

Фозилова Мохира Соибжон кизи — стажёр-преподаватель  
Андижанский Государственный Технический Институт,  
Республика Узбекистан  
ORCID ID: 0009-0005-4356-9656  
Fozilova Mohira Soyibjon qizi — trainee instructor  
Andijan state technical institute,  
Republic of Uzbekistan  
ORCID ID: 0009-0005-4356-9656

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## INVESTIGATION OF THE INTERNAL AND EXTERNAL QUANTUM EFFICIENCY OF SILICON SOLAR CELLS

**Аннотация:** В данной работе анализируется внутренняя (IQE) и внешняя (EQE) квантовая эффективность кремниевых солнечных элементов и определяются основные факторы, влияющие на их спектральный отклик. Исследовались фототок и эффективность поглощения фотонов при различных длинах волн света. Результаты показывают, что кремниевые солнечные элементы имеют высокую IQE в диапазоне 400–900 нм, в то время как EQE ниже из-за рекомбинационных потерь. Максимальное поглощение около 850 нм связано с шириной запрещенной зоны кремния 1,12 эВ. Результаты обеспечивают научную основу для понимания оптических и электрических свойств кремниевых солнечных элементов, а также для пассивации поверхности, нанесения просветляющих покрытий и оптимизации структуры.

**Ключевые слова:** кремниевый солнечный элемент, внутренняя квантовая эффективность, внешняя квантовая эффективность, спектральный отклик, фототок, длина волны, коэффициент поглощения, рекомбинационные потери, ширина запрещенной зоны, энергия фотонов, оптические потери, просветляющее покрытие, пассивация поверхности.

**Abstract:** This work analyzes the internal (IQE) and external (EQE) quantum efficiency of silicon solar cells and identifies the main factors affecting their spectral response. Photocurrent and photon absorption efficiency were investigated at various light wavelengths. The results show that silicon solar cells have high IQE in the 400–900 nm range, while EQE is lower due to recombination losses. The maximum absorption around 850 nm is associated with the silicon bandgap energy of 1.12 eV. The findings provide a scientific basis for understanding the optical and electrical properties of silicon solar cells, as well as for surface passivation, anti-reflective coating deposition, and structural optimization.

**Keywords:** silicon solar cell, internal quantum efficiency, external quantum efficiency, spectral response, photocurrent, wavelength, absorption coefficient, recombination losses, bandgap energy, photon energy, optical losses, anti-reflective coating, surface passivation.

**Введение.** Технологии производства фотоэлектрической энергии быстро развиваются и играют важную роль среди возобновляемых источников энергии. Одновременно с этим, рост глобального спроса на энергию и вопросы охраны окружающей среды усиливают необходимость повышения эффективности производства солнечной энергии. Кремниевые солнечные элементы являются наиболее широко используемыми фотоэнергетическими устройствами благодаря высокой надежности, прочности и низкой стоимости.

Повышение эффективности солнечных элементов требует глубокого анализа их физических свойств, таких как спектральная характеристика и квантовая эффективность. Внутренняя квантовая эффективность (IQE) показывает степень превращения поглощённых фотонов в электронно-дырочные пары внутри солнечного элемента, тогда как внешняя квантовая эффективность (EQE) отражает эффективность, соответствующую току, возникающему через контакты. Эти показатели тесно связаны с шириной запрещённой зоны материала, процессами рекомбинации, поверхностными и объемными потерями и имеют важное значение для понимания реального режима работы солнечного элемента.

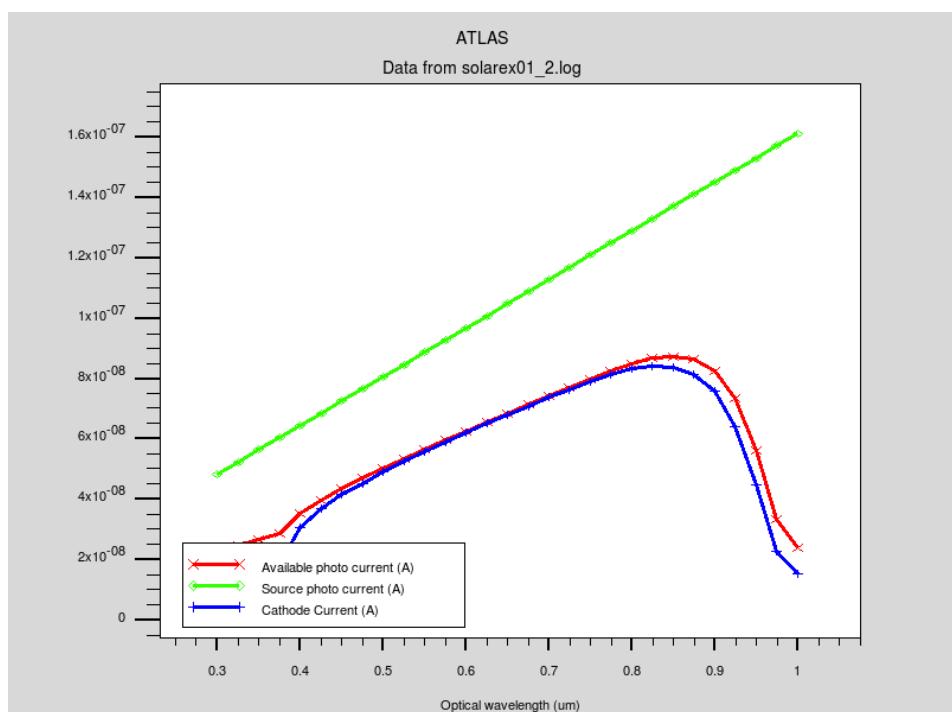
В последние годы научные исследования сосредоточены на поиске способов повышения IQE и EQE кремниевых солнечных элементов. В частности, антиотражающие покрытия, пассивация поверхности и технологии текстурирования позволяют значительно повысить EQE и IQE. Поэтому анализ спектральной характеристики и квантовой эффективности кремниевых солнечных элементов на основе экспериментов или моделирования является актуальным с научной и практической точек зрения.

В данной статье изучена внутренняя и внешняя квантовая эффективность p-n кремниевого солнечного элемента в зависимости от длины волны света, а также проанализированы основные физические механизмы спектрального отклика. Результаты исследования создают научную основу для глубокого понимания и оптимизации оптических и электрических свойств кремниевых солнечных элементов.

**Методы.** В результате моделирования, выполненного с использованием программы Silvaco ATLAS, были получены точные данные о фотогальванических параметрах и физических процессах кремниевого солнечного элемента p-n типа. На рисунке 1 показана зависимость фототока солнечного элемента от интенсивности света. Зеленая линия

соответствует фототоку источника, красная линия — максимальному току, который может достичь солнечный элемент, а синяя линия показывает ток, возникающий на катоде при освещении светом разных длин волн.

Согласно этим данным, кремниевый солнечный элемент эффективно поглощает излучение с длиной волны около 850 нм и образует электронно-дырочные пары. Это объясняется шириной запрещённой зоны материала, которая составляет 1,12 эВ. Солнечный элемент лучше всего поглощает электроны с энергией, близкой к ширине запрещённой зоны: электроны с меньшей энергией не поглощаются, а электроны с большей энергией теряют энергию на тепловые процессы и не участвуют в генерации тока.



**Рисунок 1. Зависимость фототока от длины волны света**

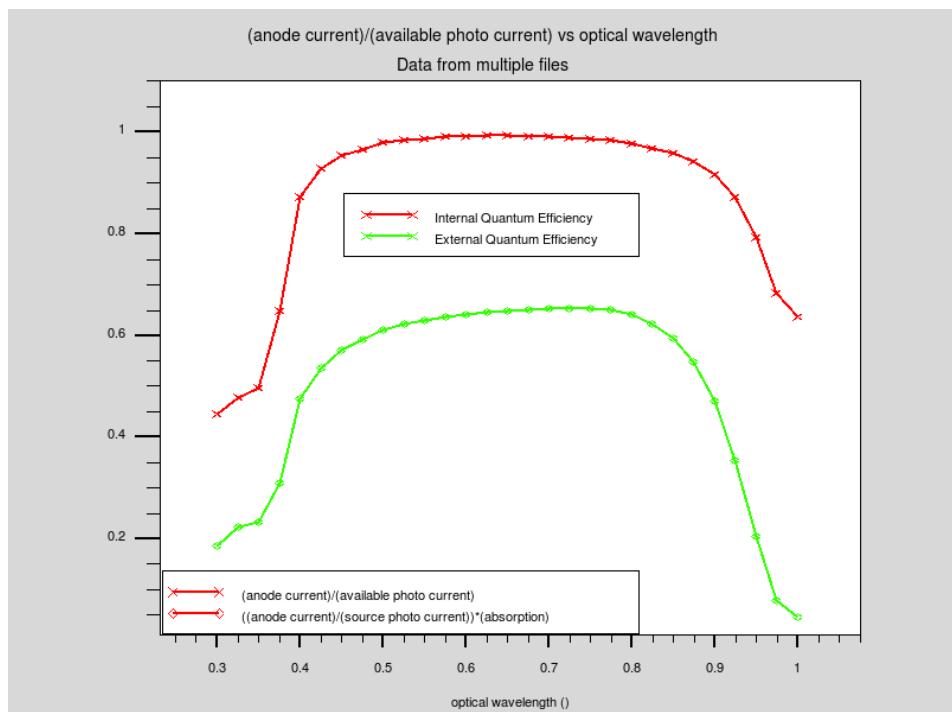
Внешняя и внутренняя квантовая эффективность позволяют определить, какой процент падающих на солнечный элемент фотонов поглощается и какая их доля участвует в генерации заряда.

На рисунке 2 показаны внутренняя и внешняя квантовые эффективности кремниевого солнечного элемента. Зеленой линией обозначена внешняя квантовая эффективность, а красной — внутренняя квантовая эффективность.

Внутренняя квантовая эффективность (IQE) определяется как отношение числа фотонов, поглощённых в солнечном элементе и образующих электронно-дырочные пары, к числу фотонов, падающих на поверхность солнечного элемента.

В нашем образце максимальная внутренняя квантовая эффективность достигла значений в диапазоне длин волн 400–900 нм и составила примерно 0,97.

Внешняя квантовая эффективность (EQE) определяется как отношение числа электронно-дырочных пар, зарегистрированных на катоде солнечного элемента, к числу фотонов, падающих на его поверхность. Внешняя квантовая эффективность всегда меньше внутренней, так как часть сгенерированных электронно-дырочных пар рекомбинирует до достижения контактов. В нашем образце максимальная внешняя квантовая эффективность наблюдалась в диапазоне длин волн 450–850 нм.



**Рисунок 2. Внутренняя и внешняя квантовая эффективность**

Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили определить зависимость внутренней (IQE) и внешней (EQE) квантовой эффективности кремниевых солнечных элементов от длины волны света. Полученные результаты показывают, что внутренняя квантовая эффективность достигает высоких значений — около 0,97 — в диапазоне длин волн 400–900 нм, что связано с шириной запрещённой зоны кремния (1,12 эВ). В процессе фотоинжекции образование электронно-дырочных пар происходит наиболее эффективно тогда, когда энергия фотона близка к ширине запрещённой зоны. В этом случае сгенерированные носители заряда успешно достигают контактных областей. Поэтому высокая IQE подтверждает эффективные оптические свойства и способность материала к поглощению фотонов.

Внешняя квантовая эффективность (EQE) всегда ниже IQE. Основная причина состоит в том, что часть сгенерированных электронно-дырочных пар рекомбинирует до того, как успевает достичь контактных областей. Максимальные значения EQE в диапазоне 450–850 нм, особенно вблизи

850 нм, объясняются спектральным откликом кремниевых солнечных элементов и соответствием энергии фотонов ширине запрещённой зоны. Полученные результаты также позволяют предложить ряд конструктивных решений для повышения эффективности кремниевых фотоэлементов. Например, пассивация поверхности и антиотражающие покрытия способны уменьшить разницу между EQE и IQE за счёт снижения оптических потерь и увеличения коэффициента поглощения света. Кроме того, оптимизация структуры устройства — в частности, текстурирование поверхности и подбор оптимальной толщины р–п перехода — способствует улучшению транспорта носителей заряда и повышению внешней квантовой эффективности.

В целом, представленные результаты позволяют глубже понять спектральные характеристики и механизмы потерь кремниевых солнечных элементов, что создаёт научную и практическую основу для их дальнейшей оптимизации и достижения более высокой эффективности.

Данное исследование позволило изучить внутреннюю и внешнюю квантовую эффективность кремниевых р–п фотоэлементов в зависимости от их спектрального отклика. Результаты показали, что кремниевые фотоэлементы обладают высокой внутренней квантовой эффективностью в диапазоне длин волн 400–900 нм, достигая максимального значения 0,97. Внешняя квантовая эффективность, как и ожидалось, всегда ниже внутренней и достигает максимума в диапазоне 450–850 нм. Максимальное поглощение в области около 850 нм связано с шириной запрещённой зоны кремния (1,12 эВ), когда энергия фотона наиболее соответствует материалу и обеспечивает эффективное образование электронно-дырочных пар.

Исследование также показало, что повышение IQE и EQE возможно за счёт применения поверхностной пассивации, антиотражающих покрытий и оптимизации структуры устройства. Дополнительные технологические решения, такие как текстурирование поверхности и подбор оптимальной толщины р–п перехода, могут расширить спектральный отклик и снизить потери, улучшая транспорт носителей заряда.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию оптических и электрических свойств кремниевых фотоэлементов, обеспечивая научную основу для повышения их эффективности и разработки новых высокопроизводительных фотогальванических конструкций. Кроме того, данное исследование служит ориентиром для дальнейших работ, направленных на оптимизацию спектрального отклика и квантовой эффективности кремниевых солнечных элементов.

### **Используемая литература:**

1. P. A. Østergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, and S. A. Kalogirou, “Recent advances in renewable energy technology for the energy transition,” *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 877–884, Dec. 2021.
2. J. W. Nielsen and E. F. Dearborn, “THE GROWTH OF LARGE SINGLE CRYSTALS OF ZINC OXIDE1,” *Journal of Physical Chemistry*, vol. 64, no. 11, pp. 1762–1763, 2002, doi: 10.1021/J100840A503.
3. N. Stem, C. A. S. Ramos, and M. Cid, “Open-circuit voltages: Theoretical and experimental optimizations of rear passivated silicon solar cells using Fz and Cz wafers,” *Solid-State Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 221–225, Mar. 2010, doi: 10.1016/J.SSE.2009.09.002.
4. Y. Gassenbauer et al., “Rear-surface passivation technology for crystalline silicon solar cells: A versatile process for mass production,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 1, pp. 125–130, 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2211338.
5. D. Z. Dimitrov and C. H. Du, “Crystalline silicon solar cells with micro/nano texture,” *Applied Surface Science*, vol. 266, pp. 1–4, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.APSUSC.2012.10.081.
6. C. Haase and H. Stiebig, “Thin-film silicon solar cells with efficient periodic light trapping texture,” *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 6, p. 061116, Aug. 2007, doi: 10.1063/1.2768882.