

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛ-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

С. М. Барайшук¹, И. А. Павлович¹,
Я. Л. Кленницкий¹, М. Вертель²

¹Белорусский государственный аграрный
технический университет, г. Минск, bear_s@rambler.ru
²Институт физики Университета Марии Склодовской-Кюри,
Польша, г. Люблин

Потенциально индуцированная деградация (ПИД) солнечных элементов – это явление снижения эффективности фотоэлектрических модулей, связанное с миграцией ионов защитного покрытия или подложки внутри модуля под действием разности потенциалов между кремнием и другими частями модуля, такими как рамка, стекло и антиотражающее покрытие. Это вызывает появление токов утечки и электрохимическую коррозию, в результате чего эффективность фотоэлектрического преобразования может снизиться до 30% за несколько лет эксплуатации [1–2].

Данный процесс особенно выражен в кристаллических кремниевых *n*–*p*-структурах с SiN_x-пассивацией при отрицательном смещении модуля относительно земли, под воздействием видимого и инфракрасного излучения и повышенной влажности. ПИД развивается в два этапа: начальный быстрый (экспоненциальный) и последующий замедляющийся, что соответствует накоплению дефектов и изменению морфологии поверхности кремния – увеличивается шероховатость и появляются структурные дефекты, усиливающие деградацию фотоэлементов [3–4].

Экспериментальные исследования с использованием потенциостата-гальваностата Р-40Х с использованием двухэлектродной ячейки, где в качестве рабочего электрода выступал исследуемый образец площадью 4 см² и хлорсеребряный электрод сравнения (Ag/AgCl) проводились при температуре в диапазоне 55–60 °С. Освещенность 100 Вт/м², аналогично описанному в [3]. Для изучения поверхности применяли атомно-силовую микроскопию (NT-206, Microtestmachines Co.) в контактном режиме и SEM микроскопию при помощи электронно-зондового микроскопа типа EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced с кремний-дрейфовым детектором X-act, работающим при комнатной температуре. Механические свойства изучали по методике описанной в [5]. Исследование проводили для элементов, отработавших в условиях фотоэлектрической электростанции от 1 до 5 лет.

Топография фотоэлементов, работавших значительное время в составе фотоэлектрической станции, позволяет говорить об образовании на их поверхности структур размером 400–600 нм в длину и 60–150 нм в поперечнике, которые имеют определяемую ориентацию (рис. 1).

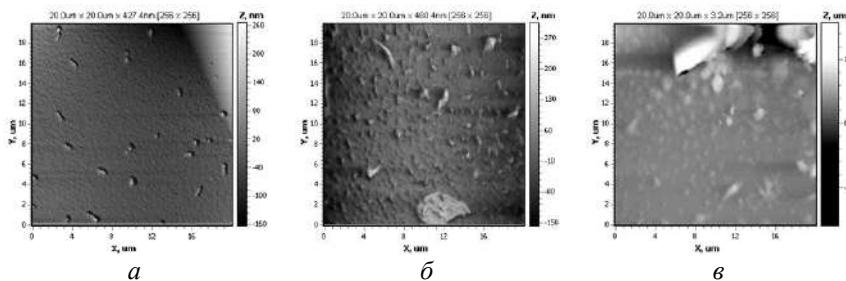


Рис.1. Топография поверхности монокристаллического кремниевого фотоэлемента: *а* – наработка 1 год, *б* – 3 года, *в* – 5 лет

Так после 3 лет работы картина и дефекты поверхности подобны, однако значительно увеличивается количество

образований, происходит их объединение в кластеры длиной до нескольких микрометров и до 10 раз увеличивается количество мелких структур.

Шероховатость первого образца достигает 260 нм. Это показывает, что поверхность уже имеет значительные неровности. После 3 лет эксплуатации шероховатость достигает 420 нм. Это немного больше, чем в первом случае, что может указывать на ускорение эрозии поверхности или на ускорение образования на поверхности частиц. 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. Можно сделать вывод о значительном увеличении шероховатости и появлении более выраженных структур на поверхности при более продолжительной эксплуатации (воздействии потенциала и облучения) по сравнению с первыми двумя. После испытаний по моделированию ускоренного старения описанному в [3] провели серию измерений микротвердости поверхности образцов, результаты которых представлены на рис. 2.

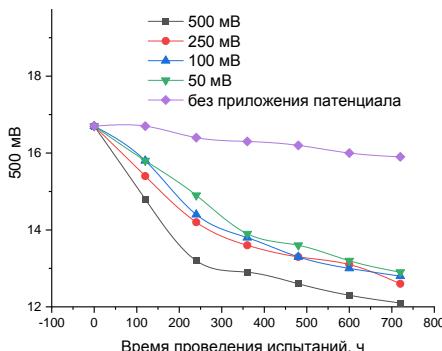


Рис. 2. Микротвердость фоточувствительного слоя фотоэлементов после испытаний в потенциостате на ПИД деградации

Твердость приповерхностного слоя фотоэлемента в 16,7 Гпа хорошо согласуется с полученными ранее данными для структур на кремниевой подложке, полученных ионно-ассистированным нанесением металлов в условиях облучения ионами наносимого металла [6]. Как видно из графиков, в процессе деградации покрытий происходит также и уменьшение его твердости, до значений твердости кремниевых пластин без покрытия, что также косвенно свидетельствует о разрушении целостности покрытия и деградации его свойств.

На рис. 3 представлены СЭМ изображения образцов после 240 и 480 ч испытаний. На поверхности образца, подвергенному испытаниям, в течение 240 ч при потенциале 500 мВ (рис. 3, *a*) наблюдаются структуры, аналогичные тому, что видим на снимках АСМ поверхности фотоэлементов, отработавших в течение 1 года (рис.1, *a*).

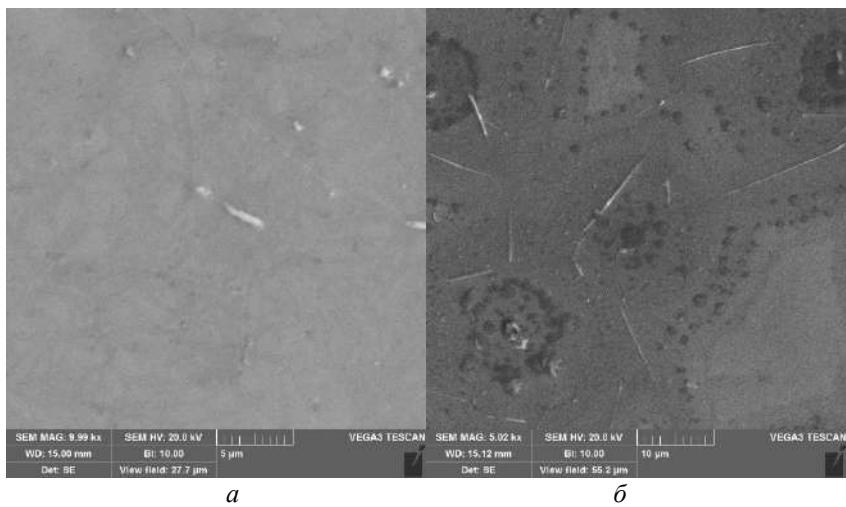


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности монокристаллического кремниевого фотоэлемента после выдержки под напряжением 500 мВ. *a* – 240 ч, *б* – 480 ч

Кроме того, при продолжении испытаний на поверхности образовались продолговатые структуры от 1 до 20 мкм, толщиной от 50 до 200 нм, анализ состава которых показывает значительное содержание Mo. Для исследуемых фотоэлементов Mo был использован в качестве тыльных контактов. В темных областях (рис. 3, б) идентифицируется содержание Na, который, по-видимому, дифундировал туда из защитного слоя под воздействием ПИД.

Ускоренными испытаниями ПИД установлена деградация механических свойств поверхности солнечных элементов и образование на поверхности микроструктурных дефектов, вызванное, по-видимому, миграцией ионов из покрытия и подложки и электрохимической коррозией. Эти эффекты необходимо учитывать для прогнозирования срока службы солнечных батарей и оптимизации их конструкции.

Работа поддержана грантом БРФФИ Т25УЗБ-024.

Литература

1. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review / W. Luo [et al.] // Energy & environmental science. – 2017. – T. 10. – No. 1. – C. 43–68.
2. PID- and UVID-free *n*-type Solar Cells and Modules / K. Maciej [et al.] // En. Procedia. – 2 016. – Vol. 92. – P. 609–616.
3. Изучение потенциально индуцированной деградации элементов для оптических ИК – газоанализаторов / С. М. Барайшук [и др.] // МССЭ : материалы XI Междунар. науч. конф. – Минск : БГУ, 2025. – С. 23–27.
4. Исследование структур покрытия на основе Mo/кремниевой подложки для тонкопленочных ИК-излучателей / С. М. Барайшук [и др.] // Ученые записки физического факультета МГУ. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2024. – № 1. – С. 2410601–1–2410601–7.

5. Склерометрический метод измерения микротвердости пленок фоторезиста на кремнии / Д. И. Бринкевич [и др.] // Приборы и методы измер. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 77–84.

6. Состав, структура и морфология поверхности кремния, модифицированного ионно-динамическим перемешиванием / И. Тащлыков [и др.] // Przeglad Elektrotechniczny. – 2008. – Т. 84. – № 3. – С. 111–113.