

В диссертационный совет
24.1.029.01
на базе ИАП РАН

ОТЗЫВ

официального оппонента 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».

1. Актуальность

В настоящее время полупроводниковые материалы A_3B_5 используются практически во всех разделах микро- и нанoeлектроники. На их основе производятся различные системы, связанные со спектроскопией и дефектоскопией, лазерные источники излучения и фотодиоды, транзисторы, солнечные элементы и многое другое. Значительную роль кристаллические соединения A_3B_5 и их твердые раствор играют также и в вакуумной фотоэлектронике. Они используются в качестве фотокатодов (эмиттеров электронов) для различного спектрального диапазона и могут значительно превзойти классические фотокатодные элементы, как по ширине спектральной восприимчивости, так и по квантовой эффективности. На сегодняшний момент наиболее широко используются соединения на основе $Al_xGa_{1-x}N$ и GaAs, обеспечивающие высокие параметры конечных изделий, преимущественно электронно-оптических преобразователей для УФ, видимого и ближнего ИК диапазона.

В диссертации К.Я. Смирнова затрагиваются два значимых вопроса: разработка эффективного фотокатода на основе соединений A_3B_5 для коротковолнового инфракрасного диапазона (длины волн от 0.9 до 1.7 мкм) и рассмотрение возможности совершенствования классического подхода к построению пассивных и активно-импульсных систем наблюдения на основе электронно-оптических преобразователей. Использование коротковолнового ИК диапазона в качестве полосы спектральной восприимчивости фотоприемников крайне привлекательно для задач наблюдения и локации в условиях слабой и нулевой видимости в силу наличия в заданном диапазоне атмосферного окна прозрачности и других физических особенностей. Большинство используемых на сегодня многоэлементных приемников этого диапазона длин волн основаны на технологии гибридных сборок, где в качестве фоточувствительного слоя используется твердый раствор InGaAs. Такая схема устройства лишена некоторых преимуществ, характерных как раз для вакуумной фотоэлектроники, в частности, электронно-оптических преобразователей. Это, в первую очередь, возможность реализации импульсного режима с малой длительностью строка в активно-импульсных системах

наблюдения и механизм усиления сигнала в рамках вакуумного элемента без применения дополнительных каскадов.

Учитывая вышесказанное, выбранная Смирновым К.Я. тема диссертации и ее содержание являются актуальными, в рамках поиска эффективных фотокатодов для коротковолнового инфракрасного диапазона и повышения характеристик фотоприемных систем, имеющих на данный момент в заданном спектральном диапазоне.

2. 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.

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 главе 1 приведено качественное обоснование целесообразности проводимых исследований, выбранной элементной базы, отражены преимущества выбранного подхода к реализации поставленных во введении целей и задач диссертационной работы.

В главе 2 посвящена исследованиям фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP . Основываясь на представленных в работе методах, сформирован работоспособный фотокатод для коротковолнового ИК диапазона, получены его характеристики, температурные кривые.

В главе 3 приведено теоретическое и практическое обоснование выбора двенадцати-элементного массива rip -диодов в качестве элемента разрабатываемого фоточувствительного прибора. Приведен технологический цикл изготовления, методы и результаты измерений предложенного преобразователя фотоэлектронов.

В главе 4 объединены исследования элементной базы, проведенные в предыдущих главах, и отражает вопросы, связанные с макетированием и измерением параметров готовых макетов фотоэлектронных приборов заявленной конструкции.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы работы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, подтверждается многочисленными научными публикациями в изданиях (SCOPUS, Web of Science, ВАК и т.д.). Основные результаты диссертационной работы изложены в 18 публикациях, из них 4 в научных журналах, рекомендованных ВАК, 14 в изданиях, индексируемых базами цитирования SCOPUS и Web of Science.

3. Научная новизна и практическая значимость исследования

В диссертационной работе К.Я. Смирнова проведено исследование практической направленности, позволившее сформировать новую элементную базу фотоприемных устройств коротковолнового инфракрасного диапазона, и на основе разработанных методов получить ее характеристическую оценку. Из наиболее значимых научных результатов могут быть выделены следующие:

1. Конструкция гибридного фотоэлектронный прибора с InP/InGaAs/InP фотокатодом и 12 элементной линейкой кремниевых электронно-чувствительных pin-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов, располагающимися в одном вакуумном объеме. Описанная конструкция целесообразна из-за совмещения преимуществ твердотельного и вакуумного подхода к приборостроению фотовосприимчивых модулей.
2. Метод получения высокой степени атомарной чистоты поверхности полупроводниковых структур на основе InP, который может быть применен для широкого спектра задач обработки материалов его основе. Использование этого метода способствовало достижению высокого квантового выхода фотоэлектронов.
3. Работоспособный фотокатод на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP с квантовой эффективностью более 5 % в коротковолновом инфракрасном диапазоне, работающий без дополнительных модулей понижения и, что особенно важно, без принудительного охлаждения и стабилизации температуры.
4. Подход и методы исследования, связанные с регистрацией, фотоэлектронов, испускаемых фотокатодными элементами.

В качестве практической значимости работы следует указать в первую очередь достигнутые высокие результаты чувствительности в несколько А/Вт и временного разрешения на уровне наносекунды, полученные на макетах фотоэлектронного сенсора, что подтверждает как дискретные результаты, полученные в результате исследований элементной базы, так и, в целом, целесообразность и обоснованность описанного в диссертации подхода к структурной схеме прибора. Высокую практическую значимость также имеют разработанные методы очистки поверхности полупроводниковых структур A_3B_5 , в частности на основе InP, относящиеся к вопросам подготовки структур к нанесению тонких пленок в высоком вакууме. Метод характеризуется экспериментально доказанной эффективностью сравнительно с классическими методами подготовки поверхностей схожей структуры.

4. По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В работе нет упоминания о лавинных pin 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 значительного 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

Несмотря на наличие замечаний, а также общий сдвиг работы в экспериментально-практическую сторону в ущерб теоретической проработке вопросов, возникающих в ходе

построения таких наукоемких фоточувствительных элементов, с учетом полученных результатов и объема проведенных исследований, оцениваю диссертацию положительно.

5. Заключение по работе

На основании изучения диссертации, автореферата и опубликованных работ, считаю диссертацию Смирнова К.Я. законченной самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, обладающей актуальностью и новизной, и имеющей научную и практическую ценность.

Результаты, полученные в работе, и использованные методы решения поставленных задач, полностью соответствуют специальности: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики (пункты 3, 4 и 6 паспорта специальности). Автореферат и публикации К.Я. Смирнова отражают содержание диссертационной работы.

На основе вышеперечисленного, считаю, что диссертация Смирнова Константина Яковлевича «Фотоприемные 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.

Официальный оппонент:



Жуков Алексей Евгеньевич

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10-Физика полупроводников, член-корреспондент РАН
профессор, руководитель департамента, заместитель декана по научной работе

департамент физики,
Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук,
Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)
194100, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 3, корп. 1, лит. А,
<https://spb.hse.ru/>, office-spb@hse.ru

Тел. +7-921-9517190
aezhukov@hse.ru; zhukale@gmail.com

03.06.2022

Подпись Жукова А.Е. заверено



Л. Н. Возиян