



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УТВЕРЖДАЮ

Ректор СПбАУ РАН

Ж.И. Алфёрова

А.Р. Наумов

27.11.2024

### Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки  
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет  
имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

о диссертационной работе **Минтаирова Михаила Александровича** «Анализ связей вольт-амперных характеристик и фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - «Физика полупроводников»

В работе Минтаирова М.А. объектом исследования являются много-переходные (МП) солнечные элементы (СЭ) различного типа и их вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также зависимости определяемых напрямую из ВАХ параметров СЭ от интенсивности падающего излучения — фотовольтаические (ФВ) зависимости. МП СЭ активно развиваются последние десятилетия и являются наиболее перспективным направлением фотовольтаики с точки зрения достижения предельных значений эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. На данный момент эффективность МП СЭ приблизилась к 50%, что стало возможным благодаря значительному усложнению структур СЭ. Перспективность технологии МП СЭ, а также уже достигнутые высокие значения эффективности, определяют актуальность работ по исследованию и совершенствованию МП СЭ.

Важной частью научно-исследовательских работ в области СЭ является анализ их ВАХ и ФВ зависимостей. Как показано в литературном обзоре работы, для однопереходных СЭ существует ряд распространенных подходов для проведения разностороннего анализа указанных характеристик. При этом уже выделен ряд строгих связей между ФВ зависимостями и ВАХ, а также факторы, влияющие на них. Однако, особенности СЭ с

несколькими p-n переходами приводят к тому, что применение известных ранее методов и подходов анализа характеристик МП СЭ становится не корректным.

Основной **целью работы** было исследование взаимного поведения вольт-амперных и фотовольтаических характеристик МП СЭ и проведение системного описания влияния на эти характеристики структурных особенностей МП СЭ, а также разработка методов анализа свойственных МП СЭ эффектов и введение параметров, которые позволят численно описывать регистрируемые эффекты.

В работе получен ряд результатов, обладающих **научной новизной**:

1. Описано влияние эффекта дисбаланса токов, фотогенерированных (ФГ) в субэлементах МП СЭ, на ВАХ характеристики и ФВ зависимости. Обнаружено, что влияние эффекта нарушает базовую сдвиговую связь между двумя различными ВАХ, заключающуюся в том, что ВАХ переходят друг в друга при их смещении на разницу ФГ тока.

2. Обнаружено и описано влияние поглощения электролюминесцентного излучения одного субэлемента другим (эффект люминесцентной связи (ЛС)) на дисбаланс ФГ токов.

3. Установлена связь между нелинейными особенностями ВАХ в районе точки напряжения холостого хода и их проявлением на ФВ зависимостях.

4. Описано влияние эффекта встречной фото-ЭДС на ВАХ характеристики и ФВ зависимости.

5. Обнаружено, что с ростом числа субэлементов МП СЭ увеличивается равномерность растекания тока между контактами, что приводит к уменьшению резистивных потерь в режиме оптимальной нагрузки.

6. Разработан новый подход для описания ВАХ и ФВ зависимостей МП СЭ с учетом всех эффектов, свойственных МП СЭ.

7. Предложен метод получения ВАХ МП СЭ, включающий в себя только сумму ВАХ p-n переходов, генерирующих полезную энергию.

К наиболее значимым результатам, приведенным в диссертационной работе Минтаирова М.А., можно отнести следующие:

1. Определены фундаментальные причины нарушения базовой сдвиговой связи между темновой и световыми ВАХ, и установлен характер основных связей ВАХ и ФВ зависимостей для фотоприемников, содержащих несколько p-n переходов.

2. Описано влияние ряда эффектов, свойственных МП СЭ, на его ВАХ и ФВ зависимости, а именно установлено, как влияют на ВАХ и ФВ зависимости: дисбаланс ФГ токов, эффект люминесцентной связи, генерация в структуре встречной фото-ЭДС, изменение картины растекания тока в МП СЭ.

3. Разработаны экспериментальные методы получения суммарной ВАХ МП СЭ и входящих в его структуру р-п переходов, генерирующих полезную энергию.

4. Разработан ряд моделей, позволяющих с учетом всех присущих МП СЭ эффектов, описывать их ВАХ и ФВ зависимости.

**Достоверность:** Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 19 международных и 2 всероссийских конференциях и изложены в 30 печатных работах, в том числе в 9 статьях в рецензируемых журналах, в 16 статьях в специальных выпусках рецензируемых журналов, посвященных публикации трудов международных конференций, и в сборниках тезисов 3 международных и 2 всероссийских конференций.

**Практическая значимость.** Результаты работы позволяют оценивать влияние различных эффектов на характеристики МП СЭ, в том числе на их эффективность и проводить комплексное моделирование структур МП СЭ. Также предложен ряд методов для анализа ВАХ и ФВ зависимостей МП СЭ, позволяющих получать параметры отдельных структурных элементов, в том числе субэлементов. Суммарно результаты работы востребованы при оптимизации конструкций МП СЭ, и особенно при разработке новых структурных концепций.

По представленной работе можно сделать следующие отдельные замечания:

1. Очевидно, что соискатель в ходе работы проанализировал очень большой пласт экспериментальных данных для фотоэлектрических преобразователей различной конструкции и назначения. Однако, несмотря на такую связь с экспериментальной работой в заключительных разделах как диссертации, так и автореферата, практически отсутствуют какие-либо численные значения, которые бы показали практический вклад исследованных эффектов и особенностей на характеристики конкретных приборов.

2. Из текста диссертации и автореферата остается не ясным, оказывает ли эффект электролюминесцентной связи, т.е. возникающее в р-п переходах широкозонных субэлементов дополнительное излучение с последующим его поглощением в указанных субэлементах, положительное влияние на приборные характеристики фотоэлектрических преобразователей.

3. В диссертационной работе практически нет сведений об оборудовании (как измерительном, так и ростовом эпитаксиальном), на котором проводились эксперименты, положенные в основу диссертации. Очевидно, что полученные результаты не зависят непосредственно от конкретных установок, но стоило уделить этому вопросу больше внимание в методическом разделе.

Тем не менее, данные замечания носят частный характер, не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей собой комплексное и законченное исследование. По актуальности поставленных задач, объему выполненных исследований, научной и практической значимости

полученных результатов, представленная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Минтаиров М.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11- «Физика полупроводников»

### **Рекомендации по использованию**

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для ознакомления и использования специалистами, занимающимися исследованием фотоэлектрических преобразователей, работающих в научно-исследовательских организациях и на промышленных предприятиях. Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов, специализирующихся на полупроводниковых устройствах.

### **Общая оценка диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 167 страниц, включая 59 рисунков и 4 таблицы. Список цитированной литературы содержит 100 наименований.

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

Апробация работы выполнена при публикации 30 статей в журналах, входящих в базы данных SCOPUS и WoS, при этом результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 21 международных и всероссийских конференциях.

### **Заключение.**

Диссертационная работа Минтаирова Михаила Александровича является завершённой 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 достоверно отражают содержание диссертации и её основные положения и выводы.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, а также объёму выполненных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа Минтаирова Михаила Александровича «Анализ связей вольт-амперных характеристик и

фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов» полностью отвечает требованиям Положения 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, а её автор Минтаиров Михаила Александровича заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - «Физика полупроводников».

Диссертационная работа, автореферат, доклад соискателя и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научном семинаре центра Нанотехнологий «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» (Протокол N 3 от 14 ноября 2024 г.).

Проректор по науке СПбАУ РАН им. Ж.И.Алфёрова

д.ф.-м.н., доцент

Тел.: +7 (812) 297-21-45

e-mail: imukhin@spbau.ru



И.С. Мухин