

нагруженную опору в единицу времени. Установлено, что максимальное значение динамической опоры за единицу времени приходится на передний отдел стопы, минимальное – на средний отдел стопы. Теоретические расчеты нашли экспериментальные подтверждения.

Практическое значение полученных результатов заключается в усовершенствовании существующих методов диагностики функциональных параметров стопы, разработке, изготовлении и внедрении в медицинскую практику комплексной диагностической системы исследования биомеханических параметров стопы человека.

Литература

1. Tsapenko V. Analysis of Dynamic Load on Human Foot / V. Tsapenko, M. Tereshchenko, G. Tymchik, S. Matvienko and V. Shevchenko // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 400–404. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088788

2. Tsapenko V. Models of evaluation of biomechanical parameters of lower extremities in children / V.V. Tsapenko, M.F. Tereshchenko, G.S. Tymchik // KPI Science News 2019 / 1, 67–75. DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.1.158812

3. Кашуба В.А. Биомеханика осанки: монография. – Киев: Олимпийская литература, 2003. – 280 с.

4. Tsapenko V. Method of study of spatial parameters of the human foot / V. Tsapenko, N. Tereshchenko // in Proc. XI Int. Sci. Tech. Conf. Integrated Intellectual Robotechnical Complexes (IIRTC-2018), Kyiv, Ukraine, May 22–23, 2018, pp. 157–159.

5. Цапенко В.В. Анализ влияния разновысокости нижних конечностей на биомеханические параметры походки / В.В. Цапенко, Н.Ф. Терещенко // Вестник Киевского политехнического института. Серия: Приборостроение. – 2019. – Вып. 57 (1). – С. 102–107. DOI: 10.20535/1970.57(1).2019.172034

6. Ромакина Н. Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы (обзор) / Н. Ромакина, А. Федонников, С. Киреев // Саратовский научно-медицинский журнал. 2015. – № 3. – С. 310–316.

УДК 621.382

ОБЛУЧЕННЫЕ ГАММА-КВАНТАМИ ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО РЕЗИСТА ФП9120 НА ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полимерные композиты широко используются в качестве резистов при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [1, 2]. Основным типом позитивных резистов являются диазохинон-новолачные (ДХН) резисты, представляющие собой композит из светочувствительного орто-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы обычно в соотношении 1:5 [3]. В качестве растворителей чаще всего используются смеси ацетатов спиртов и гликолей. Целью настоящей работы было исследование модификации спектров нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) пленок позитивного диазохинон-новолачного резиста ФП9120 при облучении γ -квантами ^{60}Co .

Методы. Пленки позитивного диазохинон-новолачного резиста ФП9120 толщиной 2,5 и 5,0 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [4]. В качестве подложек использовались пластины (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Облучение резистивных пленок γ -квантами дозой до 300 кГр проводилось на установке МРХ- γ -25М с источником ^{60}Co . Мощность поглощенной дозы составляла

$0,12 \pm 0,003$ Гр/с. Спектры НПВО структур резист-кремний в диапазоне $\nu = 400\text{--}4\,000$ см^{-1} регистрировались при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH). Разрешение составляло 2 см^{-1} , количество сканов – 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

Экспериментальные результаты. Заметные изменения спектров НПВО резистивных пленок наблюдались только при поглощенных дозах $D \geq 200$ кГр. При меньших дозах спектры облученных и исходных пленок совпадали. Новых полос НПВО в облученных пленках резиста ФП9120 не обнаружено. Облучение дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности практически всех полос НПВО. Исключение составили лишь полосы в диапазоне волновых чисел $1\,550\text{--}1\,670\text{ см}^{-1}$, обусловленные колебаниями ароматического кольца (рисунок 1) у полосы, обусловленной скелетными колебаниями ароматического кольца [5], наблюдается несколько максимумов – наиболее интенсивный при $1\,595\text{ см}^{-1}$ и малоинтенсивные при $1\,606$, $1\,560$ и $1\,540\text{ см}^{-1}$ (рисунок 1). При γ -облучении дозой свыше 200 кГр интенсивность основной полосы при $1\,595\text{ см}^{-1}$

возрастала. Остальные максимумы исчезали; на их месте наблюдались только перегибы. По нашему мнению, такого рода изменения в ходе радиолита могут быть связаны с уменьшением доли ароматических фрагментов, образующих межмолекулярную водородную связь с кислотными О-Н группами фенолов. Изменение структуры полосы поглощения при $1540\text{--}1620\text{ см}^{-1}$ обусловлено изменениями в количестве и природе заместителей при ароматическом кольце в ходе облучения.

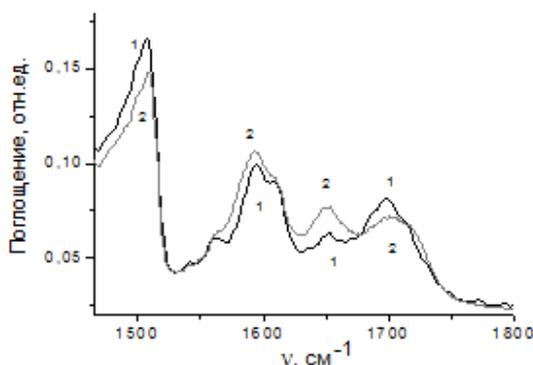


Рисунок 1 – Спектры НПВО γ -облученных пленок резиста ФП9120 толщиной 2,5 мкм в области колебаний ароматического кольца и С=О связей. Доза, кГр: 1 – 0; 2 – 270

Облучение γ -квантами дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности валентных колебаний О-Н и алифатических С-Н связей. Наблюдалось также снижение максимумов полос деформационных колебаний С-Н связей в диапазоне волновых чисел $600\text{--}900\text{ см}^{-1}$. Отметим также, что при облучении происходило перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метиленовыми $-\text{CH}_2-$ и метильными $-\text{CH}_3$ группами.

Обнаруженное методами ИК-спектроскопии НПВО снижение интенсивности поглощения алифатических С-Н связей и фенольных О-Н групп при γ -облучении ДХН-резиста происходит в результате бирадикальных процессов рекомбинации и диспропорционирования, а также в результате молекулярных процессов фрагментации возбужденных частиц фенолформальдегидной смолы, в частности, дегидратации и дегидрирования [6]. Радикалы бензильного типа в ходе рекомбинации образуют новые $-\text{CH}_2-$ фрагменты, что объясняет наблюдаемое при радиолите перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метильными ($\nu = 2960\text{ см}^{-1}$) и метиленовыми ($\nu = 2930\text{ см}^{-1}$) группами, в пользу последних.

В области валентных колебаний кратных связей при облучении наблюдается снижение интенсивности максимума полосы $\sim 1700\text{ см}^{-1}$

при одновременном ее уширении и смещении в высокоэнергетическую область на. В исходных пленках резиста полоса поглощения $\sim 1700\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями карбонильной группы *o*-нафтохинондиазида. Уширение этой полосы при одновременном смещении в высокоэнергетическую область на $\sim 30\text{ см}^{-1}$ в процессе γ -облучения, по нашему мнению, связано с двумя типами процессов. Во-первых, в результате передачи энергии возбуждения с макромолекул фенол-формальдегидной смолы на остатки *o*-нафтохинондиазида происходит его разложение. Во-вторых, в качестве продуктов радиационно-индуцированных превращений резиста образуются карбонилсодержащие соединения, которые достаточно сильно отличаются между собой по строению и, соответственно, по положению максимума поглощения С=О группы.

Интенсивность полосы с максимумом при 1650 см^{-1} , обусловленной валентными колебаниями С=О связей в формальдегиде $\text{CH}_2=\text{O}$, в ходе γ -облучения существенно возрастает (рисунок 1). Это соединение в небольшом количестве неизбежно содержится в формальдегидных смолах. Однако непрореагировавший в ходе производства полимера $\text{CH}_2=\text{O}$ хорошо присоединяет электроны, атомы водорода и углеродцентрированные радикалы [7] по кратной поляризованной связи. Последующая рекомбинация гидроксиметильных радикалов или присоединение этих радикалов по ароматическим фрагментам должны приводить к достаточно быстрому исчезновению формальдегида из полимерной пленки. Однако, полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о накоплении $\text{CH}_2=\text{O}$ в пленках ДХН-резиста при γ -облучении. Это однозначно свидетельствует о реализации процессов фрагментации гидроксиметильных остатков в составе полимерной смолы в ходе радиолита. Механизм такого рода реакций не описан в литературе. Очевидно, что возбужденные частицы фенол-формальдегидной смолы являются предшественником $\text{CH}_2=\text{O}$, но его образование может происходить как через стадию фрагментации кислородцентрированного радикала, так и в результате реализации молекулярного процесса. Косвенным подтверждением отщепления гидроксиметильных фрагментов от бензольных колец фенол-формальдегидной смолы в ходе γ -облучения ДХН-резиста является снижение интенсивности полосы при $\sim 1500\text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями углерод-углеродных связей при ароматических фрагментах.

Интенсивность широкой структурированной полосы с несколькими максимумами в диапа-

зоне волновых чисел $1\,050\text{--}1\,230\text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями С–О связей, в частности, в феноксильной группе (С–ОН), при облучении снижается. Соотношение максимумов этой полосы изменяется. Такое поведение полос НПВО в диапазоне волновых чисел $1\,050\text{--}1\,230\text{ см}^{-1}$ может свидетельствовать об образовании сложноэфирных сшивок с ОН-группами фенольного типа. Такие сшивки наблюдались ранее при имплантации Sb^+ в пленки резиста ФП9120, что приводило к увеличению их микротвердости [2]. С другой стороны, аналогичный эффект может давать также окисление фенолов до хинонметинов, в результате которого феноксильная С–ОН группа превращается в С=О.

Таким образом, выявленные в работе закономерности свидетельствуют о том, что облучение γ -квантами пленок ДХН-резиста на подложке монокристаллического кремния приводит к радиационно-индуцированным реакциям с участием боковых заместителей в составе фенолформальдегидной смолы (феноксильных, гидроксиметильных, метильных и метиленовых групп), а также фоточувствительного компонента – *о*-нафтохинондиазиды.

Литература

1. Моро У. МикролитогRAFия. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч.2. / У Моро. – М: Мир, 1990. – 632 с.
2. Бринкевич Д.И. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199.
3. Roy D. DNQ-novolac photoresists revisited: ^1H and ^{13}C NMR evidence for a novel photoreaction mechanism / D. Roy [et al.] // Magnetic resonance in chemistry. – 2003. – V. 41. – P. 84–90.
4. Вабищевич С.А. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами B^+ и P^+ / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
5. Преч Э. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных / Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер. – М.: Мир, Бином, 2006. – 438 с.
6. Вабищевич С.А. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С.А.Вабищевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59.
7. Бринкевич С.Д. Взаимодействие циклопентанона, γ -бутиролактона и их производных с α -гидроксиэтильными радикалами / С.Д. Бринкевич, И.А. Резцов, О.И. Шадыро // Химия высоких энергий. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 350–357.

УДК 528.85; 629.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЫХАЮЩИХ ЕЛЬНИКОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ АППАРАТУРЫ «МУЛЬТИСКАН»

Беляев Ю.В., Чумаков А.В., Попков А.П.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Мониторинг хвойных лесов с помощью спутникового дистанционного зондирования важен из-за большого экологического и экономическо-го значения этих лесов. Работа выполнялась с целью разработки новой методики экспресс-обработки данных, поступающих с аппаратуры «Мультискан», работавшей на борту авиа-носителя, для решения задачи обнаружения патологий хвойных лесных насаждений по данным оптических измерений. Метрологическая калибровка аппаратуры «Мультискан» проводилась в аккредитованной лаборатории оптико-физических измерений НИИ ПФП БГУ им. А.Н. Севченко.

Для оценки патологий лесных массивов использовались данные, полученные с помощью цифровых камер видимого и инфракрасного теплового диапазонов аппаратуры «Мультискан» [1, 2] с борта самолета «Даймонд» 05.08.2020 и 06.08.2020 в районе аэродрома «Зябровка» в Гомельской области. Наличие в аппаратуре системы пространственного позиционирования и записи

координат съемки данных позволило осуществить пространственную привязку видео-данных.

По полученным изображениям в результате съёмки тепловизионной камеры «FLIR» аппаратуры «Мультискан» была разработана методика выявления уровня заболеваемости леса.

Обработка тепловых ИК-кадров осуществлялась ПО обработки изображений «Monteverdi 2-0.8». Метод классификации «Fusion Clustering» позволяет объединить несколько методов классификации в один, более достоверный. Слияние выполняется либо посредством «голосования большинством», либо с помощью метода комбинирования «dempster shafer». Результат обработки представлен на рисунке 1. В результате классификации выделяются сухие кроны (окрашены белым) среди зелёного леса (оттенки серого, вплоть до чёрного). Далее методика предполагает преобразование классифицированного кадра к бинарному изображению (рисунки 2, 3), подсчёт «белых» пикселей (сухие кроны), «чёрных» пик-