

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ПОТЕНЦИАЛ-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ
МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

С. М. Барайшук¹, О. М. Михалкович², М. Х. Муродов³

¹*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь*

²*Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка,
Минск, Беларусь*

³*Наманганский инженерно-строительный институт, Наманган, Узбекистан*

Исследована корреляция между потенциально индуцированной деградацией (ПИД) кремниевых солнечных элементов и морфологическими изменениями их поверхности. Методами циклической вольтамперометрии и атомно-силовой микроскопии установлен двухстадийный механизм деградации. Зафиксировано снижение эффективности фотоэлектрического преобразования на $(16,2 \pm 0,8)\%$ и увеличение шероховатости поверхности в 9,2 раза, обусловленное селективным травлением и накоплением дефектов. Результаты подтверждают, что деградация функциональных характеристик напрямую связана с изменением топографии поверхности, что говорит о необходимости разработки пассивирующих покрытий с барьерными свойствами против миграции ионов для подавления ПИД.

Ключевые слова: потенциал-индущиванная деградация, кремниевые солнечные элементы, шероховатость, циклическая вольтамперометрия, атомно-силовая микроскопия.

Введение. Потенциально индуцированная деградация функционального слоя кремниевых солнечных элементов, обусловленная миграцией ионов из подложки и верхнего слоя кремния в антиотражающее покрытие и эмиттер под действием электрического поля, приводит к снижению эффективности фотоэлектрического преобразования до 30 % по прошествии 3 лет эксплуатации. Данный эффект наиболее выражен в кристаллических кремниевых n-p-структур с SiN_x-пассивацией при отрицательном смещении модуля относительно земли (-600...-1000 В) в условиях комбинированного облучения в видимом и инфракрасном диапазоне и повышенной влажности.

Физический механизм ПИД связан с формированием проводящих каналов в объеме Si вследствие электрохимической коррозии p-n-перехода, что исследовано в [1-2]. Это явление наиболее распространено для кристаллических кремниевых фронтальных (n-p) фотопреобразователей и наиболее интенсивно развивается, когда модули находятся под отрицательным напряжением от-

носительно земли [3]. Явление ПИД, возникающее в модулях с отрицательной полярностью цепи, можно полностью избежать, если каркас панели выполнить из диэлектрических фототермостойких материалов с достаточной механической прочностью, в остальных случаях деградация свойств неизбежно должна сопровождаться деградацией поверхности.

Результаты и обсуждение. Исследование деградации проводили для элементов, отработавших в условиях фотоэлектрической электростанции от 1 года до 4 лет, а также в экспериментальных условиях с использованием потенциостата-гальваностата Р-40Х в двухэлектродной ячейке, где в качестве рабочего электрода выступал исследуемый образец площадью 4 см^2 , а электрода сравнения – хлорсеребряный электрод (Ag/AgCl). Температура поддерживалась в диапазоне $55\text{--}60^\circ\text{C}$. Освещенность – $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Испытания проводились в режиме циклической вольтамперометрии в течение 720 ч при потенциале Еcorr (коррозионном потенциале), что позволяет изучить электрохимические процессы окисления и восстановления, а также оценить электрохимическую стабильность исследуемого материала. Аналогично тому, как проводились исследования для образцов конструкций тонкопленочных ИК-излучателей на основе MoSi_2 [4]. Для изучения поверхности применяли атомно-силовую микроскопию (NT-206, Microtestmachines Co.) в контактном режиме с площадью сканирования $20 \times 20 \text{ мкм}^2$. Обработка проводилась при помощи SurfaceExplorer.

Результаты 720-часовых циклических вольтамперометрических исследований для образцов солнечных элементов, не работавших в качестве элементов фотоэлектрических станций, демонстрируют выраженную деградацию электрохимической системы с суммарной потерей эффективности $(16,2 \pm 0,8)\%$. При проведении испытаний наблюдается уменьшение амплитуды окисительно-восстановительных пиков на $(19,3 \pm 2,1)\%$ ($p < 0,05$); анодный сдвиг потенциалов пиков на $(42 \pm 6) \text{ мВ}$ ($n = 15$); увеличение площади вольтамперометрических петель на $(38,7 \pm 3,2)\%$ ($R^2 = 0,96$). При этом происходило заметное повышение зарядового сопротивления на $(24,8 \pm 1,5)\%$.

Временной анализ процесса деградации позволяет предположить двухстадийный процесс деградации: на начальном этапе (0–600 ч) он описывается экспоненциальным законом ($k = 0,0032 \text{ ч}^{-1}$), следующая стадия соответствует параболической кинетике деградации ($k = 0,0078 \text{ ч}^{-1}$). Наблюдаемые процессы схожи с результатами натурных испытаний на опытных образцах кремниевых фотоэлементов, представленными в работе [5].

Анализ АСМ-изображений экспериментально состаренных образцов (рис. 1) показал формирование четко различимых структурных элементов, увеличение амплитуды поверхностных неровностей. Так, для исходного образца диапазон высот составляет 7,0 нм. Испытания в течение 360 ч приводят к его экспоненциальному росту до 33,5 нм, после 600 ч рост значительно ускоряется и после 720 ч диапазон высот уже составляет 64,6 нм (в 9,2 раза больше исходного).

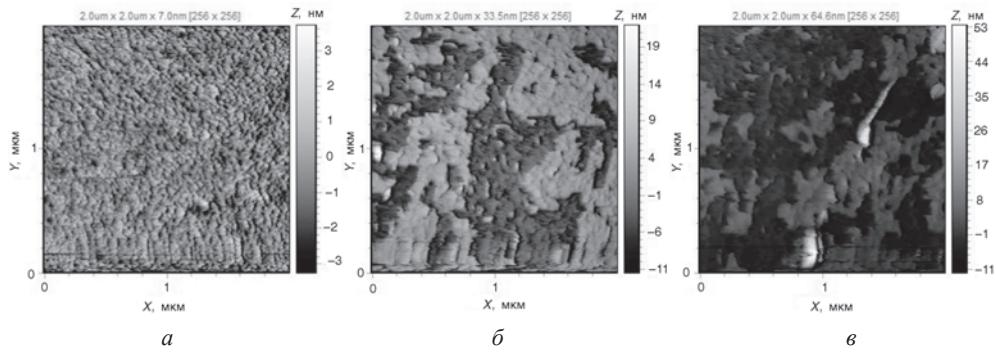


Рис. 1. Топография поверхности монокристаллического кремниевого фотоэлемента:
а – исходного; б – после 360 ч; в – после 720 ч вольтамперометрических исследований

Переход от квазигомогенной морфологии к выраженно рельефной сопровождается ростом шероховатости поверхности в прогрессии, что, по-видимому, свидетельствует о процессах, аналогичных селективному травлению (селективной коррозии), о накоплении поверхностных дефектов и формировании критических дефектов, способных ускорить деградацию материала. Рельеф поверхности становится более выраженным. В первом случае (рис. 1, а) поверхность относительно гладкая, с небольшими перепадами высот. Во втором (рис. 1, б) уже появляются более высокие пики и более глубокие впадины. В третьем (рис. 1, в) амплитуда неровностей еще больше увеличивается. Стоит обратить внимание на то, что изменение минимальных и максимальных значений высот неплохо качественно согласуется с кинетикой деградации эффективности.

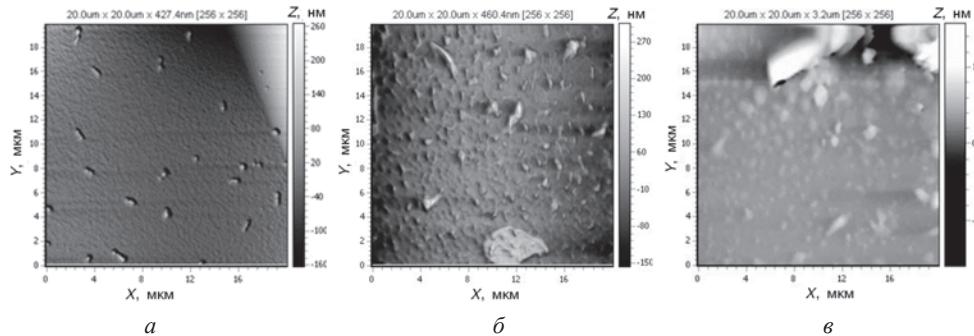


Рис. 2. Топография поверхности монокристаллического кремниевого фотоэлемента:
а – наработка 1 год; б – наработка 3 года; в – наработка 4 года

Топография фотоэлементов, работавших значительное время в составе фотоэлектрической станции (рис. 2), позволяет говорить о качественно подобных изменениях поверхности. Так, после 2 лет работы картина и дефекты поверхности подобны тому, что наблюдается после 180–200 ч испытаний. Это

демонстрирует адекватность предложенного метода оценки ПИД-деградации солнечных элементов и тонкопленочных конструкций для них. Шероховатость первого образца достигает 260 нм. Это показывает, что поверхность уже имеет значительные неровности. После 2 лет эксплуатации шероховатость достигает 420 нм. Это немного больше, чем в первом случае, что может указывать на увеличение шероховатости или ускорение эрозии поверхности. Третий образец имеет значительные дефекты структуры по сравнению с первыми двумя изображениями, особенно в области вблизи лицевого контакта, что может свидетельствовать о наличии значительных температурных индуцированных приложенным потенциалом дефектов на поверхности.

В целом можно сделать вывод о значительном увеличении шероховатости и появлении более выраженных структур на поверхности при более продолжительной эксплуатации (воздействии потенциала и облучения), что позволяет предположить необратимость указанных процессов.

Заключение. Предложенные методы ускоренных испытаний адекватно моделируют реальные условия эксплуатации, что позволяет прогнозировать срок службы фотоэлектрических систем и оптимизировать их конструкцию для подавления ПИД. Можно сделать вывод, что наблюдаемое изменение топографии поверхности свидетельствует о прогрессирующей деградации. Таким образом, ранее показанные [5] возможности регенерации солнечных элементов будут ограничены деградацией структуры непосредственно топографии поверхности, особенно в случае тонкопленочных фотопреобразователей, что указывает на перспективность разработки пассивирующих покрытий, аналогичных представленным в работе [6], для нивелирования снижения эффективности в процессе эксплуатации.

Литература

1. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review / W. Luo, Y. S. Khoo, P. Hacke [et al.] // Energy & environmental science. – 2017. – Vol. 10, No. 1. – P. 43–68.
2. Experimental Evidence of PID Effect on CIGS Photovoltaic Modules / S. Boulhidja, A. Mellit, S. Voswinckel [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 537–542.
3. PID- and UVID-free n-type Solar Cells and Modules / M. K. Stodolny, G. J. Janssen, B. B. Van Aken [et al.] // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 92. – P. 609–616.
4. Изучение потенциально индуцированной деградации элементов для оптических ИК-газоанализаторов / С. М. Барайшук, М. Х. Муродов, Х. Г. Абдулхаев [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : материалы XI Междунар. науч. конф., г. Минск, 16–18 окт. 2024 г. / Бел. гос. ун-т. – Минск, 2025. – С. 23–27.
5. Иванов, И. И. Методы решения проблем поляризационно-индуцированной деградации фотогальванических элементов / И. И. Иванов, П. П. Петров // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № 26 (78). – С. 89–100.
6. Исследование структур покрытия на основе Mo/кремниевой подложки для тонкопленочных ИК-излучателей / С. М. Барайшук, О. М. Михалкович, М. Виертель, М. Будзински // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2024. – № 1. – С. 2410601-1–2410601-7.