РЕЦЕНЗИЯ

На диссертационную работу Чучваги Николая Алексеевича на тему: «Исследование и оптимизация гетеропереходных солнечных элементов на основе кремния»,

представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика»

1. Оценка актуальности темы диссертационной работы

Фотоэлементы структуры «HIT» (heterojunction with intrinsic thin layer), демонстрирует возможность достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии порядка 25% при использовании меньшего количества кремния и пониженных температур процесса изготовления, не превышающих 200-250°C. В промышленном масштабе технология кремниевого гетероперехода позволяет получать солнечные элементы с эффективностью свыше 18%. Данная технология уже сейчас опережает традиционные кремниевые фотоэлементы в производительности, что сказывается на всё большем распространении её в мире, и, в частности, в странах СНГ.

В последние годы всё больше и больше работ посвящено исследованию фотоэлементов HIT, однако, экспериментальных работ не так много. В большинстве своём лидеры в области технологии HIT сообщают об использовании более чистых и дорогих материалов для достижения высоких КПД фотоэлементов в лабораторных условиях. Работы, посвящённые модификации дизайна фотоэлементов HIT в основном основаны на использовании компьютерного моделирования, но в большинстве своём не рассматривают фотоэлемент HIT в целом, только лишь какие-то отдельные его части. Стоит отметить, что существует проблема повышения качества фотоэлементов структуры HIT в промышленных условиях, и в основном этот вопрос рассматривается со стороны оптимизации технологических процессов и режимов работы оборудования, но не со стороны улучшения дизайна структуры фотоэлемента.

Решением проблемы улучшения качества фотоэлементов в промышленных условиях может служить комплексный подход комплексный подход к оптимизации технологических параметров структуры HIT с применением методов компьютерного моделирования, теоретических и численных расчётов, а также экспериментальных исследований с использованием промышленного или полупромышленного оборудования.

Целью диссертационного исследования является оптимизация технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов для достижения ими коэффициента полезного действия 20% и более.

Поставленная цель предопределила решение следующих **основных задач**:

1) Изучить стандартную технологию получения гетеропереходных кремниевых солнечных элементов и отработать метод её улучшения.

2) При помощи компьютерного моделирования с использованием программного пакета AFORS-HET определить параметры, влияющие на эффективность гетеропереходных кремниевых солнечных элементов.

3) Провести оптимизацию компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT теоретическими расчетами, основанными на физических закономерностях полупроводниковой электроники и фотовольтаики.

4) Провести эксперименты для оптимизации технологических параметров фотоэлемента структуры HIT, в частности, толщины: эмиттерного слоя в ФЭП, встроенного фронтального слоя собственной проводимости в ФЭП, встроенного тыльного слоя собственной проводимости в ФЭП, BSF–слоя ФЭП.

5) Изготовить оптимизированные экспериментальные HIT прототипы с эффективностью более 20 % и исследовать их характеристики методами измерения оптических и ВАХ характеристик.

Рассматриваемая работа представляет собой законченный целенаправленный научно-исследовательский труд, посвященный решению актуальной задачи повышения коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов структуры «HIT». В результате работы были решены такие задачи, как:

– разработана компьютерная модель HIT ФЭП и проведена её оптимизация численными методами;

– указанная компьютерная модель задаёт параметры слоёв фотоэлементов структуры HIT и предсказывает свойства реальных ФЭП, исходя из заданных параметров;

– экспериментально найдены оптимальные значения для толщин слоёв HIT структуры, а именно: эмиттерного слоя, верхнего и тыльного встроенного слоя, запирающего BSF-слоя;

– найденные оптимальные значения характеристик HIT ФЭП могут быть использованы в промышленном производстве ФЭП.

2. Научные результаты в рамках требования к диссертациям (пп. 127, от 31.03.11 г., «Правил присуждения учёных степеней»)

Цель диссертационной работы Чучваги Н.А. является является оптимизация технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов для достижения ими коэффициента полезного действия 20% и более. Ниже приведены основные научные результаты, полученные соискателем в ходе выполнения данной работы:

1) Отработан метод улучшения стандартной технологии путём оптимизации технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов влияющих на их выходные характеристики.

2) Методом компьютерного моделирования определены параметры, влияющие на эффективность гетеропереходных кремниевых солнечных элементов. Был разработан алгоритм оптимизации компьютерной модели.

3) Проведена оптимизация компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT, с использованием комплексного подхода, включающего в себя компьютерное моделирование на базе программного пакета AFORS-HET, теоретическое исследование слоёв Шоттки, а также анализ экспериментальных данных. Установлено, что оптимальные параметры функциональных слоев фотоэлемента структуры HIT:

- толщина аморфного слоя p–типа проводимости составляет 7 нм; уровень легирования примесями имеет значение порядка 10^{20} $см^{-3}$;

- толщина подложки кристаллического кремния n–типа проводимости составляет 200 мкм, степень легирования примесями зависит от параметров самой кристаллической пластины, в исследуемых образцах значение порядка 10^{17} $см^{-3}$;

— толщина аморфного слоя n–типа проводимости может принимать любое значение, обеспечивающее необходимый энергетический барьер для неосновных носителей заряда, оптимальный уровень легирования примесями должен быть порядка 10^{20} $см^{-3}$.

4) Показано, что с увеличением толщины встроенного слоя аморфного кремния собственной проводимости уменьшается количество поверхностных дефектов, но при этом увеличивается сопротивление структуры. Оптимальная толщина для фронтального слоя собственной проводимости составляет 5–7 нм. Для тыльного слоя собственной проводимости оптимальная толщина находится в диапазоне 7–11 нм.

5) Методами измерения оптических и ВАХ характеристик, установлено, что эффектом уменьшение толщины p–слоя является увеличение значения тока короткого замыкания фотоэлемента, которое происходит вплоть до толщины p–слоя 8 нм, а затем уменьшается. Помимо повышения тока короткого замыкания, происходит снижение напряжения холостого хода и форм-фактора, что связано с рекомбинацией носителей заряда в структуре.

6) Показано, что максимум эффективности ФЭП наблюдается при толщине p–слоя 10 нм, оптимальная толщина n-слоя может отличаться для различных пластин, оптимальным значением толщины фронтального i-a-Si:H слоя является 7 нм, в то время как для тыльного слоя i-a-Si:H оптимальным значением является 9 нм. Такая зависимость обусловлена влиянием аморфной плёнки на напряжение холостого хода, что может быть связано с изменением вероятности рекомбинации носителей заряда в структуре.

7) Показана возможность оптимизации технологических параметров структуры солнечных элементов посредством компьютерного моделирования, установлены оптимальные значения характеристик HIT ФЭП, которые можно использовать в промышленном производстве фотоэлементов, а также изготовлены оптимизированные экспериментальные HIT прототипы с эффективностью более 20 % и исследованы их характеристики.

3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность основывалась согласованием основных результатов со строго обоснованными теоретическими, практическими работами и выводами, изданными и входящими в достоверные научно-технические базы. Исследования проводились, используя зарекомендованные методы исследования с применением современного оборудования. Обсуждение полученных результатов на каждом этапе исследования докладывались на научных семинарах, также результаты представлялись на международных и региональных конференциях с участием ведущих специалистов данной области. Полученные результаты проходили проверку на достоверность путём рецензирования при издании в периодических международных научных журналах и докладах международных конференций, входящих в базы Thompson Reuters и Scopus.

4. Степень новизны каждого научного результата (положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

1) Впервые используя комплексный подход, включающий в себя экспериментальные исследования, теоретические расчёты и компьютерное моделирование найдены оптимальные геометрические параметры и уровни легирования функциональных слоёв, влияющие на выходные характеристики исследуемого фотоэлемента HIT.

2) Для фотоэлемента структуры HIT, изготовленного в промышленных условиях на основе коммерческой монокристаллической пластины n-типа проводимости определена оптимальная толщина эмиттерного аморфного слоя p-типа проводимости.

3) Для фотоэлемента структуры HIT, изготовленного в промышленных условиях на основе коммерческой монокристаллической пластины n-типа проводимости впервые определены оптимальные значения толщины для фронтального и тыльных встроенных аморфных слоёв собственной проводимости.

4) На гетеропереходных фотоэлементах HIT, произведённых в промышленных условиях с использованием оптимальных технологических параметров структуры достигнута эффективность более 20%.

5. Теоретическая и практическая значимость исследования

— Показана возможность оптимизации технологических параметров структуры солнечных элементов посредством компьютерного моделирования, используя алгоритм, представленный в работе.

— Определены оптимальные значения характеристик HIT ФЭП, которые можно использовать в промышленном производстве фотоэлементов.

6. Полнота опубликованных материалов диссертации в печати

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 16 работах, 2 из которых в журналах, входящих в базу данных SCOPUS, 3 работы в журналах, рекомендованных ККСОН, включая

инновационный патент, 5 работ в сборниках казахстанских и международных конференций. Имеются статьи в других изданиях и трудах конференций.

7. Замечание, предложения по диссертации

1) На некоторых рисунках затруднительно рассмотреть мелкие элементы;

2) в пункте 3.3.3 выводы основываются на графиках, построенных всего на трёх точках. Однако обширность исследований, а также совпадение диапазона искомых величин с теоретическими расчётами сглаживают эти недостатки;

3) В диссертационной работе, в разделе 3.2.4, автор не приводит подробного анализа расчёта слоёв Шоттки, а лишь ссылается на метод и теорию, представленную в разделе 2.5;

4) В представленном экспериментальном материале, диссертант не рассматривает связь технологических режимов работы установок для роста аморфных плёнок с эффективностью произведённых фотоэлементов. Выявление такой связи, несомненно, повысило бы практическую ценность проведенных исследований.

Содержания диссертации в рамках требований «Правила присуждения учёных степеней»

Диссертационная работа Чучваги Н.А. на тему: «Исследование и оптимизация гетеропереходных солнечных элементов на основе кремния» является самостоятельным, законченным исследованием. В диссертационной работе представлены результаты оптимизации технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов компьютерного моделирования, а также экспериментальные исследования физических свойств и структуры фотоэлементов HIT.

Тема диссертации является актуальной на сегодняшний и на завтрашний день, особенно в условиях казахстанского климата. Тема обладает достаточной новизной. Выводы исследования имеют теоретичекую и практическую значимость. Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям «Правил присуждения степеней» Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК. А Чучвага Николай Алексеевич заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика».

Рецензент:
начальник отдела РФТТ
РГП ИЯФ МЭ РК,
к.ф.-м.н. Кислицин С.Б.