

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

Фотоприемные системы, чувствительные в коротковолновом инфракрасном диапазоне, применяются в широком спектре как гражданских, так и военных задач, включающих в себя дефектоскопию, задачи по контролю качества процессов и производств, наблюдение и детектирование объектов и событий в жестких условиях. Физические свойства данного диапазона способствуют высоким показателям контрастности, разрешения и сравнительно легкой интерпретации полученных изображений. Диссертационная работа Смирнова К.Я. рассматривает вопросы повышения характеристик фотоприемных устройств коротковолнового инфракрасного диапазона и поиска как альтернативных подходов к конструированию фотодетекторов, так и, в целом, фоточувствительных материалов и слоев, способных обеспечить сравнительно лучшие параметры конечных приборов.

До сих пор подавляющее число фотоприемников, используемых для специальных задач, являются концептуально фоточувствительными в видимом спектральном диапазоне, применяются различные методы по внедрению фильтров в фотоприемные системы, смещению границ фоточувствительности структур с помощью примесей и другие. В этом смысле появление альтернативных спектральных диапазонов чувствительности фотодетекторов несет в себе большой скачок по производительности конечных устройств.

Также необходимо отметить, что гибридная технология построения фотоприемника находится на стыке вакуумной и твердотельной электроники, что позволяет совместить преимущества, свойственные двум этим различным подходам. В связи с вышеперечисленным выбранная тема диссертации и ее содержание являются, без сомнения, актуальными.

2. Обоснованность и новизна научных результатов диссертационной работы.

В диссертационной работе К.Я. Смирнов провел большой объем исследований, в частности, ряд экспериментов, обоснованных теоретической проработкой вопроса. Такой подход к исследованиям позволил ему получить как ряд качественных характеристических результатов, так и смаскетировать

реальный фотодетектор на основе внешнего фотоэффекта, работающего в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Из наиболее значимых научных результатов могут быть выделены следующие:

1. Работа предлагает альтернативный сравнительно с технологией гибридных сборок подход к проектированию фотоприемных устройств коротковолнового ИК диапазона, что позволяет превзойти параметры имеющейся на данный момент элементной базы. Выделены преимущества указанной конструкции гибридный фотоэлектронный прибор с фотокатодом и преобразователем фотоэлектронов, располагающимися в одном вакуумном объеме, перед существующими аналогами для заданного спектрального диапазона;

2. Разработана методика получения высокой степени атомарной чистоты поверхности полупроводниковых структур на основе InP, включающая в себя химическое травление и низкотемпературный вакуумный отжиг. Предложенный в работе метод очистки полупроводниковых структур представляет интерес, как в разрезе применения его на структурах InP, так и переноса на другие структуры АЗВ5.;

3. В рамках выполнения работы получен фотокатод на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP, работающий в режиме непрерывной облученности и обладающий пиковой квантовой эффективностью более 5% в коротковолновом инфракрасном диапазоне.

4. На основе предложенной конструкции и методов исследования получен преобразователь фотоэлектронов с высокими характеристиками,

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.). Обсуждения результатов диссертационной работы К.Я. Смирнова на международных и всероссийских конференциях, семинарах и научных школах.

3. Научная ценность и практическая значимость результатов диссертационной работы.

Несмотря на тенденцию к снижению использования электронно-оптических преобразователей, имеющих в своей конструкции фотокатод, и действующих на основе внешнего фотоэффекта, и заменой их на полностью твердотельные устройства на основе диодов, МДП-структур, гибридных сборок, для ряда задач ЭОП технология все еще крайне актуальна. В разрезе более высокого временного разрешения и дальности обнаружения, свойственного для таких приборов, появление фотокатода, работающего в

коротковолновой инфракрасной области переоценить невозможно. С учетом этого большую значимость **научную значимость** представляют следующие результаты:

1. Формирование фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP с низкими показателями темнового тока и квантовой эффективностью в несколько процентов;
2. Метод очистки полупроводниковых структур Al_{0.5}B_{0.5}, в частности на основе InP, с экспериментально доказанной эффективностью сравнительно с классическими методами подготовки поверхностей схожей структуры.

Необходимо отметить, что диссертационная работа Смирнова К.Я. имеет высокую практическую направленность. В качестве основных результатов, несущих в себе **практическую значимость** можно отметить следующие:

1. Реализована конструкция фотодетектора, чувствительного в коротковолновом инфракрасном диапазоне, совмещающая в себе преимущества характерные для ЭОПов (высокая чувствительность и временное разрешение) и позволяющая обойти ряд ограничений с применением твердотельных технологий (высокий коэффициент шума и большое количество преобразований сигнального заряда). В качестве результатов применения указанной гибридной технологии, удалось получить макет фоточувствительного сенсора с чувствительностью в несколько А/Вт на длине волны 1.54 мкм. При этом прибор обладает экспериментально обоснованным временным разрешением на уровне 10^{-9} с.
2. Конструкция и методы экспериментальной оценки параметров линейки pin-диодов, подтверждающие ожидаемые результаты быстрого действия с теоретической точки зрения. Указанная структура может быть применена в высокоскоростных системах сканирования.

4. 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.

Перечень используемых источников является достаточно полным, а имеющиеся в диссертации ссылки позволяют удовлетворить ряд вопросов, преимущественно теоретического характера, возникающих у читателя в ходе знакомства с работой. Большое количество современных работ и наличие фундаментальных трудов, позволяет говорить о качестве проделанной

работы с литературными источниками и осведомленности автора о тематике проводимых исследований в целом.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. 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.

5. По рецензируемой диссертации можно сделать 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.

Несмотря на отмеченные замечания, и наличие ряда пробелов как с теоретической, так и практической стороны, учитывая масштаб проведенных исследований и полученные результаты, оцениваю диссертацию положительно.

6. 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.

Автореферат и публикации К.Я. Смирнова отражают содержание диссертационной работы.

Исходя из вышеизложенного, 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:

кандидат технических наук,
научный сотрудник Федерального государственного
бюджетного учреждения
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
отделение твердотельной электроники,
лаборатория физики полупроводниковых приборов

Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович

Адрес организации:

194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26
тел.раб.: 8(812) 292-79-41
E-mail: shukrillo71@mail.ru

Подпись руки Ш.Ш. Шарофидинова заверю.

*Зам. зав. отделом кадров
Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович*

