

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной и инновационной  
деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

д.т.н.  
\_\_\_\_\_ А.А. Семенов  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

на диссертационную работу

Контрош Евгения Владимировича

**«Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных  
фотоэлектрических преобразователях»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.11. «Физика полупроводников»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В диссертационной работе Е.В. Контрош объектом исследований являются монокристаллические многопереходные фотопреобразователи (МП ФЭП) солнечного и лазерного излучения и туннельные диоды, обеспечивающие электрическое соединение фотоактивных субэлементов в структуре фотопреобразователей. Увеличение числа субэлементов в МП ФЭП перспективно для повышения энергообеспечения космических летательных аппаратов, функционирующих на различных орбитах Земли. МП ФЭП обладают высоким КПД и минимальной предсказуемой деградацией фотоэлектрических характеристик в процессе эксплуатации с учётом воздействия перепадов температуры и космической радиации. КПД МП ФЭП во многом определяется формой прямой темновой ВАХ ФЭП и механизмами транспорта носителей заряда, доминирующими в области объёмного заряда фотоактивных p-n переходов и соединительных туннельных диодов.

Соискателем проведены исследования темновых и световых, ВАХ МП ФЭП в температурном диапазоне 100-350К. Из анализа темновых ВАХ согласно (3-6) экспоненциальной модели определяются температурные зависимости токов насыщения и диодных коэффициентов каждого экспоненциального участка ВАХ. Это позволило соискателю однозначно охарактеризовать доминирующий механизм транспорта, формирующий S-образную форму ВАХ ФЭП, как туннельно-ловушечный. Поскольку его доминирование наблюдается при плотности темнового тока близкого по величине к фототоку структуры ФЭП, было вынесено предположение, что его доминирование связано с влиянием механизмов транспорта соединительных туннельных диодов. Кроме того, необходимо отметить, что соискателем впервые была предложена новая конструкция соединительного ТД на основе гетероструктуры  $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с промежуточным нелегированным  $i\text{-GaAs}$  нанослоем, перспективная для реализации в высокоэффективных многопереходных фотопреобразователях.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

Работа отвечает критерию новизны, так как в ней:

1. Показано, что наличие S-образной формы прямых темновых и световых ВАХ  $\text{InGaP}/\text{GaInAs}/\text{Ge}$  фотопреобразователей при температурах ниже 200 К обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда при плотности темновых токов от  $1 \text{ mA/cm}^2$  до  $100 \text{ mA/cm}^2$  ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД  $\text{InGaP}/\text{GaInAs}/\text{Ge}$  фотопреобразователей.

2. Предложена новая конструкция соединительного ТД на основе гетероструктуры  $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с промежуточным нелегированным  $i\text{-GaAs}$  слоем, перспективная для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.

3. Установлено, что плотность пикового тока туннельного p-i-n диода, созданного на основе гетероструктуры  $n^{++}\text{GaAs}/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , возрастает при увеличении толщины  $i$ -слоя, имеет максимум, а затем

снижается из-за роста толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда.

4. Показано, что включение тонкого наноразмерного нелегированного  $i$ -GaAs слоя между вырожденными  $n^{++}$ GaAs и  $p^{++}$ Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As областями соединительных туннельных диодов обеспечивает температурную стабильность вольтамперных характеристик соединительных элементов. При температурном отжиге, соответствующему режиму выращивания реальных структур монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, в структуре  $n^{++}$ -GaAs:( $\delta$ Si)/ $i$ -GaAs/ $p^{++}$ -Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As:(C) туннельных диодов наблюдается рост максимального значения  $J_p$ .

### **Теоретическая и практическая значимость**

К наиболее значимым результатам, приведенным в диссертационной работе Контрош Е.В., можно отнести следующие:

1. Выявлена S-образная форма прямых темновых и световых ВАХ InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей при температурах ниже 200 К. Изменение формы ВАХ обусловлено влиянием туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда. Доминирование туннельно-ловушечного механизма транспорта носителей заряда в диапазоне плотности темновых токов  $J_g$  от 1 мА/см<sup>2</sup> до 100 мА/см<sup>2</sup> ведёт к снижению фактора заполнения нагрузочной ВАХ и КПД InGaP/GaInAs/Ge фотопреобразователей.

2. Используя численное моделирование, установлено, что зависимость плотности пикового тока туннельного  $p$ - $i$ - $n$  диода от толщины  $i$ -слоя является немонотонной. Плотность пикового тока сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается из-за увеличения толщины потенциального барьера, через который туннелируют носители заряда. Выявлены факторы, влияющие на величину туннельного тока при изменении толщины  $i$ -слоя.

3. Показано что на ВАХ  $n^{++}$ -GaAs/ $n^{+++}$ -GaAs/( $i$ -GaAs/AlGaAs)/ $p^{+++}$ -AlGaAs соединительных туннельных диодов с наличием значительной области (на толщине  $\geq 10$ nm) перекомпенсации донорного и акцепторного профилей легирования атомами Si и Be, образованной в результате

температурной диффузии примеси, при температурах ниже 200К при прямом напряжении смещения до  $U_{reak}$  присутствует область нелинейной (квазиэкспоненциальной) зависимости тока от напряжения.

4. Согласно результатам по дополнительному температурному воздействию на эпитаксиальную пластину структуры  $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{Si})/i\text{-GaAs}/p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}:(\text{C})$ , при температуре 580°C в течение 2 часов, что соответствует режиму роста последующих фотоактивных слоёв монокристаллических многопереходных фотопреобразователей, наблюдается рост максимального значения  $J_p$  на пластине на 30% от 1 А/см<sup>2</sup> до 1.5 А/см<sup>2</sup>.

5. Экспериментально показано влияние на световую ВАХ двухкаскадного ФЭП наличия нелинейности на прямой ветви ВАХ  $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$  туннельного диода. Анализ световых ВАХ двухкаскадных ФЭП и ТД показал, что применение  $n^{++}\text{-GaAs}/i\text{-GaAs}/i\text{-AlGaAs}/p^{++}\text{-AlGaAs}$  соединительных ТД, полученных при более низкой температуре роста (450°C) в структуре двухпереходных ФЭП обеспечивает более низкоомное соединение однопереходных  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  p-i-n ФЭП в структуре каскадного ФЭП.

Практическая значимость работы заключается:

1. Результаты проведённых исследований позволяют прогнозировать характеристики  $\text{InGaP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$  фотопреобразователей в температурном диапазоне 100-350К, приближенных к реальным условиям эксплуатации в космическом пространстве.

2. Предложен новый тип термостабильного соединительного туннельного диода с промежуточным i-слоем, перспективный для реализации высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей.

3. На основе проведённого моделирования механизмов транспорта  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  p-i-n соединительных ТД для монокристаллических многопереходных фотопреобразователей установлено, что включение тонкого ( $\leq 4$  nm) i-слоя позволяет увеличить плотность пикового туннельного тока диода.

4. Полученные в данной работе результаты позволят оптимизировать технологии изготовления чипов монокристаллических многопереходных

фотопреобразователей с большим КПД и кратностью концентрации преобразуемого оптического излучения.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена применением современных экспериментальных методов, сопоставлением экспериментальных данных с расчётными данными, а также сравнением с результатами, полученными из различных литературных источников. Описываемые в работе результаты опубликованы в реферируемых научных журналах и были представлены на российских и международных конференциях.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 2 глав, заключения и списка используемых источников из 73 наименований. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 7 таблиц.

Материалы диссертации изложены достаточно последовательно, простым и понятным языком. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению кандидатских диссертаций, содержит достаточное число иллюстраций и таблиц, текст регулярно сопровождается ссылками на публикации.

Структура и содержание работы свидетельствуют о том, что в целом диссертация представляет собой завершённое научное исследование, в котором продемонстрирована актуальность, новизна и перспективность подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания новых функциональных материалов.

Автореферат и опубликованные работы в достаточной мере отражают содержание диссертации.

### **Рекомендации по использованию**

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для ознакомления и использования специалистами в области оптоэлектроники и радиофотоники ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий.

Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области электроники, наноэлектроники и альтернативной энергетике.

### **Замечания и рекомендации по диссертационной работе**

1. В работе не представлены данные об изучении радиационной стойкости трёхпереходных ФЭП, которая является одной из важных характеристик при эксплуатации образцов в условиях открытого космоса совместно с концентраторами солнечного излучения. Получение дополнительной информации о радиационной стойкости могло бы усилить практическую значимость исследования.

2. В диссертации недостаточно подробно рассмотрены тепловые характеристики предложенной структуры. В частности, в работе не представлено рассмотрение влияния на характеристики ФЭП криогенных температур, 78 К и ниже, что в большей степени соответствует условиям, в которых будет эксплуатироваться структура в условиях космоса.

3. В диссертации не представлено исследование процессов деградации исследуемых преобразователей, происходящих при циклическом изменении их температуры в условиях космической эксплуатации. В целом, вопросы деградации предлагаемой структуры ФЭП в диссертации практически не рассматриваются, хотя они являются весьма важными при практическом использовании ФЭП.

4. В работе не приводятся статистические параметры исследования, в частности, нет упоминания о количестве исследованных образцов монолитных многопереходных фотопреобразователей, что несколько затрудняет оценку воспроизводимости полученных результатов.

Сделанные замечания носят частный характер и не ставят под сомнения основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической значимости диссертации.

### **Заключение**

Диссертационная работа Контрош Евгения Владимировича является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном и техническом уровне. Результаты и выводы диссертации являются достоверными и научно-обоснованными. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации и её основные положения и выводы.

Апробация работы выполнена публикацией 15 статей в базах цитирования SCOPUS и WoS, 4 патента Российской Федерации.

Публикации в авторитетных изданиях и выступления на международных конференциях свидетельствуют о том, что полученные автором диссертации результаты соответствуют современному научному уровню.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, достоверности, а также объему выполненных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа Контрош Евгения Владимировича «Исследование механизмов токопрохождения в многопереходных фотоэлектрических преобразователях» полностью отвечает Положениям о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Представленная работа соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также требованиям п.9 – п.14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ). Автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. «Физика полупроводников».

Доклад Контрош Е.В. заслушан. Отзыв по результатам всестороннего рассмотрения диссертации и обсуждения доклада единогласно одобрен на заседании кафедры фотоники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский

государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» 19 июня 2024 г., протокол № 4. Отзыв подготовлен на этом же заседании.

Заведующий кафедрой фотоники  
доктор технических наук, доцент

Тарасов С.А.

Ученый секретарь кафедры фотоники,  
кандидат технических наук, доцент

Степанова О.С.

**Полное наименование организации:** федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

**Адрес:** 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

**Телефон:** (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58.

**Сайт организации:** <https://etu.ru>

**Электронная почта:** [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)