В диссертационный совет АУ 02.01,
созданный на базе федерального государственного
бюджетного учреждения высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский
Академический университет имени Ж.И. Алферова
Российской академии наук»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
Геца Дмитрия Станиславовича
на диссертационную работу Вячеславовой Екатерины Александровны
на тему «Формирование и свойства гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения на основе наноструктурированного кремния»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Актуальность темы диссертационной работы

Перспективность наноструктурированного черного кремния (black silicon, *b*-Si) для гетероструктурных солнечных элементов обусловлена снижением оптических потерь за счет подавления отражения от поверхности в широком диапазоне длин волн и углов падения излучения. Однако увеличение площади поверхности при наноструктурировании сопровождается ростом скорости поверхностной рекомбинации и, как следствие, потерями фототока и напряжения. Центральная проблема состоит в разрешении противоречия между оптическим преимуществом и электрическими потерями, что требует совместной оптимизации топологии наноструктур и методов осаждения пассивирующих и функциональных слоев, чем и определяется **актуальность** работы.

Диссертационное исследование Е.А. Вячеславовой направлено на разработку технологии формирования наноструктурированной поверхности черного кремния методом плазмохимического травления при криогенных температурах; оптимизацию осаждения пассивирующих и эмиттерных слоев на развитой поверхности с применением низкотемпературных методов плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) и плазмохимического атомно-слоевого осаждения (PE-ALD); исследование фотоэлектрических свойств гетероструктурных солнечных элементов на черном кремнии.

Общая характеристика работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Полный объем работы составляет 154 страницы и содержит 73 рисунка и 16 таблиц. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Во введении сформулированы цель и задачи работы, обоснованы ее актуальность, научная новизна и практическая значимость. Изложены научные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов.

Первая глава посвящена литературному обзору монокристаллических солнечных элементов: методам получения монокристаллического кремния и его легирования, описанию основных промышленных технологий монокристаллических солнечных элементов, их преимуществ и недостатков. Отмечается, что дальнейший прирост эффективности все в большей степени ограничен оптическими факторами. Показано, что стандартные подходы по снижению отражения от поверхности не обеспечивают достаточного широкополосного и угло-независимого подавления отражения, что обосновывает интерес к наноструктурированному черному кремнию.

Во второй главе изложены физические причины низкой отражательной способности черного кремния (теория эффективной среды, многократное отражение), проведено сравнение основных методов получения структур черного кремния (металл-стимулированное химическое травление, лазерная абляция и плазмохимическое травление), а также рассмотрены подходы к пассивации наноструктурированной поверхности методами плазмохимического осаждения из газовой фазы и атомно-слоевого осаждения.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям по формированию структур черного кремния методом криогенного травления в индуктивно-связанной плазме SF_6/O_2. Для повышения управляемости и воспроизводимости процесса продемонстрировано развитие технологии от травления шлифованной поверхности к полированной поверхности подложки, а затем к травлению пластин с удаленным поврежденным при резке слоем. В работе исследовано влияние добавления аргона в рабочую газовую смесь SF_6/O_2. Добавка аргона приводит к формированию структур конусообразной формы, что создает благоприятные предпосылки для последующей конформной пассивации и не ухудшает фотоэлектрические характеристики. Предложен режим травления через слой резиста PMGI, обеспечивающий воспроизводимость процесса на пластинах с удаленным поврежденным при резке слоем.

Четвертая глава посвящена формированию гетероструктурных солнечных элементов (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*b*-Si. Исследовано влияние морфологии наноструктур и толщины пассивирующего (*i*)*a*-Si:H слоя на качество пассивации и фотоэлектрические характеристики солнечного элемента. После осаждения (*i*)*a*-Si:H слоя методом PECVD достигнуто эффективное время жизни неосновных носителей заряда 0,75 мс, а после нанесения (*p*)*a*-Si:H слоя – 0,25 мс. Сформирован элемент, который демонстрирует напряжение холостого хода 0,66 В, плотность тока короткого замыкания 27,5 мА/см^2 и коэффициент заполнения 74% при стандартных условиях измерения (AM1,5G, 100 мВт/см^2, 25 °C). Проведено моделирование гетероперехода с учетом реальной геометрии наноструктур для определения особенностей распределения свободных носителей заряда и профиля электростатического потенциала. Продемонстрировано, что при высокой плотности поверхностных состояний рекомбинация на границе раздела (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*b*-Si становится доминирующим механизмом потерь.

Пятая глава посвящена формированию гетероструктурных солнечных элементов (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si. В работе представлен новый подход, заключающийся в использовании метода PE-ALD для конформного осаждения широкозонного эмиттерного слоя GaP. Показано, что метод PE-ALD обеспечивает конформное осаждение слоя GaP на поверхность черного кремния с высоким соотношением сторон.

Сформированный элемент демонстрирует напряжение холостого хода 0,473 В и плотность тока короткого замыкания 34,7 мА/см^2 без антиотражающего проводящего слоя и с тестовой контактной сеткой при стандартных условиях измерения (AM1,5G, 100 мВт/см^2, 25 °С). На спектре внешней квантовой эффективности показано повышение фоточувствительности в коротковолновой области спектра за счет снижения потерь на поглощение в слое GaP. Проведено моделирование гетероперехода (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si с учетом реальной геометрии наноструктур для определения особенностей распределения свободных носителей заряда и профиля электростатического потенциала.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

Научная новизна результатов исследований

В диссертационной работе Е.А. Вячеславовой получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые исследовано влияние добавки аргона в газовую смесь SF_6/O_2 при криогенном травлении. Показано, что введение Ar позволяет получать конусообразную форму наноструктур кремния, необходимую для достижения более эффективной пассивации поверхности. При использовании аргон-содержащей плазмы время жизни неосновных носителей заряда в объеме кремния сохраняется на уровне 0,7 мс, как и для процесса без добавки Ar.
2. Получены новые данные о влиянии толщины собственного (*i*)*a*-Si:H слоя, осажденного на наноструктуры *b*-Si, на время жизни носителей заряда. Установлено, что пассивация (*i*)*a*-Si:H слоем позволяет достичь времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии 0,75 мс и сохранить его на уровне 0,25 мс после последующего осаждения легированного слоя (*p*)*a*-Si:H.
3. Впервые сформирован гетероструктурный солнечный элемент (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*b*-Si, демонстрирующий значение напряжения холостого хода 0,66 В.
4. Впервые сформирован гетероструктурный солнечный элемент (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si, обладающий повышенной фоточувствительностью в коротковолновой области спектра за счет снижения потерь на поглощение.

Практически значимым результатом является разработка технологии формирования наноструктурированного кремния конусообразной формы, предпочтительной для достижения качественной пассивации поверхности и обеспечивающей слабую зависимость полной отражательной способности в широком диапазоне длин волн и углов падения излучения. Создан гетероструктурный солнечный элемент (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*b*-Si с напряжением холостого хода 0,66 В.

Самостоятельную практическую ценность имеет предложенный автором подход к формированию гетероперехода (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si с применением низкотемпературной конформной технологии PE-ALD. Создан гетероструктурный солнечный элемент (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si, обладающий повышенной фоточувствительностью в коротковолновой области спектра (<400 нм) за счет снижения потерь на поглощение в слое (*n*)GaP.

Теоретическая значимость работы состоит в выявлении особенностей распределения свободных носителей заряда и профиля электростатического потенциала в гетероструктурном солнечном элементе (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*b*-Si, что важно как для понимания

зонной структуры данного гетероперехода, так и для проектирования солнечных элементов на основе черного кремния.

Рекомендуется продолжить исследования гетероструктурных солнечных элементов (*n*)GaP/(*p*)*b*-Si с эмиттерным слоем GaP и сосредоточиться на улучшении пассивации поверхности черного кремния и оптимизации контактной сетки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке солнечных элементов нового поколения на основе наноструктурированного кремния. Они создают технологическую основу для управления морфологией черного кремния, повышения оптического качества поверхности без снижения времени жизни носителей заряда, создания гетероструктурных солнечных элементов с улучшенным откликом в коротковолновой области спектра.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов формирования гетероструктур на наноструктурированной поверхности, таких как криогенное травление, PECVD и PE-ALD, и методов их исследования, включая РЭМ, ПЭМ, метод квазистационарной фотопроводимости, нестационарную спектроскопию глубоких уровней, спектроскопию полной проводимости, измерения отражательной способности, вольтамперных характеристик, спектров квантовой эффективности, а также согласованностью результатов независимых измерений и сопоставлением экспериментальных данных с моделированием и литературными данными.

Полученные Е.А. Вячеславовой результаты апробированы на научных конференциях различного уровня и опубликованы в рецензируемых журналах. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертационной работе не отражена информация о типе эталонного образца, который использовался при измерении спектров полной отражательной способности наноструктурированной поверхности черного кремния. Проводилось ли сравнение черного кремния с «суперчерным» графеном или другим эталоном сверхнизкого отражения?
2. В третьей главе на рис. 38 (б) приведено сравнение угловой зависимости полной отражательной способности черного кремния как материала с гетероструктурным солнечным элементом (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*c*-Si на пирамидально-текстурированной поверхности с осажденным слоем оксида индия-олова (контрольный образец). Однако данные по отражательной способности материала еще не характеризуют угловое поведение фотоэлектрических характеристик готового солнечного элемента. Проводились ли угловые измерения вольтамперных характеристик гетероструктурных солнечных элементов на основе черного кремния и их сравнение с характеристиками контрольного образца?
3. В работе недостаточно полно представлены сведения о количестве изготовленных образцов гетероструктурных солнечных элементов (*p*)*a*-Si:H/(*n*)*c*-Si на основе черного кремния, статистике измерений и оценке разброса данных ключевых фотоэлектрических характеристик.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую значимость представленных в диссертации результатов и не влияют на общую положительную оценку качества выполненной работы.

Заключение

Диссертационная работа Вячеславовой Екатерины Александровны представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, в котором получены новые результаты, относящиеся к формированию, оптическим и фотоэлектрическим свойствам гетероструктурных солнечных элементов на основе наноструктурированного кремния.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук», предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Вячеславова Екатерина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.11 – физика полупроводников**.

Официальный оппонент,

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Гец Дмитрий Станиславович

«26» ноября 2026 г.

Место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».
Адрес: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, дом 9.
Сайт организации: https://itmo.ru/
Телефон: +7 9
Электронная почта: dmitry.gets@metalab.ifmo.ru

ПОДПИСЬ Геца Д.
УДОСТОВЕРЯЮ
МЕНЕДЖЕР
ТОМАСОВА Д.