

## ОТЗЫВ

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

### Актуальность темы

Многокаскадные (переходные) солнечные элементы на основе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны на сегодняшний день являются основой солнечных батарей космических аппаратов (КА). В настоящее время основным солнечным элементом (СЭ), применяемым в космической отрасли, является трехкаскадный солнечный элемент на основе твердых растворов  $A^3B^5$  GaInP/GaAs/Ge со средним значением КПД на уровне 29,5-32% (AM0 1367 Вт/м<sup>2</sup>). Обладая большей эффективностью фотообразования, данные солнечные элементы также являются более радиационно-стойкими, в сравнении с однокаскадными кремниевыми СЭ, что делает их наиболее привлекательными для применения в космической отрасли.

В современных условиях происходит постоянное увеличение электрической мощности, потребляемой бортовыми системами отдельных космических аппаратов, в связи с расширением круга задач, решаемых космическими средствами, а также увеличения сроков активного существования солнечных батарей дорогостоящих КА, с целью снижения темпов роста затрат на финансирование космических программ, что приводит к необходимости разработки новых типов многокаскадных СЭ.

Гетероструктура многокаскадных солнечных элементов содержит несколько десятков различных наноразмерных и объемных эпитаксиальных слоев, а достижение предельных значений КПД требует оптимизации параметров практически каждого составляющего ее слоя. Ввиду острой практической значимости данной тематики многие исследования, приводящиеся в данной области зарубежными специалистами, даются в публикациях в сжатом виде или являются предметом «ноу-хау», что особенно обостряется по причине современной геополитической ситуации.

Фотоэлектрические характеристики, в том числе эффективность преобразования каждого субэлемента, составляющего многопереходный солнечный элемент, напрямую связаны с характеристиками всего многопереходного солнечного элемента, а новые эффекты, присущие только многопереходным структурам, играют важную роль при

оптимизации их параметров. Поэтому вопросы достижения высоких значений КПД многопереходных структур связаны с тщательным исследованием и выявлением скрытых параметров каждого отдельного слоя гетроструктуры.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что работа Минтаирова М.А., включающая разработку научных основ многопереходных солнечных элементов и описание путей снижения различного вида потерь, является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

### **Структура 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.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору однопереходных и каскадных солнечных элементов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на характеристики таких солнечных элементов.

Главы 2 — 4 посвящены изложению оригинальных результатов, полученных в диссертационной работе.

Вторая глава описывает модельные подходы для описания влияния так называемой «генераторной части» каскадных солнечных элементов, представляющей собой сумму всех фотоактивных  $p-n$  переходов, на вольтамперные и фотоэлектрические характеристики. Предложен сегментный подход к описанию генераторной части каскадных солнечных элементов и описан эффект дисбаланса токов, генерируемых отдельными субэлементами. Рассмотрен эффект люминесцентной связи, состоящий в том, что электролюминесцентное излучение одного субэлемента наводит дополнительный фототок в соседнем субэлементе, и предложена процедура расчёта вольтамперных характеристик с учётом влияния этого эффекта

Третья глава посвящена исследованию особенностей так называемой «соединительной части» каскадных элементов, представляющей собой сумму всех слоев, не входящих в фотоактивные  $p-n$  переходы. Рассмотрен эффект генерации встречной фото-эдс в туннельных диодах и другие эффекты, возникающие в таких диодах. Описано влияние так называемых «высокорезистивных» гетеробарьеров, препятствующих транспорту основных носителей заряда, на вольтамперные и другие характеристики каскадных солнечных элементов. Исследовано влияния числа субэлементов на процессы растекания носителей между контактными шинками лицевой контактной сетки и показано, что увеличение числа субэлементов приво-

дит к снижению влияния сопротивления растекания между шинками на характеристики солнечных элементов.

Четвертая глава посвящена проверке на практике описанных выше эффектов. Делается ряд важных выводов. Особо стоит отметить предложенный в данной главе метод экспериментального определения так называемых «фундаментальных вольтамперных характеристик». Это характеристики каскадного элемента, в которых исключено влияние всех описанных выше факторов, а также влияние последовательного сопротивления.

#### **Основные научные результаты и их новизна** заключается в следующем:

Установлено, что эффект дисбаланса генерирующихся субэлементами токов описывается так называемым «напряжением дисбаланса», величина которого представлена аналитическим выражением. Обнаружено, что в случае дисбаланса нарушается базовая сдвиговая связь вольтамперных характеристик, и световые характеристики нельзя получить, сдвигая темновую на величину генерируемого тока, а эффект люминесцентной связи уменьшает величину так называемого «добавочного напряжения дисбаланса».

Установлено, что при балансе токов субэлементов, когда описанная выше сдвиговая связь применима, эффект люминесцентной связи не нарушает эту связь.

Установлено, что неоптимизированные туннельные диодов, генерирующие или нет встречную фото-эдс, а также высокорезистивные гетероинтерфейсы вызывают изгибы на световых вольтамперных характеристиках каскадных солнечных элементов. Эффект встречной фото-эдс в туннельных диодах описываются как последовательное сопротивление в случае, когда пиковый ток значительно превосходит ток оптимальной нагрузки.

Предложен и экспериментально апробирован метод получения фундаментальной вольтамперной характеристики, включающей в себя только сумму характеристик  $p$ - $n$  переходов, и не зависящей от эффектов встречной фото-эдс, люминесцентной связи, а также от резистивных потерь.

**Основная практическая значимость** работы заключается в следующем.

Все описанные в работе эффекты оказывают заметное влияние на КПД многопереходных солнечных элементов. Предложенные автором модели описания этих эффектов достаточно хорошо разработаны и позволяют получать целый ряд внутренних параметров элементов без применения сложных и дорогих структурных исследований. Это особенно важно на промышленных предприятиях, где, в отличие от исследовательских институтов, число методов структурных исследований ограничено.

Предложенные методики открывают новые возможности для оптимизации структур каскадных элементов, а также прогнозирования их утилитарных характеристик. В частности,

описанные эффекты дисбаланса и люминесцентной связи позволяют более точно прогнозировать КПД космических солнечных элементов при их радиационной деградации.

**Достоверность научных положений и выводов** хорошо обоснована и определяется целым рядом факторов. В первую очередь, автором проведен подробный анализ литературных источников по вопросам, относящимся к структурам каскадных солнечных элементов. Применен целый ряд апробированных и разработанных автором аналитических методик расчета параметров каскадных солнечных элементов. Результаты, полученные в результате моделирования, сопоставлены с экспериментальными данными и показывают хорошее согласование.

Основные результаты автора нашли отражение в большом количестве опубликованных работ, общим числом 30, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах, 4 – в журналах первого квартиля по рейтингу Scimago SJR, были представлены на значительном количестве отечественных и зарубежных конференций.

Автореферат правильно и полно передает основное содержание диссертации, оформлен в соответствии с требованиями ВАК России.

### **Замечания и недостатки**

Несмотря на высокий научный уровень новизны и практическую значимость полученных в диссертационной работе результатов, можно сформулировать несколько важных, с моей точки зрения, замечаний:

1. Несмотря на то, что основной сферой применения каскадных фотоэлектрических преобразователей является космическая отрасль, в работе очень малое внимание уделено влиянию описанных эффектов на работу каскадных солнечных элементов в условиях космического пространства, хотя, очевидно, это влияние должно быть значительным. Например, радиационное повреждение субэлементов изменяет дисбаланс токов в каскадном солнечном элементе, а также влияет на эффект люминесцентной связи, так как интенсивность электролюминесценции падает при возникновении дефектов в слоях фотоактивных *p-n* переходов. Целесообразным видится проведение исследований с целью практической апробации данных подходов при проведении радиационных испытаний каскадных СЭ, что позволит оптимизировать структуру многокаскадных СЭ с учетом требований на начало и конец срока активного существования.

2. При экспериментальной проверке применимости модели расчёта ВАХ МП СЭ с учётом влияния эффекта ЛС, автором не приведены данные об условиях измерения ВАХ солнечных элементов: спектр падающего излучения (АМ0/АМ1,5), температура СЭ. А также

отсутствует информация о способе получения дисбаланса фотогенерированных токов в GaInP/GaAs/Ge.

3. Очевидно, что в основе работы лежит огромное количество экспериментальных исследований и разработок по созданию гетероструктур фотопреобразователей методом МОС-гидридной эпитаксии. Информация об этом есть в тексте диссертации, но отсутствует в автореферате. В свое время, при проведении совместных научно-исследовательских работ АО «Сатурн» и ФТИ им. А. Ф. Иоффе по разработке технологии роста многокаскадных гетероструктур для солнечных элементов космического назначения, ряд технологических решений, полученных в ходе исследований, нашел свое применение при становлении промышленной технологии изготовления СЭ со средним значением КПД 25% и максимальным значением 27% при AM0 1367 Вт/м<sup>2</sup>. В ходе дальнейших работ, нашим предприятием был сделан акцент на проведении исследований в области материаловедения: поиску оптимальных режимов эпитаксиального наращивания гетероструктур, а также разработке их новой послойной конфигурации, что позволило достичь значений КПД на уровне 30% (AM0 1367 Вт/м<sup>2</sup>). Т.е. это означает, что позднее в основе исследований, проводимых наши организациями, лежали несколько различные подходы. В связи с этим, хотелось бы знать каким образом аналитические результаты, включенные в данную диссертационную работу, повлияли на технологические разработки эпитаксиальных гетероструктур, которые проводились в ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Вероятно, в автореферате стоило бы отразить «обратную связь» наиболее важных результатов диссертации с технологическими исследованиями.

Однако указанные замечания ни в коей мере не снижают высокой научной ценности диссертационной работы и не ставят под сомнение основные научные результаты и сделанные выводы.

## **Заключение**

Оценивая работу, можно утверждать, что рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладающую несомненной актуальностью, научной новизной и практической ценностью, в которой решена задача, имеющая существенное значение для развития фотоэнергетики и полупроводниковой оптоэлектроники.

Считаю, что диссертационная работа «Анализ связей вольт-амперных характеристик и фотовольтаических параметров многопереходных солнечных элементов» удовлетворяет всем критериям "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Минтаиров Михаил Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Заместитель генерального директора по научной работе

А.Ф. Скачков

Скачков Александр Федорович

Кандидат технических наук по специальности

05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АО «Сатурн»

+7 (861) 293-79-04

email: info@satum-kuban.ru

адрес: 350072, г. Краснодар, ул. Солнечная, д.6

Подпись Скачкова А.Ф. удостоверяю:

Начальник отдела по работе с персоналом

АО «Сатурн»