

Исследование возможности повышения годовой выработки электроэнергии за счет использования кремниевых солнечных элементов с наноструктурированной поверхностью

© Э.Я. Ярчук¹, Е.А. Вячеславова², М.З. Шварц³, А.С. Гудовских^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ernst_yarchuk@mail.ru

Поступила в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 14 июля 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Представлены результаты исследования угловой зависимости отражательной способности структур черного кремния с нановолокнами конической и нитевидной формы, а также поверхности кремния с текстурированной пирамидальной поверхностью с нанесенным слоем ИТО. Продемонстрирована возможность увеличения годовой выработки электроэнергии для солнечных элементов на основе черного кремния за счет слабой зависимости коэффициента полного отражения от угла падения света. Прирост по сравнению с пирамидальной поверхностью составляет 7.34 и 6.33% для солнечных элементов на основе черного кремния с нановолокнами конической и нитевидной формы соответственно.

Ключевые слова: солнечная энергетика, черный кремний, полное отражение, выработка электроэнергии.

DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56781.5013C

Развитие солнечной энергетики требует снижения стоимости электроэнергии, повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей и увеличения генерируемой энергии. Текущее рекордное значение КПД кремниевого солнечного элемента составляет 26.7% [1], что близко к теоретическому пределу Шокли–Квиссера 30% [2]. Дальнейшее развитие возможно за счет уменьшения количества отраженного света в широком диапазоне углов, а также за счет захвата отраженного и рассеянного света. Сравнительно недавно был предложен более эффективный способ снижения оптических потерь за счет формирования развитой поверхности кремния, известной как „черный кремний“. Он эффективен как в широком спектральном диапазоне, так и при разных углах падения. Так, черный кремний эффективно поглощает солнечное излучение в широком диапазоне длин волн $\lambda = 250\text{--}1200$ нм. Солнечный элемент (СЭ) на основе конструкции с тыльными контактами (IBC) и лицевой поверхностью в виде черного кремния уже достиг КПД 22.1% [3]. Однако на сегодняшний день имеется мало информации о реальном выигрыше СЭ на основе черного кремния по сравнению с классической конструкцией СЭ с текстурированной поверхностью. В данной работе, опираясь на экспериментальные данные по угловой зависимости коэффициента отражения, был проведен расчет среднегодовой выработки энергии для СЭ на основе черного кремния и гетероструктурных СЭ с текстурированной поверхностью.

Для проведения расчета были получены данные об угловой зависимости спектров отражения для двух образцов черного кремния (*b*-Si), отличающихся геометрией кремниевых волокон и строением обратной стороны подложки. Оба образца были получены методом криогенного сухого травления кремниевых подложек *n*-типа (10^{15} см⁻³) и ориентацией (100). Процесс производился в индуктивно связанной плазме в газовой смеси SF₆/O₂ при температуре -150°C [4]. Первый образец был изготовлен с кремниевыми волокнами конусообразной формы только на одной стороне подложки (рис. 1, *a*) за счет использования разработанного нами процесса с добавлением аргона [4], а второй образец сформирован с характерной для *b*-Si геометрией — с кремниевыми волокнами нитевидной формы различного диаметра, полученными с обеих сторон подложки (рис. 1, *b*). Для сравнительного анализа был взят образец на основе *a*-Si:H/*c*-Si-гетероперехода с текстурированной поверхностью кремния с нанесенным слоем ИТО (рис. 1, *c*).

Для приема полученного излучения для всего спектрального диапазона использовался сдвоенный спектрометр CAS 140B Array Spectrometer, а для измерения коэффициента полного отражения $R(\lambda)$ — интегрирующая сфера UPB-150-ART, для которой был изготовлен держатель образцов, позволяющий изменять угол падения входного светового пучка в диапазоне от $0\text{--}90^\circ$.

Для оценки годовой выработки энергии СЭ необходимо рассчитать выходную мощность для каждого

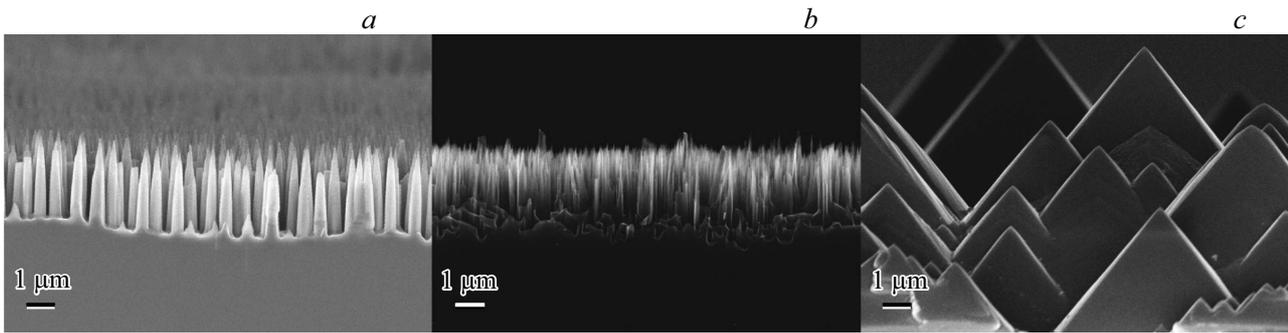


Рис. 1. РЭМ-изображения структур: *a* — односторонний образец черного кремния с нановолокнами конусообразной формы, *b* — двусторонний образец черного кремния с нановолокнами нитевидной формы, *c* — образец кремния на основе *a*-Si:H/*c*-Si-гетероперехода с текстурированной поверхностью.

кремниевое СЭ с учетом суточного и годового изменения освещенности — инсоляции, а также угловой зависимости положения Солнца относительно поверхности СЭ. Для такого расчета нужны данные о положении Солнца в конкретный момент времени с необходимой дискретностью, а также данные об инсоляции для выбранного региона — города Санкт-Петербург, Россия. Ориентация СЭ по Солнцу, т. е. угол падения солнечных лучей на СЭ, определяется солнечным азимутом γ_s и его высотой над горизонтом α_s в сферических координатах и определяется формулой из [5] при ориентации СЭ строго на юг:

$$\cos \theta = |\cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos \gamma_s|, \quad (1)$$

где $\theta_z = 90 - \alpha_s$, β — угол наклона СЭ к поверхности.

Для получения данных по инсоляции были использованы базы данных NASA Power Data Access Viewer [6]. Для расчетов были взяты данные по инсоляции при ясном небе для каждого пятого дня в 2021 году для географического региона Санкт-Петербург. Данные о положении солнца были получены с помощью онлайн-ресурса для автоматизации подобных расчетов [7]. Для учета угловой и спектральной зависимости коэффициента полного отражения в расчете выходной мощности необходимо использовать средневесовую отражательную способность (Weighted Average Reflectance, WAR), рассчитываемую по формуле [8]

$$\text{WAR} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_i} \Phi R d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_i} \Phi d\lambda}, \quad (2)$$

где поток Φ рассчитан на основе стандартного спектра солнечного излучения AM1.5G [9]:

$$\Phi = \frac{E_0}{1240e} \lambda, \quad (3)$$

E_0 — распределение плотности интенсивности спектра AM1.5G.

Расчет выходной мощности солнечных элементов с учетом их спектральной зависимости коэффициента полного отражения проводился по следующей формуле:

$$P = P_n I_R \left(1 - \frac{\text{WAR}}{100}\right) \cos \theta, \quad (4)$$

где $\cos(\theta)$ — косинус угла падения солнечных лучей, P_n — номинальная мощность для стандартных условий освещения (1000 Вт/м^2), I_R — величина инсоляции.

Для оценки абсолютных значений энергии, вырабатываемой модулями с различающейся морфологией поверхности, в расчетах использовалась одинаковая номинальная мощность для стандартных условий освещения (P_n). За основу были взяты технические характеристики солнечных панелей Hevel на основе гетероструктурных СЭ (НТ) с $P_n = 400 \text{ Вт}$ [10]. Факторы снижения эффективности СЭ, такие как нагрев или занесение снегом, в данной статье не рассматриваются. Таким образом, в расчетах учитывалась только разница в угловой зависимости коэффициента отражения.

Спектральные зависимости коэффициента полного отражения R для образца НТ и исследуемых образцов *b*-Si, измеренные в диапазоне волн 300–1200 нм на доступном диапазоне углов падения света на образцы, представлены на рис. 2, *a*. Для контрольного образца НТ коэффициент полного отражения имеет четко выраженный минимум с отражением $< 2\%$ вплоть до угла 60° на длине волны 600 нм, что связано с просветляющим эффектом слоя ИТО. Однако в коротковолновой области $R \geq 17\%$ и растет до 60% с увеличением угла наклона падающего излучения, а также существенно увеличивается с ростом угла наклона в ИК-области.

Спектры коэффициента отражения для образцов *b*-Si (рис. 2, *a*) не превышают 2% в широком диапазоне длин волн (400–1000 нм) для нормального падения и слабо зависят от угла падающего излучения по сравнению с текстурированной поверхностью. Для углов падения $\geq 70^\circ$ коэффициент отражения одностороннего образца с коническими нановолокнами становится больше, чем для двустороннего с нитевидными нановолокнами. На основе полученных данных по отражению была

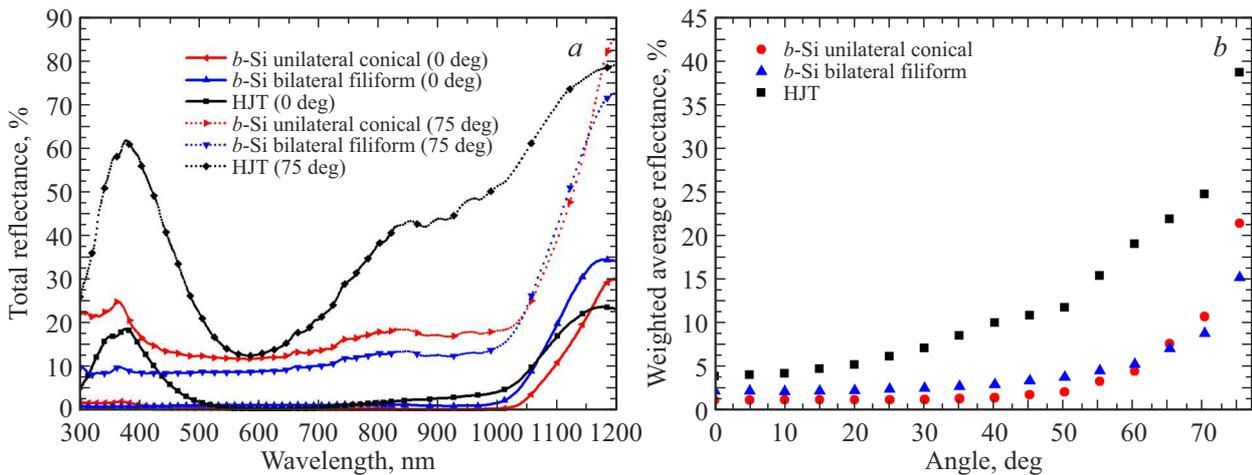


Рис. 2. Спектральные зависимости полного отражения при углах наклона образцов 0 и 75° (а), зависимость средневесового коэффициента отражения для *b*-Si и HJT от угла падения излучения (б). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

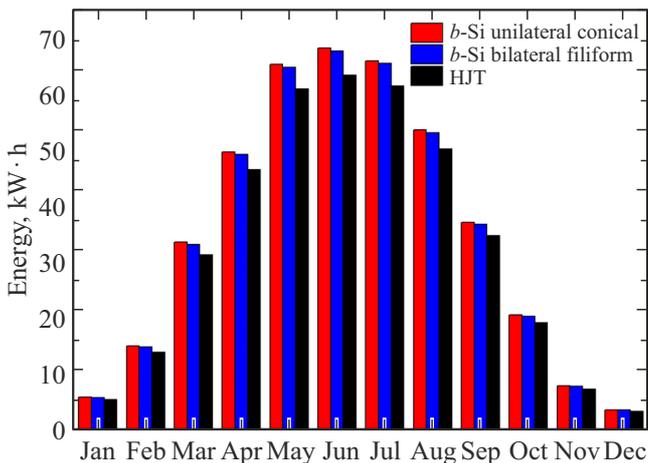


Рис. 3. Распределение выработки электроэнергии в течение года для региона Санкт-Петербург.

рассчитана средневесовая отражательная способность WAR (рис. 2, б). WAR для образцов *b*-Si слабо зависит от угла падающего излучения и не превышает 2% при угле 0–50°. При этом вплоть до 60° WAR для поверхности с коническими нановолокнами ниже, чем для нитевидных. WAR для контрольного образца с текстурированной поверхностью (HJT) монотонно растет с увеличением угла падения, достигая 12% при 50°. С увеличением углов падения света WAR увеличивается. По полученным WAR по формуле (4) рассчитана среднегодовая выработка электроэнергии за год. Расчет оптимального угла наклона демонстрирует тот факт, что СЭ на основе *b*-Si позволяют достичь большей выработки электроэнергии во всем диапазоне углов установки. Расчет суточной выработки электроэнергии доказывает, что структуры на основе *b*-Si эффективнее в течение всего дня, но наиболее — в утренние и вечерние

часы, что связано со слабой угловой зависимостью *R* для *b*-Si.

Распределение выработки электроэнергии по месяцам (рис. 3) показывает, что прирост при использовании данных образцов *b*-Si составляет 7–9% для одностороннего образца с коническими волокнами и 6–7.5% для двустороннего образца с нитевидными волокнами. При этом СЭ на основе черного кремния позволяют увеличить выработку на ~7% в течение всего времени. Таким образом, суммарная годовая выработка электроэнергии при ориентации на юг и под оптимальным углом наклона 45° в районе города Санкт-Петербург для панелей с $P_n = 400$ Вт составляет 369 кВт·ч для HJT-СЭ, для элементов на основе черного кремния с коническими нановолокнами — 396 кВт·ч и для элемента из черного кремния с нановолокнами нитевидной формы ~392 кВт·ч. Прирост при использовании *b*-Si составляет 7.34 и 6.33% для СЭ на *b*-Si с коническими нановолокнами и *b*-Si с нановолокнами нитевидной формы, что показывает перспективность применения кремниевых солнечных элементов с наноструктурированной поверхностью в наземной солнечной энергетике.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00735, <https://rscf.ru/project/23-29-00735/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Green, Y. Hishikawa, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A.W.Y. Ho-Baillie. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **27** (1), 3 (2019). DOI: 10.1002/pip.3102

- [2] T. Tiedje, E. Yablonovitch, G.D. Cody, B. G. Brooks. IEEE Trans. Electron Dev., **31**, 711 (1984). DOI: 10.1109/t-ed.1984.21594
- [3] H. Savin, P. Repo, G. von Gastrow, P. Ortega, E. Calle, M. Garín, R. Alcuilla. Nature Nanotechnol., **10**, 624 (2015). <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.89>
- [4] E.A. Vyacheslavova, I.A. Morozov, D.A. Kudryashov, A.V. Uvarov, A.I. Baranov, A.A. Maksimova, S.N. Abolmasov, A.S. Gudovskikh. ACS Omega, **7**, 6053 (2022). DOI: 10.1021/acsomega.1c06435
- [5] M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, P. Scandura, G.M. Tina. Proc. 24th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf., PV Power Plants, Hamburg, 4162 (2009). DOI: 10.4229/24thEUPVSEC2009-5BV.2.41
- [6] POWER. Data Access Viewer. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 12.02.2023).
- [7] Онлайн-калькулятор: Азимут и высота солнца над горизонтом, PlanetCalc. URL: <https://planetcalc.ru/320/> (дата обращения: 16.03.2023).
- [8] G. Womack, P. Kaminski, A. Abbas, K. Isbilir, R. Gottschalg, J.M. Walls. J. Vac. Sci. Technol. A, **35** (2), 021201 (2017). DOI: 10.1116/1.4973909
- [9] Th. Henriksen. *Solstråling, Sol-ozon-helse* (Gyldendal akademisk, 2002). ISBN13 9788205304062
- [10] <https://spb.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-batarei/> (дата обращения: 23.04.2023).

Редактор А.Н. Смирнов

Nanostructured and thin film materials Study of the possibility to increase annual electricity production using silicon solar cells with a nanostructured surface

E.Y. Yarchuk¹, E.A. Vyacheslavova², M.Z. Shvarts³,
A.S. Gudovskikh^{1,2}

¹ St. Petersburg State Electrotechnical University,
197376 St. Petersburg, Russia

² Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

³ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of a study of the angular dependence of the reflectivity of black silicon structures with conical and filamentary nanowires, and a silicon surface with a textured pyramidal surface coated with an ITO layer are presented. The possibility to increase the annual electricity generation for solar cells based on black silicon has been demonstrated due to the weak angle dependence of the total reflectance. Compared to the textured pyramidal surface, the increase is 7.34% and 6.33% for the solar cells based on black silicon with conical and filamentary nanowires, respectively.