

УДК: 535.217, 538.958

Барайшук¹ С.М., к.ф.-м.н., доцент, Вергель² М., Ph-d

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск

²Институт физики Университета Марии Складовской-Кюри,
г. Люблин

ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ МОРФОЛОГИЮ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Потенциально индуцированная деградация (ПИД) является одним из ключевых факторов снижения эффективности и долговечности кремниевых фотоэлектрических модулей. Это явление связано с миграцией ионов (например, из защитного стекла или покрытий) под действием разности потенциалов между кремниевой пластиной и другими компонентами модуля, что приводит к электрохимической коррозии, увеличению токов утечки и деградации фотоэлектрических параметров [1]. Наибольшая подверженность ПИД наблюдается в n-p-структурах с SiN_x-пассивацией при отрицательном смещении, повышенных температуре и влажности. В работе исследуются структурные и механические изменения поверхности кремниевых фотоэлементов в результате длительной эксплуатации и ускоренных испытаний на ПИД.

Исследования проводились на монокристаллических кремниевых фотоэлементах, эксплуатировавшихся на фотоэлектрической станции от 1 до 5 лет, а также на образцах, подвергнутых ускоренным испытаниям. Ускоренное старение моделировали в двухэлектродной ячейке с использованием потенциостата-гальваностата Р-40Х при потенциале 500 мВ, температуре 55–60°C и освещенности 100 Вт/м² [2]. Рабочим электродом служил исследуемый образец (4 см²), электродом сравнения – хлорсеребряный (Ag/AgCl). Для анализа поверхности использовали атомно-силовую микроскопию (АСМ, NT-206) в контактном режиме и сканирующую электронную микроскопию (СЭМ, EDX Oxford Instruments AZtecEnergy).

Результаты и обсуждение.

Топография поверхности фотоэлементов, исследованная методом АСМ, демонстрирует прогрессирующие изменения в зависимости от времени эксплуатации (рис. 1).

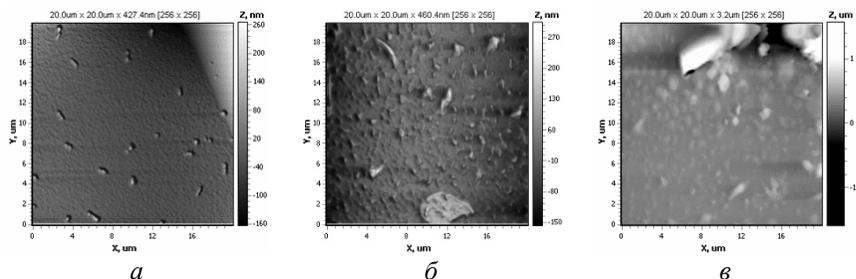


Рис.1. Топография поверхности монокристаллического кремниевого фотоэлемента: *а* – наработка 1 год, *б* – 3 года, *в* – 5 лет

После 1 года эксплуатации на поверхности наблюдаются структуры размером 400–600 нм в длину и 60–150 нм в поперечнике, с шероховатостью ~260 нм. Через 3 года количество структур увеличивается, они объединяются в кластеры длиной до нескольких микрометров, а шероховатость возрастает до ~420 нм. После 5 лет эксплуатации поверхность имеет значительные дефекты, особенно вблизи лицевых контактов, что свидетельствует о температурных и потенциал-индуцированных повреждениях.

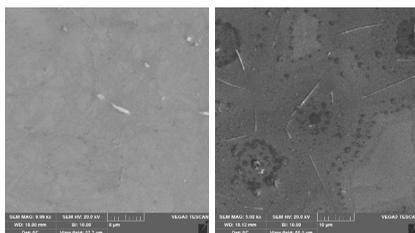


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности после испытаний при 500 мВ: *а* – 240 ч, *б* – 480 ч

СЭМ-анализ образцов после ускоренных испытаний выявил образование на поверхности микроструктур, аналогичных наблюдаемым на элементах после 1 года эксплуатации (рис. 2а, 240 ч). После 480 ч испытаний (рис. 2б) появляются протяженные структуры длиной 1–20 мкм и толщиной 50–200 нм. EDX-анализ показал повышенное содержание молибдена (Mo), используемого в тыльных контактах, а в темных областях – натрия (Na), мигрировавшего, вероятно, из защитного слоя.

Образование дефектов и изменение состава поверхности связывается с миграцией ионов под действием приложенного потенциала, аналогично наблюдавшемуся в работе [3] и последующей электрохимической коррозией.

Работа выполнена в рамках гранта министерства образования 20211250.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили, что потенциально индуцированная деградация приводит к значительным структурным изменениям поверхности кремниевых фотоэлементов. Учет этих факторов необходим для прогнозирования срока службы и повышения надежности фотоэлектрических модулей.

Список использованных источников.

1. Luo W. et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review // *Energy & Environmental Science*. – 2017. – Vol. 10. – № 1. – P. 43–68.

2. Барайшук С.М. и др. Изучение потенциально индуцированной деградации элементов для оптических ИК-газоанализаторов // МССЭ материалы XI Междунар. н. конф. – Мн., 2024. – С. 23–27.

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

УДК 519.87

**Нефедов С.С., ст. преподаватель,
Павлович И.А., ст. преподаватель, Есипович М.И., студент**
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Переход к предиктивному обслуживанию электрооборудования является ключевым трендом современной энергетики. В контексте диагностики асинхронных электродвигателей это требует перехода от ручного анализа данных к их автоматизированной интеллектуальной обработке. Искусственные нейронные сети демонстрируют