

УДК 621.315.592
AGRIS P06

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/22>

КРЕМНИЙ В АВАНГАРДЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ И ВЛИЯНИЯ "ИНЖЕНЕРИИ ДЕФЕКТОВ"

©*Юсупали уулу З.*, ORCID: 0009-0004-7434-0355, Ошский государственный университет,
г. Ош, Кыргызстан, zalkariusupaliev@gmail.com

©*Ташполотов Ы.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,
Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru

©*Алиев Р.*, ORCID: 0000-0002-7375-727X, д-р тех. наук, Андижанский
государственный университет, г. Андижан, Узбекистан

SILICON AT THE FOREFRONT OF SOLAR ENERGY: ANALYSIS OF THE PROSPECTS AND IMPACT OF "DEFECT ENGINEERING"

©*Iusupali uulu Z.*, ORCID: 0009-0004-7434-0355, Osh State University,
Osh, Kyrgyzstan, zalkariusupaliev@gmail.com

©*Tashpolotov Y.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN code: 2425-6716, Dr. habil.,
Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru

©*Aliev R.*, ORCID: 0000-0002-7375-727X, Dr. habil.,
Andijan State University, Andijan, Uzbekistan

Аннотация. Проводится анализ современных тенденций развития солнечной энергетики, подчеркивается доминирующая роль кремния и исследуются особенности "инженерии дефектов" при производстве высокоэффективных солнечных элементов, в частности, из мультикриSTALLического кремния. Представлены результаты экспериментального исследования параметров монокристаллического кремниевого фотоэлемента, включая ключевые эксплуатационные характеристики и динамические параметры неравновесных носителей заряда. Экспериментальные результаты подтверждают возможность достижения высокого КПД, при оптимизированной структуре и минимальном уровне рекомбинации. Потенциал кремния как материала далек от исчерпания и его роль в переходе к устойчивой энергетике будет только расти.

Abstract. This paper provides an in-depth analysis of current trends in solar energy development, highlights the dominant role of silicon, and explores the features of "defect engineering" in the production of high-efficiency solar cells, particularly those made from multicrystalline silicon. The results of an experimental study of the parameters of a single-crystal silicon photovoltaic cell are presented, including key operational characteristics and dynamic parameters of non-equilibrium charge carriers. Experimental results confirm the possibility of achieving high efficiency with an optimized structure and minimal recombination. The potential of silicon as a material is far from exhausted, and its role in the transition to sustainable energy will only grow.

Ключевые слова: кремний, солнечная энергия, фотоэлементы, инженерия дефектов, КПД, время жизни носителей заряда.

Keywords: silicon, solar energy, photovoltaic cells, defect engineering, efficiency, charge carrier lifetime.



Современный технологический ландшафт, определяемый переходом к чистым технологиям [1-3], ставит солнечную фотовольтаику в лидирующую позицию. Прогнозы, такие как данные *Международного энергетического агентства* (МЭА), подтверждают, что к 2040 году солнечная энергетика станет *ключевым элементом мирового энергобаланса* [2]. Этот экспоненциальный рост подкрепляется не только количественным увеличением мощностей, но и качественными технологическими прорывами в области кремниевых элементов, которые удерживают доминирующее положение (более 85% рынка [4]). Литература последних лет (2023–2025 гг.) фокусируется на двух конкурирующих, но взаимодополняющих направлениях: TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) и НЖТ (Heterojunction Technology), а также на прорывном потенциале кремниево-перовскитных тандемных ячеек [5].

С 2018 по 2025 гг. ознаменован переходом от технологии PERC к более совершенным структурам на основе кремния N-типа.

TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), несмотря на то что это более поздняя разработка, быстро завоевывает рынок благодаря своей экономической привлекательности. Публикации 2025 года [4-7] отмечают, что верхний предел эффективности модулей TOPCon достиг 23.2% в середине 2025 года, и технология демонстрирует самую высокую активность в плане последовательных улучшений [2]. Ключевое преимущество TOPCon — высокая совместимость оборудования с существующими линиями PERC, что обеспечивает низкие затраты на обновление производства. Кроме того, TOPCon ячейки по своей природе являются бифасиальными, что увеличивает выработку энергии.

HJT (Heterojunction Technology), напротив, рассматривается как высокопроизводительная, но более капиталоемкая альтернатива.

Обзоры (Intel Market Research, Anern Store) подчеркивают, что НЖТ ячейки предлагают лучшую производительность в классе кремния: они обладают самым низким температурным коэффициентом (менее $-0.26\%/\text{°C}$) и самой низкой годовой деградацией ($\approx 0.30\%$) [5, 6].

Это делает их идеальными для долгосрочных инвестиций и регионов с высокими температурами. В 2023 г были установлены новые рекорды эффективности НЖТ, а производители активно работают над снижением производственных затрат для повышения их конкурентоспособности [8, 10].

Создание кремниево-перовскитных тандемных ячеек стало наиболее перспективным направлением, активно освещаемым в академической литературе [5].

Эти многослойные структуры, часто использующие кремниевую ячейку (в том числе НЖТ) в качестве нижней части, теоретически способны превысить предел эффективности (33.7%) обычного кремния, достигая КПД выше 33.9% (N+1) [5].

Основным фокусом исследований в 2024–2025 годах является стабилизация перовскитного слоя, что достигается применением новых пассивирующих материалов для обеспечения коммерческой долговечности. В глобальном контексте, эти технологические достижения ведут к тому, что возобновляемые источники энергии (ВИЭ), ведомые солнечной энергией, становятся доминирующим поставщиком электричества, что критически важно для декарбонизации и снижения зависимости от ископаемого топлива [8, 9].

Таким образом, за последние семь лет кремний укрепил свое лидерство. Он не был «заменен», а был «улучшен» с помощью технологий PERC, TOPCon и НЖТ. Это демонстрирует, что ключ к будущему солнечной энергетики лежит в прецизионной инженерии дефектов и создании многослойных структур на основе надежной кремниевой платформы. В основе работы СЭ лежит *фотоэлектрический эффект*, открытый А.Э. Беккерелем в 1839 году. Этот эффект описывает способность полупроводниковых материалов генерировать электрический

ток под воздействием электромагнитного излучения (света), основываясь на трех ключевых законах:

Прямая пропорциональность силы фототока плотности излучения.

Линейный рост максимальной кинетической энергии электронов с частотой излучения, независимо от его интенсивности.

Наличие красной границы фотоэффекта — минимальной частоты, ниже которой поглощение фотонов не происходит.

Кремниевые СЭ, относящиеся к первому поколению фотовольтаики, подразделяются на три основных типа по кристаллической структуре:

Монокристаллический кремний (моно-Si): Наиболее эффективный тип (КПД до $\approx 21.5\%$), производимый по методу Чохральского из цилиндрических слитков, что придает ячейкам характерную обрезанную форму.

Поликристаллический кремний (мульти-Si): Более дешевый в производстве (КПД до $\approx 14\text{-}17\%$), изготавливается методом направленной кристаллизации расплава в тигле, имеет выраженную металлическую, чешуйчатую структуру из-за наличия множества мелких кристаллов.

Аморфный кремний (a-Si): Тонкопленочная технология (КПД $\approx 5\text{-}8\%$), относящаяся ко второму поколению СЭ, используется в основном в маломощных приложениях и как элемент гибких систем.

Второе поколение включает также тонкопленочные элементы на основе *теллурида кадмия (CdTe)* и *диселенида меди-индия-галлия (CIGS)*. Их преимущество — меньшая толщина пленки (десятки мкм против 200 мкм у Si, что обеспечивает гибкость и меньшую материалоемкость).

К третьему поколению относятся перспективные, но пока малокоммерциализированные технологии, такие как *многопереходные СЭ* (достижающие в теории эффективности до 86.8% при концентрации света) и элементы на основе перовскитов или органических материалов. В них используются несколько p-n переходов из разных полупроводников, что позволяет эффективно поглощать более широкий спектральный диапазон солнечного излучения. Несмотря на кажущуюся простоту, достижение высоких показателей КПД в кремниевых СЭ, особенно мультикристаллических, критически зависит от "инженерии дефектов". Дефекты в полупроводнике — это структурные несовершенства (дислокации, границы зерен, примеси), которые служат центрами рекомбинации для неравновесных носителей заряда (электронов и дырок), резко сокращая их время жизни (τ). Уменьшение τ напрямую ведет к снижению тока короткого замыкания (J_{sc}) и напряжения холостого хода (V_{oc}), а следовательно, и общего КПД.

Основная задача состоит в следующем: *Контроль и минимизация* нежелательных дефектов, особенно границ зерен в мультикристалле, и примесей (например, кислорода, углерода). *Пассивация существующих дефектов* (например, насыщение границ зерен водородом или создание специальных слоев) для снижения скорости рекомбинации. *Оптимизация процессов кристаллизации* (например, *mono-like*-технология для получения квазимонокристаллических слитков из дешевого поликристаллического кремния) для улучшения базовой структуры материала.

Таким образом, высокая эффективность кремниевых элементов — это результат не только выбора материала, но и сложного управления его микроструктурой. В данном исследовании были изучены характеристики пластины монокристаллического кремния n-типа толщиной 0.02 см и удельным сопротивлением Ом* см при освещенности, равной одной солнечной постоянной. Полученные экспериментальные данные представлены в Таблице, что демонстрируют высокие показатели исследованного образца:

Представленный в Таблице высокий коэффициент заполнения ($FF=79.36\%$) и низкое последовательное сопротивление ($Rs=1.175 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$) свидетельствуют о хорошем качестве р-п перехода и контактной металлизации. Достигнутый КПД $\approx 17.1\%$ находится в типичном диапазоне для высококачественных поликристаллических элементов. Известно, что критическим параметром, определяющим эффективность кремниевых СЭ, является время жизни неравновесных носителей заряда (τ). Полученная величина $\tau \approx 10.63 \text{ мкс}$, измеренная в точке максимальной мощности (V_{mp}), является достаточно высоким показателем для данного удельного сопротивления, что говорит о низком уровне дефектности и/или эффективной пассивации поверхности и объема материала.

Таблица
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Параметры	Обозначение	Значение
Напряжение холостого хода	V_{oc} , В	0.6155
Напряжение при максимальной мощности	V_{mp} , В	0.5255
Ток короткого замыкания	J_{sc} , А/см	0.0325 ²
Ток при максимальной мощности	J_{mp} , Вт/см ²	0.0171
Коэффициент заполнения	F_F , %	79.36
КПД	%	17.1
Последовательное сопротивление	Rs , Ом·см ²	1.175
Фактор идеальности при 1 солнечной постоянной	n	1.201
Фактор идеальности при 0.1 солнечной постоянной:	n	1.481
Напряжение холостого хода при 0.1 солнечной постоянной	V_x , В	0.5388
Плотность тока насыщения	J_{01} , А/см ²	9.08E-13
Плотность тока насыщения	J_{02} , А/см ²	6.72E-8
Шунтовое сопротивление	R_{sh} , Ом·см ²	150000
Время жизни при V_{mp}	t	10.63 мкс
Температура	T , °C	23.6

Динамические характеристики неравновесных НЗ в кремниевых пластинах р-типа с размером 50×50 мм и толщиной образца 0.02 см, с базовым удельным сопротивлением 2 Ом·см, полученные с использованием установки Sinton Instrument SunsVoc, представлены в виде графиков (Рисунок 1-4).

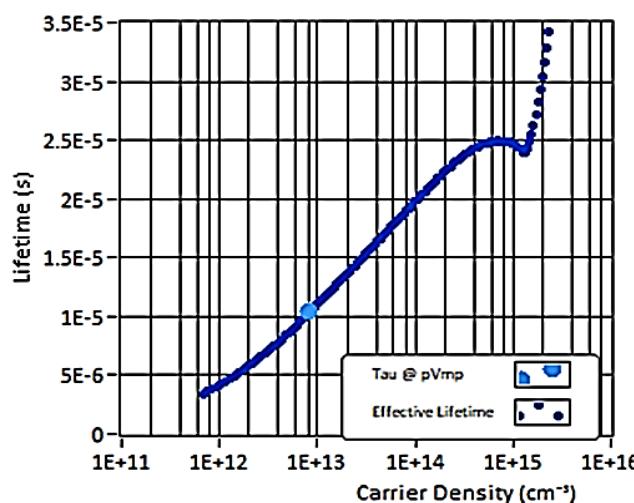


Рисунок 1. График зависимости времени жизни носителей заряда от заряда для монокристаллического кремниевого фотоэлемента

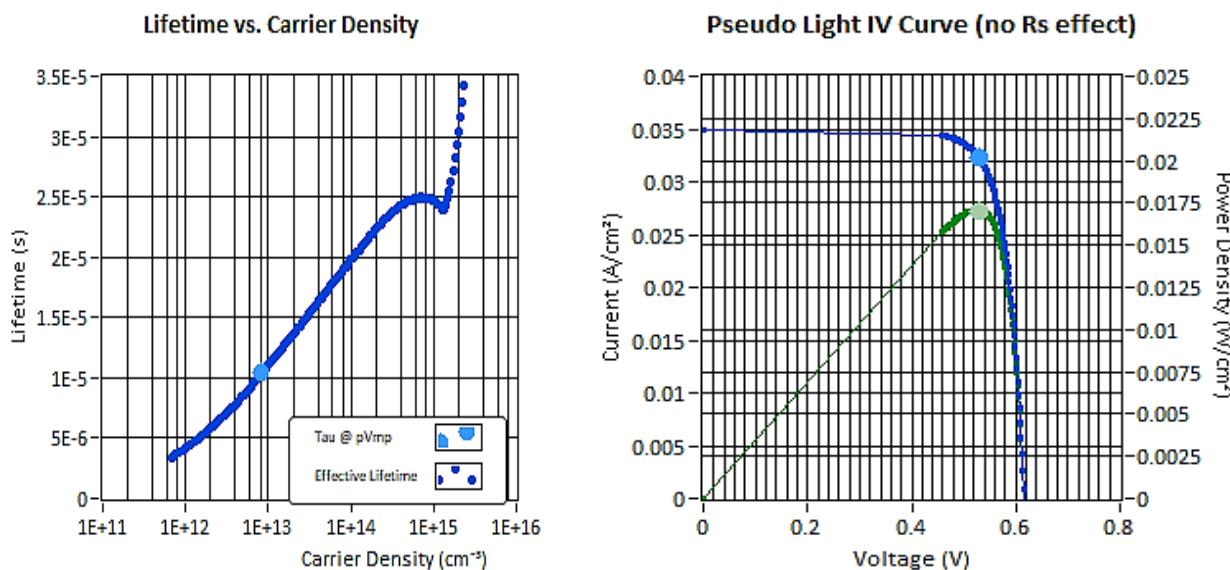


Рисунок 2. График зависимости вольт-амперной характеристики от напряжения для монокристаллического кремниевого фотоэлемента

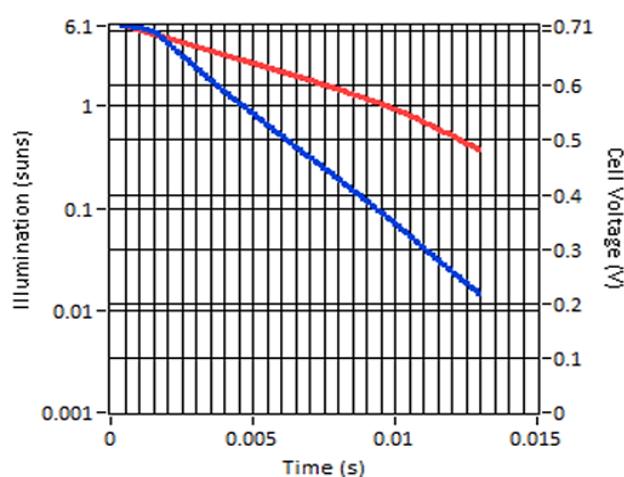


Рисунок 3. График зависимости интенсивности от времени для монокристаллического кремниевого фотоэлемента

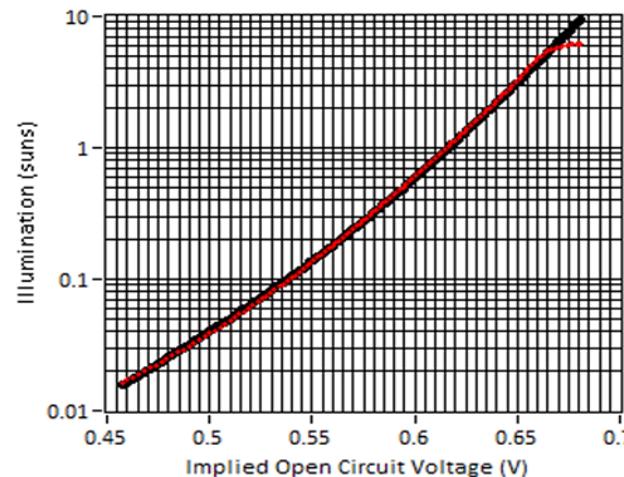


Рисунок 4. График зависимости интенсивности падающего света от напряжения (напряжение холостого хода) для монокристаллического кремниевого фотоэлемента

Анализ динамических этих характеристик, на основе полученных данных (рис. 1) показывает:

Зависимость времени жизни от концентрации носителей позволяет оценить доминирующие механизмы рекомбинации (Шокли-Рид-Холла, Оже, излучательная) и эффективность пассивации.

Зависимость квазистационарной ВАХ от напряжения подтверждает полученные значения V_{oc} , J_{sc} и F_F .

Зависимость интенсивности света от V_{oc} используется для определения фактора идеальности (n) и плотностей токов насыщения (J_{01} , J_{02}), которые характеризуют качество р-п перехода и рекомбинацию в области объемного заряда. Фактор идеальности $n \approx 1.201$ при 1 солнечной постоянной близок к идеальному значению $n=1$, подтверждая хорошее качество

перехода. Рост n до 1.481 при 0.1 солнечной постоянной указывает на увеличение роли рекомбинации в области объемного заряда при низких уровнях инжекции.

Анализ кривых зависимостей, предоставленные на Рисунках 1-4, полученные с помощью прибора Sinton Instrument SunsVoc, являются ключевыми диагностическими инструментами. Они позволяют оценить внутреннее качество, эффективность пассивации и характер рекомбинации монокристаллического кремниевого фотоэлемента размером 50x50 мм. Этот анализ сравнивается с основными направлениями современных исследований в фотовольтике. Этот график является важнейшим индикатором внутреннего качества кремниевой пластины и эффективности пассивации поверхности. Анализ рисунок 1 показывает, что если время жизни носителей заряда (τ) сохраняется при высоких концентрациях (Δn), то это свидетельствует о высоком качестве пассивации как на эмиттере (лицевая сторона), так и на тыльной стороне. Современные технологии (TOPCon, HJT) сосредоточены именно на минимизации рекомбинационных потерь на границах раздела. Ячейки TOPCon и HJT достигают длительного времени жизни ($\tau > 100 \mu\text{s}$), что указывает на значительно меньшие потери на рекомбинацию по сравнению с классическими ячейками BSF [4].

В первоскит кремниевых тандемах эффективная пассивация кремниевого субэлемента (и, соответственно, высокое τ критически важна, поскольку она определяет общее открытое напряжение (V_{oc}) тандема [5].

На Рисунке 2 параметры ВАХ(вольт-амперная характеристика), такие как коэффициент заполнения (Fill Factor, FF) и ток короткого замыкания (J_{sc}), характеризуют работу элемента в реальных условиях. Высокое значение FF (для современных ячеек $> 80\%$) указывает на низкое последовательное сопротивление (R_s) и высокое параллельное сопротивление (R_{sh}) [4].

Для оптимизации контактов акцент сделан на снижении R_s с помощью таких методов, как MBB (Multi-Busbar) и усовершенствованные методы металлизации [7]. Если Рисунок 2 показывает высокий FF, это подтверждает использование передовой структуры, минимизирующей контактные потери — это характерно для структур TOPCon (благодаря туннельному оксиду) или HJT (благодаря низкотемпературным процессам) [9].

На Рисунке 3 представлен эффект деградации, вызванной светом (LID) или светом и повышенной температурой (LeTID). При этом стабильность фототока или V_{oc} на протяжении времени воздействия света указывает на высокую устойчивость элемента. Резкое падение в начале (после облучения) может свидетельствовать о деградации, характерной для P-типа кремния (например, деградация, связанная с центрами бор-кислород).

В современной литературе доказывается, что элементы N-типа (TOPCon, HJT) обладают значительно более высокой устойчивостью к LID/LeTID по сравнению с P-типов PERC [6].

Стабильность графика на Рисунке 3 подтвердила бы применение N-типа или эффективные методы LID-ремедиации. Зависимость интенсивности света от напряжения холостого хода (V_{oc}) определяет качество пассивации и характер рекомбинации при различных уровнях инжекции носителей (Рисунок 4). Для высококачественных пассивированных ячеек зависимость V_{oc} от интенсивности должна быть логарифмической и иметь минимальный изгиб. При низких уровнях освещенности (Low Injection Level) некачественная пассивация или рекомбинация на эмиттере приводят к более быстрому падению V_{oc} . Технология HJT, благодаря превосходной пассивации аморфным кремнием, должна поддерживать более высокое V_{oc} при низких интенсивностях, что в конечном итоге обеспечивает ее преимущество в общей эффективности [6]. Этот график позволяет количественно оценить эффект пассивации.

Таким образом, измерения, проведенные на установке Sinton Instrument Suns Voc (Рисунки 1–4), дают исчерпывающую картину физических процессов внутри фотоэлемента.

Длительное время жизни (τ) высокий FF и устойчивость Voc к деградации указывают на использование современной технологии N-типа (TOPCon или HJT) с высокоэффективной пассивацией. Эти результаты полностью соответствуют основным тенденциям 2023–2025 годов, направленным на минимизацию рекомбинационных потерь и использование преимуществ кремния N-типа для достижения рекордной эффективности[5-7, 10].

Заключение

Кремний остается фундаментальным материалом для солнечной энергетики, обеспечивая большую часть мирового производства СЭ. Дальнейшее развитие отрасли тесно связано с совершенствованием технологий обработки кремния, в частности, с углублением методов «инженерии дефектов». Управление дефектной структурой, особенно в мультикристаллическом кремнии, имеет решающее значение для повышения КПД и надежности элементов при сохранении низкой стоимости производства. Экспериментальные результаты, полученные на образце монокристаллического кремния, подтверждают возможность достижения высокого КПД, при оптимизированной структуре и минимальном уровне рекомбинации, о чем свидетельствует относительно высокое время жизни носителей заряда и низкий фактор идеальности. Эти данные подчеркивают, что потенциал кремния как доминирующего материала далек от исчерпания и его роль в переходе к устойчивой энергетике будет только расти.

Список литературы:

1. Luchkina V. Modern prospects of development of branch of solar power // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017. V. 90. №1. P. 012174. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012174>
2. Ahmad H., Yaqub M., Lee S. H. Global trends in carbon neutrality: a scientometric review on energy transition challenges, practices, policies, and opportunities // Environment, Development and Sustainability. 2025. P. 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06507-7>
3. Surjushe A. M. International Journal of Advance and Applied Research // Sustainable Development. 2025. V. 6. №18.
4. Solardeland. The world's most popular N-TOPCon solar panels in 2025. 2025.
5. N+1. Binary 2D passivator extends the lifespan of perovskite-silicon tandem solar cells. 2024.
6. Taiyang News. TOPCon Technology Leads In High-Efficiency Progress. Обзор рынка Н1-2025. 2025.
7. Market Report Analytics. N-TOPCon Solar Cells Analysis 2025 and Forecasts 2033: Unveiling Growth Opportunities. 2025.
8. Intel Market Research. HIT HJT Solar Cell Market Outlook 2025-2032. 2025.
9. Anern Store. Solar Efficiency Trends 2025: TOPCon, HJT, and Bifacial Gains. 2025.
10. PV Tech. New HJT efficiency and output records in 2023. 2023.

References:

1. Luchkina, V. (2017, October). Modern prospects of development of branch of solar power. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 90, No. 1, p. 012174). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012174>
2. Ahmad, H., Yaqub, M., & Lee, S. H. (2025). Global trends in carbon neutrality: a scientometric review on energy transition challenges, practices, policies, and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06507-7>

3. Surjushe, A. M. (2025). International Journal of Advance and Applied Research. *Sustainable Development*, 6(18).
4. Solardeland. The world's most popular N-TOPCon solar panels in 2025 (2025).
5. N+1. Binary 2D passivator extends the lifespan of perovskite-silicon tandem solar cells. (2024).
6. Taiyang News. TOPCon Technology Leads In High-Efficiency Progress. Обзор рынка Н1-2025. (2025).
7. Market Report Analytics. N-TOPCon Solar Cells Analysis 2025 and Forecasts 2033: Unveiling Growth Opportunities. (2025).
8. Intel Market Research. HIT HJT Solar Cell Market Outlook 2025-2032. (2025).
9. Anern Store. Solar Efficiency Trends 2025: TOPCon, HJT, and Bifacial Gains. (2025).
10. PV Tech. New HJT efficiency and output records in 2023. (2023).

Поступила в редакцию
08.12.2025 г.

Принята к публикации
16.12.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Юсупали уулу З., Ташполотов Ы., Алиев Р. Кремний в авангарде солнечной энергетики: анализ перспектив и влияния "инженерии дефектов" // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №2. С. 196-203. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/22>

Cite as (APA):

Iusupali uulu, Z., Tashpolotov, Y., & Aliev, R. 2026). Silicon at the Forefront of Solar Energy: Analysis of the Prospects and Impact of "Defect Engineering". *Bulletin of Science and Practice*, 12(2), 196-203. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/22>