

*На правах рукописи*

МИНТАИРОВ Михаил Александрович

АНАЛИЗ СВЯЗЕЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И  
ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПЕРЕХОДНЫХ  
СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

специальность

1.3.11 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) 194021, СПб, ул. Политехническая 26.

Научный руководитель: Калюжный Николай Александрович, кандидат физико-математических наук, ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург), ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией.

Официальные оппоненты: Жуков Алексей Евгеньевич, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, НИУ «Высшая школа экономики» (г. Санкт-Петербург), профессор, руководитель департамента физики.

Скачков Александр Федорович, кандидат технических наук, АО «Сатурн» (г. Краснодар), заместитель генерального директора по научной работе.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический Университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

Защита состоится 19 декабря 2024 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 34.01.02 при ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, СПб, ул. Политехническая 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» ноября 2024 года

Ученый секретарь диссертационного совета:

Л.М. Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние десятилетия ведётся активная работа по созданию и развитию приборов, преобразующих энергию Солнца в электрическую, — солнечных элементов (СЭ). Современная промышленность выпускает различные СЭ, отличающиеся своими характеристиками, стоимостью и областью применения (для наземного или космического использования). При этом, на данный момент потенциал солнечных элементов реализован не полностью, а их эффективность (КПД) значительно отстаёт от теоретического предела. Это определяет актуальность научно-исследовательских работ по разработке технологий создания и совершенствованию конструкций СЭ. Одним из наиболее перспективных путей достижения предельных значений эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую является подход по созданию СЭ с несколькими р-п переходами, сформированными в полупроводниковых материалах с различной шириной запрещенной зоны — многопереходных (МП) солнечных элементов. За счёт более оптимального преобразования энергии солнечного излучения такие приборы обладают большей эффективностью, которая на данный момент приближается к 50% (для наземного спектра AM1.5).

Исследование и разработка новых конструкций СЭ требует глубокого анализа их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и получаемых из них фотовольтаических (ФВ) параметров. К таким параметрам обычно относятся — фотогенерированный ток, напряжение холостого хода, а также напряжение и ток оптимальной нагрузки. В случае концентраторной фотовольтаики особую значимость имеет анализ зависимостей ФВ параметров от кратности мощности падающего излучения или от величины фотогенерированного (ФГ) тока. Такие зависимости в данной работе называются фотовольтаическими.

Многолетние исследования однопереходных СЭ выделили ряд строгих связей между фотовольтаическими зависимостями и вольт-амперными

характеристиками, а также факторы, влияющие на них. Однако для структур с несколькими p-n переходами (субэлементами) характер этих связей усложняется, что связано с эффектами, свойственными только МП СЭ. К таким эффектам относятся: дисбаланс фотогенерированных токов, заключающийся в том, что субэлементы могут вырабатывать разные по величине ФГ токи; эффект люминесцентной связи (ЛС), вызванный тем, что электролюминесцентное излучение одного субэлемента может наводить дополнительные ФГ токи в другом субэlemente и эффект встречной фото-эдс, которую могут вырабатывать соединительные туннельные диоды (ТД), включенные в структуру МП СЭ. Анализ литературы выявил отсутствие как комплексного исследования взаимного поведения вольт-амперных и фотовольтаических характеристик МП СЭ, так и системного описания влияния на эти характеристики перечисленных выше эффектов. Необходимость создания такого описания на основе комплексного исследования, перспективность объекта исследования, а также активно развивающееся в фотовольтаике направление многопереходных солнечных элементов определило актуальность работы.

**Цели и задачи работы.** Основной целью работы было исследовать влияние различных структурных особенностей МП СЭ на их вольт-амперные характеристики и ФВ зависимости, разработать методы анализа эффектов, свойственных МП СЭ, ввести параметры, которые позволят численно описывать регистрируемые особенности и эффекты.

Выполнение работы позволило:

1. Определить фундаментальные причины нарушения базовой сдвиговой связи между темновой и световыми ВАХ, заключающейся в том, что световые ВАХ могут быть получены путём смещения темновой ВАХ на величину ФГ тока.
2. Описать влияние дисбаланса ФГ токов на ФВ параметры МП СЭ, определяемые режимами холостого хода и оптимальной нагрузки.

3. Определить вклад люминесцентной связи в дисбаланс ФГ токов и проанализировать её влияние на ВАХ и ФВ зависимости МП СЭ.
4. Описать особенности световых ВАХ и ФВ зависимостей напряжения холостого хода от ФГ тока, вызванные генерацией в ТД встречной фото-эдс.
5. Исследовать отличительные особенности влияния на ВАХ МП СЭ туннельных диодов с низким пиковым током, а также гетероинтерфейсов, обладающих нелинейной ВАХ.
6. Исследовать влияние на резистивную составляющую ВАХ МП СЭ процесса растекания тока между полосками лицевого металлического контакта.
7. Разработать экспериментальные методы получения генераторной части ВАХ МП СЭ, т.е. суммарной ВАХ и р-п переходов, генерирующих полезную энергию, в которой исключено падение напряжения на соединительных элементах гетероструктуры.
8. Разработать сегментную модель МП СЭ, с учетом всех присущих им эффектов, позволяющую аппроксимировать их ВАХ и ФВ зависимости.

#### **Научная новизна.**

1. Установлено, что эффект дисбаланса токов, фотогенерированных в субэлементах МП СЭ, можно описать добавочным напряжением дисбаланса, величина которого определяется диодным коэффициентом р-п перехода субэлемента с наибольшим ФГ током и коэффициентом дисбаланса, равным отношению избыточного ФГ тока к наименьшему. Показано, что для режимов напряжения холостого хода и оптимальной нагрузки соответствующие добавочные напряжения дисбаланса являются константами.
2. Обнаружено, что в случае дисбаланса ФГ токов между ВАХ, полученными при разной кратности солнечного излучения, нарушается базовая сдвиговая связь, заключающаяся в том, что ВАХ переходят друг в друга при их смещении на разницу ФГ тока.

3. Обнаружено, что при дисбалансе ФГ токов эффект люминесцентной связи субэлементов МП СЭ всегда уменьшает величину добавочного напряжения дисбаланса (в предельных случаях влияние эффекта сводится к уменьшению коэффициента дисбаланса).
4. Установлено, что при балансе ФГ токов наведённые внутренней электролюминесценцией токи (эффект ЛС) не влияют на базовую сдвиговую связь между ВАХ, полученными при разных концентрациях падающего излучения.
5. Установлена связь между нелинейными особенностями ВАХ в районе точки напряжения холостого хода и их проявлениями на ФВ зависимостях, вызванными наличием в структурах МП СЭ неоптимизированных туннельных диодов, высокорезистивных гетероинтерфейсов или генерацией туннельными диодами (ТД) встречной фото-эдс.
6. Установлено, что эффект встречной фото-эдс в ТД, пиковый ток которых значительно превосходит ток оптимальной нагрузки СЭ, проявляется на ВАХ как незначительно зависящее от уровня освещения сосредоточенное последовательное сопротивление.
7. Обнаружено, что с ростом числа субэлементов МП СЭ увеличивается равномерность растекания тока между контактами, что приводит к уменьшению резистивных потерь для режима оптимальной нагрузки.
8. Разработан сегментный подход к описанию ВАХ и ФВ зависимостей МП СЭ, учитывающий влияние всех исследуемых в работе эффектов на ВАХ МП СЭ, и предложены экспериментальные методы определения параметров сегментированной ВАХ.
9. Предложен и экспериментально апробирован метод получения ВАХ генераторной части МП СЭ (ВАХ, включающая в себя только сумму ВАХ p-n переходов, генерирующих полезную энергию), основанный на измерении

взаимозависимости трёх величин «ток»—«напряжение»—«интенсивность электролюминесценции». Показано, что на результаты метода не влияют эффекты встречной фото-эдс, люминесцентной связи, а также резистивных потерь на последовательном сопротивлении МП СЭ.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты позволяют проводить комплексный анализ основных характеристик МП СЭ с учетом собственных им эффектов, проводить численную характеризацию этих эффектов, а также выявлять структурные особенности (в том числе отдельных субэлементов), которые могут быть оптимизированы для улучшения утилитарных параметров МП СЭ. Это востребовано при оптимизации конструкций МП СЭ и особенно при разработке новых структурных концепций. Полученные результаты не привязаны к конкретному типу МП СЭ, количеству входящих в его состав субэлементов или спектральному составу преобразуемого излучения.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. При дисбалансе фотогенерированных токов в многопереходном солнечном элементе фотовольтаические параметры, определяемые режимами холостого хода и оптимальной нагрузки (включая эффективность и фактор заполнения ВАХ), сохраняют логарифмическую зависимость от фотогенерированного тока. При этом световые ВАХ не сохраняют логарифмический вид и не совпадают с темновой ВАХ при их смещении на величину фотогенерированного тока.
2. Эффект люминесцентной связи при балансе фотогенерированных токов, индуцированных внешним освещением, сохраняет базовую связь между темновой и световыми ВАХ, заключающуюся в том, что световые ВАХ могут быть получены путём смещения темновой ВАХ на величину фотогенерированного тока. При дисбалансе эффект люминесцентной связи понижает добавочное напряжение дисбаланса.

3. Величина пикового тока туннельного р-п перехода критично влияет на эффект встречной фото-эдс: чем больше пиковый ток, тем меньше величина встречной фото-эдс. Если величина фотогенерированного тока солнечного элемента меньше, чем разность пикового тока и фотогенерированного тока туннельного диода, то эффект встречной фото-эдс проявляется на ВАХ как линейное последовательное сопротивление, незначительно зависящее от интенсивности освещения. Если величина фотогенерированного тока больше указанной разности, происходит скачкообразное падение напряжения холостого хода.
4. Увеличение количества субэлементов приводит к более равномерному растеканию тока в структуре многопереходного солнечного элемента, при этом для режима оптимальной нагрузки величина резистивных потерь уменьшается, стремясь к насыщению.
5. Взаимозависимости трёх величин «ток»—«напряжение»—«интенсивность электролюминесценции» однозначно определяют ВАХ генераторной части каждого субэлемента (с точностью до константы) и точную ВАХ генераторной части многопереходного фотопреобразователя. При этом, на форму определяемой ВАХ не влияют: дисбаланс фотогенерированных токов, встречная фото-эдс, люминесцентная связь, а также любые резистивные потери.

**Апробация работы.** Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 19 международных и 2 всероссийских конференциях.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы 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.

**Личный вклад автора.** Автором лично проводились работы по сбору и обработке экспериментальных данных, моделированию характеристик МП СЭ и планированию экспериментов, требуемых для апробации научных гипотез, вошедших в положения диссертации.

**Структура и объем 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1.** Первая глава посвящена обзору основных факторов, влияющих на характеристики СЭ, и краткому обзору структур современных МП СЭ. Для однопереходных СЭ в литературе выделяют ряд строгих связей между зависимостями ФВ параметров и ВАХ. В разделе 1.1. показано, что причиной этих связей является то, что безрезистивные ВАХ, полученные при разной кратности падающего излучения, переходят друг в друга при их смещении на разницу ФГ токов. Такая связь ВАХ в работе названа сдвиговой связью. На рис. 1 показана сдвиговая связь темновой и световой ВАХ однопереходного СЭ. Видно, что характерные точки световой ВАХ (ток короткого замыкания -  $J_{sc}$ , напряжение холостого хода -  $V_{oc}$ , ток -  $J_m$  и напряжение -  $V_m$  оптимальной нагрузки), дающие основные ФВ параметры, могут быть соотнесены с точками на темновой ВАХ при помощи их токового сдвига на величину ФГ тока  $J_g$ .

Показанные на рис. 1 характеристики являются безрезистивными. При преобразовании солнечного излучения большой концентрации требуется учитывать влияние резистивной составляющей СЭ на его ВАХ. Основной вклад

в последовательное сопротивление СЭ вносят сопротивления слоёв структуры (включая полупроводниковую подложку), сопротивление контактов, сопротивление металл-полупроводник, а в наибольшей степени сопротивление слоев, по которым происходит растекание тока между полосками («шинами») лицевого металлического контакта прибора [1].

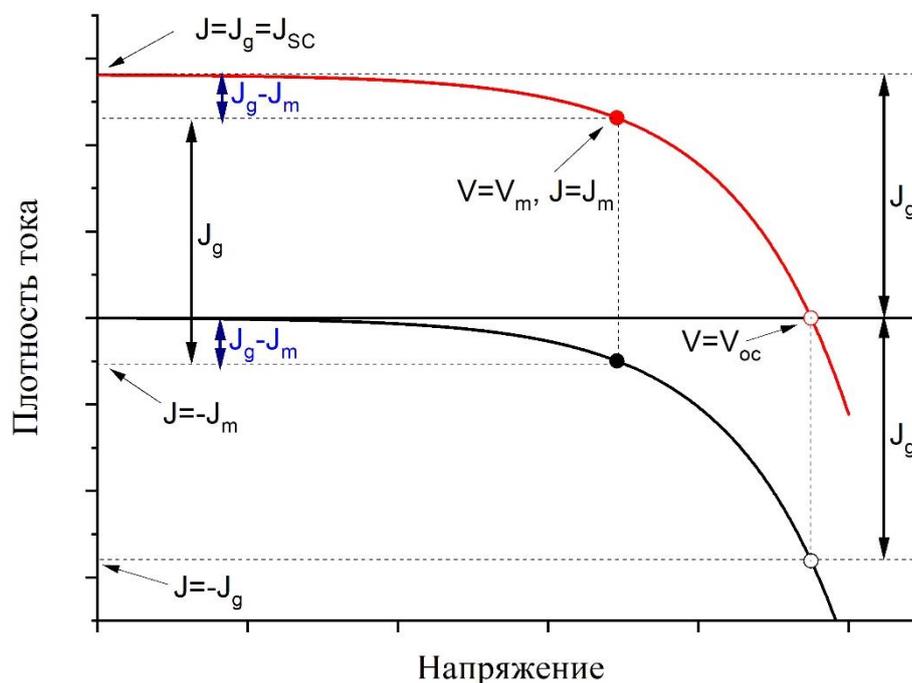


Рис. 1. Сдвиговая связь ВАХ однопереходного солнечного элемента и характерные точки световой ВАХ.

При рассмотрении МП СЭ требуется дополнительно учитывать вклад в последовательное сопротивление той части структуры, которая служит для соединения между собой отдельных субэлементов. Таким образом, с электрической точки зрения любой СЭ может быть представлен в виде набора последовательно соединённых элементов, часть из которых выполняет соединительную функцию, а часть служит для генерации полезной энергии. Группируя элементы по их свойствам, можно представить эквивалентную схему СЭ, состоящую из двух последовательно соединённых частей: генераторной и соединительной. Каждая часть обладает своей ВАХ, а полная ВАХ СЭ является вольтовой суммой генераторной и соединительной ВАХ.

В отличие от однопереходного случая, генераторная часть МП СЭ содержит несколько фотовольтаических р-п переходов, а соединительная часть включает в себя туннельные диоды. Эти отличия приводят к ряду эффектов, которые значительно влияют на ВАХ и ФВ зависимости МП СЭ.

**Глава 2.** Во второй главе рассмотрены модельные подходы для описания влияния эффектов, возникающих в генераторной части МП СЭ, на их ВАХ и ФВ зависимости. Был предложен сегментный подход к описанию ВАХ генераторной части МП СЭ (Рис. 2).

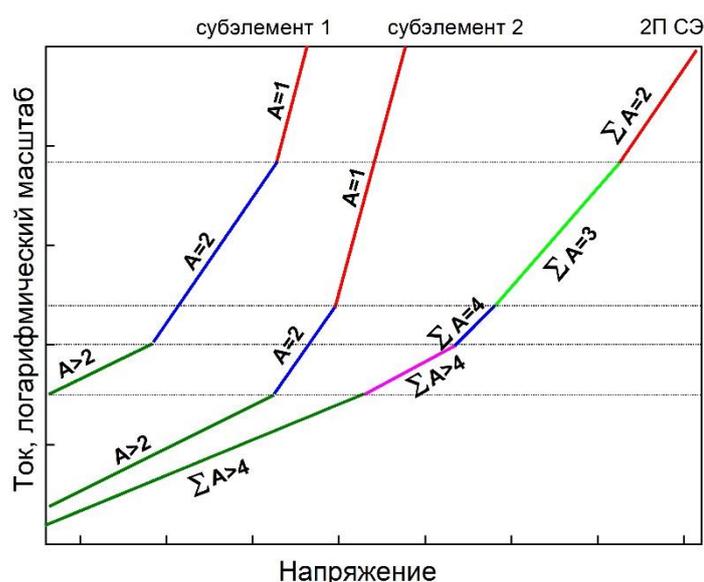


Рис. 2. Сегментная аппроксимация ВАХ двух субэлементов (субэлемент 1 и субэлемент 2) и формирование сегментов ВАХ МП СЭ.

На каждом сегменте ВАХ моноэкспоненциальна, поэтому зависимость  $V(J)$  определяется простым выражением:

$$V(J) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i kT}{q} \ln \left[ \frac{J_{g,i} - J}{J_{0,i}} \right] = \frac{kT}{q} \sum_{i=1}^n \ln \left[ \left( \frac{J_{g,i} - J}{J_{0,i}} \right)^{A_i} \right] = \frac{kT}{q} \ln \left[ \prod_{i=1}^n \left( \frac{J_{g,i} - J}{J_{0,i}} \right)^{A_i} \right], \quad (1)$$

где  $A_i$ ,  $J_{0,i}$ ,  $J_{g,i}$  – соответственно, диодный коэффициент, ток насыщения и ФГ ток  $i$ -го субэлемента,  $n$  - количество субэлементов. По аналогии с однопереходными приборами ФГ током МП СЭ будем считать ток, равный регистрируемому на ВАХ току короткого замыкания. Так как субэлементы МП СЭ соединены последовательно, ток короткого замыкания всегда соответствует наименьшему

ФГ току, поэтому ФГ ток МП СЭ равен  $J_g = \min\{J_{g,1}, J_{g,2}, \dots, J_{g,n}\}$ , тогда (1) может быть представлено в виде суммы двух слагаемых:

$$V(J) = \frac{AkT}{q} \ln \left[ \frac{J_g - J}{J_0} \right] + V_a = E \cdot \ln \left[ \frac{J_g - J}{J_0} \right] + V_a, A = \sum_{i=1}^n A_i, J_0 = \sqrt[A]{\prod_{i=1}^n J_{0,i}^{A_i}}, \quad (2)$$

где  $A$  и  $J_0$  - диодный коэффициент и ток насыщения сегмента. Первое слагаемое по форме полностью повторяет ВАХ однопереходного СЭ. Второе слагаемое характеризует дисбаланс фотогенерированных токов субэлементов и определяется только отношением ФГ токов и диодными коэффициентами сегментов. Введя коэффициенты дисбаланса ФГ токов равные отношению ФГ тока субэлемента к ФГ току МП СЭ  $\kappa_i = \frac{J_{g,i}}{J_g} \geq 1$ , получаем выражение для  $V_a$  - добавочного напряжения дисбаланса:

$$V_a = \frac{kT}{q} \ln \left[ \prod_{i=1}^n \left( \frac{\kappa_i J_g - J}{J_g - J} \right)^{A_i} \right], \quad (3)$$

Параметры для этого выражения могут быть определены экспериментально. Сегментное представление ВАХ является общим как для одно-, так и для много-переходных СЭ. В первом случае параметры сегментов являются параметрами единственного р-п перехода. В МП СЭ эти же параметры являются комбинацией параметров всех р-п переходов субэлементов. При полном балансе ФГ токов все  $\kappa_i = 1$  и  $V_a$  обращаются в 0, а выражение (2) приобретает вид полностью соответствующий случаю однопереходного СЭ. Применимость сегментного подхода для описания ВАХ и ФВ зависимостей, полученных при дисбалансе ФГ токов, была показана экспериментально при анализе характеристик трёхпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ.

Другим рассмотренным в работе эффектом, возникающим в генераторной части МП СЭ, является эффект люминесцентной связи. Электролюминесцентное излучение одного субэлемента наводит дополнительный фототок в соседнем субэlemente, влияя на дисбаланс ФГ токов. Было предложено описывать эффект при помощи результативности люминесцентной связи  $\gamma$ , характеризующей,

какая часть тока через р-п переход одного субэлемента посредством электролюминесценции (ЭЛ) будет наведена в другом субэлементе. С использованием двухдиодной модели ВАХ и зависимости интенсивности ЭЛ от напряжения на р-п переходе были предложены базовые выражения для описания эффекта:

$$J_{pn} = J_{rd} \frac{\gamma/\gamma_s}{(1-\gamma/\gamma_s)^2} \quad (4a)$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{J_{rd}}{4J_{pn}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4J_{pn}}{J_{rd}}} \right)^2 = \gamma_s \left[ 1 + \frac{J_{rd}}{2J_{pn}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4J_{pn}}{J_{rd}}} \right) \right], \quad (4b)$$

где  $\gamma_s$  - предельное значение результативности ЛС,  $J_{pn}$  - ток через р-п переход излучающего субэлемента,  $J_{rd} = \frac{J_{02}^2}{J_{01}}$  - характерный ток, зависящий от величин токов насыщения  $J_{01}$  и  $J_{02}$  двухдиодной модели, характеризующих два основных механизма протекания тока [2, 3]. Применимость модели была проверена экспериментально (рис. 3а) для GaInP/GaAs/Ge СЭ.

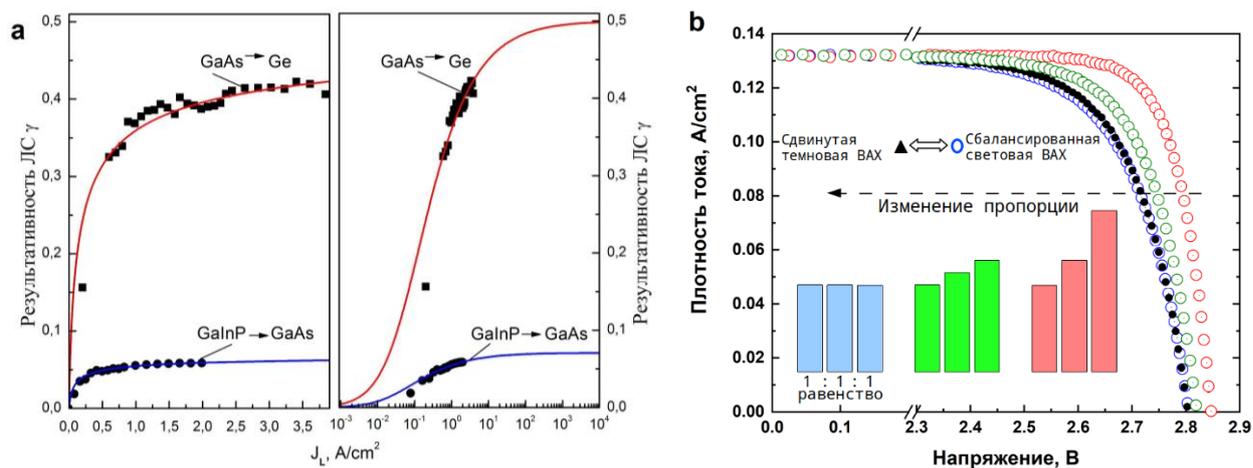


Рисунок 3. а) Передаточная функция для пар субэлементов GaInP–GaAs и GaAs–Ge в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабах: точки - экспериментальные данные, линия – расчет по формуле (4). б) Экспериментальная световая ВАХ (синие кружочки), полученная при балансе ФГ токов, и совпадающая с ней сдвинутая темновая (чёрные треугольники) ВАХ, а также ВАХ, полученные при дисбалансе фотогенерированных токов (зелёные и красные символы). Столбчатые диаграммы показывают уровень дисбаланса фотогенерированных токов, цвета диаграмм соответствуют цветам, которыми маркируются экспериментальные зависимости.

На основе модели была предложена процедура расчёта ВАХ МП СЭ с учётом влияния эффекта ЛС. Важным следствием модели является то, что при балансе ФГ токов, наведенных внешним освещением, ток через p-n переходы, а значит, и напряжения всех субэлементов определяются разницей ФГ тока и тока, протекающего через структуру СЭ. Это условие является критерием наличия сдвиговой связи между световыми и темновой ВАХ. Наличие такой связи было подтверждено экспериментально (рис 3. б).

**Глава 3.** Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей соединительной части МП СЭ. Как отмечалось ранее соединительная часть МП СЭ обычно содержит туннельные диоды, которые могут поглощать часть падающего излучения, генерируя встречную фото-эдс. Влияние генерации встречной фото-эдс на ВАХ и ФВ зависимости было исследовано экспериментально, для этого были изготовлены структуры, содержащие разные конструкции туннельных диодов. Было установлено, что при некоторой кратности мощности падающего излучения встречная фото-эдс понижает значение напряжения холостого хода, а при достижении тока генерации в ТД равного пиковому току, происходит резкое падение  $V_{oc}$ . Моделирование характеристик туннельных диодов с высоким значением пикового тока показало незначительное влияние фото-эдс на  $V_{oc}$ . В этом случае эффект встречной фото-эдс проявляется на ВАХ как дополнительное линейное сопротивление, незначительно зависящее от мощности падающего излучения.

Были исследованы экспериментальные характеристики пассивных (не генерирующих встречную фото-эдс) ТД с низким пиковым током, а также высокорезистивные гетероинтерфейсы (ГИ). Эти специальные ТД могут быть результатом становления технологии или разработки новой концепции гетероструктур МП СЭ. Они почти одинаково влияют на ВАХ - приводят к нелинейной зависимости ВАХ в области точки холостого хода. Было экспериментально показано, что отличительной особенностью ГИ от ТД

является температурная зависимость ВАХ. В случае ГИ его вклад в ВАХ прибора значительно изменяется при изменении температуры на величину порядка 10 градусов. Таким образом, регистрируя ВАХ при разных температурах, можно определить, какой конкретно пассивный элемент оказывает негативное влияние на ее форму, и провести оптимизацию структуры.

Также было исследовано влияние увеличения числа субэлементов на величину падения напряжения на соединительных элементах МП СЭ (на величину резистивных потерь). Согласно (2) диодные параметры на каждом сегменте ВАХ зависят от числа субэлементов. Изменение параметров диодов в эквивалентной схеме СЭ приводит к изменению картины распределения токов. При помощи двумерной модели растекания тока был произведен расчёт ВАХ МП СЭ с различным количеством субэлементов. В расчёте величина ФГ тока МП СЭ сохранялась. Было обнаружено, что с увеличением числа субэлементов распределение токов в слое, в котором происходит растекание тока, становится более равномерным. Это приводит к изменению ВАХ соединительной части МП СЭ (рис. 4а).

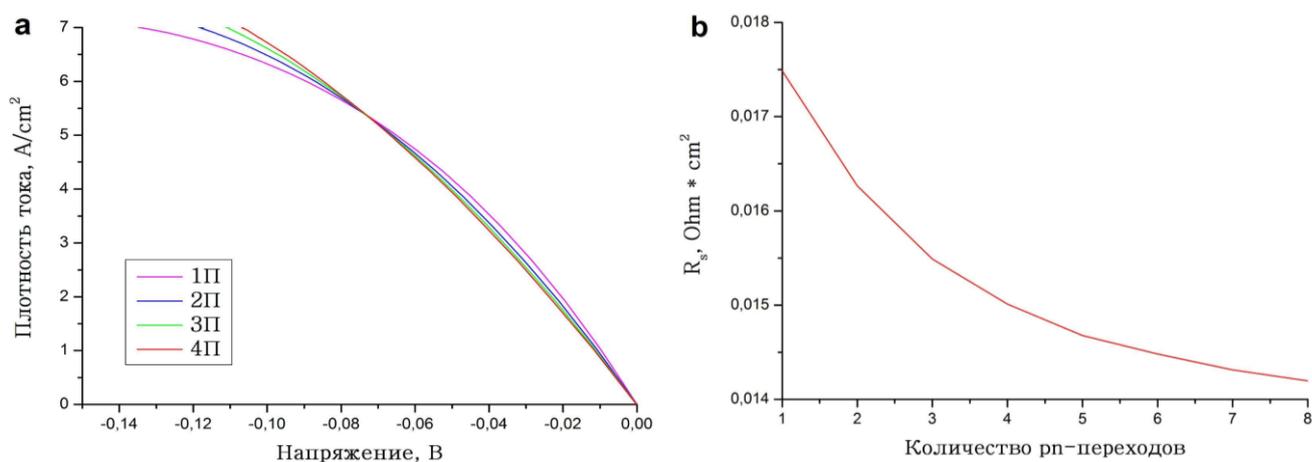


Рис. 4. а) ВАХ соединительной части МП СЭ с разным количеством субэлементов. б) Величина сосредоточенного эквивалента последовательного сопротивления для МП СЭ с разным количеством р-п переходов (субэлементов).

При этом существуют участки ВАХ, где падение напряжения на элементах соединительной части растёт, а есть участки, где оно уменьшается. Для участка, соответствующего режиму оптимальной нагрузки, падение напряжения уменьшается, что соответствует уменьшению линейного эквивалента последовательного сопротивления  $R_s$  (рис. 4b).

**Глава 4.** В четвёртой главе проведено исследование влияния на ВАХ и ФВ зависимости МП СЭ эффектов дисбаланса ФГ токов и ЛС, возникающих в генераторной части МП СЭ, а также предложен метод экспериментального получения генераторной ВАХ. Влияние на ВАХ и ФВ зависимости рассмотрено для упрощенного случая - двухпереходного СЭ с односегментной ВАХ. При этом показано, что экспериментальные характеристики любых МП СЭ обладают теми же свойствами. Были исследованы зависимости добавочного напряжения дисбаланса от тока, пропускаемого через структуру СЭ (рис. 5а). Зависимости приведены как с учётом, так и без учёта эффекта ЛС. Видно, что эффект ЛС уменьшает величину добавочного напряжения. Приведённый расчёт был выполнен для случая, когда результативность ЛС  $\gamma$  равна предельной результативности  $\gamma_s$ . В этом случае учёт влияния ЛС на дисбаланс ФГ токов сводится к замене коэффициента дисбаланса  $\kappa$  на  $\kappa_{LC} = \frac{\kappa+1}{\gamma+1}$ , при этом  $\kappa_{LC} < \kappa$ .

Путем расчёта показано, что дисбаланс ФГ токов нарушает базовую сдвиговую связь между темновой и световой ВАХ и ведёт к отклонению световых ВАХ от темновой ВАХ при разной кратности падающего излучения  $X$  (рис. 5). Было произведено совмещение этих характеристик — сдвиг на величину ФГ тока. Видно, что при дисбалансе ФГ токов световые ВАХ значительно отклоняются от логарифмической зависимости, в то время как зависимости напряжения холостого хода и напряжения оптимальной нагрузки остаются логарифмическими. Это связано с тем, что величина добавочного напряжения не зависит от уровня освещения при токах, составляющих постоянную долю от ФГ тока  $\alpha = J/J_g = const$ . Для напряжения холостого хода ( $J=0$ )  $\alpha$  всегда константа и

равна нулю. Для тока оптимальной нагрузки  $\alpha = \ln(J_g/J_0)/(1 + \ln(J_g/J_0))$  и определяется отношением ФГ тока к току насыщения p-n перехода. На практике это отношение близко к константе.

Расчёт также показал, что эффект ЛС повышает величину  $V_{oc}$  и незначительно сказывается на величине  $V_m$ . Значение темновых токов насыщения при ЛС уменьшаются (рис. 5б). Это связано с тем, что в темновом режиме структура генерирует фототок за счёт поглощения электролюминесценции субэлементов.

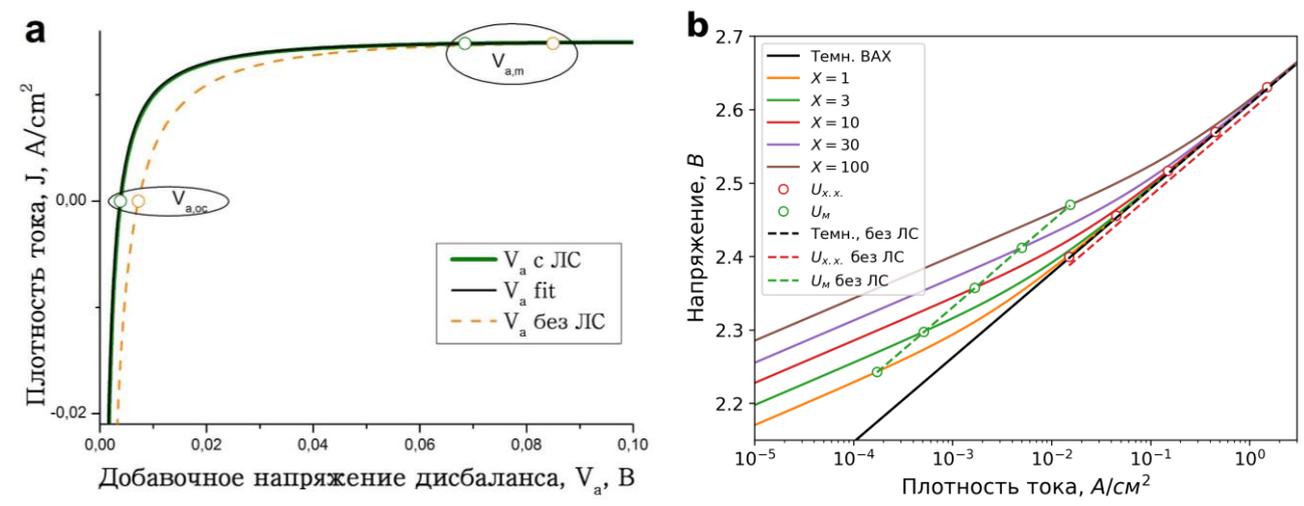


Рисунок 5. а) Добавочное напряжения дисбаланса. Зеленая линия - полученная вольтовым вычитанием рассчитанных ВАХ. Синяя линия - расчет по (3) с корректировкой коэффициента дисбаланса ( $\kappa = \kappa_{LC}$ ). Пунктирная оранжевая линия - без учёта эффекта ЛС. Также на рисунке отмечены точки, соответствующие величине дисбалансных добавок в режиме холостого хода ( $V_{a,oc}$ ) и оптимальной нагрузке ( $V_{a,m}$ ). б) Темновая и совмещённые световые ВАХ при разных концентрациях падающего излучения  $X$ . Характеристики построены с учётом эффекта ЛС (сплошные линии) и без него (пунктирные линии). Также символами на рисунке указаны положения на световых ВАХ точек напряжения холостого хода (красные кружочки) и напряжения оптимальной нагрузки (зелёные кружочки).

Таким образом, было определено влияние эффектов дисбаланса ФГ токов и ЛС на ВАХ и на величины  $V_{oc}$  и  $V_m$ . Эффект дисбаланса отклоняет ВАХ от логарифмической формы и смещает на константы ФВ зависимости указанных напряжений. В связи с тем, что основные фотовольтаические параметры

определяются режимами холостого хода и оптимальной нагрузки (включая эффективность и фактор заполнения ВАХ), ФВ зависимости этих параметров тоже остаются логарифмическими, но смещенными на соответствующие константы.

Также в 4 главе получена ВАХ генераторной части МП СЭ. В однопереходных структурах СЭ генераторная часть описывается безрезистивной зависимостью  $V_{oc}-J_g$ . В МП СЭ эта задача является более сложной, так как на напряжение холостого хода влияют эффекты дисбаланса ФГ токов и встречной фото-эдс. Поэтому для экспериментального получения ВАХ генераторной части был предложен электролюминесцентный метод. Метод основывается на анализе связи между интенсивностью ЭЛ субэлементов  $L_i$  и регистрируемым напряжением на СЭ. Эта связь пропорциональна произведению концентраций свободных электронов и дырок, которые в свою очередь пропорциональны  $\exp(qV/kT)$  [4]. Введя коэффициенты пропорциональности  $L_{0,i}$ , получим следующее выражение, для суммарного напряжения  $V_{pn,total}$ , вырабатываемого всеми субэлементами:

$$V_{pn,total} = \sum_{i=1}^n V_{pn,i} = \frac{kT}{q} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{L_i}{L_{0,i}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\prod_{i=1}^n L_i}{\prod_{i=1}^n L_{0,i}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_{0,i}}\right) \quad (5)$$

Сущность разработанного метода основывается на возможности измерения безрезистивного участка зависимости  $V_{pn,total}(\Phi)$  и экспериментальном определении параметра  $\Phi_0$ , что позволяет при помощи (5) определять напряжение генераторной ВАХ при любых токах.

Метод применен к двум МП СЭ, которые включали одинаковые субэлементы, но один из них содержал специальный туннельный диод со значительным нелинейным сопротивлением и большой встречной фото-эдс. Результат определения предложенным методом ВАХ генераторной части для обоих образцов показан на рис. 6а, где также представлены темновая ВАХ и зависимость напряжения холостого хода от ФГ тока для образца со специальным

ТД. Видно, что в отличие от ВАХ, полученной предложенным методом, на первую сильно влияет последовательное сопротивление, на вторую влияют как эффект дисбаланса, так и эффект встречной фото-эдс. Важным следствием метода является возможность экспериментального получения с точностью до константы генераторных ВАХ отдельных субэлементов (рис. 6б), что позволяет экспериментально определить диодные параметры сегментов и использовать их в сегментном методе расчёта ВАХ и фотовольтаических зависимостей.

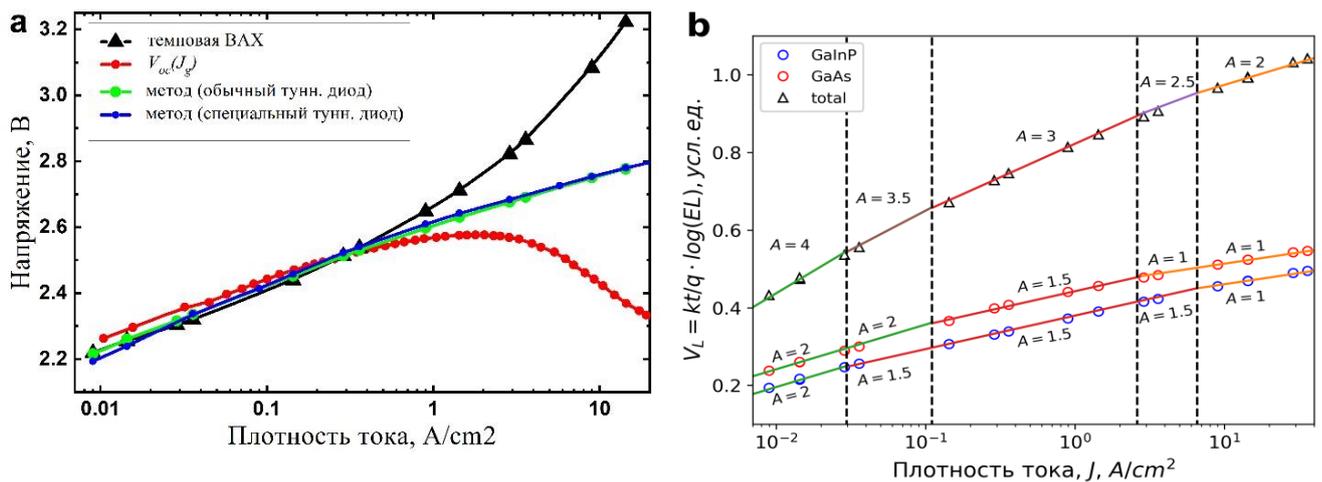


Рис 6. а) Сравнение полученных электролюминесцентным методом ВАХ двух образцов (зелёная линия - с обычным ТД и синяя - со специальным ТД) и экспериментальные темновая ВАХ (черный цвет) и  $V_{oc} - J_g$  зависимость (красный) образца со специальным ТД. б) Экспериментальные (символы) и сегментные (сплошные линии - отрезки) вольт-амперные зависимости напряжения  $V_L$  от тока для GaInP/GaAs двухпереходного СЭ и его субэлементов. Сегменты разделены вертикальными пунктирными линиями. Диодные коэффициенты сегментов  $A$  для всех характеристик приведены в следующей последовательности: вверху - для всего СЭ, далее для GaAs субэлемента и внизу для GaInP субэлемента. Для субэлементов  $V_L = (kT/q) \ln(L)$ , где  $L$  - экспериментально измеренная интенсивность ЭЛ. ВАХ двухпереходного СЭ является вольтовой суммой ВАХ субэлементов.

**Заключение.** В заключении обобщены основные результаты работы:

1. Исследовано влияние на ВАХ и ФВ зависимости эффектов дисбаланса ФГ токов, люминесцентной связи и встречной фото-эдс.

2. Установлено, что при дисбалансе ФГ токов световые ВАХ отклоняются от формы темновой ВАХ. Описание связи между ВАХ и основными ФВ зависимости возможно при учёте добавочного напряжения дисбаланса.
3. Установлено, что поглощение внутренней ЭЛ не нарушает сдвиговой связи между ВАХ, полученными при балансе ФГ токов.
4. Установлено, что эффект ЛС уменьшает величину добавочного напряжения дисбаланса.
5. Установлено, что на эффект встречной фото-эдс критично влияет разница между ФГ током и пиковым током фотоактивных ТД.
6. Показано, что увеличение числа субэлементов приводит к более равномерному растеканию тока в структуре МП СЭ, при этом для режима оптимальной нагрузки величина резистивных потерь уменьшается (при сохранении резистивного вклада соединительных элементов).
7. Предложен сегментный метод расчёта ВАХ и ФВ зависимостей МП СЭ.
8. Предложен электролюминесцентный метод получения генераторной ВАХ МП СЭ.
9. Сделано заключение, что результаты работы позволяют анализировать ВАХ и ФВ зависимости МП СЭ, определять параметры, характеризующие МП СЭ, а также параметры различных элементов, входящих в структуру МП СЭ.

**Список публикаций автора по теме диссертации:**

1. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Влияние дисбаланса фотогенерированных токов на вольт-амперные характеристики многопереходных солнечных элементов, ПЖТФ, т.49, 23, В сборнике конф. Физика.СПб/2023, 2023, с. 38 — 41
2. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Electroluminescent method of subcell IV characteristics determination in multi-junction solar cells. AIP Conf. Proc., v.2550, 2022, p. 020007

3. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.G. Dubrovskii, N.A. Kalyuzhnyy, Using electroluminescence of subcells for obtaining fundamental resistive-less dark IV characteristic of multi-junction solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, v.245, 2022, p. 111863
4. S.A. Levina, V.M. Emelyanov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, Multijunction solar cell spectral response determination at radiation damage study. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.2103, 2021, p. 012180
5. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Isotype barriers in the connecting part of multi-junction solar cells. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.1695, 2021, p. 12091
6. S.A. Levina, V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Cascade optical coupling and quantum efficiency measurements of MJ Scs. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, v.213, 2020, p. 110560
7. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Isotype heterointerfaces in triple-junction solar cells: influence on IV-curve shape and optimization. v.1, *EU PVSEC*, 2018, p. 978 - 980
8. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Аномалии в фотовольтаических характеристиках многопереходных солнечных элементов при сверхвысоких концентрациях солнечного излучения. *Письма ЖТФ*, т.45, 21, 2019, с. 37 - 39
9. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Противодействующий фотовольтаический эффект в верхней межгенераторной части трехпереходных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов. *ФТП*, т.53, 11, 2019, с. 1568 - 1572
10. S.A. Levina, E.D. Filimonov, A.V. Malevskaya, V.M. Emelyanov, M.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.V. Evstropov, M.Z. Shvarts, Light Budget in MJ SC at Temperature Tuning. *AIP Conf. Proc.*, v.2149, CPV 2019, 2019, p. 080004
11. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Heterointerfaces in the bottom tunnel part of GaInP/GaAs/Ge solar cells. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.1124, 4, 2018, p. 041028
12. S.A. Levina, F.D. Filimonov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Multijunction solar cells with pronounced optical coupling: Single wavelength laser biasing approach at quantum efficiency measurements. *AIP Conf. Proc.*, v.2012, CPV 2018, 2018, p 100003
13. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, Series spreading resistance in single- and multi-junction concentrator solar cells. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.1038, 1, *PhysicA.SPb* 2017, 2018, p. 012105

14. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, S.A. Kozhukhovskaia, N.A. Kalyuzhnyy, Manifestation of counteracting photovoltaic effect on IV characteristics in multi-junction solar cells. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.917, 5, SpbOpen, 2017, p. 052034
15. E.D. Filimonov, S.A. Kozhukhovskaia, V.M. Emelyanov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Current relaxation in MJ SCs and its influence on IV curve formation in presence of light coupling. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.741, 1, SpbOpen 2016, p. 012091
16. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, M.Z. Shvarts, S.A. Kozhukhovskaia, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, Counter-Photo-Electromotive Force at Heterointerfaces in MJ SC: Study by Spectral Method. *AIP Conf. Proc.*, v.1766, CPV-12, 2016, p. 050005
17. M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, M.A. Mintairov, E.D. Filimonov, S.A. Kozhukhovskaia, Overcoming the Luminescent Coupling Effect in Experimental Search for the Actual Quantum Efficiency Values in Multi-Junction Solar Cells. *AIP Conf. Proc.*, v.1766, CPV-12, 2016, p. 060005
18. S.A. Kozhukhovskaia, E.D. Filimonov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Elimination of light coupling negative effect on the accuracy of external quantum yield determination in a MJ SC, *J. Phys.: Conf. Ser.*, v.643, SpbOpen, 2015, p. 012064
19. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina, N.A. Kalyuzhnyy, The segmental approximation of the multijunction solar cell photovoltaic characteristics. *EU PVSEC Proceedings*, 2015, p. 1470 - 1473
20. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts, Heterointerfaces in MJ SC: IV Curves and their Peculiarities. *AIP Conf. Proc.*, v.1679, CPV-11, 2015, p. 050007
21. M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.Kh. Timoshina, Temperature Influence on Luminescent Coupling Efficiency in Concentrator MJ SCs. *AIP Conf. Proc.*, v.1679, CPV-11, 2015, p. 120003
22. M.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, A. Luque, The segmental approximation in multijunction solar cells. *IEEE J. Photovoltaics*, v.5, 4, 2015, p. 1229 - 1236
23. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов. *ФТП*, т.49, 5, 2015, с. 682 — 687
24. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, Р.А. Салий, В.М. Лантратов, Разностный способ получения темновой вольт-амперной характеристики и ее виды для остаточной (негенерирующей) части многопереходного солнечного элемента. *ФТП*, т.48, 5, 2014, с. 671 - 676

25. T. Sogabe, A. Ogura, C.Y. Hung, V.V. Evstropov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Y. Okada, Experimental characterization and self-consistent modeling of luminescence coupling effect in III-V multijunction solar cells. *Appl. Phys. Lett.*, v.103, 26, 2013, p. 263907
26. M.Z. Shvarts, M.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, N. Kh. Timoshina, Method For Direct Measurements Of Luminescent Coupling Efficiency In Concentrator MJ SCs. *AIP Conf. Proc.*, v.1556, CPV-9, 2013, p. 147 — 153
27. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, V.D. Rumyantsev, N. Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, Determination of Series Resistance of Multijunction Solar Cells by Using their Photoelectric Characteristic. *EU PVSEC Proceedings*, 2012, p. 459 - 463
28. М.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов, Фотоэлектрическое определение последовательного сопротивления многопереходных солнечных элементов. *ФТП*, т.46, 8, 2012, с. 1074 — 1081
29. М.А. Минтаиров, В.М. Лантратов, В.В. Евструпов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Поведение трех-переходных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов при высоких кратностях концентрирования солнечного освещения, XI всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой и опто- и наноэлектронике СПб, 2009
30. М.А. Минтаиров, В.М. Лантратов, С.Б. Мусалинов, В.М. Андреев, Особенности фотоэлектрических свойств многопереходных (InGaP/GaAs и InGaP/GaAs/Ge) монокристаллических солнечных элементов при концентрированном солнечном освещении. X всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой и опто- и наноэлектронике, СПб, 2008.

### **Список цитируемой литературы**

1. В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев, *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения*, Ленинград: Наука, 1989
2. W. Shockley, *Bell System Technical Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 435–489, 1949, doi: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x.
3. C. Sah, R. Noyce, and W. Shockley, *Proceedings of the IRE*, vol. 45, no. 9, pp. 1228–1243, Sep. 1957, doi: 10.1109/{JRPROC}.1957.278528.
4. M. Shur, *Physics of Semiconductor Devices*, first edition.; Pearson: Englewood Cliffs, 1990.