

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **МИНТАИРОВА Михаила Александровича** «Анализ связей вольт-амперных характеристик и фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Многопереходные солнечные элементы занимают в настоящее время особое место среди полупроводниковых солнечных элементов. Это связано с возможностью достижения с их помощью максимальной эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Такие солнечные элементы состоят из нескольких последовательно соединенных *p-n* переходов, сформированных в полупроводниковых материалах с различной шириной запрещенной зоны. Каждый из субэлементов отвечает за преобразование определенной части спектра, что и обеспечивает возможность более эффективного использования излучения солнца. Высокое значение КПД является определяющим критерием для применения таких солнечных батарей для питания бортовой аппаратуры космических аппаратов. Помимо этого, важным преимуществом многопереходных солнечных элементов на основе соединений АЗВ5 является их способность эффективно преобразовывать более чем 100-кратно концентрированное солнечное излучение. Это позволяет снизить расход используемых полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрации и, соответственно, снизить стоимость преобразования солнечной энергии в наземных условиях. Исследовательские усилия, направленные на дальнейшее повышение КПД преобразования, не прекращаются, что возможно с помощью оптимизации их конструкции на основе глубокого понимания физических процессов, протекающих в многопереходном элементе. К числу таких явлений, следует отнести возникающий вследствие различной степени поглощения солнечного света разными субэлементами дисбаланс фототоков, учет переизлучения света, встречной ЭДС в туннельных переходах и другие явления, не получившие пока детального описания. Таким образом, все сказанное выше определяет **актуальность** диссертационной работы М.А. Минтаирова, целью которой является разработка методов анализа многопереходных солнечных элементов, в первую очередь их вольт-амперных и фотовольтаических характеристик, и исследование влияния на них различных особенностей конструкции многокаскадного преобразователя.

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

Первая глава диссертации содержит обзор литературы, посвященной каскадным солнечным элементам. В ней описаны принципы действия одно- и много-переходных солнечных элементов, а также с основные факторы, влияющие на характеристики солнечных элементов. Кроме того, обсуждены основные проблемы, возникающие при формировании многопереходных солнечных элементов.

Вторая глава диссертационной работы содержит информацию о модельных подходах для описания влияния эффектов, возникающих в генераторной части многопереходных солнечных элементов, на их вольтамперные и фотовольтаические характеристики. Описан предложенный автором сегментный подход к описанию вольтамперных характеристик генераторной части многопереходных солнечных элементов. Рассмотрены эффекты дисбаланса токов, генерируемых каскадами, а также эффект люминесцентной связи между каскадами солнечных элементов.

Результаты проведенных автором исследований особенностей соединительной части солнечных элементов приведены в третьей главе. Рассмотрены эффекты, которые вносят туннельные диоды и гетероинтерфейсы, препятствующие транспорту носителей заряда. Исследовано влияние увеличения числа каскадов на напряжение, падающее в соединительной части.

В четвертой главе проведено исследование влияния эффектов дисбаланса токов и люминесцентной связи на характеристики многопереходных солнечных элементов. Предложен разработанный автором оригинальный метод экспериментального получения вольтамперной характеристики генераторной части многопереходных солнечных элементов.

В заключении сформулированы основные результаты работы и сформулирован совокупный результат. Он заключается в том, что развитые автором аналитические модели и численные методы позволяют анализировать характеристики многопереходных солнечных элементов и определять внутренние причины возникновения тех или иных особенностей, давая таким образом средства для целенаправленного управления параметрами с целью оптимизации КПД.

Характеризуя **научную новизну** полученных в диссертационной работе результатов, можно отметить, что большинство из них получены впервые. К наиболее значимым результатам работы следует отнести, на мой взгляд, то, что влияние дисбаланса токов, генерируемых разными каскадами, можно описать с помощью добавочного напряжения – напряжения дисбаланса. При этом нарушается обычно подразумеваемая связь между темновыми и световыми ВАХ, т.е. световая ВАХ уже не получается простым сдвигом темнового тока на величину тока короткого замыкания. Также показано, что люминесцентная связь между каскадами уменьшает величину добавочного напряжения дисбаланса, а в случае баланса токов наведенные внутренней электролюминесценцией токи не нарушают простую сдвиговую связь между темновой и световой ВАХ. Весьма важным, на мой взгляд, является и полученный в работе вывод о том, что встречная фото-эдс, возникающая в туннельном переходе между каскадами, проявляется как последовательное сопротивление в том случае, если пиковый ток туннельного диода значительно превосходит ток оптимальной нагрузки. Обнаружено, что с ростом числа каскадов увеличивается равномерность растекания тока между контактами. Разработан оригинальный сегментный подход к описанию вольтамперных характеристик многопереходных солнечных элементов, а также предложен и экспериментально апробирован

электролюминесцентный метод получения вольтамперной характеристики генераторной части каскадных солнечных элементов.

Практическая значимость работы заключается в том, что в ней разработаны методы анализа измеряемых характеристик многокаскадных солнечных элементов, позволяющие количественно оценивать протекающие в многопереходных элементах явления и определять свойства отдельных субэлементов, способствуя тем самым оптимизации фотоэлектрических преобразователей для улучшения их приборных характеристик. Разработанные автором подходы применимы к самому широкому классу ФЭП, вне зависимости от последовательности эпитаксиальных слоев, числа каскадов, геометрии контактов и других ограничений, диктуемых конкретным прибором,

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов исследования, в том числе измерении характеристик при различной степени концентрации солнечного излучения, использованием большого объема экспериментальных результатов, полученных с помощью измерений высокоэффективных трехпереходных солнечных элементов, а также специально сконструированных структур, и подтверждается общей непротиворечивостью экспериментальных и расчетных данных, воспроизводимостью основных закономерностей, согласием с имеющимися литературными данными там, где такие данные имеются.

По диссертационной работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В работе следовало бы более детально обсудить, каким образом создаются структуры с различным контролируемым дисбалансом фототоков.

2. В диссертации на рисунке 44 представлена зависимость распределения плотности тока растекания для различного числа субэлементов. Видно, что существует некоторая замечательная точка, в которой все кривые сходятся. Что это за точка?

3. Автор предложил новый метод получения ВАХ генераторной части, основанный на анализе связи между интенсивностью электролюминесценции субэлементов и напряжением фотопреобразователя. Интересно узнать, как этот метод работает для непрямозонных субэлементов, например, для Ge.

4. Хочется уточнить, почему в работе мало внимания уделяется краевым эффектам и другим вопросам неидеальности солнечных элементов, например, токам туннельной природы.

Сделанные замечания не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных результатов, не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации.

Основные результаты диссертации были доложены на 21 конференции и опубликованы 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.

Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертационной работы, оформление автореферата соответствует требованиям ВАК РФ.

Работа представляет собой законченное исследование в области физики полупроводников. По своему объему, актуальности, новизне и значимости полученных результатов диссертация Минтаирова Михаила Александровича

«Анализ связей вольт-амперных характеристик и фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов», **соответствует** требованиям положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

27.11.2024 г. _____ Жуков Алексей Евгеньевич _____

доктор физико-математических наук, 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. (812)6445911#61588 e-mail: aezhukov@hse.ru

Подпись Жукова А.Е. заверяю
