

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Минтаирова Сергея Александровича «Многoperеходные гетероструктурные фотопреобразователи на основе материалов  $A^3B^5$  и германия, полученные методом МОС – гидридной эпитаксии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Среди полупроводниковых фотопреобразователей, используемых для преобразования энергии солнечного света в электрическую энергию, каскадные солнечные элементы на основе соединений  $A^3B^5$  занимают в настоящее время особое место. Это связано с возможностью достижения с их помощью максимальной эффективности преобразования солнечной энергии. Многокаскадные солнечные элементы состоят из нескольких последовательно соединенных p-n переходов, сформированных в полупроводниковых материалах с различной шириной запрещенной зоны. Это обеспечивает возможность преобразования значительной части солнечного спектра. В последние годы наибольшее применение получили солнечные элементы на основе каскадных гетероструктур, использующих германий и арсенид галлия в качестве узкозонных материалов, и твердые растворы галлий-индий-фосфор в качестве широкозонных материалов. Несмотря на значительную стоимость каскадных солнечных элементов по сравнению с кремниевыми они, как отмечено выше, демонстрируют максимальную эффективность преобразования солнечной энергии. Этот фактор является определяющим при выборе материалов для создания солнечных батарей для электропитания бортовой аппаратуры космических аппаратов. Помимо этого важным преимуществом многокаскадных солнечных элементов на основе соединений  $A^3B^5$  является их способность эффективно преобразовывать более чем 100-кратно концентрированное солнечное излучение. Это позволяет снизить расход используемых полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрации и, соответственно, существенно снизить стоимость преобразования солнечной энергии. В настоящее время подавляющее большинство фотоэлектрических преобразователей на основе гетероструктур системы  $A^3B^5$

выращивается методом МОС-гидридной эпитаксии, при помощи которой производился рост исследованных структур в представленной работе. Таким образом, все сказанное выше определяет **актуальность** целей и задач исследований, результаты которых представлены в диссертационной работе С.А. Минтаирова.

Работа состоит из введения, четырех глав, в которых представлены литературные данные по теме диссертационной работы, рассмотрена технология получения структур, описаны использованные экспериментальные методики, проведено обсуждение полученных результатов, и заключения по диссертационной работе. В конце каждой из глав сформулированы выводы по главе, что позволяет получить представление о наиболее важных и интересных результатах с точки зрения автора диссертационной работы. Диссертационная работа содержит 173 страницы машинописного текста, включая 75 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 130 наименований.

Первая глава диссертации содержит обзор литературы, посвященной каскадным фотопреобразователям и технологии их создания. Структура представленного обзора позволяет ознакомиться с используемыми материалами и структурами, принципом действия однопереходных и каскадных фотопреобразователей, а также с основными принципами технологии МОС-гидридной эпитаксии, используемой при создании каскадных фотопреобразователей на основе соединений  $A^3B^5$ .

Вторая глава диссертационной работы содержит информацию о использованной автором технологии и особенностях однопереходных субэлементов каскадных фотопреобразователей р-п и п-р полярности. В данной главе представлены методики аналитического описания электрофизических процессов, происходящих в структурах фотоэлектрических преобразователей. Основной целью проведенной «аналитики» было выявление различного рода возможных потерь в структурах фотопреобразователей и поиск путей их оптимизации.

Результаты проведенных автором исследований по оптимизации оптических и электрических потерь в структурах каскадных

фотопреобразователей GaInP/GaInAs/Ge и по оптимизации каскадных фотопреобразователей на основе субэлементов GaInP, GaInAs и Ge представлены в третьей и в четвертой главах диссертационной работы.

Характеризуя **научную новизну** полученных в диссертационной работе результатов можно отметить, что большинство из них получены впервые. В частности, проведены расчеты коэффициентов собирания фотогенерированных носителей из фотоактивных слоев каскадных солнечных элементов и сделаны выводы о путях оптимизации структуры для обеспечения значительного собирания носителей, а так же сделан вывод о преимуществе *p-n* полярности для GaAs солнечных элементов. Обнаружены недостатки GaInP солнечных элементов *p-n* полярности и указаны пути повышения эффективности таких элементов. Проведена оптимизация оптических потерь, связанных с внутренним отражением от гетерограниц в структурах каскадных фотопреобразователей, и показано, что использование нуклеационного слоя GaInP с оптимальной толщиной (170-180 нм) приводит к дополнительному возрастанию фототока Ge субэлемента, а оптимизация толщин и материалов слоев верхнего туннельного диода и широкозонного окна среднего субэлемента позволяет значительно сократить оптические потери в структурах и повысить фототок, генерируемый средним GaInAs субэлементом. Обнаружено, что встречная фотоЭДС в каскадных фотопреобразователях может возникать в верхнем туннельном диоде в случае заметного поглощения фотонов в слое тыльного потенциального барьера *p*-GaInP, и предложена его замена на слой *p*-AlGaInP. Предложено использование слоя *p*-GaInP в качестве тыльного барьера среднего GaInAs субэлемента, являющегося одновременно широкозонным барьером для нижнего туннельного диода, что позволяет улучшить вольтамперные характеристики каскадных солнечных элементов. Показано, что в случае использования слоя  $p-(Al_xGa_{1-x})_{0,52}In_{0,48}P$  при «х» меньше 25% высота барьера для дырок на гетеропереходе оказывается достаточно малой, чтобы обеспечить эффективный транспорт носителей. Так же показано, что использование гетеропереходов в среднем субэлементе структуры позволяет повысить общий КПД структуры.

**Практическая значимость** полученных в работе результатов заключается в разработке технологии МОС – гидридного эпитаксиального выращивания

монокристаллических, многослойных и многопереходных GaInP/GaInAs/Ge гетероструктур солнечных элементов, которая может быть использована для производства высокоэффективных фотопреобразователей. Кроме того, разработана технология создания однокаскадных солнечных элементов на основе Ge, GaAs, GaInP с высокими значениями КПД, а так же двухкаскадные GaAs/Ge и GaInP/GaAs фотопреобразователи, которые могут быть использованы для решения ряда задач в современной оптоэлектронике. Прикладное значение результатов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается значительным числом патентов, полученных автором.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием современных методов исследования, непротиворечивостью полученных экспериментальных и расчетных данных, воспроизводимостью основных закономерностей.

Представляется целесообразным сделать следующие замечания по диссертационной работе:

1. В первой главе работы рассчитаны коэффициенты сбора фотогенерированных носителей из эмиттеров и баз субэлементов и показано, что для всех эмиттеров сбор порядка 95% достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя, а для баз GaAs и GaInP субэлементов – при двукратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя. Однако экспериментальные значения диффузионных длин в фотоактивных слоях в явном виде не приведены.
2. В работе нет данных о диффузионных длинах в фотоактивных слоях GaInP различной полярности, хотя разработанные методики их оценки посредством аппроксимации спектральных характеристик могли легко быть применены для их нахождения.
3. Представленные в тексте диссертационной работы 17 пунктов «новизны» желательно было бы сформулировать в более общем виде сократив их количество.

Однако, сделанные замечания не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных результатов, не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации, большая часть из которых получена впервые.

Основные результаты автора опубликованы в шестидесяти одной печатной работе, из них 18 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 глава в монографии, 12 патентов, действующих на территории России, а также печатные работы в материалах 30 международных и всероссийских конференций.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ.

Таким образом, по объему проделанной работы, представленной в диссертации, ее актуальности и новизне, по значимости полученных результатов диссертация Минтаирова Сергея Александровича «Многоступенчатые гетероструктурные фотопреобразователи на основе материалов  $A^3B^5$  и германия, полученные методом МОС – гидридной эпитаксии», соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Главный научный сотрудник кафедры полупроводников  
физического факультета Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

А.Г. Казанский

26.11.2015

Адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, дом. 1,  
строение 2, физический факультет, кафедра полупроводников.

Телефон: +7 (495) 939 41 18

e-mail: [kazanski@phys.msu.ru](mailto:kazanski@phys.msu.ru)

Декан физического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
профессор

ев