ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2021, том 55, № 1, с. 66–75

РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ

УДК 544.54:541.6

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛЕНКАХ ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО РЕЗИСТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ γ-КВАНТАМИ ^{60}Co

© 2021 г. С. Д. Бринкевич[a, *], Д. И. Бринкевич[a], В. С. Просолович[a], Р. Л. Свердлов[a, b]

[a] Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030 Республика Беларусь

[b] Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, ул. Ленинградская, 14, Минск, 220006 Республика Беларусь

*E-mail: BrinkevichSD@bsu.by

Поступила в редакцию 04.08.2020 г.
После доработки 20.08.2020 г.
Принята к публикации 02.09.2020 г.

Методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследованы процессы, протекающие при облучении γ-квантами ^{60}Co пленок диазохинон-новолачного резиста ФП9120 на кремнии. Показано, что существенная модификация спектров НПВО фоторезистивных пленок заметна только при поглощенных дозах свыше 200 кГр и происходит за счет радиационно-индуцированных превращений метильных, метиленовых, гидроксиметильных и феноксильных групп фенол-формальдегидной смолы, а также *о*-нафтохинондиазида (фоточувствительного компонента). При этом в спектрах НПВО при дозах до 300 кГр не обнаружено признаков разрушения ароматических фрагментов резиста. В области валентных колебаний C=O связей при облучении наблюдается снижение интенсивности максимума полосы ~1700 см$^{-1}$ при одновременном ее уширении и смещении в высокоэнергетическую область на ~30 см$^{-1}$, обусловленное изменением ближайшего окружения C=O-группы. Увеличение интенсивности полосы при 1650 см$^{-1}$ свидетельствует о накоплении формальдегида при γ-облучении резиста в результате фрагментации гидроксиметильных остатков в составе фенолформальдегидной смолы.

Ключевые слова: ИК-спектрометрия, НПВО, диазохинон-новолачный фоторезист, γ-облучение, кремний

DOI: 10.31857/S0023119321010071

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию радиационно-индуцированных процессов в полимерах обусловлен широким применением таких материалов в космической технике и медицине [1, 2]. Кроме того, ионизирующее излучение является одним из эффективных способов модифицирования полимерных материалов, поскольку вследствие высокой молекулярной массы полимера даже сравнительно небольшие дозы могут вызвать существенное изменение его свойств [3]. Оно существенно изменяет поверхностные характеристики полимеров, в частности смачиваемость поверхности и ее адгезию к полупроводниковым материалам [4, 5].

Полимерные композиты широко используются в качестве резистов при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [6–8]. 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 [6]. 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 ИССЛЕДОВАНИЯ

Пленки позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 2.5 и 5.0 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [9]. В качестве подложек использовались пластины (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Перед формированием пленки фоторезиста пластины кремния подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорга-

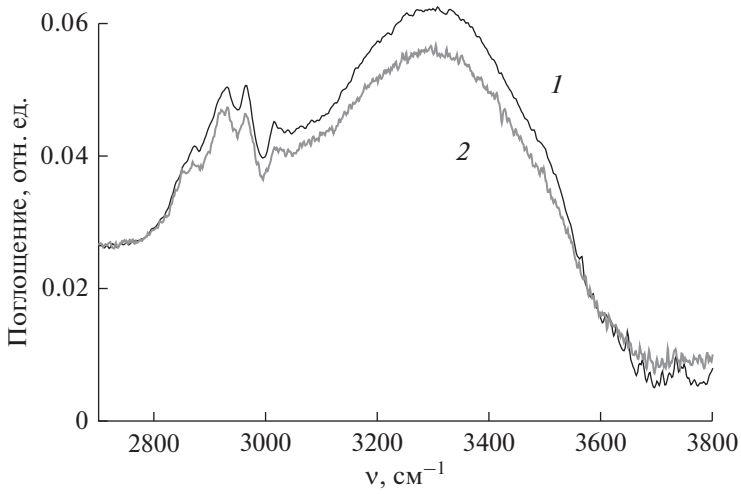


Рис. 1. Спектры НПВО облученных γ-квантами пленок фоторезиста ФП9120 толщиной 2.5 мкм в области валентных колебаний O–H- и C–H-связей. Доза, кГр: *1* – 0; *2* – 270.

нических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 мин при температуре 88°C. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по 5 фиксированным точкам.

Облучение фоторезистивных пленок γ-квантами дозой до 300 кГр проводилось на установке МРХ-γ-25М с источником ^{60}Co при комнатной температуре и атмосферном давлении. Мощность поглощенной дозы составляла 0.12 ± 0.003 Гр/с. Спектры НПВО структур фоторезист-кремний в диапазоне ν = 400–4000 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 И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Заметные изменения спектров НПВО фоторезистивных пленок наблюдались только при поглощенных дозах D ≥ 200 кГр (рис. 1–3). При меньших дозах спектры облученных и исходных пленок почти совпадали. Облучение дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности практически всех полос НПВО. Исключение составили лишь полосы в диапазоне волновых чисел 1550–1670 см$^{-1}$, обусловленные колебаниями углеродного скелета ароматического кольца и C=O-связей (рис. 2). Новых полос НПВО в облученных пленках фоторезиста ФП9120 не обнаружено.

Облучение γ-квантами дозой свыше 200 кГр приводило к снижению интенсивности валентных колебаний O–H- и алифатических C–H-связей (рис. 1). Наблюдалось также снижение максимумов полос деформационных колебаний C–H-связей в диапазоне волновых чисел 600–900 см$^{-1}$ (рис. 3). Отметим, что при облучении происходило перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метиленовыми $-CH_2$- и метильными $-CH_3$-группами. Так, если в исходных пленках (рис. 1, кривая *1*) интенсивности полос связанных с метиленовыми (ν ~ 2930 см$^{-1}$ [10, 11]) и метильными (ν ~ 2960 см$^{-1}$ [10, 11]) группами примерно равны, то после облучения интенсивность полосы ν ~ 2930 см$^{-1}$ (метиленовая $-CH_2$-группа) выше интенсивности полосы ν ~ 2960 см$^{-1}$ (метильная $-CH_3$-группа). Это свидетельствует о сшивании молекул резиста при облучении, наблюдавшемся ранее в работе [9].

В области валентных колебаний кратных связей при облучении наблюдается снижение интенсивности максимума полосы ~ 1700 см$^{-1}$ при одновременном ее уширении и смещении в высокоэнергетическую область на ~30 см$^{-1}$. Как известно [12, 13], полоса при ~1700 см$^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями C=O-связей в ароматических соединениях. При изменении ближайшего окружения положение максимума этой полосы может смещаться как в низкоэнергетическую, так и в высокоэнергетическую область. Так в альдегидах и при сопряжении с C=C-связями максимум полосы указанных колебаний смещается в низкоэнергетическую область [11, 13]. Отметим, что согласно [14] при ионной имплантации фоторезиста ФП9120 формируются хиноидные структуры, для которых максимум полосы поглощения должен находиться в диапазоне 1645–1690 см$^{-1}$ [15] в зависимости от числа сопряженных связей. С

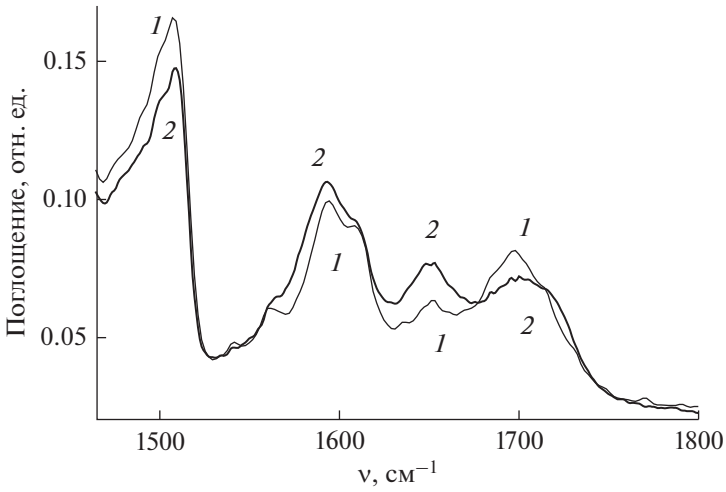


Рис. 2. Спектры НПВО облученных γ-квантами пленок фоторезиста ФП9120 толщиной 2.5 мкм в области колебаний ароматического кольца и C=O связей. Доза, кГр: *1* – 0; *2* – 270.

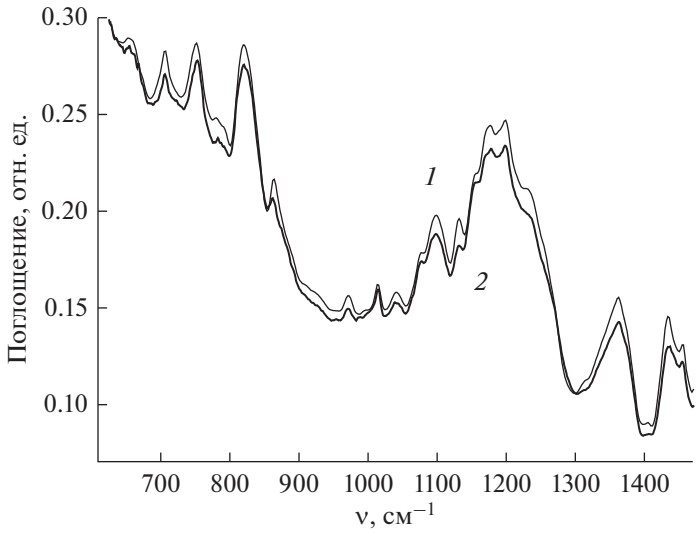


Рис. 3. Спектры НПВО облученных γ-квантами пленок фоторезиста ФП9120 толщиной 2.5 мкм. Доза, кГр: *1* – 0; *2* – 270.

другой стороны, в карбоновых кислотах и сложных ароматических эфирах максимум полосы валентных колебаний C=O-группы смещается в высокоэнергетическую область к 1715–1740 см$^{-1}$ [15, 16]. Формирование сложных ароматических эфиров при облучении является, вероятнее всего, основной причиной смещения максимума указанной полосы. Изменение ближайшего окружения C=O-связей, возникшее в результате облучения, приводит к уширению полосы при 1700 см$^{-1}$ вследствие разнопланового действия приведенных выше факторов.

Интенсивность полосы, обусловленной валентными колебаниями C=O-связей в формальдегиде CH_2=O, с максимумом при ~1650 см$^{-1}$ в ходе γ-облучения существенно возрастает (рис. 2). Это свидетельствует об образовании формальдегида при низкоинтенсивном γ-облучении. Отметим, что при электронном облучении дозой ~30 МГр интенсивность указанной полосы практически не изменялась.

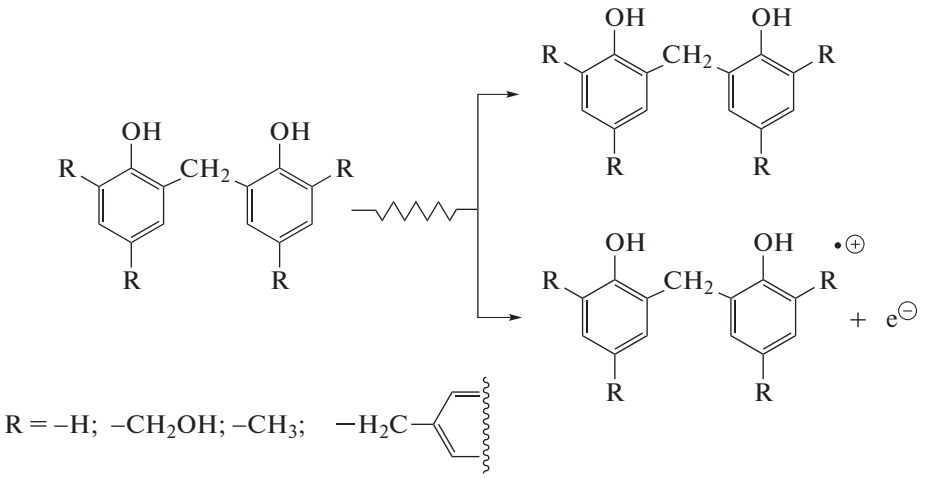
При γ-облучении рост поглощения наблюдался также в диапазоне волновых чисел 1540–1620 см$^{-1}$. Полоса в этом диапазоне волновых чисел обусловлена скелетными колебаниями ароматического кольца [10]. У этой полосы наблюдается несколько максимумов – наиболее интенсивный при 1595 см$^{-1}$ и малоинтенсивные при 1606, 1560

и 1540 см$^{-1}$ (рис. 2). При γ-облучении дозой свыше 200 кГр интенсивность основной полосы при 1595 см$^{-1}$ возрастала. Остальные максимумы исчезали; на их месте наблюдались только перегибы (рис. 2). По нашему мнению, такого рода изменения в ходе радиолиза могут быть связаны с уменьшением доли ароматических фрагментов, образующих межмолекулярную водородную связь с кислыми O–H-группами фенолов. Модификация структуры полосы поглощения при 1540–1620 см$^{-1}$ также обусловлена изменениями в количестве и природе заместителей при ароматическом кольце в ходе облучения.

В то же время интенсивность полосы с максимумом ~1500 см$^{-1}$, связанной с валентными колебаниями ArC–C-связей [15] заметно снижается при γ-облучении (рис. 2). Что указывает либо на элиминирование боковых заместителей при ароматическом кольце, либо на их существенную модификацию, например, с образованием кратных углерод-углеродных связей.

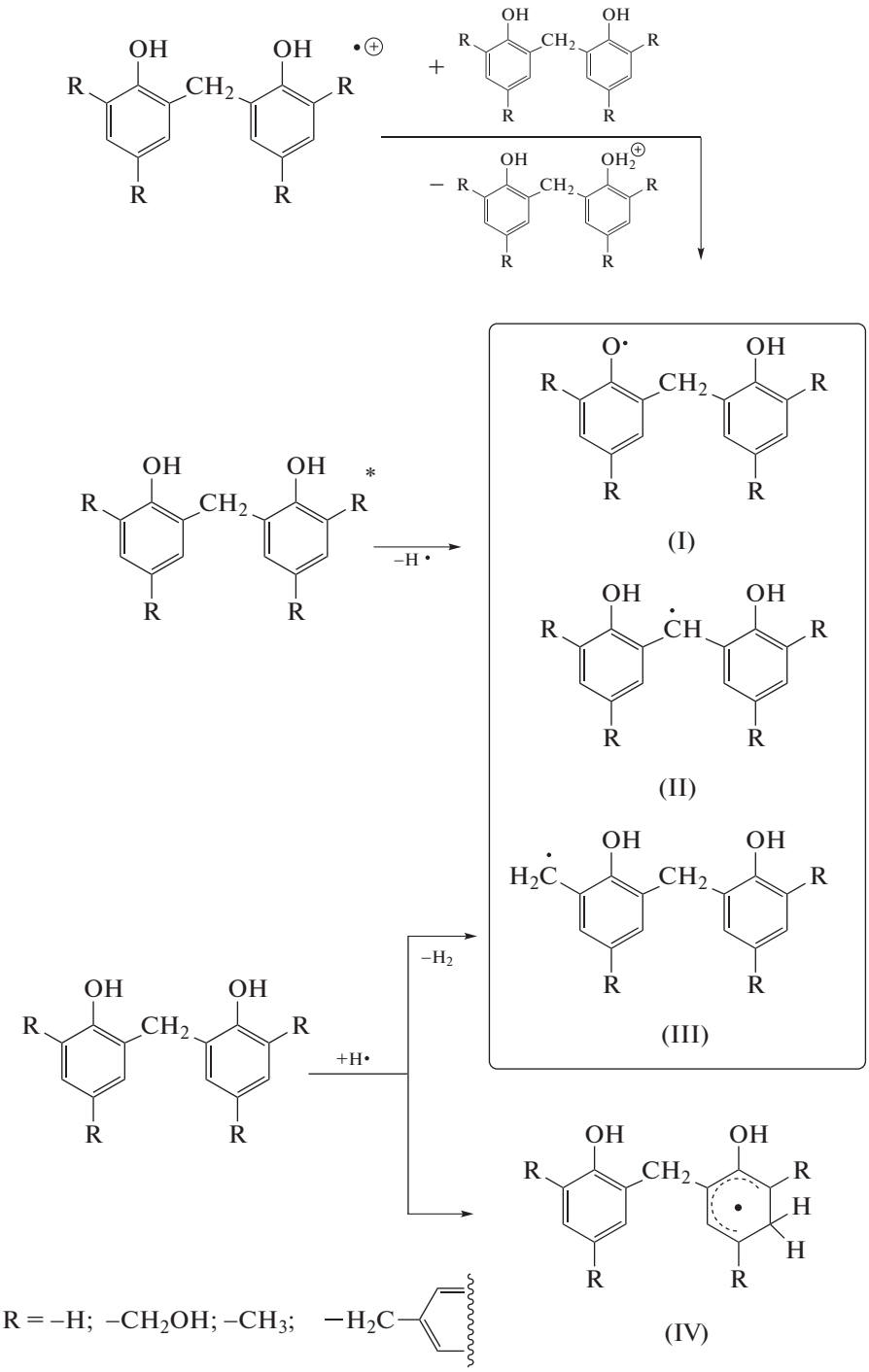
Интенсивность широкой структурированной полосы с несколькими максимумами в диапазоне волновых чисел 1050–1230 см$^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями C–O-связей, в частности, в феноксильной группе (C–OH) [11], при облучении снижается (рис. 3). Соотношение максимумов этой полосы изменяется. Такое поведение полос НПВО в диапазоне волновых чисел 1050–1230 см$^{-1}$ может свидетельствовать об образовании сложноэфирных сшивок с OH-группами фенольного типа. Такие сшивки наблюдались ранее при имплантации Sb^+ в пленки фоторезиста ФП9120, что приводило к увеличению их микротвердости [8]. Отметим, что ранее [9] упрочнение пленок ФП9120 наблюдалось при облучении γ-квантами ^{60}Co. С другой стороны, аналогичный эффект может давать также окисление фенолов до хинонметинов, в результате которого феноксильная C–OH-группа превращается в C=O.

Изменения в γ-облученном фоторезисте, наблюдаемые методом ИК-спектроскопии НПВО, обусловлены радиационно-индуцированными процессами, протекающими в объеме полимерной пленки. В отличие от ионной имплантации [8, 11, 17] поглощение энергии ионизирующего излучения происходит по всему объему полимерного композита. Кроме того, мощность поглощенной дозы при γ-радиолизе на 5–6 порядков ниже, чем при облучении ионами B^+ или P^+. Поэтому образующиеся в результате реакций возбуждения (1) и ионизации (2) фенол-формальдегидной смолы частицы будут равномерно распределены по всему объему фоторезиста в нано- и субнаномолярных концентрациях, что исключает кластеризацию радиационных эффектов.

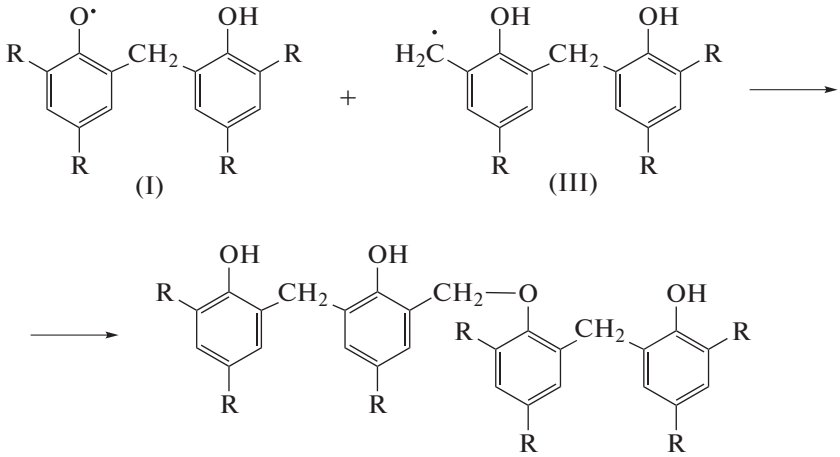


В результате последующих ион-молекулярных процессов, например, по реакции (3), распада возбужденных молекул (4), а также различных радикал-молекулярных взаимодействий, например, с участием атомов водорода по реакциям (5) и (6) будет образовываться довольно разнообразный набор радикальных интермедиатов. Наиболее термодинамически устойчивыми из них будут радикалы феноксильного (I) и метиленового типа (II). Поскольку в составе полимерной смолы ДХН-резиста присутствуют крезольные (гидроксиметилбензольные) фрагменты в ходе реакций (3)–(5) при облучении будут также образовываться и ради-

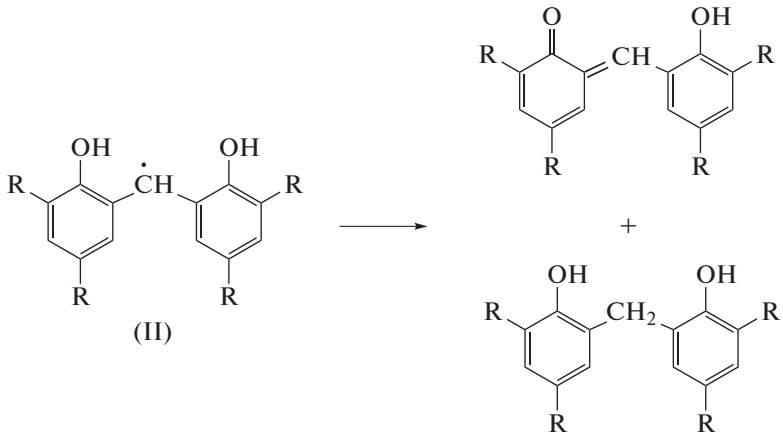
калы бензильного типа (III). Как и большинство других ароматических соединений [18, 19], фенолформальдегидные смолы способны присоединять электроны и атомы водорода (реакция (6)) с образованием радикалов пентадиенильного типа (IV).



Обнаруженное методами ИК-спектрометрии НПВО снижение интенсивности поглощения алифатических С–Н-связей и фенольных О–Н-групп при γ-облучении ДХН-фоторезиста происходит в результате бирадикальных процессов рекомбинации и диспропорционирования, например, по реакциям (7) и (8). Можно заметить, что радикалы бензильного типа (III) в ходе рекомбинации образуют новые $-CH_2$-группы, что объясняет наблюдаемое при радиолизе перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метильными (2960 $см^{-1}$) и метиленовыми (2930 $см^{-1}$) группами, в пользу последних.



(7)

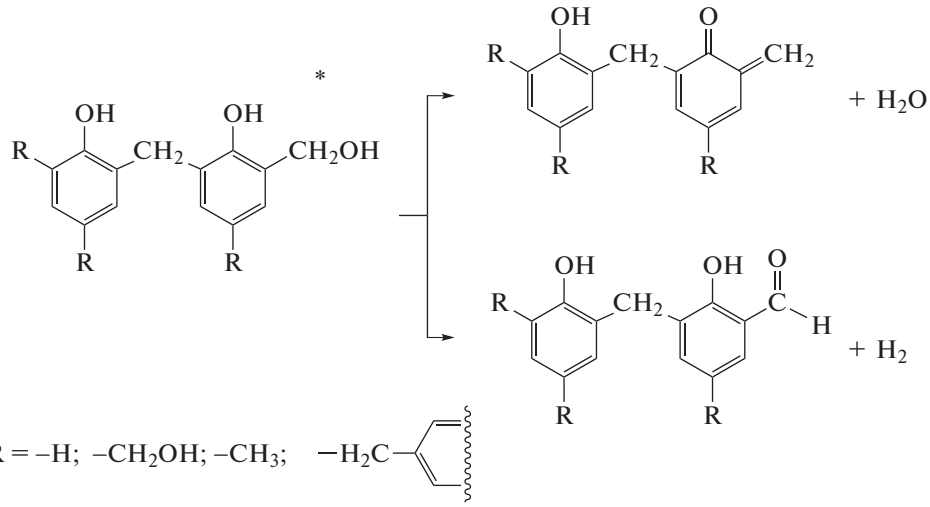


(8)

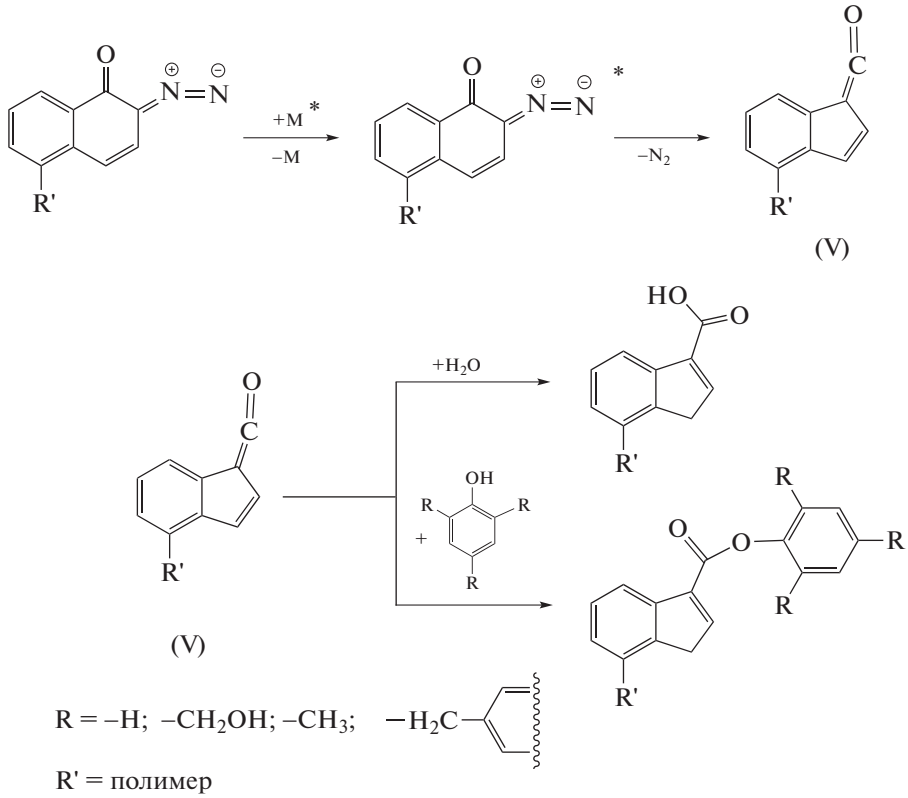
R = –H; –CH_2OH; –CH_3; –H_2C–

Помимо отмеченных выше реакций уменьшение интенсивности полос поглощения алифатических C–H-связей и фенольных O–H-групп при γ-облучении ДХН-фоторезиста происходит и в результате молекулярных процессов фрагментации возбужденных частиц фенолформальдегидной смолы, в частности, дегидратации и дегидрирования по реакциям (9) и (10). Оба процесса сопровождаются высвобождением низкомолекулярных летучих продуктов и приводят к появлению новых структур с кратными C=O-связями.

В исходных пленках фоторезиста полоса поглощения при ~1700 $см^{-1}$ обусловлена в основном валентными колебаниями карбонильной группы *о*-нафтохинондиазида. Уширение этой полосы при одновременном смещении в высокоэнергетическую область на ~30 $см^{-1}$ в процессе γ-облучения, по нашему мнению, связано с двумя типами процессов. Во-первых, в результате передачи энергии возбуждения с макромолекул фенолформальдегидной смолы на остатки *о*-нафтохинондиазида (фоточувствительного компонента ДХН-фоторезиста) происходит его разложение по реакции (11). Во-вторых, в качестве продуктов радиационно-индуцированных превращений полимерного компаунда образуются новые карбонилсодержащие соединения, которые достаточно сильно отличаются между собой по строению и, соответственно, по положению максимума поглощения C=O-группы. Так, например, в ходе реакций (8) и (9) образуются новые карбонильные группы в хинонметиновых фрагментах фенол-формальдегидной смолы, а вследствие дегидрирования по реакции (10) – в арилальдегидных остатках.



В ходе γ-радиолиза ДХН-резиста будут также образовываться ароматические карбоновые кислоты и сложные эфиры вследствие превращений кетена (V). Поскольку остаточная влажность пленки обычно составляет ~1%, соединение (V) преимущественно трансформируется в 1-Н-инден-3-карбоновую кислоту в результате присоединения воды по реакции (12). Реализация такого процесса при УФ-облучении пленок ДХН-резиста лежит в основе его использования в фотолитографии [7]. Нами ранее было показано [8], что в условиях глубокого вакуума при ионной имплантации кетен (V) преимущественно будет взаимодействовать с НО-группами фенол-формальдегидной смолы по реакции (13) с образованием сложных эфиров ароматических соединений.



Одной из характерных особенностей ИК-спектров НПВО пленок ДХН-резистов, имплантированных ионами B^+ и P^+, было дозозависимое увеличение поглощения в диапазоне волновых

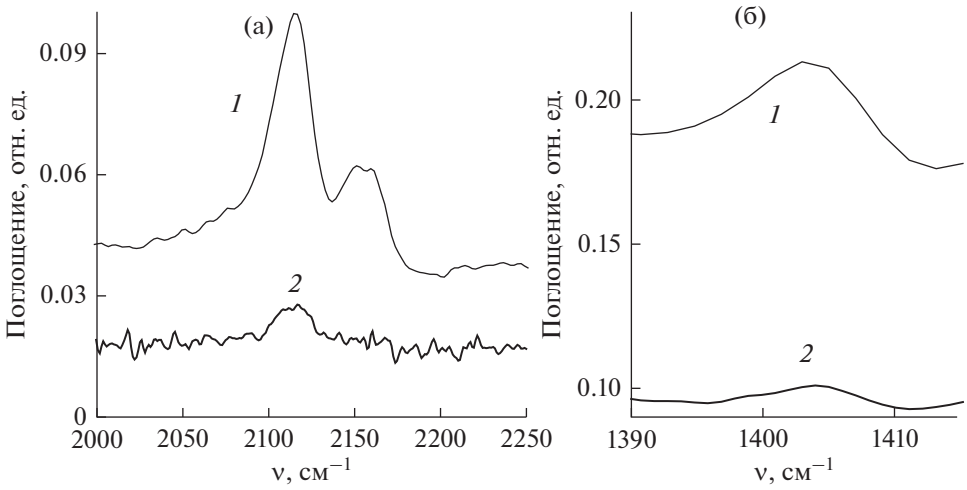
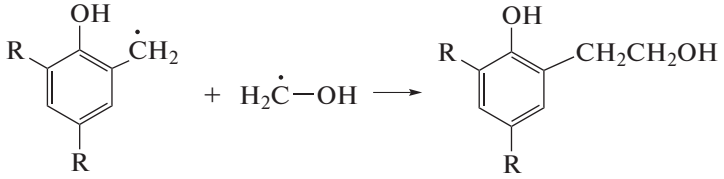


Рис. 4. Спектры НПВО "засвеченных" пленок ФП9120 толщиной 5.0 мкм в области колебаний, обусловленных C=C=O-связями: *1* – до γ-облучения; *2* – в дозе 200 кГр.

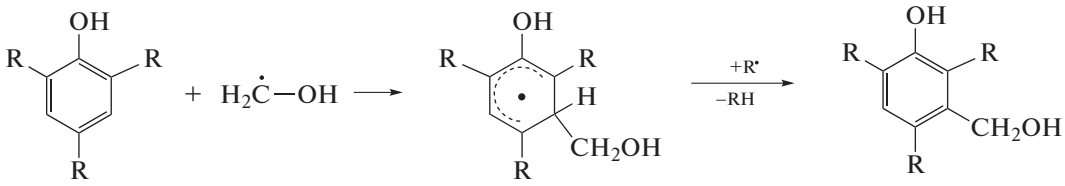
чисел 2100–2060 см$^{-1}$ и при ~1405 см$^{-1}$ [20]. Такие изменения обусловлены валентными колебаниями двойных кумулятивных связей >C=C=O [11, 21] в кетене (V), образующемся в результате деазотирования *о*-нафтохинондиазида по реакции (11). В отличие от ионной имплантации при γ-облучении пленок ДХН резистов образование соединения (V) нами не наблюдалось. Даже более того, в том случае, если для γ-облучения использовались пленки, предварительно облученные светом в видимом и УФ диапазоне или длительно хранившиеся, облучение γ-квантами приводит к исчезновению характерных для кетена (V) полос как при 2100–2060 см$^{-1}$ (рис. 4а), так и при ~1405 см$^{-1}$ (рис. 4б). Эти полосы значительно менее устойчивы к γ-облучению по сравнению с другими структурами в ИК-спектрах пленок фоторезиста. Так, заметное снижение их интенсивностей наблюдалось уже при дозах ~2–10 кГр, а при 200 кГр указанные полосы едва заметны на фоне шумов (рис. 4). Помимо уже рассмотренных реакций нуклеофильного присоединения воды (12) и фенолов (13) по активированной кратной >C=C<-связи кетена (V), его интенсивное разложение при γ-радиолизе может быть также связано с высокой реакционной способностью по отношению к электронам, атомам водорода и, в меньшей степени, углеродцентрированным радикалам.

Отдельно следует прокомментировать изменение интенсивности полосы при ~1650 см$^{-1}$, ответственной за валентные колебания C=O-связи в формальдегиде CH_2=O. Это соединение в небольшом количестве неизбежно содержится в фенолформальдегидных смолах. Однако непрореагировавший в ходе производства полимера CH_2=O по реакции (14) хорошо присоединяет электроны, атомы водорода и углеродцентрированные радикалы [22, 23] по кратной поляризованной связи. Последующая рекомбинация гидроксиметильных радикалов, например, по реакции (15) или присоединение этих радикалов по ароматическим фрагментам (16) должны приводить к достаточно быстрому исчезновению формальдегида из полимерной пленки.

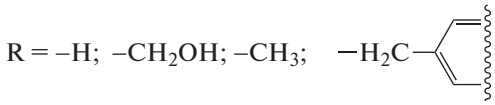
$$H_2C{=}O + H\cdot\ (e^{\ominus}) \longrightarrow H_2\dot{C}{-}OH\ \left(H_2\dot{C}{-}O^{\ominus}\right) \quad (14)$$



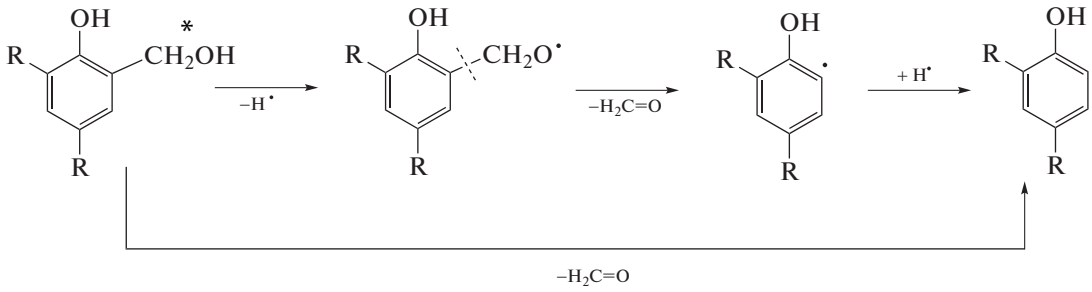
(15)



(16)

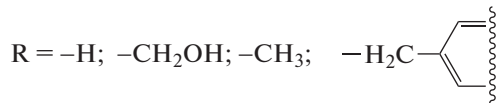


Однако, полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют о накоплении $CH_2{=}O$ в пленках ДХН-резиста при γ-облучении. Это однозначно свидетельствует о реализации процессов фрагментации гидроксиметильных остатков в составе полимерной смолы в ходе радиолиза. Механизм такого рода реакций не описан в литературе. Очевидно, что возбужденные частицы фенол-формальдегидной смолы являются предшественником $CH_2{=}O$, но его образование может происходить как через стадию фрагментации кислородцентрированного радикала по схеме (17), так и в результате реализации молекулярного процесса (18).



(17)

(18)



Косвенным подтверждением отщепления гидроксиметильных фрагментов от бензольных колец фенол-формальдегидной смолы в ходе γ-облучения ДХН-резиста является снижение интенсивности полосы при ~1500 см$^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями углерод-углеродных связей при ароматических фрагментах.

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 фенол-формальдегидной смолы (феноксильных, гидроксиметильных, метильных и метиленовых групп), а также фоточувствительного компонента – *о*-нафтохинондиазида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенная модификация спектров НПВО фоторезистивных пленок заметна только при поглощенных дозах свыше 200 кГр и происходит за счет радиационно-индуцированных превращений метильных, метиленовых, гидроксиметильных и феноксильных групп фенол-формальдегидной смолы, а также *о*-нафтохинондиазида (фоточувствительного компонента). При этом в спектрах НПВО при дозах до 300 кГр не обнаружено признаков разрушения ароматических фрагментов резиста. Обнаружено, что при γ-облучении происходит перераспределение интенсивности полос колебаний, обусловленных метильными и метиленовыми группами в пользу последних. В области валентных колебаний C=O-связей в ходе радиолиза наблюдается снижение интенсивности максимума полосы ~1700 см$^{-1}$ при одновременном ее уширении и смещении в высокоэнергетическую область на ~30 см$^{-1}$. Такие изменения обусловлены расходованием *о*-нафтохинондиазида и образованием новых карбонилсодержащих соединений: хинонметинов, арилальдегидов, карбоновых кислот и сложных эфиров. Увеличение интенсивности полосы при 1650 см$^{-1}$ свидетельствует о накоплении фор-

мальдегида при γ-облучении резиста в результате фрагментации гидроксиметильных остатков в составе фенолформальдегидной смолы. При дозах более 200 кГр наблюдался рост интенсивности полосы при ~1600 см$^{-1}$, обусловленной скелетными колебаниями ароматического кольца, что может быть связано с уменьшением доли гидроксильных групп, участвующих в образовании межмолекулярных водородных связей с бензольными кольцами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clough R.L.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2001. V. 185. P. 8.
2. *Кабанов В.Я., Фельдман В.И., Ершов Б.Г., Поликарпов А.П., Кирюхин Д.П., Апель П.Ю.* // Химия высоких энергий. 2009. Т. 43. № 1. С. 5.
3. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под общ. ред. М.Я. Мельникова. М.: МГУ. 2009. С. 172.
4. *Guven O., Alacakir A., Tan E.* // Radiat. Phys. Chem. 1997. V. 50. № 2. P. 165.
5. *Вабищевич С.А., Бринкевич С.Д., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.* // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. № 1. С. 54.
6. *Debmalya Roy, Basu P.K., Raghunathan P., Eswaran S.V.* // Magnetic resonance in chemistry. 2003. V. 41. P. 84.
7. *Моро У.* Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2. М.: Мир, 1990. 632 с.
8. *Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Вабищевич Н.В., Оджаев В.Б., Просолович В.С.* // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 3. С. 193.
9. *Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Бринкевич С.Д.* // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2016. № 12. С. 30.
10. Применение ИК и ПМР спектроскопии при изучении строения органических молекул Учебно-методическое пособие. Сост. Л.Г. Самсонова. Томск. 2016, 60 с.
11. *Бринкевич С.Д., Гринюк Е.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.* // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. № 5. С. 377.
12. *Бельков М.В., Бринкевич С.Д., Самович С.Н., Скорняков И.В., Толсторожев Г.Б., Шадыро О.И.* // Журн. прикладной спектроскопии. 2011. Т. 78. № 6. С. 851.
13. *Толсторожев Г.Б., Скорняков И.В., Бельков М.В., Шадыро О.И., Бринкевич С.Д., Самович С.Н.* // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 202.
14. *Олешкевич А.Н., Лапчук Н.М., Оджаев В.Б., Карпович И.А., Просолович В.С., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д.* // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 1. С. 58.
15. *Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К.* Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир, Бином. 2006. 438 с.
16. Методы исследования древесины и ее производных: Учебное пособие / Под ред. Н.Г. Базарновой. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. 160 с.
17. *Бринкевич С.Д., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.* // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 6. С. 1. DOI: 10.31857/S0544126920060022
18. *Бринкевич С.Д., Малиборский А.Я., Капусто И.А., Свердлов Р.Л., Григорьев Ю.В., Ивашкевич О.А., Шадыро О.И.* // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. № 2. С. 140.
19. *Сараева В.В.* Радиолиз углеводородов в жидкой фазе. Современное состояние вопроса. М.: МГУ, 1986. 256 с.
20. *Просолович В.С., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Гринюк Е.В., Янковский Ю.Н.* // “Взаимодействие излучений с твердым телом”. Материалы 13 межд. конф. Минск. 30.09–3.10.2019. – Мн., Изд. Центр БГУ, 2019. С. 169.
21. *Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н.* // Журн. Белорусского государственного университета. 2020. № 2. С. 62.
22. *Бринкевич С.Д., Резцов И.А., Шадыро О.И.* // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 5. С. 350.
23. *Петряев Е.П., Шадыро О.И.* Радиационная химия бифункциональных органических соединений. Минск: Университетское, 1986.