

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И ТАНДЕМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Ахмеджонов Нодирбек Одилбек угли

Cyber University

axmedjonovnodirbek@gmail.com

Аннотация - В настоящей статье представлен комплексный, детализированный сравнительный анализ традиционных однопереходных солнечных элементов на основе кристаллического кремния (c-Si) и высокоэффективных многопереходных (тандемных) фотоэлектрических структур, с особым акцентом на монокристаллические перовскит-кремниевые архитектуры (2Т конфигурации). В условиях, когда доминирующая на рынке кремниевая технология вплотную приблизилась к своему фундаментальному термодинамическому пределу Шокли-Квиссера (максимум ~29.4% для стандартного спектра AM1.5G), тандемные элементы рассматриваются как безальтернативный драйвер следующего технологического уклада в возобновляемой энергетике. Подробно освещены физические механизмы работы тандемных структур: способность широкозонного перовскита эффективно поглощать высокоэнергетические фотоны с генерацией высокого напряжения (V_{oc}), что позволяет радикально минимизировать потери на термализацию горячих носителей заряда, в то время как нижний кремниевый каскад утилизирует прошедшее длинноволновое излучение. В работе проведено всестороннее сопоставление технологий по ключевым физико-технологическим параметрам: термодинамической эффективности (лабораторные рекорды >33.9% у тандемов против 26.8% у монокремния), температурным коэффициентам, деградационной стабильности и сложности промышленного производства. Выявлены и систематизированы критические барьеры на пути к массовой коммерциализации тандемных модулей, включая ионную миграцию галогенидов, проблемы инкапсуляции, токсичность свинца и трудности прецизионного масштабирования однородных пленок на текстурированных пластинах большой площади (форматы M10/G12). На основе анализа сформулированы научно обоснованные прогнозы по преодолению данных барьеров и экспоненциальному снижению нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) в перспективе до 2035 года, что сыграет решающую роль в достижении глобальных целей углеродной нейтральности.

Ключевые слова: фотовольтаика, предел Шокли-Квиссера, тандемные солнечные элементы, галогенидный перовскит, кристаллический кремний, термализация носителей заряда, рекомбинация Шокли-Рида-Холла, токовое согласование, LCOE.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальный переход к углеродно-нейтральной экономике требует экспоненциального роста мощностей возобновляемых источников энергии. На сегодняшний день солнечная энергетика достигла тераваттного масштаба установленной мощности, при этом более 90% мирового рынка фотовольтаики формируют элементы на основе кристаллического кремния (c-Si). Эволюция солнечных элементов традиционно делится на три поколения:

1. Первое поколение: Традиционные элементы на основе моно- и поликристаллического кремния (высокая эффективность, высокая стабильность).

2. Второе поколение: Тонкопленочные элементы (CdTe, CIGS, a-Si), нацеленные на снижение материалоемкости и себестоимости.

3. Третье поколение: Новые концепции, стремящиеся обойти фундаментальные термодинамические ограничения (органические элементы, элементы на квантовых точках и многопереходные тандемные структуры).

Несмотря на доминирование первого поколения, экстенсивный путь развития кремниевой технологии исчерпан. Эффективность лучших промышленных модулей превысила 23%, а лабораторных ячеек - 26.8%. Дальнейшее повышение КПД требует непропорционально высоких технологических затрат из-за приближения к теоретическому пределу Шоккли-Квиссера. В этой связи фокус фундаментальной физики полупроводников и материаловедения сместился к тандемным архитектурам, способным революционизировать отрасль, повысив теоретический предел эффективности до ~42.5% при сохранении приемлемой стоимости производства.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

Фундаментальные ограничения традиционных кремниевых фотоэлементов: Принцип работы классического фотоэлемента основан на поглощении фотонов полупроводником с шириной запрещенной зоны E_g . При поглощении фотона с энергией $E = h\nu > E_g$ электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости, генерируя электрон-дырочную пару.

Предел Шоккли-Квиссера (Detailed Balance Limit):

В 1961 году Уильям Шоккли и Ханс Квиссер сформулировали фундаментальный термодинамический предел эффективности для однопереходного $p-n$ элемента, основанный на принципе детального равновесия [1]. Согласно их модели, максимальный КПД ограничивается следующими неустраняемыми факторами:

1. Недостаток энергии (потери на пропускание): До 19% энергии стандартного солнечного спектра AM1.5G переносится фотонами с энергией $E < E_g$. Эти фотоны не поглощаются полупроводником.

2. Термализация горячих носителей: Фотоны высокоэнергетической (ультрафиолетовой и синей) части спектра ($E \gg E_g$) создают «горячие» электроны. В течение пикосекунд эти носители релаксируют к дну зоны проводимости, передавая избыточную энергию кристаллической решетке в виде фононов (тепла). Термализация ответственна за потерю около 33% энергии спектра.

3. Радиационная рекомбинация: Термодинамически неизбежный процесс, при котором электрон и дырка рекомбинируют с излучением фотона (обратный процесс фотопоглощения).

Математически, максимальная выходная мощность P_{out} элемента

выражается через ток короткого замыкания J_{sc} , напряжение холостого хода V_{oc} и фактор заполнения FF:

$$\eta = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}}$$

Для кремния ($E_g \approx 1.12$ эВ) теоретический максимум эффективности составляет 29.4%. Практический предел (с учетом оже-рекомбинации и рекомбинации Шокли-Рида-Холла на дефектах) оценивается в $\sim 27.5\%$.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материаловедение и физика галогенидных перовскитов: Для преодоления описанных ограничений требуется использование материалов с настраиваемой шириной запрещенной зоны. Оптимальным решением стали органо-неорганические галогенидные перовскиты.

Эти материалы имеют общую кристаллическую структуру ABX_3 , где:

- А - органический или неорганический катион (например, метиламмоний $CH_3NH_3^+$, формамидиний $CH(NH_2)_2^+$, или цезий Cs^+).
- В - катион металла группы IV (чаще всего свинец Pb^{2+} или олово Sn^{2+}).
- Х - галогенидный анион (иод I^- , бром Br^- , хлор Cl^-).

Уникальные оптоэлектронные свойства перовскитов:

• Прямозонная структура: В отличие от непрямозонного кремния, перовскиты имеют чрезвычайно высокий коэффициент оптического поглощения ($\alpha > 10^5 \text{ см}^{-1}$), что позволяет использовать пленки толщиной всего 500-800 нм.

• Настраиваемая ширина E_g : Путем изменения химического состава галогенидов (например, соотношения иода и брома I / Br), ширину запрещенной зоны перовскита можно плавно настраивать в диапазоне от 1.5 эВ до 2.3 эВ. Это критически важно для создания идеального верхнего слоя в тандемных элементах.

• Дефектоустойчивость: Перовскиты демонстрируют удивительную толерантность к дефектам кристаллической решетки; большинство дефектов создают мелкие энергетические уровни, не выступая эффективными центрами безызлучательной рекомбинации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Архитектура и физические принципы тандемных элементов: Суть тандемной концепции заключается в спектральном разделении. Многопереходная структура позволяет каждому полупроводнику поглощать ту часть спектра, для которой его термодинамические потери минимальны [6].

1. Оптическое согласование спектра:

В перовскит-кремниевом тандеме широкозонный перовскитный элемент ($E_g \approx 1.68$ эВ) располагается сверху. Он эффективно поглощает фотоны высоких энергий. Так как E_g перовскита велико, этот процесс генерирует заряд при высоком напряжении $V_{oc} > 1.2$ В (у монокремния $V_{oc} \approx 0.74$ В), что радикально

снижает потери на термализацию.

Свет с энергией $1.12 \text{ эВ} < E < 1.68 \text{ эВ}$ проходит сквозь прозрачный перовскит и поглощается нижней кремниевой ячейкой.

2. Интеграционные схемы: 2Т против 4Т

Существуют два основных подхода к объединению ячеек:

- Четырехконтактная (4Т) схема: Ячейки изготавливаются отдельно и оптически накладываются друг на друга через прозрачные клеящие слои (например, EVA). Они имеют отдельные электрические выводы. Это упрощает производство, так как нет строгих требований к электрическому согласованию, но приводит к высоким паразитным потерям на отражение между слоями и удорожает электронику инверторов.

- Двухконтактная (2Т) схема: Перовскитный слой осаждается непосредственно поверх кремниевой структуры. Это монолитная структура. В 2Т конфигурации элементы соединены последовательно, что означает равенство проходящего через них тока: $J_{tandem} = \min(J_{top}, J_{bottom})$.

Для эффективной работы 2Т тандема требуется точное токовое согласование и наличие рекомбинационного туннельного перехода (TRJ). TRJ - это ультратонкий слой (часто на основе легированного нанокристаллического кремния или прозрачных проводящих оксидов TCO), в котором электроны из верхнего элемента безызлучательно рекомбинируют с дырками из нижнего элемента, замыкая цепь без падения напряжения.

На сегодняшний день именно 2Т монолитные тандемы демонстрируют рекордные показатели КПД, превышающие 33.9% [3, 4].

Таблица 1

Сравнительный анализ: Традиционные и Тандемные элементы

Параметр	Традиционные панели (c-Si, PERC/TOPCon/HJT)	Тандемные панели (Монолитные 2Т Перовскит / c-Si)
Максимальный КПД (лаборатория)	26.8% (Геоструктурные элементы HJT) [2]	> 33.9% [4]
Теоретический предел	29.4%	~ 42.5%
Температурный коэффициент (P_{max})	Около -0.30% ... -0.35% / °C	Сниженный (-0.15% ... -0.25% / °C) благодаря высокому V_{oc} верхнего слоя.
Эффективность при слабом освещении	Средняя	Высокая (перовскиты сохраняют высокий FF и генерацию при рассеянном свете).
Сложность производства (CAPEX)	Отработанный техпроцесс, низкие капитальные затраты на гигаваттные линии.	Более высокая. Требует интеграции вакуумного осаждения (ALD) и мокрых процессов в одной линии.
Ограничения по току	Высокий ток ($J_{sc} > 40 \text{ мА/см}^2$), низкое напряжение.	Сниженный ток ($J_{sc} \approx 20 \text{ мА/см}^2$), высокое напряжение ($V_{oc} > 1.9 \text{ В}$). Снижает омические потери I^2R в шинах модуля.

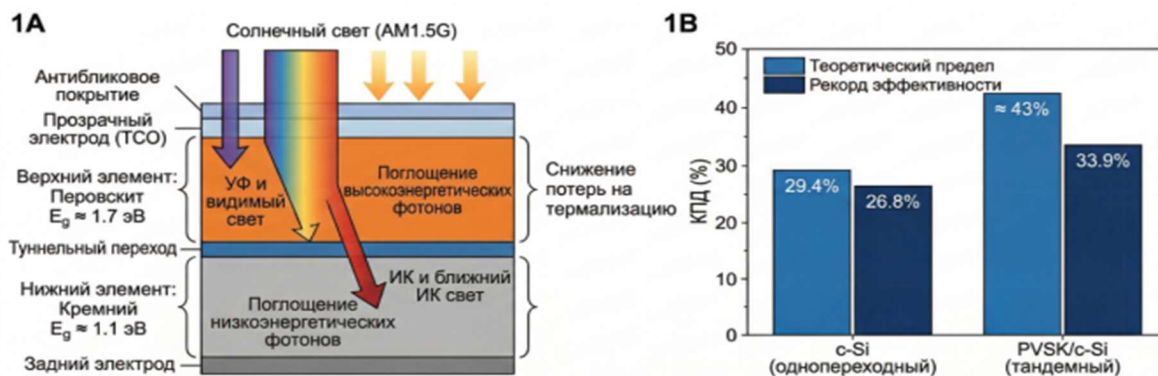


Рис 1А. Схематическая архитектура и принцип работы тандемного солнечного элемента перовскит/Кремний (PVSK/c-Si)

Рис 1В. Сравнение теоретического предела Шоккли-Квиссера и текущих рекордов эффективности КПД

Деградационные механизмы и физика эксплуатационной стабильности: Главный водораздел между технологиями лежит в плоскости их эксплуатационной надежности (долговечности).

Традиционный кремний обладает феноменальной стабильностью. Основные механизмы деградации — LID (светоиндуцированная деградация) и PID (деградация, индуцированная потенциалом) — хорошо изучены и эффективно подавляются современными методами пассивации. Линейная деградация c-Si модулей составляет менее 0.4% в год, что гарантирует срок службы в 25–30 лет.

Галогенидные перовскиты подвержены комплексу специфических механизмов деградации:

1. Влага и кислород: Органические катионы (особенно метиламмоний) гигроскопичны. Взаимодействие с водой приводит к необратимому гидролизу перовскита до йодида свинца (PbI_2).

2. Ионная миграция и сегрегация фаз: Под действием электрического поля и интенсивного освещения ионы галогенидов (иода и брома) внутри решетки начинают мигрировать. Это приводит к расслоению материала на участки с разной шириной запрещенной зоны, что нарушает оптическое согласование и вызывает падение V_{oc} [5].

3. Фото-термическая деградация: При температурах выше 85°C (стандартный тест на влажное тепло) некоторые фазы перовскита претерпевают структурные фазовые переходы.

Для преодоления этих проблем применяются методы двумерной (2D) пассивации границ раздела слоев, замена органических катионов на более стабильный цезий (Cs^+) и передовые методы инкапсуляции (например, покрытие атомно-слоевым осаждением — ALD) стеклом с обеих сторон модуля.

Будущие ожидания и барьеры масштабирования: Для того чтобы тандемные модули вытеснили монокремний, промышленности необходимо решить три ключевые инженерные и экономические задачи:

1. Технология масштабирования (Scale-up): Перенос процессов с

лабораторных площадей (1 см^2) на промышленные пластины ($> 240 \text{ см}^2$, формат M10/G12) крайне сложен. Лабораторный метод центрифугирования (spin-coating) не подходит для промышленности из-за высоких потерь раствора. Перспективными методами являются щелевое осаждение (slot-die coating) и совмещенное вакуумное термическое напыление, однако обеспечение однородной кристаллизации перовскита на текстурированной поверхности кремния (с пирамидами высотой 2-3 мкм) остается фундаментальным вызовом.

2. Экологический аспект и токсичность (RoHS): Наличие водорастворимого свинца (Pb) в структуре перовскита вызывает опасения регуляторов. В случае физического повреждения модуля (например, градом) свинец может попасть в почву. Для массового внедрения разрабатываются самовосстанавливающиеся инкапсулянты на основе эпоксидных смол, способные связывать свинец при нарушении герметичности ячейки.

3. Снижение нормированной стоимости энергии (LCOE): Главным критерием успеха любой энергетической технологии является LCOE (Levelized Cost of Energy) — стоимость одного мегаватт-часа выработанной энергии за весь жизненный цикл. Тандемные модули будут иметь более высокую начальную стоимость (CAPEX на оборудование, дорогие прекурсоры и TCO материалы). Однако, благодаря более высокому КПД (увеличение выработки на 20-30% с одного квадратного метра), существенно снизятся затраты на монтажные конструкции, инверторы, землю и прокладку кабелей (BOS-затраты - Balance of System).

Моделирование показывает, что при достижении ресурса работы тандема в 20 лет, его LCOE окажется ниже, чем у традиционного монокремния, что сделает технологию коммерчески безальтернативной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящей статье комплексный физический и технологический анализ позволяет сделать однозначный вывод: эволюция мировой фотовольтаики неуклонно смещается от экстенсивной оптимизации однопереходных систем к фундаментальным архитектурным инновациям, воплощенным в многопереходных тандемных структурах. Традиционные кремниевые солнечные панели, являясь неоспоримым триумфом современной полупроводниковой инженерии и основой текущего энергетического перехода, вплотную подошли к своему термодинамическому потолку. Дальнейшее существенное снижение нормированной стоимости солнечной генерации (LCOE) невозможно без качественного преодоления предела Шоккли-Квиссера.

Перовскит-кремниевые тандемные фотоэлектрические преобразователи не призваны полностью заменить существующую кремниевую индустрию; напротив, они представляют собой ее элегантное и логичное эволюционное развитие. Синергетическая интеграция оптически полупрозрачных, широкозонных галогенидных перовскитов поверх отработанных промышленных кремниевых ячеек (таких как PERC, TOPCon или HJT) позволяет эффективно разделить солнечный спектр. Этот подход радикально минимизирует паразитные

потери на термализацию высокоэнергетических электронов в верхнем слое и обеспечивает беспрепятственное прохождение низкоэнергетических фотонов к нижнему кремниевому каскаду.

Несмотря на выдающиеся лабораторные рекорды эффективности, значительно превышающие теоретический предел монокремния, путь к масштабному серийному производству тераваттного уровня сопряжен с серьезными материаловедческими вызовами. Проблемы гигроскопичности структур, фазовой сегрегации под воздействием интенсивного света и ионной миграции в перовскитах требуют скорейшего внедрения передовых методов 2D/3D пассивации границ раздела фаз и разработки абсолютно герметичных систем инкапсуляции. Кроме того, предстоит окончательно решить инженерные задачи по равномерному вакуумному или растворному осаждению тонких пленок на шероховатые кремниевые пластины большой площади без потери качества кристаллизации.

Тем не менее, беспрецедентные темпы научных исследований и масштабные инвестиции в данную отрасль вселяют обоснованную уверенность. Ожидается, что в течение ближайших 3–5 лет первые промышленные линии продемонстрируют стабильный КПД серийных тандемных модулей на уровне 28-30%. Компенсация более высоких начальных капитальных затрат (CAPEX) на их производство будет легко достигнута за счет существенного снижения системных балансовых затрат (BOS — Balance of System). Сокращение расходов на инверторы, монтажные конструкции, кабельную продукцию и земельные участки произойдет благодаря рекордной удельной энергоотдаче с каждого квадратного метра. Успешная коммерциализация тандемных технологий в ближайшее десятилетие ознаменует начало новой эры сверхдешевой, масштабируемой и надежной гелиоэнергетики, необходимой для окончательного и бесповоротного отказа мировой экономики от ископаемого топлива.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shockley W., Queisser H. J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells // *Journal of Applied Physics*. - 1961. - Vol. 32, № 3. - P. 510-519. DOI: 10.1063/1.1736034.
2. Green M. A., Dunlop E. D., Yoshita M. [et al.]. Solar cell efficiency tables (Version 62) // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. - 2023. - Vol. 31, № 7. - P. 651-663. DOI: 10.1002/pip.3726.
3. Liu J., Aydin E., Yin J. [et al.]. Perovskite/silicon tandem solar cells with bilayer interface passivation // *Science*. - 2022. - Vol. 377, № 6603. - P. 302-306. DOI: 10.1126/science.abq7652.
4. Chin X. Y., Turkey D., Steele J. A. [et al.]. Interface passivation for 31.25%-efficient perovskite/silicon tandem solar cells // *Science*. - 2023. - Vol. 381, № 6653. - P. 59-63. DOI: 10.1126/science.adg0091.
5. Aydin E., Ugur E., Yildirim B. K. [et al.]. Enhanced optoelectronic coupling for perovskite/silicon tandem solar cells // *Nature*. - 2023. - Vol. 623, № 7988. - P. 732-738. DOI: 10.1038/s41586-023-06667-4.

6. Meng L., Zhou Y. [et al.]. Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Insights and Outlooks // *ACS Energy Letters*. - 2024. - DOI: 10.1021/acsenerylett.4c00172.
7. Jost, M., Kegelmann, L., Korte, L., & Albrecht, S. Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Pathways to Over 30% Efficiency // *Advanced Energy Materials*. - 2020. - Vol. 10, № 26. - P. 1904102. DOI: 10.1002/aenm.201904102.
8. Werner, J., Niesen, B., & Ballif, C. Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Marriage of Convenience or True Love Story? - An Overview // *Advanced Materials Interfaces*. - 2018. - Vol. 5, № 1. - P. 1700731. DOI: 10.1002/admi.201700731.
9. Kavdia, P. [et al.]. High-efficiency tandem solar cells with perovskite top cell: A review of fundamental physics and scaling constraints // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2022. - Vol. 158. - P. 112111. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112111.
10. Leijtens, T., Bush, K. A., Prasanna, R., & McGehee, M. D. Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite top cells // *Nature Energy*. - 2018. - Vol. 3, № 10. - P. 828-838. DOI: 10.1038/s41560-018-0190-4.