



УДК 621.383

doi.10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА CIGS В SENTAURUS TCAD

Комилов Аслиддин Гуломович¹- д.т.н., с.н.с.,<https://orcid.org/0000-0002-5406-0477> e-mail: asliddin@rambler.ru**Истамов Дамир Ботирович**²- (PhD), м.н.с.<https://orcid.org/0009-0007-4654-1180> e-mail: istamov@uzsci.net

¹Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии,
Чингиз Айтматов 2Б/1, Ташкент 100084, Узбекистан

²Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан, Чингиз Айтматов
2Б/2, Ташкент 100084, Узбекистан

Аннотация. В работе разработана и откалибрована численная модель тонкоплёночного солнечного элемента CIGS с использованием Synopsys Sentaurus TCAD. Методика основана на самосогласованном решении дрейфово-диффузионных уравнений с расчётом оптической генерации методом матрицы переноса. Проведённый корреляционный анализ выявил сильную зависимость ширины запрещённой зоны E_{go} от напряжения холостого хода ($r \approx 0,99$), а также влияние толщины слоя CdS и коэффициента заполнения (FF) на эффективность устройства. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации гибких фотоэлектрических элементов.

Материалы и методы. Численное моделирование CIGS солнечных элементов выполнялось в TCAD в дрейфово-диффузионном приближении с самосогласованным решением уравнений переноса заряда, расчётом оптической генерации методом матрицы переноса и учётом основных рекомбинационных механизмов в многослойной структуре Mo/CIGS/CdS/OVC.

Результаты. Численное моделирование CIGS солнечного элемента выполнено для 36 конфигураций при стандартном освещении AM 1.5G, при этом КПД составил 16,19–19,99 % в зависимости от параметров структуры.

Корреляционный анализ показал сильную зависимость E_{go} от напряжения холостого хода V_{oc} ($r \approx 0,99$) и фототока J_{PH} , а также снижение эффективности при увеличении толщины слоёв CdS и CIGS. Наибольшее влияние на повышение КПД оказывает коэффициент заполнения (FF).

Ключевые слова: тонкоплёночные солнечные элементы, CIGS (диселенид меди-индия-галлия), Sentaurus TCAD, численное моделирование, гетероструктура, корреляционный анализ.

Дата поступления: 20.04.2026. После обработки: 20.04.2025 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Komilov A., Istamov D.B. Modeling of a CIGS Solar Cell in Sentaurus TCAD. Alternative Energy. 2026. 2(23). pp. 19-26. (In Rus.)

UDC 621.383

MODELING OF A CIGS SOLAR CELL IN SENTAURUS TCAD

Komilov Asliddin¹-DCs, senior researcher,<https://orcid.org/0000-0002-5406-0477> e-mail: asliddin@rambler.ru**Istamov Damir Botirovich**² - junior researcher<https://orcid.org/0009-0007-4654-1180> e-mail: istamov@uzsci.net



¹National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy, Tashkent, Uzbekistan

²Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2B/2 Chingiz Aitmatov Street, Tashkent 100084, Uzbekistan

Abstract. In this work, a numerical model of a thin-film CIGS solar cell was developed and calibrated using Synopsys Sentaurus TCAD. The methodology is based on the self-consistent solution of drift-diffusion equations, with optical generation calculated using the transfer matrix method. The performed correlation analysis revealed a strong dependence of the bandgap energy (E_g) on the open-circuit voltage ($r \approx 0.99$), as well as the influence of the CdS layer thickness and fill factor (FF) on the device efficiency. The obtained results can be used to optimize flexible photovoltaic devices.

Materials and Methods. Numerical modeling of CIGS solar cells was performed in TCAD using the drift-diffusion approximation, with a self-consistent solution of charge transport equations, optical generation calculated via the transfer matrix method, and inclusion of the main recombination mechanisms in the multilayer Mo/CIGS/CdS/OVC structure.

Results. Numerical modeling of the CIGS solar cell was performed for 36 configurations under standard AM 1.5 G illumination, with the efficiency ranging from 16.19% to 19.99% depending on the structural parameters.

Correlation analysis revealed a strong dependence of the bandgap energy (E_g) on the open-circuit voltage (V_{oc}) ($r \approx 0.99$) and the photocurrent (J_{ph}), as well as a decrease in efficiency with increasing thickness of the CdS and CIGS layers. The fill factor (FF) was found to have the greatest impact on improving the device efficiency.

Keywords: Thin-film solar cells, CIGS (copper indium gallium diselenide), Sentaurus TCAD, numerical modeling, heterostructure, correlation analysis.

UO‘K 621.383

SENTAURUS TCAD DASTURIDA CIGS QUYOSH ELEMENTINI MODELLASHTIRISH

Komilov Asliddin G‘ulomovich¹ -texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim,

<https://orcid.org/0000-0002-5406-0477> e-mail: asliddin@rambler.ru

Istamov Damir Botirovich² - texnika fanlari falsafa doktori (PhD)

<https://orcid.org/0009-0007-4654-1180> e-mail: istamov@uzsci.net

¹Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent sh.

²O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Fizika-texnika instituti, Chingiz Aytmatov ko‘chasi 2B/2, Toshkent sh.

Annotatsiya. Ushbu ishda sentaurus tcad dasturida cigs quyosh elementini modellashtirilgan va uning kalibrlash jarayoni amalga oshirildi. Mazkur metodika zaryad tashishning drift-diffuziya tenglamalarini o‘zaro moslashgan (self-consistent) tarzda yechishga asoslanib, optik generatsiya jarayoni transfer matritsa usuli (TMM) yordamida hisoblanadi. Korrelyatsion tahlil taqiqlangan zona kengligi (E_g) va salt yurish kuchlanishi (V_{oc}) o‘rtasida yuqori musbat bog‘liqlik ($r \approx 0.99$) mavjudligini ko‘rsatdi. Shuningdek, CdS qatlam qalinligi va to‘ldirish koeffitsienti (FF) qurilma samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi. Olingan natijalar egiluvchan fotoelektrik elementlarni optimallashtirishda qo‘llanilishi mumkin.

Materiallar va usullar. CIGS quyosh elementlarining sonli modellashtirilishi TCAD muhitida drift-diffuziya yaqinlashuvi asosida amalga oshirildi. Jarayonda zaryad tashish tenglamalari self-consistent yechildi, optik generatsiya TMM orqali hisoblandi va Mo/CIGS/CdS/OVC ko‘p qatlamli tuzilmadagi asosiy rekombinatsiya jarayonlari inobatga olindi.



Natijalar. CIGS quyosh elementi uchun sonli modellash tirish 36 ta konfiguratsiya bo'yicha standart AM 1.5G yoritilish sharoitida amalga oshirildi, bunda foydali ish ko'effitsienti (FIK) struktura parametrlariga bog'liq holda 16,19–19,99 % oralig'ida o'zgardi.

Xulosa. Korrelyatsion tahlil natijalari Eg bilan salt yurish kuchlanishi (Voc) va qisqa tutashuv toki (I_{sc}) o'rtasidagi musbat bog'liqlik ($r \approx 0,99$) mavjudligini, shuningdek CdS va CIGS qatlamlari qalinligining ortishi qurilma samaradorligining pasayishiga olib kelishini ko'rsatdi. Tahlillar asosida foydali ish ko'effitsiyentini (FIK) oshirishda asosiy belgilovchi parametr sifatida to'ldirish ko'effitsiyenti (FF) aniqlandi.

Kalit so'zlar: Yupqa plyonkali quyosh elementlari, CIGS (mis–indiya–galliy diselenidi), Sentaurus TCAD, sonli modellash tirish, geterostruktura, korrelyatsion tahlil.

Введение.

Солнечные элементы на основе диселенида меди-индия-галлия (CIGS) представляют собой одну из наиболее перспективных технологий тонкоплёночной фотовольтаики, обеспечивающую коэффициенты преобразования энергии, сопоставимые с показателями кристаллического кремния [1]. Рекордная эффективность лабораторных образцов данной технологии достигла 22,6 % при использовании поглощающего слоя толщиной менее 3 мкм [1].

Прямозонная структура материала CIGS характеризуется высоким коэффициентом поглощения — порядка 10^5 см^{-1} для фотонов с энергией 1,5 эВ и выше, что делает его эффективным материалом для создания облегчённых, гибких и высокопроизводительных фотоэлектрических устройств [2]. Дополнительным преимуществом является возможность прецизионного регулирования ширины запрещённой зоны в диапазоне 1,07–1,7 эВ путём изменения молярной доли галлия, что открывает широкие возможности для спектральной оптимизации приборных структур [1].

Численное моделирование является важным инструментом для исследования электрофизических процессов в гетероструктурах данного типа и идентификации внутренних механизмов потерь [3]. Симуляции позволяют количественно оценить влияние градиентов состава по глубине, свойств интерфейсов и параметров дефектных состояний на выходные характеристики солнечного элемента [3]. Оптимизация параметров оконного слоя ZnO, поглотителя и интерфейсов CIGS/CdS рассматривается как один из ключевых факторов повышения эффективности лабораторных образцов [4]. Использование специализированных TCAD-симуляторов позволяет предсказывать поведение двумерных и трёхмерных приборных структур на основе фундаментальных физических моделей полупроводников [5].

В рамках данной работы построение и анализ модели солнечного элемента выполняются с использованием программного комплекса Synopsys Sentaurus TCAD — одного из ведущих инструментов многомерного моделирования полупроводниковых приборов [6]. Расчёт электрического поведения прибора, включая процессы переноса носителей заряда и их рекомбинацию по механизму Шокли—Рида—Холла, осуществляется путём численного решения системы фундаментальных уравнений полупроводниковой физики, включая уравнение Пуассона и уравнения непрерывности [7].

Основная цель исследования заключается в разработке и калибровке модели, способной с высокой точностью воспроизводить экспериментальные данные, включая вольт-амперные характеристики и спектры внешней квантовой эффективности [8]. В статье рассматривается влияние проектных параметров, включая толщины слоёв и уровни легирования, на достижение высоких значений КПД [9]. Отдельное внимание уделено анализу факторов, лимитирующих производительность, в частности влиянию глубоких ловушечных уровней в объёме поглотителя и дефектов на границе раздела CdS/CIGS [6]. Полученные результаты моделирования позволяют определить эффективные стратегии оптимизации структуры тонкоплёночных солнечных элементов и повышения их энергетической эффективности в реальных условиях эксплуатации [10].



Методика моделирования

Методика численного моделирования солнечных элементов CIGS основана на решении фундаментальных уравнений полупроводниковой физики с использованием метода контрольных объёмов, при котором расчётная область дискретизируется на совокупность ячеек конечного объёма [8]. Математическая модель устройства формируется в среде TCAD и включает описание геометрии структуры, распределения материалов, электрических контактов и физических параметров слоёв [7].

Моделирование представляет собой самосогласованное решение системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для электронов и дырок [11]. Электростатическое поле описывается уравнением Пуассона:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \Psi) = q(p - n + N_D - N_A) - \rho_T \quad (1)$$

Перенос носителей заряда в CIGS-структурах моделируется в дрейфово-диффузионном приближении, где плотности токов определяются градиентами электростатического потенциала и концентраций носителей [7].

Оптическая генерация носителей в объёме поглотителя рассчитывается на основе метода матрицы переноса (Transfer Matrix Method), предполагающего плоские границы раздела и когерентное распространение излучения в тонкоплёночных слоях [6].

Ключевым элементом модели является учёт механизмов рекомбинации носителей заряда. Рекомбинация через глубокие уровни ловушек описывается статистикой Шокли—Рида—Холла. Дополнительно учитываются излучательная рекомбинация

$$R_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (2)$$

и Оже-рекомбинация, существенная в высоколегированных областях [7].

Численное решение системы уравнений выполняется самосогласованно итерационными методами до достижения сходимости по невязке. Точность и устойчивость расчётов существенно зависят от качества дискретизации и плотности расчётной сетки [6]. Материальные параметры, включая подвижности носителей, времена жизни и оптические коэффициенты, задаются в рамках параметризации используемых физических моделей [7].

Построение модели в Sentaurus TCAD

Создание геометрической модели солнечного элемента CIGS начинается в модуле Sentaurus Structure Editor (SDE) с инициализации рабочего пространства командами (sde: clear) и (sdegeo: set-default-boolean "ABA"). Инструментарий SDE позволяет формировать структуры как интерактивно через графический интерфейс, так и с использованием скриптов на языке Scheme, обеспечивая гибкость при создании TCAD-устройств [7]. С помощью SDE задаются области устройства, материалы и расположение электрических контактов, после чего формируется расчётная сетка [6]. Каждая виртуальная структура сохраняется в TDR-файле, содержащем описание границ, типов материалов и узлов сетки [7].

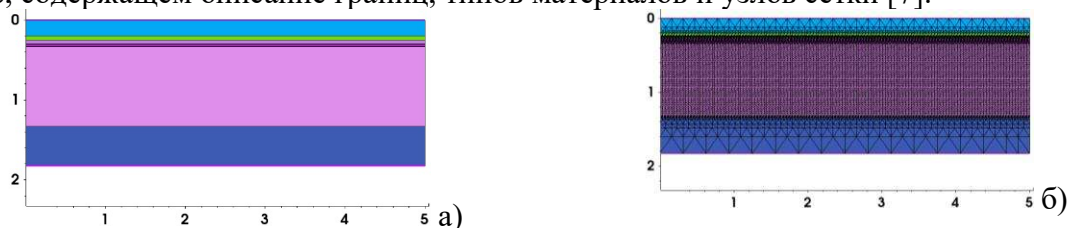


Рисунок 1. Геометрическая модель структуры (а) и сетка (б) CIGS в Sentaurus Structure Editor.

Построение устройства выполняется послойно, включая такие слои, как Mo, CIGS, OVC и CdS, с точным указанием координат и толщин. Плотность расчётной сетки адаптируется под аналитические профили, сформированные в SDE, или профили, полученные в Sentaurus Process, что критически важно для точности вычислений [12].



Входные данные для моделирования в модуле Sentaurus Device включают файл сетки @tdr@, файл параметров sdevice.par и спектр солнечного излучения am15g.txt. Типичная структура CIGS предусматривает оконный слой из алюминий-легированного ZnO и нелегированного ZnO (i-ZnO), за которым следует буферный слой CdS n-типа [13].

Профили легирования слоёв задаются через постоянные концентрации: например, $pCIG_{prof}$ со значением $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $nCIG_{prof}$ со значением $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Файл параметров содержит пользовательские значения коэффициентов физических моделей, которые заменяют стандартные настройки для конкретных регионов или материалов [7]. В секции Physics активируются статистика Ферми, учет разрывов энергетических зон на гетеропереходах через параметр HeteroInterface, а также механизмы рекомбинации SRH, Оже и излучательной рекомбинации. Для одномерных симуляций шаг сетки на границах слоёв устанавливается равным 1 нм и постепенно увеличивается до 70 нм к середине слоя для корректного расчёта градиентов концентраций [8].

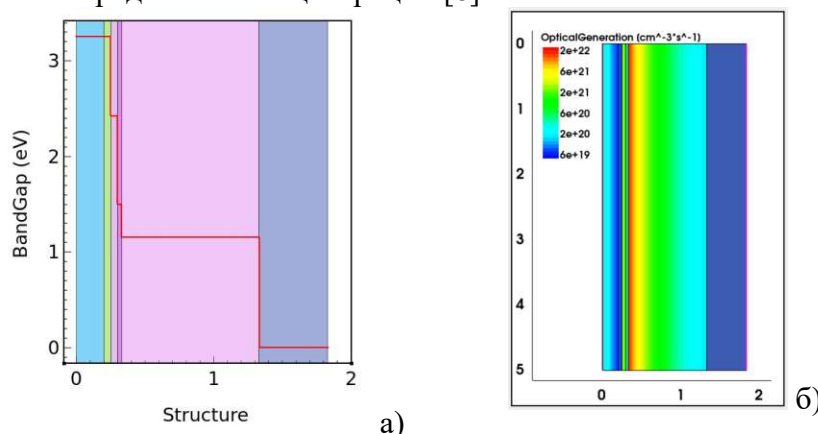


Рисунок 2. Энергетическая диаграмма (а) и распределение фотогенерации (б) в структуре.

Для обеспечения сходимости решения на границах разделов CIGS/CdS и CIGS/OVC применяется функция измельчения сетки MaxLenInt, ограничивающая максимальную длину ребра. В процессе моделирования рассчитываются внутренние величины, включая энергетические диаграммы, распределение электрических полей и потенциалов в условиях равновесия [14]. Оптические характеристики вычисляются с использованием модуля ComplexRefractiveIndex, а для визуализации стоячих волн в тонких слоях поглотителя активируется расчёт OpticalIntensity. Адекватное моделирование распространения света требует учёта когерентного взаимодействия и рассеяния волн на протяжении всей последовательности слоёв [3].

Результаты и обсуждение

Численные расчёты выполнены для набора параметров, включающего толщины слоёв CdS, CIGS и OVC, а также значения ширины запрещённой зоны активных слоёв. Параметр Eg0 задавался как ширина запрещённой зоны при температуре 0 К, тогда как фактические значения ширины запрещённой зоны приведены в результатах моделирования.

В расчётах использовались следующие диапазоны:

Толщина CdS: 0,01 и 0,03 мкм

Толщина CIGS: 2 и 3 мкм

Толщина OVC: 0,01; 0,02; 0,03 мкм

Eg0 (CIGS и OVC): 1,3; 1,4; 1,5 эВ

Фактическая ширина запрещённой зоны: 1,25–1,45 эВ

Освещение: включено (AM1.5G)

Всего выполнено 36 расчётных конфигураций.

Полученные значения основных выходных параметров составили:



Плотность тока короткого замыкания J_{SC} : от $-24,48$ до $-31,23$ мА/см^2

Напряжение холостого хода V_{OC} : от $0,73$ до $0,94$ В

Мощность в точке максимальной мощности P_{MPP} : от $16,19$ до $19,99$ мВт/см^2

Напряжение в точке максимальной мощности V_{MPP} : от $0,59$ до $0,83$ В

Плотность тока в точке максимальной мощности J_{MPP} : от $-21,77$ до $-28,98$ мА/см^2

Фототок J_{PH} : от $26,86$ до $32,88$ мА/см^2

Коэффициент заполнения FF: от $71,78$ до $81,02$ %

КПД преобразования энергии E_{ff} : от $16,19$ до $19,99$ %

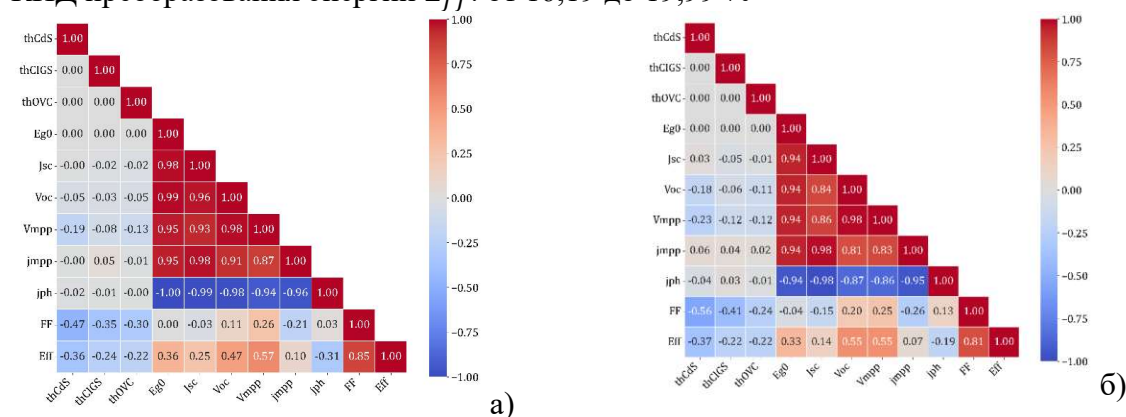


Рисунок 3. Корреляционные матрицы на основе результатов симуляции солнечных элементов CIGS в среде Sentaurus TCAD: (a) — коэффициенты корреляции Пирсона и (b) — коэффициенты Спирмена.

Анализ статистических корреляционных тепловых карт, полученных на основе численного моделирования солнечного элемента CIGS в среде Sentaurus TCAD, позволяет выявить ключевые взаимосвязи между входными параметрами структуры и выходными электрическими характеристиками прибора. На рисунке 3 представлены две корреляционные матрицы: (a) — коэффициенты корреляции Пирсона, отражающие линейные зависимости, и (b) — коэффициенты Спирмена, характеризующие монотонные взаимосвязи.

Как показано на рис. 3(a), начальная ширина запрещённой зоны E_{g0} демонстрирует практически идеальную линейную корреляцию с напряжением холостого хода V_{OC} ($r \approx 0.99$), что подтверждает её ключевую роль в формировании встроенного потенциала p-n перехода. Аналогично, наблюдается высокая по модулю корреляция между E_{g0} и токовыми характеристиками ($|r| \approx 0.98$), что указывает на существенное влияние ширины запрещённой зоны на процессы генерации и переноса носителей заряда в рамках рассматриваемого диапазона параметров. Следует отметить, что столь высокие значения коэффициентов корреляции обусловлены ограниченностью параметрического пространства моделирования и не должны интерпретироваться как универсальные зависимости для всех CIGS-структур.

Особое внимание привлекает практически идеальная отрицательная корреляция ($r \approx -1.00$) между E_{g0} и плотностью фототока j_{ph} (рис. 3(a)), что отражает фундаментальный физический компромисс между генерацией фототока и увеличением ширины запрещённой зоны. Данный результат согласуется с известными положениями о необходимости оптимизации содержания галлия в CIGS для балансировки между V_{OC} и J_{SC} [15–17].

Анализ коэффициентов Спирмена (рис. 3(b)) позволяет дополнительно выявить монотонные зависимости, не обязательно являющиеся строго линейными. В частности, толщина буферного слоя CdS (thCdS) демонстрирует отрицательную корреляцию с эффективностью преобразования (Eff) на уровне $r \approx -0.37$, что указывает на устойчивую тенденцию снижения эффективности при увеличении толщины буферного слоя в рамках



исследуемых конфигураций. Аналогичная, но менее выраженная зависимость наблюдается для толщины поглощающего слоя thCIGS ($r_s \approx -0.22$).

Кроме того, как видно из рис. 3(а), коэффициент заполнения (FF) демонстрирует сильную положительную корреляцию с эффективностью (Eff), достигающую $r \approx 0.85$. Это указывает на значительную роль потерь, связанных с сопротивлением и рекомбинационными процессами, в формировании итоговой производительности устройства.

Сопоставление рис. 3(а) и 3(б) показывает, что ряд зависимостей носит преимущественно линейный характер, тогда как другие проявляют более сложное монотонное поведение. Например, зависимость между V_{OC} и Eff остаётся положительной, однако её величина снижается в анализе Спирмена, что свидетельствует о том, что рост напряжения сам по себе не гарантирует пропорционального увеличения эффективности. В данном случае эффективность определяется совокупным влиянием нескольких параметров, включая токовые характеристики и коэффициент заполнения.

В целом, представленные на рис. 3(а–б) корреляционные зависимости формируют основу для дальнейшего анализа и оптимизации структуры CIGS солнечных элементов в рамках численного моделирования.

Заключение

Численное моделирование гетероструктур CIGS в среде Sentaurus TCAD позволило идентифицировать ключевые физические компромиссы, определяющие производительность прибора. На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

Оптимизация ширины запрещённой зоны: Начальное значение E_{g0} является доминирующим фактором для роста V_{OC} ($r \approx 0.99$), однако оно находится в идеальной отрицательной корреляции с фототоком ($r \approx -1.00$), что подтверждает необходимость точного баланса содержания галлия в структуре.

Влияние толщины слоёв: Увеличение толщины буферного слоя CdS устойчиво снижает общую эффективность ($r_s \approx -0.37$), что указывает на приоритетность минимизации данного слоя для уменьшения оптических потерь.

Факторы эффективности: наряду с вольтамперными характеристиками, коэффициент заполнения (FF) демонстрирует сильную корреляцию с КПД ($r \approx 0.85$), подчеркивая значимость минимизации рекомбинационных и омических потерь.

Практическая значимость: Разработанная модель адекватно воспроизводит экспериментальные параметры и может быть масштабирована для проектирования высокоэффективных тонкоплёночных преобразователей, работающих в реальных условиях эксплуатации.

Литература

- [1]. Boukortt N.E.I., Patané S. Single junction-based thin-film CIGS solar cells optimization with efficiencies approaching 24.5 % // *Optik*. – 2020. – Vol. 218. – Article 165240. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165240.
- [2]. Boukortt N.E.I., Patané S., Abdulraheem Y.M. Numerical investigation of CIGS thin-film solar cells // *Solar Energy*. – 2020. – Vol. 204. – Pp. 440–447. – DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.021.
- [3]. Richter M., Schubbert C., Eraerds P., Parisi J., Riedel I., Dalibor T., Palm J. Comprehensive simulation model for Cu(In,Ga)(Se,S)_2 solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2015. – Vol. 132. – Pp. 162–171. – DOI: 10.1016/j.solmat.2014.08.047.
- [4]. Lorbada R.V., Walter T., Marrón D.F., Lavrenko T., Muecke D. A deep insight into the electronic properties of CIGS modules with monolithic interconnects based on 2D simulations with TCAD // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9. – Article 128. – DOI: 10.3390/coatings9020128.
- [5]. Ghorbani T., Zahedifar M., Moradi M., Ghanbari E. Influence of affinity, band gap and ambient temperature on the efficiency of CIGS solar cells // *Optik*. – 2020. – Vol. 223. – Article 165541. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165541.
- [6]. Di Napoli S., Locatelli M., Sozzi G. Numerical simulation of high-efficiency CIGS-based solar cells. – Università di Parma, 2018. – 226 p.



- [7]. Sentaurus TCAD. Sentaurus Device User Guide. Version N-2017.09-SP2. – Synopsys, Mountain View, CA, USA, 2017.
- [8]. Salas J.F.L. Modeling and Simulation of Charge Carrier Recombination Dynamics in Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells. – Oldenburg, 1990.
- [9]. Kumar A., Goyal A.K., Gupta U., Tanya, Gupta N., Chaujar R. Increased efficiency of 23% for CIGS solar cell by using ITO as front contact // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 28. – Pp. 361–365. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.688.
- [10]. Schubbert C., Eraerds P., Richter M., Parisi J., Riedel I., Dalibor T., Palm J. Performance ratio study based on a device simulation of a 2D monolithic interconnected Cu(In,Ga)(Se,S)₂ solar cell // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2016. – Vol. 157. – Pp. 146–153. – DOI: 10.1016/j.solmat.2016.05.002.
- [11]. Bechlaghem S., Zebentout B., Benamara Z. The major influence of the conduction-band-offset on Zn(O,S)/CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se₂ solar cells // Results in Physics. – 2018. – Vol. 10. – Pp. 650–654. – DOI: 10.1016/j.rinp.2018.07.006.
- [12]. Sentaurus TCAD. Sentaurus Mesh User Guide. Version N-2017.09. – Synopsys, 2017.
- [13]. Boukortt N.E.I. Numerical optimization of 0.5-μm-thick Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ solar cell // Optik. – 2020. – Vol. 200. – Article 163409. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163409.
- [14]. Boukortt N.E.I., Patanè S., Adouane M., AlHammadi R. Numerical optimization of ultrathin CIGS solar cells with rear surface passivation // Solar Energy. – 2021. – Vol. 220. – Pp. 590–597. – DOI: 10.1016/j.solener.2021.03.078.
- [15]. Gloeckler M., Sites J.R. Band-gap grading in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2005. – Vol. 66. – Pp. 1891–1894. – DOI: 10.1016/j.jpcs.2005.09.087.
- [16]. Decock K., Lauwaert J., Burgelman M. Characterization of graded CIGS solar cells // Energy Procedia. – 2010. – Vol. 2. – Pp. 49–54. – DOI: 10.1016/j.egypro.2010.07.009.
- [17]. Saadat M., Moradi M., Zahedifar M. CIGS absorber layer with double grading Ga profile for highly efficient solar cells // Superlattices and Microstructures. – 2016. – Vol. 92. – Pp. 303–307. – DOI: 10.1016/j.spmi.2016.02.036.