

3. Таширев А. Б. и др. Скрининг дрожжей-продуцентов меланина из наземных антарктических биотопов // Мікробіологічний журнал. – 2010. – №. 72, № 1. – С. 3–8.
4. Ushakova N.A., Dontsov A.E., Bastrakov A.I., Garmash N.Y., Pavlov D.S. Paramagnetics Melanin and Mn²⁺ in Black Soldier Fly *Hermetia illucens*. // Doklady Biochemistry and Biophysics. – 2017. – Vol. 473 – P. 102–105.
5. Кукулянская Т.А., Курченко Н.В., Курченко В.П., Бабицкая В.Г. // Прикладная биохимия и микробиология. – 2002. – Т. 38, № 1. – С. 68–72.

ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИК-ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

**С. М. Барайшук¹, М. Муродов², Х. Абдулхаев²,
В. И. Митюк³, О. М. Михалкович⁴**

¹⁾ *Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220012 Минск, Беларусь, e-mail: bear_s@rambler.ru*

²⁾ *Наманганский инженерно-строительный институт, ул. И. Каримова, 12, 160103, Наманган, Республика Узбекистан, e-mail: m_murodov@mail.ru*

³⁾ *Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. Петруся Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: mitsiuk@physics.by*

⁴⁾ *Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, ул. Советская, 18, 220030, Минск, Беларусь, e-mail: phyzbober@tut.by*

Потенциал индуцированная деградация (ПИД) кремниевой подложки и сформированного на ней функционального слоя сенсорного или солнечного элемента, вызванная возникновением разности потенциалов между подложкой и корпусом в условиях облучения в видимом и инфракрасном диапазонах вызывает потерю их эффективности. В работе исследована деградация тонких пленок дисилицида молибдена, полученных на пластинах монокристаллического кремния (111) Si, с последующим облучением ионами Mo⁺ при ускоряющем потенциале 5 кВ–15 кВ.

Ключевые слова: потенциал индуцированная деградация; молибденовые покрытия; сенсорные элементы; фотопреобразователи.

STUDY OF THE POTENTIAL OF INDUCED DEGRADATION OF ELEMENTS FOR OPTICAL IR GAS ANALYZERS

**S.M. Baraishuk¹, M. Murodov², Kh. Abdulkhaev²,
V. I. Mitsiuk³, O. M. Mikhalkovich⁴**

¹⁾ *Belarusian state agrarian technical university, Nezavisimosti av. 99, 220012 Minsk, Belarus*

²⁾ *Namangan engineering-construction institute, 160100, Namangan, Uzbekistan*

³⁾ *Stale Scientific and Production Association «Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus», P. Brovki Sir. 19, 220072, Minsk, Belarus*

⁴⁾ *Belarusian State Pedagogical University named after M. Tank, Sovetskaya, 18, 220030, Minsk Belarus*

Corresponding author: S. M. Baraishuk (bear_s@rambler.ru)

Potentially induced degradation of the silicon substrate and the functional layer of the sensor or solar cell formed on it, caused by the occurrence of a potential difference between the substrate and the case during irradiation in the visible and infrared ranges, leads to the loss of their performance. In this paper, the degradation of thin films of molybdenum disilicide obtained on wafers of monocrystalline silicon (111) Si with subsequent irradiation with Mo^+ ions at an accelerating potential of 5 kV–15 kV was investigated..

Key words: potentially induced degradation; molybdenum coatings; sensor elements; photoconverters.

ВВЕДЕНИЕ

Потенциал индуцированная деградация (ПИД) – деградация кремниевой подложки или сформированного на ней функционального слоя сенсорного элемента, вызванная возникновением разности потенциалов между подложкой и корпусом в условиях облучения в видимом и инфракрасном диапазоне. Наибольшее влияние это явление оказывает на ИК-датчики, датчики освещения и фотоэлементы, вызывая потерю эффективности последних из-за наличия токов утечки. Это явление затрагивает наиболее распространенные солнечные панели на основе кремния. Механизм деградации, известный как поляризация в цепях, имеющих положительный потенциал напряжения относительно земли, обсуждался в [1–4]. Структурный отказ наиболее распространен для кристаллических кремниевых фронтальных ($n-p$) фотопреобразователей и наиболее интенсивно развивается, когда модули находятся под отрицательным напряжением относительно земли [5].

Снижение эффективности достигает 30 % после 3 лет эксплуатации. Скорость деградации зависит от рабочего напряжения системы, влажности и температуры элементов. Особенностью для фотоэлектрических панелей является возникновение индуцированных токов между фотоэлектрическими панелями и землей, что существенно увеличивает деградацию частей элементов, подключенных к отрицательному или заземленному электроду (корпусу панели). Явления ПИД, возникающие в модулях с отрицательной полярностью цепи, можно полностью избежать, если каркас панели выполнить из диэлектрических, фототермостойких материалов с достаточной механической прочностью. Известно также решение на основе анодного заземления [6] для защиты кремниевых пластин путем смещения электрохимического потенциала земли. В отличие от солнечных элементов, площадь сенсора значительно меньше, и необходимо контролировать как состояние самого сенсорного слоя, так и состояние подложки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Покрытия для сенсорных элементов наносились распылением молибдена на пластины монокристаллического кремния Si (111) с последующим облучением ионами Mo^+ при ускоряющем потенциале 5 кВ–15 кВ. Для этого использовалась методика с применением резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы, описанная в [7]. Источник ионов вначале использовался для создания структур подложек Mo/Si путем пассивного осаждения нейтрального потока атомов металла, после чего проводилось ионно-ассистированное доосаждение покрытий. Плотность ионного тока находилась в пределах 50–100 А/см². Давление в вакуумной камере $\sim 10^{-3}$ Па, а скорость осаждения $\sim 0,45$ нм/мин. Ионная бомбардировка при нанесении покрытий в ионно-активированных условиях обеспечивает взаимное перемешивание

на границе раздела металл/кремний [8] и образование силицидов металлов, что представляет интерес для исследователей ввиду его широкого применения в электронике.

Топографию поверхности покрытий изучали с помощью сканирующей электронной зондовой микроскопии (EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced), элементный анализ состава поверхности пленок проводили методом обратного рассеяния энергии электронов с использованием кремний-дрейфового детектора X-act. Атомно-силовая микроскопия (NT 206 (Microtestmachines Co.)). Твердость и модуль Юнга измеряли с помощью нанотвердомера Fisher H100. Дegradацию изучали по известной схеме с применением потенциостата-гальваностата Р-40Х.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

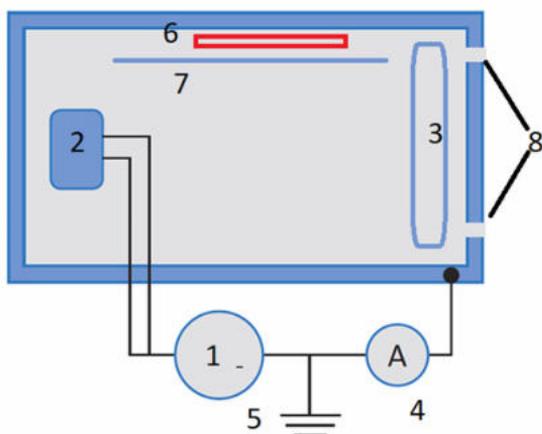


Схема изучения потенциально индуцированной деградации сенсорных элементов:

- 1 – потенциостат-гальваностат; 2 – испытательный элемент;
3 – источник света; 4 – амперметр;
5 – заземление; 6 – нагреватель; 7 – экран нагревателя;
8 – выходы для поддержания газовой среды

В нашей работе было предложено использовать в качестве слоев сенсорных элементов тонкие пленки дисилицида молибдена, полученные путем нанесения металлического покрытия с сопутствующим облучением ионами того же металла. Возможность применения таких структур в качестве элементов сенсорных систем обсуждалась нами ранее [9]. Для исследования процессов деградации таких элементов нами была собрана установка на основе потенциостата-гальваностата Р-40Х, схематично представленная на рисунке.

Такая конфигурация измерительной системы позволяет исследовать влияние различной освещённости, в том числе в ИК диапазоне, на характеристики сенсора, что интересно для нас, поскольку предложенные системы предназначены для формирования конструкции, тонкопленочных ИК-излучателей на основе MoSi_2 , при создании оптических газоанализаторов, построенных на принципе бездисперсионной ИК-спектроскопии. Измерительная система позволяет контролировать или поддерживать газовую среду, температуру и статировать потенциал на поверхности исследуемых систем. При отсутствии газовой среды, или при проточной подаче воздуха такая схема дает возможность изучить и явление деградации солнечных элементов. Эксперимент проводился для группы образцов в течение 500 часов, температура поддерживалась в диапазоне 55–60 °С. Освещенность 100 Вт/м². В некоторых сериях испытаний, в камере поддерживалась концентрация аммиака 2 %.

Анализ данных, полученных из АСМ-изображений и СЭМ для различных образцов, после экспериментов по деградации показал, что покрытия с дополнительной ионно-ассистированной обработкой имеют более низкую деградацию поверхности,

меньшую в 2,7 раза (по результатам обработки программой), чем для обычного покрытия. Анализ состава поверхности (методом электронного рассеяния) с помощью электронной микроскопии подтверждает деградацию, а фактически отсутствие покрытия, в видимых областях и соответствует результатам АСМ-анализа поверхности. При подключении исследуемых структур при помощи тыльного контакта под всей площадью сенсора, на поверхности наблюдается равномерная деградация покрытия, сопровождающаяся увеличением шероховатости и снижением проводимости поверхности до 18 %. Подключение исследуемых структур при помощи торцевого контакта подтверждает возникновение явления аналогичного тому, что наблюдалось другими авторами [5, 10] для солнечных элементов, а именно ускоренной деградации вблизи отрицательного электрода (контакта с отрицательным потенциалом).

Предложенная система позволила провести измерение сенсорного отклика структур на основе исследуемых пленок. Исследования проводились следующим образом: на образец подавалось напряжение 15 В; освещение в камере отключалось; через 60 секунд через систему пропусклась смесь аргона с воздухом и включался ИК излучатель. Измерение токов проводилось с интервалом в 10 секунд. Измерения были произведены при одинаковых температурах, с одинаковой интенсивностью ИК излучателя, с интервалом 48 часов, для выявления изменения чувствительности. При этом под чувствительностью понимается отношение сопротивления пленки в присутствии ИК-излучения к сопротивлению пленки при полном отсутствии освещения. Чувствительность сенсоров нелинейно спадала, с течением времени уменьшаясь от 2,5 до 1,5 для сенсоров на стандартных подложках и до 1,87 для сенсоров на подложках с ионно-ассистированным осаждением Мо. Кроме того, проводились исследования на выявление изменения отклика пленок, в зависимости от интенсивности ИК излучения при температуре 50 °С (для уменьшения влияния колебания температур окружающей среды), которые также показали снижение сенсорного отклика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получены структуры покрытие-подложка, содержащие силициды молибдена, имеющие равномерное распределение по поверхности, высокую термическую стабильность резистивных свойств (ПВД-элементы до 2,7 раз меньше по сравнению с другими материалами), смачиваемостью 200, что ниже, чем у исходных подложек. Анализ результатов измерений твердости показал, что твердость самих покрытий в 4,3 раза превышает твердость исходного кремния что подтверждает хорошие прочностные характеристики полученных покрытий. Полученные результаты показывают возможность формирования датчика ИК-излучения групповым методом в виде чипа, вырезанного из кремниевой пластины, с повышенным сроком службы, который будет иметь значительно меньшую деградацию в сравнении с известными системами [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review / Luo W. [et al.] // *Energy & environmental science*. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 43–68.
2. Experimental Evidence of PID Effect on CIGS Photovoltaic Modules / Boulhidja, S. [et al.] // *Energies*. – 2020, Т. 13, P. 537–542.
3. Effect of negative potential on the extent of PID degradation in photovoltaic power plant in a real operation mode / Hylsky, J. [et al.] // *Microelectron. Reliab.* – 2018. – Vol. 85. – P. 1218.
4. Diagnostics of PID Early Stage in PV Systems / Finsterle, T. [et al.] // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2155.

5. PID- and UVID-free *n*-type Solar Cells and Modules / Maciej K. [et al.] // Energy Procedia. –2016. – Vol. 92. – P. 609–616.
6. Барайшук, С. М. Снижение сезонных колебаний сопротивления растеканию тока заземляющих устройств применением смесей для стабилизации влажности грунта/ С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. И. Кахоцкий // Эпоха науки. – 2020. – №. 24. – С. 87–93.
7. Ташлыков И. С. и др. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном нанесении тонких пленок. – 2009.
8. Surface Properties of Me/Si Structures Prepared by Means of Self-Ion Assisted Deposition / I. S Tashlykov [et al.] // Acta Physica Polonica A. No. 6. Proc. of the 8-th International Conference NEET 2013, Zakopane, Poland. – June 18–21. – 2013. –P. 1306–1309.
9. Исследование структур покрытия на основе Мо/кремниевой подложки для тонкопленочных ИК-излучателей / С. М. Барайшук [и др.] // Ученые записки физического факультета Московского университета. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2024. – N 1. – С. 2410601-1-2410601-7.
10. Causes, consequences, and treatments of induced degradation of solar PV: a comprehensive review./ Kazem, H. A. [et al.] // Arab Journal of Basic and Applied Sciences. – Vol. 31(1). –2014. – P. 177–191.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОЙ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, А. Н. Петлицкий²

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: borzdov@bsu.by*

²⁾ *ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск*

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование флуктуаций плотности тока в кремниевой диодной $n^+ - n - n^+$ -структуре при постоянном напряжении на электродах с учетом процессов генерации-рекомбинации электронов через ловушки. Процессы генерации-рекомбинации включены в процедуру моделирования в качестве дополнительного механизма рассеяния. Рассчитаны автокорреляционные функции и спектральная плотность токовых флуктуаций для нескольких различных значений времени генерации и рекомбинации электронов при температуре кристаллической решетки 300 К.

Ключевые слова: генерация-рекомбинация; кремниевая диодная структура; метод Монте-Карло; шумовые характеристики.

SIMULATION OF SILICON DIODE STRUCTURE NOISE CHARACTERISTICS WITH ACCOUNT OF ELECTRON GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES

A. V. Borzdov¹, V. M. Borzdov¹, A. N. Petlitsky²

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

²⁾ *JSC «Integral» – Holding Management Company, Kazintsya str. 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. M. Borzdov (borzdov@bsu.by)*