



ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ CIGS С МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Иброхимова Машхура

студент кафедры «альтернативных источников энергии»

Атажонов Мухиддин

доцент кафедры «альтернативных источников энергии»

*Андижанского машиностроительного института, Андижан,
Узбекистан.*

Аннотация: В работе рассматриваются тонкие пленки на основе селенида меди, индия и галлия (CIGS) как перспективные материалы для фотоэлектрических технологий. CIGS-пленки обладают высокой эффективностью преобразования солнечной энергии и позволяют создавать гибкие, легкие модули, которые могут использоваться на различных поверхностях. В аннотации анализируются основные методы осаждения и выращивания CIGS-пленок, такие как химическое осаждение из паровой фазы и молекулярно-лучевая эпитаксия, а также их влияние на кристаллическую структуру и фотоэлектрические характеристики материала. Особое внимание уделяется методам повышения эффективности и стабильности CIGS-пленок, в том числе улучшению межслойных переходов и добавлению буферных слоев.

Ключевые слова: CIGS, химическое осаждение из паровой фазы (CVD), молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE), межслойные переходы, буферные слои, стабильность, экологическая безопасность



Введение

Фотоэлементы на основе кристаллических пленок III-V групп

Полупроводниковые материалы на основе соединений групп III (Al, Ga, In) и V (N, P, As, Sb) известны с 1950 года, а в начале 1960-х годов были созданы и первые фотоэлементы на основе арсенида галлия, которые тут же нашли применение в космических исследованиях благодаря устойчивости к космическому излучению и высокой эффективности фотопреобразования. Из всех соединений групп III-V наиболее широко применяются InP и GaAs, поскольку они имеют почти идеальную ширину запрещенной зоны в 1,4 эВ. Наибольшая эффективность на структурах с одним переходом была достигнута на тонкопленочных устройствах, сформированных методом газофазной эпитаксии: 25,8% для GaAs и 21,9% для InP [1].

Недостатком устройств на пленках соединений III-V групп является высокая стоимость подложек, обеспечивающих эпитаксиальный рост этих материалов. Кроме этого, эффективность фотопреобразования пленок очень чувствительна к примесям и структурным дефектам, что не позволяет упростить технологию их осаждения и снизить стоимость производства ячеек. Выход из этой ситуации: использовать ячейки с несколькими переходами, обеспечивающими более полное поглощение солнечного спектра, а также использовать концентрирование солнечной энергии с большой площади на небольшой фотоэлемент. В этом случае вместо дорогостоящего фотоэлемента используется существенно более дешевое концентрирующее устройство, например, линза Френеля. В результате стоимость фотоэлемента снижается пропорционально степени концентрирования солнечного излучения. Современный рекорд эффективности фотопреобразования, достигнутый на структуре с тремя переходами при концентрировании в 364 раза, составляет 41,6% (см. рис. 1). Увеличение количества гетеропереходов больше 3 приводит к



значительному удорожанию фотоэлемента, поэтому основной рынок для высокоэффективных устройств с четырьмя и более гетеропереходами – аэрокосмическая промышленность [1, 3].

Среди различных направлений в области возобновляемой энергетики фотоэлектрические технологии играют одну из ведущих ролей, и спрос на солнечные модули с высокой эффективностью и доступной себестоимостью постоянно растет. В последние годы тонкопленочные материалы стали привлекать особое внимание благодаря их уникальным свойствам и перспективам для создания компактных и гибких солнечных элементов. Одним из наиболее эффективных и изучаемых тонкопленочных материалов является селенид меди, индия и галлия (CIGS), который обладает высоким коэффициентом поглощения солнечного света и возможностью создания тонких слоев, что позволяет значительно снизить потребление материалов и удешевить производство [2, 5-7].

Тонкие пленки CIGS демонстрируют высокие показатели фотоэлектрического преобразования, достигая КПД порядка 22% в лабораторных условиях, что делает их конкурентоспособными с традиционными кремниевыми солнечными элементами. При этом CIGS-пленки обладают гибкостью, что позволяет применять их для изготовления портативных и гибких солнечных модулей, а также использовать на сложных поверхностях и в устройствах с ограничениями по весу.

Однако для массового внедрения CIGS в солнечную энергетику необходимо решить ряд задач, связанных с оптимизацией их структуры, повышением долговечности и стабильности, а также снижением производственных затрат. В связи с этим, исследования направлены на разработку более экономичных и эффективных методов осаждения тонких пленок CIGS, улучшение качества межслойных переходов и повышение стойкости к воздействию внешних факторов [3].



Целью данного исследования является комплексный анализ свойств, методов производства и перспектив применения тонкопленочных CIGS-покрытий в фотоэлектрических преобразователях.

Постановка задачи

В условиях глобального перехода на возобновляемые источники энергии актуальность создания высокоэффективных и экономичных фотоэлектрических технологий стремительно возрастает. Одним из перспективных решений в данной области являются тонкопленочные солнечные элементы на основе селенида меди, индия и галлия (CIGS). Эти материалы обладают рядом преимуществ, включая высокую эффективность преобразования солнечной энергии, низкую себестоимость и возможность создания гибких и легких модулей [4-5].

Целью исследования является анализ и оптимизация свойств тонких пленок CIGS для применения в солнечной энергетике. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение структуры и свойств CIGS-пленок: исследование кристаллической структуры, состава и толщины пленок, а также их влияния на фотоэлектрические свойства материала.
2. Анализ методов осаждения и выращивания CIGS-пленок: изучение различных методов осаждения, таких как химическое осаждение, молекулярно-лучевая эпитаксия, соосаждение, и их влияние на качество пленок и себестоимость производства.
3. Повышение эффективности преобразования: исследование межслойных переходов, буферных слоев и контактных областей для снижения потерь энергии и повышения КПД фотоэлектрических преобразователей.
4. Увеличение стабильности и долговечности устройств: разработка методов для повышения устойчивости CIGS-пленок к воздействию



окружающей среды (влажность, температура, ультрафиолетовое излучение) и улучшение их эксплуатационных характеристик.

5. Экологическая и экономическая оценка: анализ экологической безопасности использования CIGS в солнечных элементах, а также определение экономических преимуществ и ограничений в массовом производстве.

Методы

Методы осаждения тонких пленок на основе селенида меди, индия и галлия (CIGS) играют ключевую роль в получении высококачественных фотоэлектрических преобразователей. Они позволяют контролировать кристаллическую структуру и толщину пленок, что критически важно для эффективности и стабильности солнечных элементов [6]. Наиболее распространенные методы осаждения CIGS-пленок включают:

1. Химическое осаждение из паровой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD)

- Описание: CVD — один из самых широко используемых методов для получения тонких пленок. В ходе процесса испаренные химические вещества вступают в реакцию на поверхности подложки, где образуется тонкий слой CIGS.

- Преимущества: высокая точность контроля толщины пленок, высокая однородность и низкая себестоимость для массового производства.

- Недостатки: сложность контроля состава и высокого уровня чистоты; требуются точные условия для предотвращения образования побочных продуктов.

2. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (Molecular Beam Epitaxy, MBE)



- Описание: МВЕ осуществляется путем испарения каждого компонента (Cu, In, Ga, Se) в вакууме и осаждения на подложке. Процесс позволяет получать кристаллы с высокой степенью чистоты.

- Преимущества: высокий контроль над кристаллической структурой и чистотой пленок, возможность создания лабораторных образцов с высокой эффективностью.

- Недостатки: высокая стоимость оборудования и невысокая скорость осаждения, что затрудняет использование в массовом производстве.

3. Соосаждение (Co-evaporation)

- Описание: в этом методе элементы Cu, In, Ga и Se испаряются одновременно или последовательно и осаждаются на подложке. Можно регулировать состав пленки, управляя скоростью испарения компонентов.

- Преимущества: высокий контроль над составом пленки и эффективное использование материалов, подходящих для промышленного производства.

- Недостатки: требуется точный контроль температуры и соотношения компонентов для обеспечения равномерного осаждения.

4. Реактивное распыление (Sputtering)

- Описание: частицы материала выбиваются с поверхности мишени путем воздействия ионов, создавая осаждение на подложке. В этом методе используются металлические мишени Cu, In и Ga, а селен добавляется путем последующей селенизации [7].

- Преимущества: широкое распространение, возможность работы с разными подложками, низкие температуры обработки.

- Недостатки: возможность возникновения дефектов из-за высокого уровня энергии частиц, требуются дополнительные этапы для селенизации.

5. Электроосаждение (Electrodeposition)



- Описание: осаждение пленки происходит путем погружения подложки в раствор электролита и подачи электрического тока. При этом ионы Cu, In и Ga осаждаются на подложке, а затем происходит селенизация.

- Преимущества: экономичность и простота оборудования, возможность контролировать толщину и состав пленок [8].

- Недостатки: требуется дальнейшая селенизация для завершения процесса, и может быть сложным контроль за однородностью покрытия.

6. Осаждение из раствора (Solution-based deposition)

- Описание: в данном методе раствор с комплексами элементов CIGS наносится на подложку, после чего происходит нагревание, и образуется тонкий слой.

- Преимущества: низкая стоимость, возможность нанесения на гибкие подложки, подходит для массового производства.

- Недостатки: ограниченный контроль над составом и качеством пленок, что может привести к снижению эффективности преобразователя.

Выбор метода осаждения

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от целей исследования или производства. Для массового производства применяют методы, сочетающие экономичность и высокую производительность, такие как CVD или соосаждение. Для лабораторных исследований и создания образцов с высоким КПД часто применяют более дорогостоящие методы, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия [9].

Постоянное улучшение этих методов позволяет создавать высокоэффективные солнечные элементы на основе CIGS, делая их всё более доступными для массового рынка [10].

Преимущества гибких модулей на основе CIGS



Высокий коэффициент поглощения: CIGS обладает высоким коэффициентом поглощения света, что позволяет использовать тонкие слои материала без значительной потери эффективности. Это делает модули более легкими и удобными для использования на поверхностях со сложной формой.

Гибкость и прочность: Гибкие модули на основе CIGS могут наноситься на полимерные и металлические подложки, что позволяет им быть устойчивыми к изгибам и деформации. Такие модули легко интегрировать в материалы зданий, автомобили, текстиль и другие объекты [9-11].

Высокая эффективность преобразования: КПД тонкопленочных CIGS-модулей может достигать 20%, что делает их конкурентоспособными с традиционными кремниевыми солнечными панелями. При этом они лучше работают при недостатке освещения и могут сохранять высокий уровень эффективности в условиях слабого солнечного освещения или частичного затенения.

Легкость и удобство установки: Гибкие солнечные панели на основе CIGS легче традиционных кремниевых, что снижает затраты на транспортировку и упрощает процесс установки. Это особенно важно для портативных решений, где важны вес и удобство использования [12].

Широкий спектр применения: Гибкость и легкость таких модулей позволяет применять их в строительстве, на транспорте, в мобильных устройствах и даже в военных и космических технологиях, где особенно важны компактность и устойчивость к механическим воздействиям [13].

Основные межслойные переходы в CIGS-солнечных элементах

Межслойные переходы в тонкопленочных структурах на основе селенида меди, индия и галлия (CIGS) играют критически важную роль в повышении эффективности и стабильности фотоэлектрических



преобразователей. Качество межслойных переходов существенно влияет на основные параметры солнечных элементов, такие как коэффициент заполнения, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания [14]. В этой связи межслойные переходы между CIGS и другими слоями — например, буферными и контактными слоями — являются ключевыми компонентами для оптимизации фотоэлектрических характеристик.

1. Переход CIGS/буферный слой:

- Буферный слой — это переходный слой между активной CIGS-пленкой и прозрачным оксидным слоем. Он обычно состоит из материалов с широкой запрещенной зоной, таких как CdS, ZnO или Zn (S,O).

- Функции буферного слоя: Буферный слой снижает поверхностные дефекты и рекомбинацию носителей заряда на границе CIGS и прозрачного слоя. Он улучшает сбор носителей и стабилизирует рабочие характеристики солнечного элемента.

- Проблемы и решения: Традиционный буферный слой на основе CdS часто заменяют на безкадмиевые материалы, такие как Zn (O,S) или In₂S₃, чтобы избежать токсичности кадмия и улучшить пропускание света.

2. Переход буферный слой/прозрачный проводящий слой (TCO):

- Прозрачный проводящий слой (обычно ZnO:Al или ITO) служит фронтальным электродом и обеспечивает передачу света к активному слою, а также выводит ток из солнечного элемента.

- Оптимизация перехода: Толщина и кристаллическая структура этого переходного слоя должны быть тщательно настроены для минимизации потерь энергии и улучшения прозрачности и проводимости TCO-слоя.

3. Переход CIGS/задний контакт:

- Задний контакт, обычно состоящий из молибдена (Mo), формирует обратную поверхность солнечного элемента и отвечает за эффективное отражение света обратно в активный слой.



- Влияние заднего контакта: Качество адгезии между CIGS и задним контактом важно для стабильности устройства. В некоторых случаях добавляют промежуточные слои (например, MoSe₂), которые улучшают проводимость и уменьшают потери носителей.

4. Границы зерен внутри CIGS-пленки:

- Границы зерен в структуре CIGS также действуют как межслойные переходы и могут служить как барьеры для носителей заряда, повышая вероятность рекомбинации. Управление структурой CIGS — такие как оптимизация температуры осаждения и условий роста кристаллов — способствует улучшению фотоэлектрических характеристик.

- Решения: Использование добавок, таких как натрий (Na), может улучшить кристаллическое качество CIGS-пленок, уменьшив количество дефектов и повысив концентрацию носителей заряда.

Методы улучшения межслойных переходов в CIGS-структурах

1. Оптимизация толщины и состава слоев: Точный контроль толщины и состава каждого слоя помогает минимизировать потери энергии на межслойных переходах и увеличивает эффективность солнечного элемента.

2. Введение допирующих элементов: Натрий (Na), рубидий (Rb) и другие элементы могут вводиться в CIGS для уменьшения количества рекомбинационных центров и улучшения пропускания границ зерен.

3. Плазменная обработка: Поверхностная обработка слоя плазмой помогает улучшить адгезию между слоями и увеличить контактную поверхность, уменьшая контактное сопротивление.

4. Защитные покрытия и барьерные слои: Применение барьерных слоев между CIGS и другими компонентами защищает от диффузии нежелательных элементов и увеличивает долговечность и стабильность устройств.



Межслойные переходы в CIGS-солнечных элементах оказывают значительное влияние на их эффективность и стабильность. Продолжаются исследования в области оптимизации этих переходов путем подбора материалов, улучшения адгезии, введения новых буферных слоев и применения различных методов обработки. Улучшение межслойных переходов позволяет создавать более эффективные и долговечные солнечные элементы на основе CIGS, что делает их более перспективными для применения в фотоэлектрических технологиях.

Заключение

Каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения, и выбор подходящей технологии зависит от требований к качеству пленки, стоимости и доступности оборудования. Для промышленного производства чаще всего используются методы соосаждения и испарения с последующим селенированием, так как они обеспечивают высокое качество и стабильность материалов для солнечных элементов.

Литературы

1. <https://www.prosolar.ru/articles/fotoelementy-na-osnove-tonkih-plenok-poluprovodnikov/>
2. Muhiddin Atajonov. Development of technology for the development of highly efficient combinations of solar and thermoelectric generators. (2024) AIP Conf. Proc. 3045, 020011, <https://doi.org/10.1063/5.0197733>.
3. M.O. Atajonov., S.J. Nimatov., A.I. Rahmatullayev. **Formalization of the dynamics of the functioning of petrochemical complexes based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic.** Computer and Systems Engineering (2023) |Conference paper| p.050014-1-050014-5. <https://doi.10.1063/5.0112403>



4. S.T. Yunusova., D.A. Halmatov., M.O. Atajonov. Malaysia, Formalization of the Cotton Drying Process Based on Heat and Mass Transfer Equations // IJUM Engineering Journal. (2020) –Vol.21. № 2. p.256–265: <https://doi.org/10.31436/ijumej.v21i2.1456>.
5. Muhiddin Atajonov., Qudrat Mamarasulov., Odiljon Zaripov. Study of Solar Photoelectric Plant in Matlab (Simulink) Package. (2024) MPASE-2024. Pp.12.
6. Касимахунова А.М., Атажонов М.О, Абдуллаева М.П. «Исследование технологий изготовления пленочных термоэлементов (bi_2te_3) и (sb_2te_3) в современных термоэлектрических технологиях», Международная научно-практическая конференция «проблемы рационального использования природных ресурсов и современные технологии переработки угля», посвященная 90-летию д.т.н., профессора А.С. Джаманбаева. Киргизия 2023. 30-01.12.2023г
7. Касимахунова А.М., Атажонов М.О, Абдуллаева М.П. «Перспективы развития создания комбинированных преобразователей альтернативной энергии», Международная научно-практическая конференция «проблемы рационального использования природных ресурсов и современные технологии переработки угля», посвященная 90-летию д.т.н., профессора А.С. Джаманбаева. Киргизия 2023. 30-01.12.2023г.
8. Атажонов.М.О. Новые конструкции солнечных воздухонагревателей. Международная научно-практическая конференция посвященная 80 - летию Академии наук Узбекистана. Андижан – 2023. Ст. 200-203.
9. Атажонов.М.О. Исследование гибридных фототермогенераторов и их перспективы. Международная научно-практическая конференция посвященная 80 - летию Академии наук Узбекистана. Андижан – 2023. Ст. 265-268.



10. Атажонов.М.О. Улучшение эффективности фототермоэлемента. «Критические проблемы использования возобновляемых энергетических ресурсов, применения искусственного интеллекта и цифровых технологий в повышении эффективности энергосберегающих устройств» научно-техническая конференция. Ст. 496-498.

11. М.О Атажонов Исследование термогенераторов как альтернативных источников энергии. НамМТИ, Международная научно-практическая конференция. 2023г май, 3-4, 2-том.Ст. 118-122.

12. I.H. Sidikov M.O. Atajonov., S.T. Yunusova., M.F. Sherboyev Adaptive Control System of Uncertain Dynamic Objects No Stationary Parametrically. International Journal of Scientific & Technology Research Volume 8, Issue 12, December 2019. 1846-1849.

13. М.О Атажонов. Нанокompозитные пленки на основе системы ZITO ($ZnO In_2 O_3-SnO_2$): перспективы термоэлектрического преобразования. Prospects For Thermoelectric Conversion. Research and implementation, 2(3), (2024) 152–157. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10775304>

14. М.О Атажонов. Нанопроволочные солнечные элементы нового поколения. “Research and implementation” Том 2 № 3 (2024)
[DOI:10.5281/zenodo.10805267](https://doi.org/10.5281/zenodo.10805267)