

07

## Исследование влияния спектральной чувствительности фотоэлектрических модулей на основе $c$ -Si, $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si и условий эксплуатации на эффективность их работы

© Д.А. Богданов<sup>1,2</sup>, А.В. Бобыль<sup>1</sup>, Е.И. Теруков<sup>1,3</sup>,  
В.Н. Вербицкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: dmitrii.a.bogdanov@gmail.com

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

<sup>3</sup> НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
РАН, Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию 16 июля 2014 г.

Рассмотрена эффективность фотоэлектрических модулей (на основе  $c$ -Si кристаллического и  $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si тандемного тонкопленочного) в зависимости от параметров атмосферы в условиях повышенной влажности и облачности, которая проявляет себя посредством соответствующих зависимостей спектрального распределения солнечного излучения. Экспериментально установлено, что в этих условиях мощность на ватт установленной мощности выше у модулей на основе  $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si: 1) при низких значениях освещенности (до  $150 \text{ W/m}^2$ ) за счет их более высокой чувствительности в коротковолновой части спектра, 2) при высоких значениях (более  $400 \text{ W/m}^2$ ) — за счет меньшей величины температурной зависимости КПД.

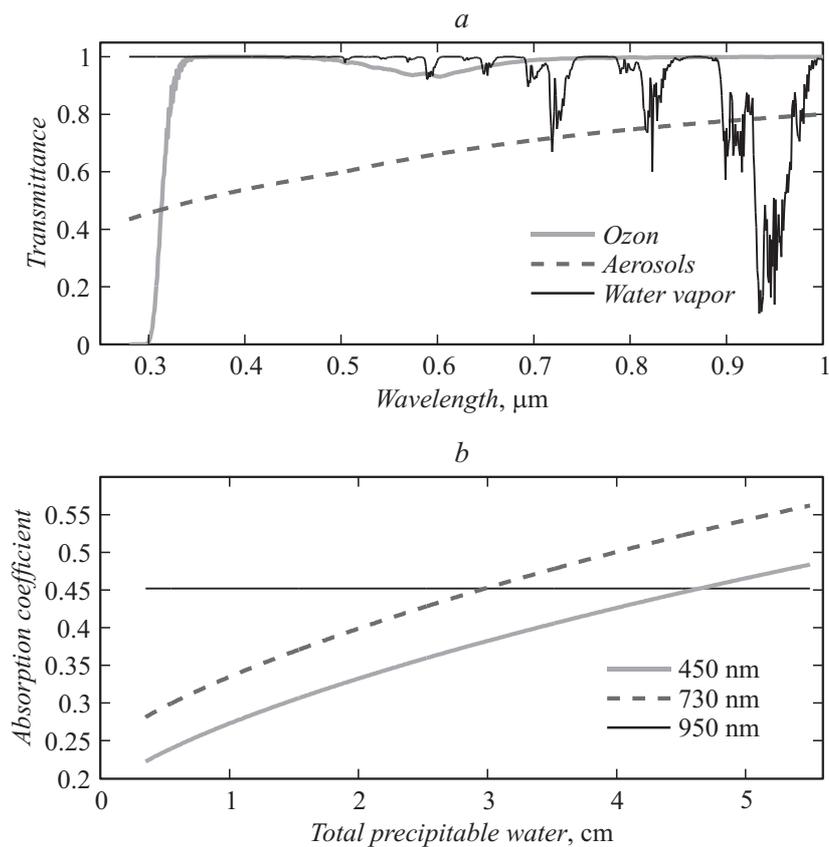
Существующие методы оценки эффективности работы фотоэлектрических модулей основаны на измерении характеристик их работы в стандартных тестовых условиях (STC): мощность излучения  $1000 \text{ W/m}^2$ , спектр излучения AM 1.5, температура панели  $25^\circ \text{C}$ . Однако оценки эффективности преобразования, полученные в стандартных условиях, не позволяют с достаточной точностью оценивать энерговыработку фотоэлектрических модулей в реальных условиях: ошибка расчета, основанного на этих данных, может достигать 40% [1]. На ра-

боту модулей оказывает влияние температура поверхности панели, светопрозрачность атмосферы, воздушная масса, углы положения солнца; сложное взаимодействие этих факторов определяет выходную мощность преобразователей. Такие факторы, как запыленность атмосферы и влажность, в определенных условиях могут приводить к долговременному изменению эффективности модулей или даже выходу модулей из строя [2]. В реальных условиях менее 1% данных мониторинга соответствует стандартным тестовым условиям [3]; это приводит к тому, что даже методы, учитывающие независимое изменение температуры и мощности излучения на поверхности модуля [4,5], позволяют с достаточной точностью оценивать характеристики работы лишь модулей на основе кристаллического кремния [6].

Для повышения точности оценки эффективности модулей в реальных условиях необходимо также учитывать их спектральные характеристики [7] и изменение спектрального распределения излучения, так как изменение параметров атмосферы и длины пути солнечных лучей в атмосфере приводит к изменению не только мощности излучения, но и спектрального распределения света. При мониторинге спектральных характеристик, проведенном в префектуре Сига, Япония [8], было установлено, что свыше 95% измеренных спектральных распределений были смещены в синюю область относительно стандартного спектра, средняя энергия фотона превышала 2 eV при средней энергии фотона стандартного спектра 1.87 eV.

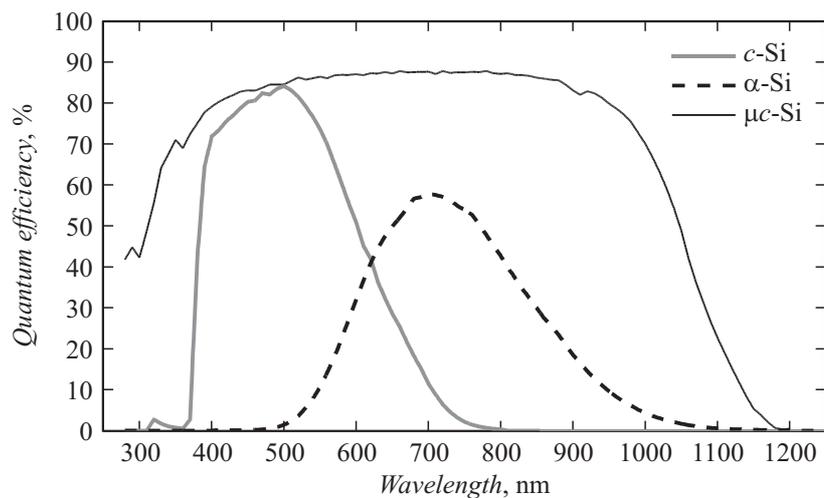
Значительное влияние на прозрачность атмосферы оказывает облачность; влияние облачности на спектр солнечного излучения является неравномерным, мощность излучения для излучения с длиной волны более 500 nm снижается, в то время как мощность в области 400 nm возрастает [9]. В отсутствие облачности основными причинами рассеивания солнечного излучения в атмосфере являются загрязнения атмосферы, атмосферный озон и пары воды [10]. На рис. 1, а представлены графики зависимости коэффициента пропускания атмосферы для озона, аэрозоля загрязнений и водяного пара для Санкт-Петербурга, рассчитанные на основе модели атмосферы SMARTS2; параметры атмосферы взяты для июля — месяца, характеризующегося наибольшим содержанием влаги в атмосфере [10], угол высоты солнца 20°.

Из рис. 1, а видно, что загрязнение атмосферы (аэрозоли твердых частиц) играет заметную роль в ослаблении излучения на протяжении всего спектра видимого света, в то время как наличие водяного пара



**Рис. 1.** Коэффициенты пропускания атмосферного озона и аэрозоля загрязнений и водяного пара для Санкт-Петербурга (a) и зависимость коэффициента поглощения света от содержания влаги в атмосфере (b).

в атмосфере не приводит к ослаблению спектра излучения в диапазоне от 250 до 600 nm, однако в зоне красного и инфракрасного излучения именно водяной пар играет основную роль в снижении мощности излучения. Влияние атмосферного озона на спектр ограничивается зоной ультрафиолета, влияние озона на остальной спектр незначительно. Таким образом, основную роль в смещении спектра солнечного излучения



**Рис. 2.** Внешняя квантовая эффективность фотоэлементов на основе  $c$ -Si,  $\alpha$ -Si,  $\mu c$ -Si.

в синюю область играет именно водяной пар. На рис. 1, *b* представлена зависимость коэффициента поглощения солнечного излучения для длин волн 450, 720 и 950 nm от количества атмосферной влаги, остальные параметры атмосферы остаются неизменными (параметры атмосферы для Санкт-Петербурга в июле, угол высоты солнца  $20^\circ$ ), расчет проведен на основе модели SMARTS2 [10]. Увеличение содержания влаги в атмосфере приводит к сублинейному увеличению коэффициента поглощения атмосферы в красной и инфракрасной области спектра, однако не оказывает влияния на коэффициент поглощения в синей области.

Спектральные характеристики полупроводниковых материалов на основе кремния  $c$ -Si,  $\alpha$ -Si,  $\mu c$ -Si различны: квантовая эффективность  $\alpha$ -Si достигает максимума в синей области спектра,  $\mu c$ -Si — в красной области, в то время как спектр поглощения  $c$ -Si включает в себя весь видимый спектр и инфракрасную часть спектра; внешние квантовые эффективности фотоэлементов на основе  $c$ -Si,  $\alpha$ -Si,  $\mu c$ -Si, измеренные в НТЦ тонкопленочных технологий при ФТИ им. Иоффе, представлены на рис. 2.

Таким образом, влияние изменения спектрального состава излучения для разных типов кремниевых модулей будет неодинаковым. Увеличение содержания влаги в атмосфере не приводит к увеличению коэффициента поглощения в области спектра, соответствующей максимуму спектра поглощения  $\alpha$ -Si, однако приводит к возрастанию поглощения в красной и инфракрасной частях спектра, соответствующих спектру поглощения  $c$ -Si. На основании этих данных можно сделать вывод, что в условиях влажного климата, облачной погоды и снижения загрязненности атмосферы эффективность работы модулей на основе  $c$ -Si будет снижаться, в то время как эффективность  $\alpha$ -Si и тандемных модулей  $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si будет возрастать и выработка на ватт установленной мощности электроустановок на основе  $\alpha$ -Si будет выше, чем у электроустановок на основе  $c$ -Si.

Задачей работы является исследование характеристик работы модулей на основе  $c$ -Si,  $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si в условиях эксплуатации в Северо-Западном регионе.

Для рассмотрения характеристик работы модулей в условиях малого угла высоты солнца и плотной облачности были выбраны следующие дни: 2, 8, 11, 13 октября и 6 ноября 2013 года. Также был рассмотрен безоблачный день 6 сентября 2013 года. Данные погоды за рассматриваемые дни представлены в табл. 1.

Были использованы данные мониторинга мощности прямого и диффузного солнечного излучения и данные мониторинга работы модулей на основе  $c$ -Si и тандемного  $\alpha$ -Si/ $\mu c$ -Si, установленных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В ходе мониторинга работы фотоэлектрических преобразователей с интервалом в 1 min измерялись значения мощности, тока

**Таблица 1.** Основные характеристики погоды в рассматриваемые дни

Дата	Облачность, %		Температура, °C	Давление, mm Hg
	8–14 h	14–20 h		
06.09.2013	0	0	13.1	768.5
02.10.2013	90–100	70–80	4.8	770.9
08.10.2013	100	100	11.4	763.1
11.10.2013	100	40–80	9.5	765.6
13.10.2013	90–100	80–100	9.1	765.3
06.11.2013	80–100	100	7.1	744.7

**Таблица 2.** Характеристики рассматриваемых модулей

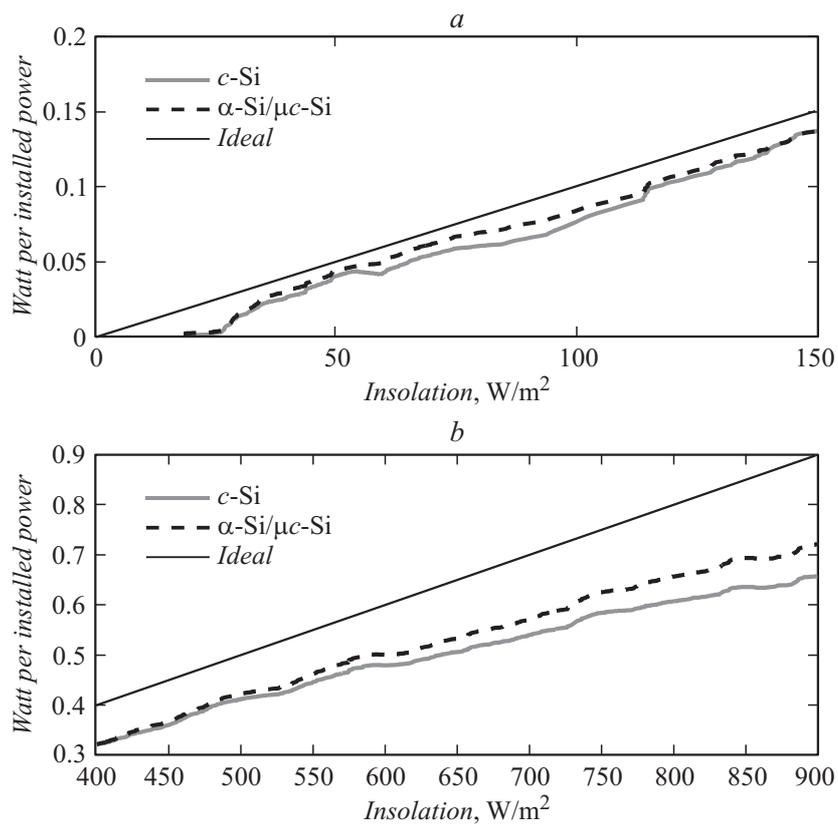
Характеристики	Модуль производства Primas ( $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-S : H tandem)	Модуль на основе кристаллического кремния
$P_{\max}$ , W	133	175
$I_{sc}$ , A	2.6	5.133
$V_{oc}$ , V	74.134	42.51
$I_{pm}$ , A	2.259	4.286
$V_{pm}$ , V	58.867	34.295
Eff, %	9.3	13.7

*Примечание:*  $P_{\max}$  — максимальная мощность,  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания,  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода,  $I_{pm}$  — ток при максимальной мощности,  $V_{pm}$  — напряжение при максимальной мощности, Eff. — КПД).

и напряжения в точке максимальной мощности ВАХ; при мониторинге мощности солнечного излучения каждые 12 s производилось измерение мощности прямого солнечного излучения и мощности диффузной составляющей солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность. Для анализа были использованы данные мониторинга работы тонкопленочного модуля производства Primas и кристаллического модуля, характеристики которых приведены в табл. 2.

Измерение тонкопленочного модуля производилось в марте 2013 года перед началом эксплуатации, таким образом, следует учесть снижение эффективности тонкопленочного модуля в результате светондуцированной деградации, стабилизированное значение эффективности согласно данным производителя составляет 90% от изначального.

В результате анализа данных мониторинга было определено, что снижение эффективности работы тонкопленочных модулей в условиях облачности (при преобладании диффузной составляющей в полном излучении на поверхности модуля) меньше, чем снижение эффективности кристаллического модуля. При мощности излучения до  $150 \text{ W/m}^2$  снижение эффективности кристаллического значительно превышает снижение для тонкопленочного — 24.96 и 12.59% соответственно; при мощности излучения до  $50 \text{ W/m}^2$  — 34.35 и 17.3% соответственно, и КПД тандемного и кристаллического модулей становятся равны. Таким образом, в условиях облачности и повышенной влажности выработка на ватт установленной мощности выше у энергоустановки на основе



**Рис. 3.** Зависимость мощности на ватт установленной мощности от инсоляции для облачного дня (2 октября 2013 года) (a) и безоблачного дня (9 сентября 2013 года) (b).

тандемного тонкопленочного модуля. Данные мощности генерации модулей на ватт установленной мощности для 2 октября 2013 года представлены на рис. 3, a. Мощность на ватт установленной мощности модуля на основе кристаллического кремния и тандемного тонкопленочного модуля оказывается ниже идеального значения по причине нелинейности ВАХ преобразователей, приводящей к снижению КПД при снижении фототока.

График зависимости генерируемой мощности от мощности излучения для солнечного дня (9 сентября 2013 года) представлен на рис. 3, *b*. При отсутствии влажности преимущество аморфного кремния в области малой мощности инсоляции отсутствует, однако происходит снижение эффективности кристаллического кремния в области высокой инсоляции (свыше  $400 \text{ W/m}^2$ ) по причине большего, чем у аморфного кремния температурного коэффициента.

Таким образом, изменения параметров атмосферы оказывают значительное влияние на спектр излучения и приводят к изменению эффективности фотоэлектрических модулей. Повышение содержания влаги в атмосфере приводит к понижению эффективности модулей на основе кристаллического кремния. При сплошной облачности (мощности излучения до  $150 \text{ W/m}^2$ ) снижение эффективности кристаллического кремния значительно превышает снижение для тонкопленочного, в условиях более плотной облачности (при мощности излучения до  $50 \text{ W/m}^2$ ) эффективность тандемного модуля становится равна эффективности кристаллического. В условиях облачности и повышенной влажности выработка на ватт установленной мощности выше у энергоустановки на основе модуля  $\alpha\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$ . Благодаря эффективной работе в условиях повышенной влажности и облачности, а также из-за малого температурного коэффициента использование тонкопленочных модулей  $\alpha\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$  может быть наиболее целесообразно в областях, где преобладает облачная погода и зимние температуры близки к нулю. Сравнение эффективности кристаллических и аморфных кремниевых модулей требует дальнейшего исследования.

## Список литературы

- [1] Durisch W, Urban J // *Renew. Energ.* 1996. V. 8. Iss. 1–4. P. 359–366.
- [2] Mekhilefa S., Saidurb R., Kamalisarvestanib M. // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2012. V. 16. P. 2920–2925.
- [3] Minemoto T, Nagae S, Takakura H. // *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* 2007. V. 91. P. 919–923.
- [4] *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules-design qualification and type approval* // International Electrotechnical Commission. CEI/IEC 61215:2005. Geneva, Switzerland, 2005.
- [5] *International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices. Pt.1–10, CEI/IEC 60904, IEC Geneva, Switzerland.*

- [6] *Kenny R., Ioannides A., Mullejans H.* // *Thin Solid Films*. 2006. V. 511–512. P. 663–672.
- [7] *Крюченко Ю.В., Саченко А.В., Бобыль А.В. и др.* // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. В. 11. С. 86–91.
- [8] *Minemotoa T., Todaa M., Nagaea S., Gotoh M.* // *Sol. Energ. Mat. Sol. C*. 2007. V. 91 P. 120–122.
- [9] *Bartlett J.S., Ciotti A.M., Davis R.F., Cullen J.J.* // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N 12. P. 31 017–31 031.
- [10] [http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS/relatedrefs/SMARTS2\\_report.pdf](http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS/relatedrefs/SMARTS2_report.pdf)