



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт  
(технический университет)»  
(СПбГТИ (ТУ))**

Московский пр., д.26. г. Санкт-Петербург, 190013.  
телеграф: Санкт-Петербург, Л-13, Технолог,  
факс: ректор (812) 710-6285, общий отдел (812) 712-  
7791,  
телефон: (812) 710-1356.  
E-mail: office@technolog.edu.ru

09.06.2022 № 1253

**УТВЕРЖДАЮ**  
Ректор федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
институт (технический университет)»  
д.т.н., профессор

*Шевчик*

А.П. Шевчик



## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу СМИРНОВА КОНСТАНТИНА ЯКОВЛЕВИЧА  
«Фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона с фотокатодом на  
основе гетероструктур InP/InGaAs/InP», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

### **Актуальность темы выполненной работы**

Полупроводниковые материалы группы А3В5, а частности GaAs, InAs, GaP, GaSb и InP являются базовыми материалами для построения огромного множества электронных и оптоэлектронных приборов. Особое место среди этих приборов занимают фотодетекторы на основе внешнего и внутреннего фотоэффекта, включая как фотодиоды, так и фотокатоды, работающие в широком спектральном диапазоне. В этом смысле, вопросы, связанные с изготовлением, обработкой и экспериментальным исследованием таких материалов, а также построением на их основе готовых электронных устройств, вызывают большой интерес. В рамках технологического цикла изготовления готовых устройств на основе полупроводниковых моно- и гетероструктур, критически важными являются не только процессы эпитаксии и формирования бездефектной кристаллической структуры, но и получения атомарно чистой активной поверхности устройств на этапе пассивации и корпусирования. Особенно это важно для материалов вакуумной фотоэлектроники, где зачастую необходимо не только обеспечить удаление примесей и окислов различного происхождения, но и сформировать эффективные тонкие пленки высокого качества.

Диссертация К.Я. Смирнова связана как с исследованиями фотокатодной структуры на основе твердого раствора InP/InGaAs/InP, чувствительной в коротковолновом инфракрасном диапазоне, так и с поиском путей совершенствования характеристик

фоточувствительных ИК приборов, решающих задачи детектирования объектов в условиях слабой и нулевой видимости, высокоскоростной локации и позиционирования, в частности, создания приборов ночного видения. Автором предлагается подход к проектированию фотодетекторов для коротковолнового инфракрасного диапазона, основанный на сочетании вакуумного фотоэлектронного прибора с фотокатодом на гетероструктурах InP/InGaAs/InP и твердотельного кремниевого элемента, обладающего чувствительностью к электронам. Применение предложенных в работе конструкторских решений, новой элементной базы и методов позволяет преодолеть ряд недостатков, характерных для приборов чувствительных в заданном спектральном диапазоне (0,9-1,7 мкм). В частности, с помощью заявленной схемы прибора возможно исключить необходимость криогенного охлаждения, реализовать высокочастотный импульсный режим с длительностью строба менее 100 нс, отказаться от дорогостоящего процесса бондинга в ходе технологического цикла изготовления конечного устройства, обеспечить высокие параметры выходного сигнала с применением внутреннего процесса усиления с низким коэффициентом шума. С учетом вышеперечисленного, тема диссертации и полученные в ней результаты являются актуальными.

### **Основные результаты, полученные автором диссертации**

1. Реализована конструкция вакуумного фотоэлектронного прибора, чувствительного в коротковолновом инфракрасном диапазоне (0,9-1,7 мкм). Выделены преимущества указанной конструкции перед существующими аналогами для заданного спектрального диапазона.
2. Предложена конструкция фотокатода на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP с квантовой эффективностью более 5% в режиме непрерывной облученности. Выполнен расчет влияния подложки InP на оптическое пропускание коротковолнового ИК излучения. Определены оптимальные параметры подложки и просветляющего покрытия.
3. Разработана методика двухэтапной очистки образцов фотокатодов для получения поверхности структуры с высокой степенью атомарной частоты.
4. Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования двенадцати-элементного массива рип-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов в гибридном фотоэлектронном приборе. По разработанным методикам получены импульсные характеристики, образцов линеек, и результаты электронного усиления фотоэлектронов при рекомбинации в области подложки диода.
5. Изготовлен макет фоточувствительного прибора с внешним фотоэффектом, чувствительный в коротковолновом инфракрасном диапазоне (0,9-1,7 мкм), и обеспечивающий распределение чувствительности по координате.

### **Научная значимость полученных результатов**

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные результаты в ходе выполнения исследований позволили сформировать работоспособный фотокатод, чувствительный в коротковолновом спектральном диапазоне и способный эксплуатироваться в условиях комнатных температур. В ходе проведенных исследований отработан процесс формирования отрицательного электронного сродства на поверхности фотокатода. Предложена методика получения атомарно чистой поверхности фотокатодной структуры посредством совмещения методов химического травления и вакуумного отжига. Обоснована перспективность использования фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP в качестве основной части неохлаждаемых фотоприемных систем инфракрасного диапазона.

Разработаны методы оценки импульсного отклика и коэффициента усиления в области подложки линейного массива  $\text{pin}$ -диодов. Предложен метод оценки параметров макета фотодетектора, изготовленного в соответствии с предложенной конструкцией и элементной базой.

### **Практическая значимость полученных результатов**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что её результаты могут быть использованы для повышения характеристик фотоприемных систем для заданного спектрального диапазона. При этом результаты и разработанные методы могут быть полезны для задач проектирования фотодетекторов на основе внешнего фотоэффекта широкого спектра. Предложенная гибридная конструкция фотоэлектронного прибора, где все элементы (фотокатод чувствительный в коротковолнового инфракрасном диапазоне и твердотельный электронно-чувствительный элемент) объединены в одном вакуумном объеме, позволяет значительно превзойти по ряду параметров классические модули на основе сочленения ЭОП и ФПЗС. Полученная в соответствии с предложенными методами фотокатодная гетероструктура  $\text{InP/InGaAs/InP}$  обладает стабильной квантовой эффективностью на уровне нескольких процентов, что значительно превышает известные результаты, полученные на основе структур  $\text{Ag-O-Cs}$ . На линейном массиве  $\text{pin}$ -диодов, использованном в качестве преобразователя электронов, получены высокие значения электронной восприимчивости и импульсного отклика менее 10 нс. В соответствии с предложенными методами получены высокие параметры спектральной чувствительности макетов приборов при низком уровне темнового тока и коэффициента шума в условиях комнатной температуры.

### **Структура диссертационной работы, публикации и апробация**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 145 наименований, трех приложений. Работа содержит 59 рисунков и 6 таблиц, полный объем диссертации с приложениями – 129 страниц. Основное содержание диссертации изложено в 18 оригинальных статьях, четыре из которых – в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, 14 – в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и в 19 тезисах докладов на международных конференциях, форумах и семинарах.

Во **введении** изложены актуальность темы диссертации, цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены выносимые на защиту положения, обоснованы достоверность и надежность результатов работы.

В **первой главе** обосновывается выбор полосы спектральной чувствительности разрабатываемого фотоприемного устройства, выбор элементной базы прибора и его принципиальной конструкции. Приводится сравнение предложенной схемы фотодетектора с аналогами для заданного спектрального диапазона.

**Вторая глава** посвящена исследованию фотокатода, чувствительного в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Предложена конструкция такого ФК на основе полупроводниковой гетероструктуры  $\text{InP/InGaAs/InP}$ . Описана методика получения поверхности высокой степени чистоты фотокатодных структур на основе  $\text{InP}$ . Для разработанной гетероструктуры получен ряд спектральных характеристик, проведены температурные испытания, выполнен расчет просветляющего покрытия для подложки ФК.

В **третьей главе** обосновывается выбор использования электронно-чувствительного многоэлементного твердотельного прибора на основе кремния в качестве преобразователя фотоэлектронов. Описан механизм усиления первичных фотоэлектронов в области подложки в результате рекомбинации. В качестве конечного преобразователя фотоэлектронов для разрабатываемого фотодетектора выступает двенадцати-элементный линейный массив рiп-диодов. В главе представлен технологический цикл изготовления и методы измерения параметров изготовленных массивов.

**Четвертая глава** посвящена разработке методов измерений и получению результатов исследований макетов приборов с InP/InGaAs/InP фотокатодом и 12-элементным массивом рiп-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы работы.

#### **По диссертационной работе имеется ряд замечаний:**

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. Не ясно, 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.

Указанные замечания не меняют общей положительной характеристики диссертационной работы, которая выполнена на высоком уровне, и содержит в себе важные практические результаты.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов настоящей работы**

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, а также методики измерения характеристик предложенной элементной базы могут быть полезны для предприятий, занимающихся разработкой и производством многоэлементных фотонных детекторов различного спектрального диапазона: «АО Катод» (г. Новосибирск), «ОАО Геофизика-НВ» (г. Москва), «АО ЦНИИ «Электрон» (г. Санкт-Петербург), НПК «Фотоника» (г. Санкт-Петербург), АО «Диаконт» (г. Санкт-Петербург), АО «Московский завод Сапфир» (г. Москва), а также ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбГПУ, ИТМО, ЛЭТИ.

#### **Оценка соответствия содержания диссертации специальности 1.3.2.**

Сформулированная соискателем цель диссертационного исследования, предложенные методы и подходы по её реализации, разработанные и апробированные на практике новые методы измерения физических величин, проведенные с их использованием экспериментальные исследования, предложенные теоретические модели и выполненные на их основе расчеты, а также сделанные по результатам исследований выводы полностью соответствуют заявленной специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики. Журналы, из перечня ВАК, в которых опубликованы результаты научных

исследований Смирнова Константина Яковлевича соответствуют специальности 1.3.2 (пункты 3,6 из паспорта специальности), по которой представлена диссертация к защите.

### **Заключение**

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для развития материаловедения фоточувствительных материалов, физики и техники фотоприёмных устройств.

Выводы и рекомендации обоснованы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Публикации соискателя полностью соответствуют тематике диссертационного исследования и позволяют судить о значимости его личного вклада в полученные и представленные результаты.

Диссертация Смирнова Константина Яковлевича «Фотоприёмные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона с фотокатодом на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP» полностью удовлетворяет требованиям и критериям п. 9 положения о порядке присуждения ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013, № 842 (редакция от 11.09.2021)), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Смирнов Константин Яковлевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Доклад соискателя по материалам диссертации и отзыв обсуждены на научном семинаре кафедры «Теоретических основ материаловедения» (Протокол № 8 от «3» июня 2022 г.).

Руководитель семинара,  
Заведующий кафедрой  
теоретических основ материаловедения,  
доктор технических наук, профессор,  
Председатель российского отделения  
международного дисплейного общества (SID)  
190013, Россия, Санкт-Петербург,  
Московский проспект, дом 26

Сычев Максим Максимович

Тел: +7 (812) 494-92-45

e-mail: materials\_science\_dept@technolog.edu.ru

### **Данные об организации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)"

190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А

Сайт: <https://technolog.edu.ru/>

Тел.: +7 (812) 494-92-45

e-mail: office@technolog.edu.ru