов, располагающимися в одном вакуумном объеме, в качестве схемы организации разрабатываемого фотодетектора, на основании литературного анализа и проведения численного моделирования;
- разработке и реализации метода очистки полупроводниковых эпитаксиальных структур АЗВ5 для получения на их поверхности высокой степени атомарной частоты;

- сборке и модернизации экспериментальной установки для проведения исследований фотокатодного узла и вакуумной заправки его в рамках макета гибридного фотоэлектронного прибора;
- изготовлении фотокатода на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP для коротковолнового инфракрасного диапазона с пиковой квантовой эффективностью более 5% при непрерывной облученности;
- проведении измерений макетов и дискретных элементов гибридных фотоэлектронных приборов с InP/InGaAs/InP фотокатодом и 12-ти элементным массивом pin-диодов на разработанных лабораторных стендах.

На заседании 01.07.2022 г. Диссертационный совет принял решение присудить Смирнову Константину Яковлевичу степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 15 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 13, против – 2, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
Диссертационного совета,
д.т.н., проф.



В.Е. Курочкин

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
д.ф.- м.н.

А.Л. Буляница

01.07.2022 г.

М.П.