

УДК 544.54:541.6

ЭПР СПЕКТРОСКОПИЯ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ P⁺ И В⁺ ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО РЕЗИСТА

© 2020 г. Д. И. Бринкевич^{а, *}, С. Д. Бринкевич^а, А. Н. Олешкевич^а,
В. С. Просолович^а, В. Б. Оджаев^а

^аБелорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220050 Беларусь

*E-mail: BrinkevichSD@bsu.by

Поступила в редакцию 28.08.2019 г.

После доработки 28.08.2019 г.

Принята к публикации 21.10.2019 г.

С использованием метода ЭПР установлена природа стабильных радикалов в имплантированных ионами бора и фосфора пленках позитивного фоторезиста ФП9120, нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния. При дозе имплантации $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в спектре ЭПР наблюдается узкая синглетная изотропная линия с g -фактором 2.0064. При увеличении дозы до $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ величина ее g -фактора снижалась до значений, близких к g -фактору свободного электрона. Концентрация парамагнитных центров была выше при имплантации ионов фосфора, чем в образцах имплантированных ионами бора. Указанное обстоятельство связано с тем, что при имплантации В⁺ вклад ядерного торможения мал и не превышает 10–15% от электронного торможения. Образование долгоживущих парамагнитных центров, регистрируемых методом ЭПР спустя недели после имплантации позитивного фенолформальдегидного фоторезиста, обусловлено наличием в структуре радикалов мощной системы сопряженных >C=O и –C=C– кратных связей.

Ключевые слова: фоторезист, имплантация, фосфор, бор, ЭПР, семихиноидные анион-радикалы

DOI: 10.31857/S0023119320020047

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных методов управления электрофизическими, прочностными и биологическими свойствами приповерхностных слоев полимеров является ионная имплантация [1, 2]. Так, при облучении ионами наблюдается монотонный рост электропроводности имплантированного слоя, значение которой может меняться на 10–18 порядков величины [3]. Преимуществом магниторезонансных методов (в частности, ЭПР) является высокая чувствительность, которая особенно важна при исследовании тонких пленок. Метод ЭПР-спектроскопии широко применяется в физике, химии, биологии и медицине с середины прошлого столетия. Он является основным, а часто и единственно возможным, методом исследования свободнорадикальных процессов [4].

Целью работы являлось исследование радиационно-индуцированных процессов в пленках диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 при имплантации ионов бора и фосфора, а также облучении γ -квантами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки позитивного фоторезиста ФП9120, представляющего собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы, толщиной 1.0, 1.8 и 2.5 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [5]. Толщина h пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1.0 мкм при скорости вращения $\nu = 8300 \text{ об./мин}$; 1.8 мкм – при $\nu = 2900 \text{ об./мин}$; 2.5 мкм – при $\nu = 1200 \text{ об./мин}$. 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 неорганических 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.

Спектры ЭПР пленок фоторезиста регистрировались на спектрометре “RadioPan SE/X-2543” с резонатором H₁₀₂ в X-диапазоне при комнатной температуре. Максимальная мощность СВЧ из-

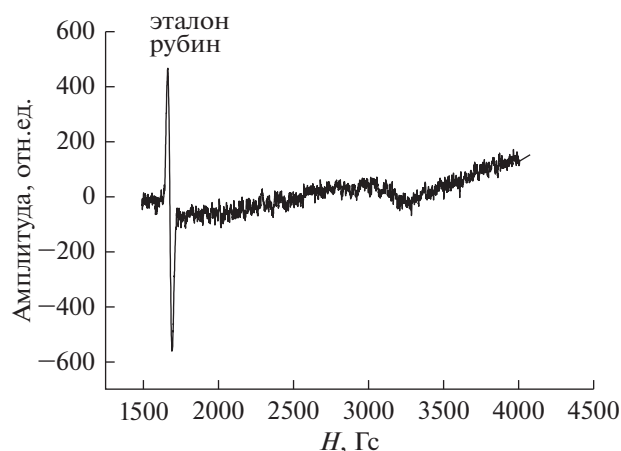


Рис. 1. Спектр ЭПР пленки фоторезиста толщиной 1.0 мкм, облученной γ -квантами дозой 270 кГр.

лучения в резонаторе – 200 мВт. Частота модуляции магнитного поля – 100 кГц, амплитуда – 0.1 мТл. Для контроля добротности измерительного резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ-излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке резонатора. Чувствительность спектрометра составляла 3×10^{12} спин/мТл.

Имплантация ионами фосфора P⁺ (энергия 100 кэВ) и бора B⁺ (энергия 60 кэВ) в интервале доз 6×10^{14} см⁻²– 1.2×10^{16} см⁻² при плотности ионного тока $j = 4$ мкА/см² проводилась в остаточном вакууме не хуже 10^{-5} мм. рт. ст. на ионно-лучевом ускорителе “Везувий-6”. Облучение полимерных пленок γ -квантами дозой до 270 кГр. проводилось на установке МРХ- γ -25М с источником ⁶⁰Со. Мощность поглощенной дозы составляла 0.25 ± 0.007 Гр/с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На спектрах ЭПР необлученной пленки фоторезиста линий поглощения не наблюдалось. Облучение γ -квантами ⁶⁰Со дозой до 270 кГр и ионная имплантация дозами до 5×10^{15} см⁻² также не при-

водили к образованию стабильных парамагнитных центров. Измеренный через 4 ч после прекращения облучения спектр (рис. 1) был идентичен спектру необлученного фоторезиста.

При дозе $6 \cdot 10^{15}$ см⁻² в спектре ЭПР имплантированных P⁺ пленок появляется узкая синглетная линия шириной ~4 Гс. В имплантированных бором образцах она не наблюдалась, вероятнее всего, из-за низкой интенсивности. Форма линии характерна для образцов, содержащих парамагнитные центры с анизотропным g -фактором [6]. Ее анизотропные компоненты $g_{\parallel} = 2.0064$ и $g_{\perp} \sim 2.0015$. Линии ЭПР с близкими анизотропными компонентами наблюдались авторами [7] в облученном лигнине и связывались с образованием ион-радикала семихинона. Отмечалось, что частичная локализация несвязанного электрона на атоме кислорода вследствие сильной спин-орбитальной связи приводит к анизотропии g -фактора.

После увеличения дозы ионной имплантации до 1.2×10^{16} см⁻² линия ЭПР смещалась в высокополевую часть спектра и наблюдалась во всех исследовавшихся образцах (рис. 2). Величина ее g -фактора снижалась до значений 2.00127–2.00254 (табл. 1), что очень близко к g -фактору свободного электрона ($g_s = 2.0023$). Линия становится ассиметричной (рис. 3), причем параметр ассиметрии колеблется в широких пределах: $a/b = (1.2–1.75)$, где a и b – амплитуды соответственно низкополевой и высокополевой частей первой производной линии ЭПР поглощения. Это свидетельствует о сильном спин-орбитальном взаимодействии, которое приводит к уменьшению величины g -фактора в соответствии с выражением [6]:

$$g = g_s(1 - a\lambda/\Delta E), \quad (1)$$

где λ – константа спин-орбитальной связи, ΔE – расщепление между основным и ближайшим по энергии орбитальным состоянием, участвующим в орбитальном движении; a – множитель, зависящий от природы парамагнитного центра и ориентации его по отношению к внешнему магнитному полю.

Таким образом, при увеличении дозы имплантации наблюдается усиление спин-орбитального взаимодействия, обусловленное, вероятнее всего,

Таблица 1. Параметры линии ЭПР в имплантированных дозой 1.2×10^{16} см⁻² пленках фоторезиста

Ион	Толщина пленки, мкм	g	ΔH , Гс	Амплитуда, отн. ед.	Концентрация радикалов, отн. ед.
P ⁺	1.0	2.0018	5.30	1029.7	28924
	2.5	2.0020	5.47	782.3	23407
B ⁺	1.0	2.0021	8.86	296.6	23283
	2.5	2.0014	9.05	192.9	15799

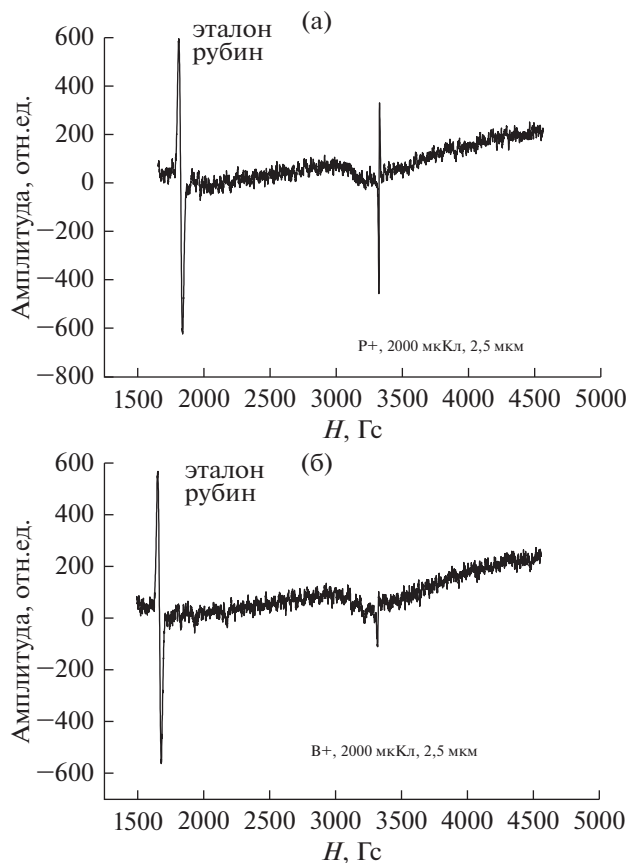


Рис. 2. Спектр ЭПР пленки фоторезиста толщиной 2.5 мкм, облученной ионами фосфора (а) и бора (б) при дозе имплантации $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

увеличением степени делокализации неспаренного электрона.

Концентрация парамагнитных центров была выше при имплантации ионов фосфора, чем в образцах имплантированных ионами B^+ (табл. 1). При этом ширина линии ЭПР в имплантированных P^+ пленках была почти в 2 раза меньше. Сужение линии ЭПР свидетельствует о росте обменного взаимодействия, которое обусловлено перекрытием областей делокализации парамагнитных центров [8]. Отметим, что концентрация парамагнитных центров была выше в более тонких пленках (1.0 мкм) как при имплантации бора, так и фосфора (табл. 1). Это обусловлено тем, что поглощенная доза в расчете на единицу объема полимера будет меньше для толстых пленок (2.5 мкм), а, следовательно, и степень их радиационной конверсии.

Наличие в спектре ЭПР одиночной линии с g -фактором, близким к g -фактору свободного электрона, характерно для различных углеродсодержащих материалов: углей, графита, пиролизованых, облученных и исходно-проводящих по-

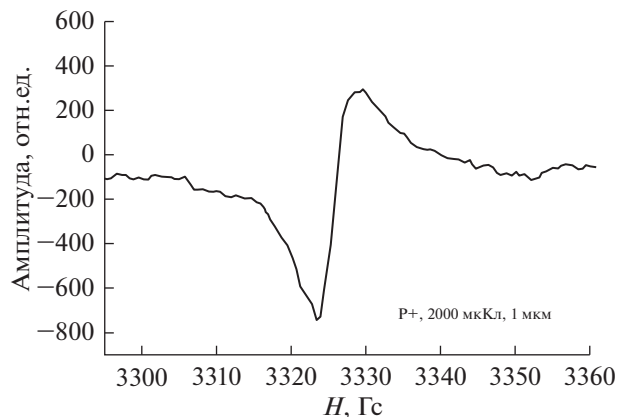


Рис. 3. Форма линии ЭПР пленки фоторезиста толщиной 1.0 мкм, облученной ионами фосфора дозой $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

лимеров [8]. Конкретная структура этого парамагнитного центра окончательно не установлена. Мало отличаясь по ширине и величине g -фактора синглеты могут принадлежать различным радикалам — например, имеющим сопряженные углерод-углеродные связи или с частичной локализацией спиновой плотности на кислородном атоме (феноксильные радикалы, семихиноны и др.) [7]. Так, линия ЭПР с g -фактором 2.0025 ± 0.0005 , наблюдавшаяся ранее в различных полимерах (полиэтилен, ПЭТФ, полиимид) при имплантации ионов азота и аргона по мнению авторов [8] обусловлена неспаренными электронами, делокализованными по π -полисопряженной системе. Линия с g -фактором 2.0020 наблюдалась также в композитах полиметилметакрилат-фуллерен C_{60} и связывалась с комплексами фуллерен-кислород [9].

Отметим, что для радикалов монозамещенных фенолов характерны значения g -фактора 2.0048–2.0037 в зависимости от наличия и состава боковых групп [4]. Таким образом, наблюдавшиеся в настоящей работе парамагнитные центры, вероятнее всего, не являются фенольными радикалами, но, по всей видимости, включают в свой состав атомы кислорода.

Изменение потерь в резонаторе (добротности резонатора) при внесении в него исследуемых образцов контролировалось по изменению амплитуды эталонного образца рубина, наклеенного на стенку резонатора. Добротность контура (амплитуда сигнала эталона) снижалась при увеличении толщины пленки как в исходных, так и в имплантированных образцах на 7–14% (табл. 2). После имплантации амплитуда сигнала эталона возрастала, причем более интенсивно в случае внедрения ионов фосфора (табл. 2). Указанный факт является неожиданным, поскольку при имплантации растет электрическая (омическая) проводимость полимерных пленок [8], что должно приводить к сниже-

Таблица 2. Амплитуда сигнала ЭПР (в отн. ед.) эталона (рубина) при внесении в резонатор пленок фоторезиста на кремнии

Толщина пленки, мкм	Необлученные	P ⁺ 1.2 × 10 ¹⁶ см ⁻²	B ⁺ 1.2 × 10 ¹⁶ см ⁻²
1.0	1032	1304	1286
2.5	918	1213	1130

нию добротности контура и, соответственно, к уменьшению амплитуды сигнала эталона.

Увеличение добротности резонатора с имплантированными образцами по сравнению с исходными пленками может быть связано с присутствием в пленке фоторезиста небольшого количества воды (до 1% от веса фоторезиста). Вода может также поступать в необлученный полимер из атмосферы. Известно [8], что вода хорошо поглощает СВЧ излучение. Поэтому при помещении пленки фоторезиста с остатками воды в резонатор, его добротность ухудшается и, соответственно, падает амплитуда сигнала ЭПР эталона. Причем чем толще пленка фоторезиста, тем больше количество воды в ней и хуже добротность резонатора. В условиях имплантации (вакуум не менее 10⁻⁵ мм. рт. ст.) происходит удаление (испарение + реакции дегидратации) воды из фоторезиста, что должно приводить к увеличению добротности резонатора и, соответственно, к усилению сигнала ЭПР эталона, что и наблюдалось в эксперименте.

Для объяснения полученных экспериментальных данных необходимо принимать во внимание, что фенолформальдегидные смолы — основной компонент фоторезиста — являются сетчатыми полимерами с достаточно вариативным составом. Их средняя молекулярная масса, степень сшивки и другие физико-химические свойства сильно зависят от соотношения фенола и формальдегида при конденсации, а также условий отверждения смолы (температура, время, механическое воздействие) и последующих технологических обработок [10].

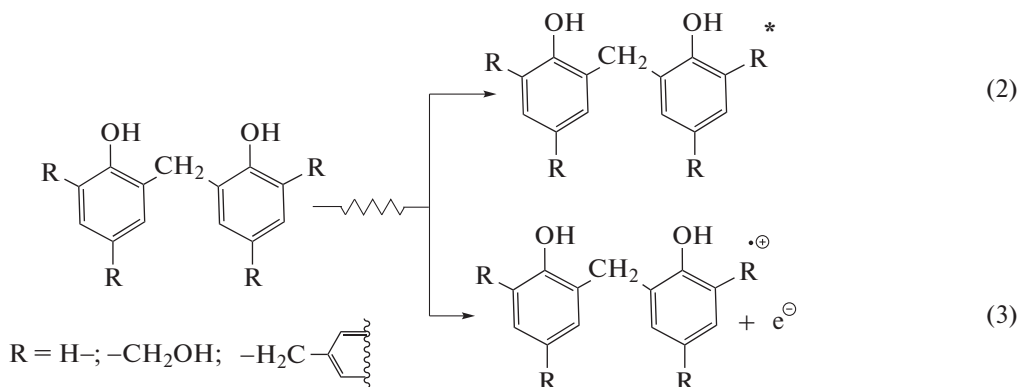
Ионное облучение фоторезиста индуцирует сложный комплекс физических и химических процессов, оказывающих заметное влияние на структу-

ру и состав полимеров. Для легких ионов, в частности B⁺, основным механизмом торможения в полимере является взаимодействие электронами материала мишени — электронное торможение [8]. Помимо ионов в ходе этого процесса также образуются возбужденные макромолекулы полимера, как в результате непосредственного воздействия ионизирующей частицы, так и вследствие вторичных процессов нейтрализации разноименно заряженных частиц в треке.

Ядерное торможение вносит существенный вклад при низких энергиях — в конце пробега ионов — и приводит к деструкции макромолекул, образованию нарушенных областей и, в дальнейшем (при больших дозах), к формированию аморфизированного углеродного слоя. С увеличением массы высокоэнергетической частицы доля потерь на ядерное торможение будет возрастать. Для иона P⁺ с энергией 60 кэВ она составляет 40% [8].

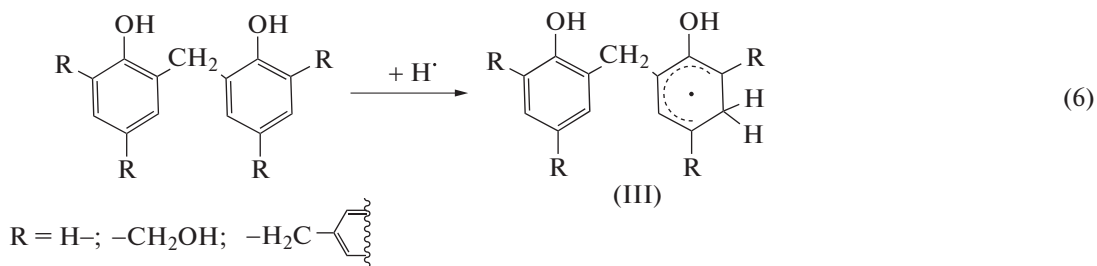
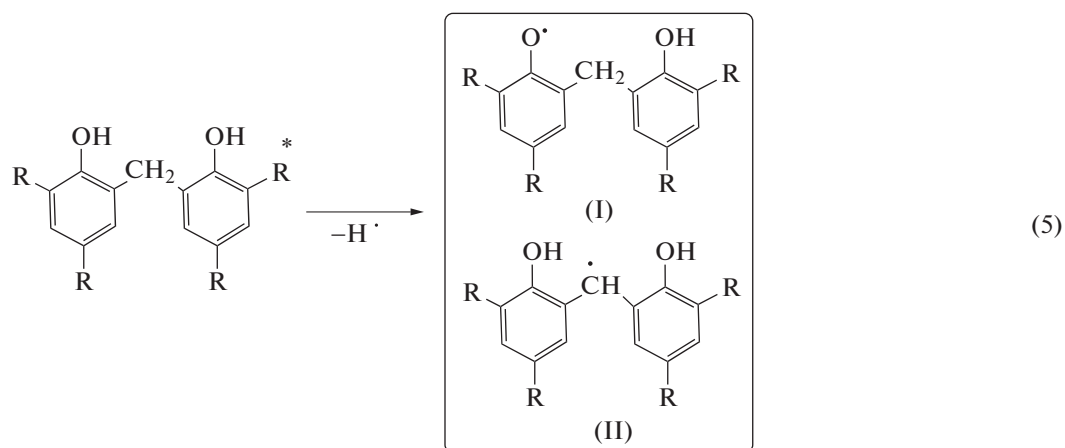
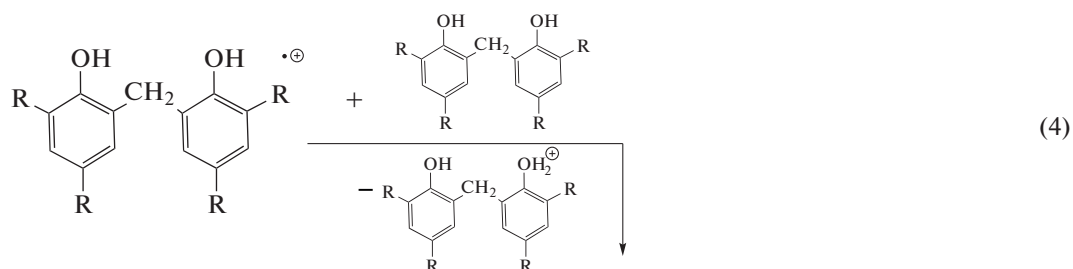
Вклад первичной ионизации молекул при ионной имплантации полимеров доминирует — на него приходится свыше половины энергии, потерянной при электронном торможении (по некоторым данным до 80%) [11]. Выбитые электроны достаточно подвижны, они могут перемещаться на расстояния порядка 100 нм в полимере, вызывая радиационно-индуцированные процессы и образуя латентные треки [8, 11].

В отличие от корпускулярного излучения γ-кванты изотопных источников передают энергию только электронам и не взаимодействуют с ядрами атомов. В упрощенном виде воздействие высокоэнергетических ионов и γ-излучения на фенолформальдегидную смолу можно свести к возбуждению (реакция 2) и ионизации макромолекул (реакция 3) полимера.



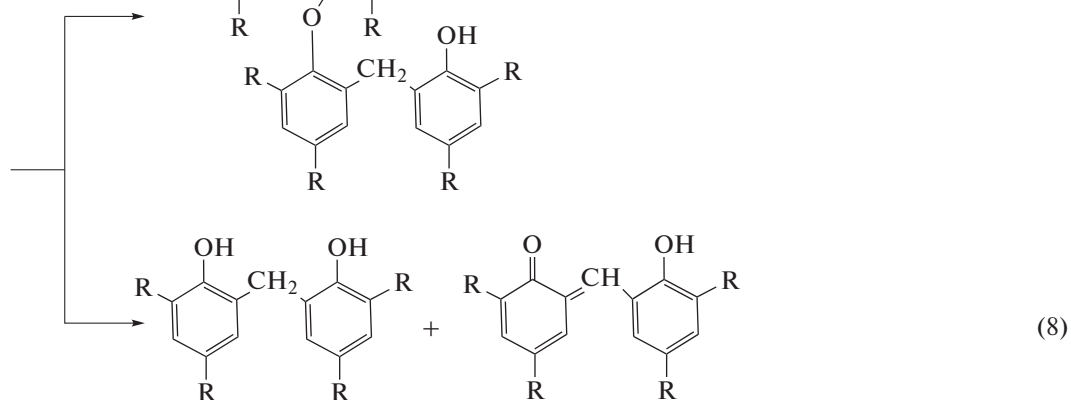
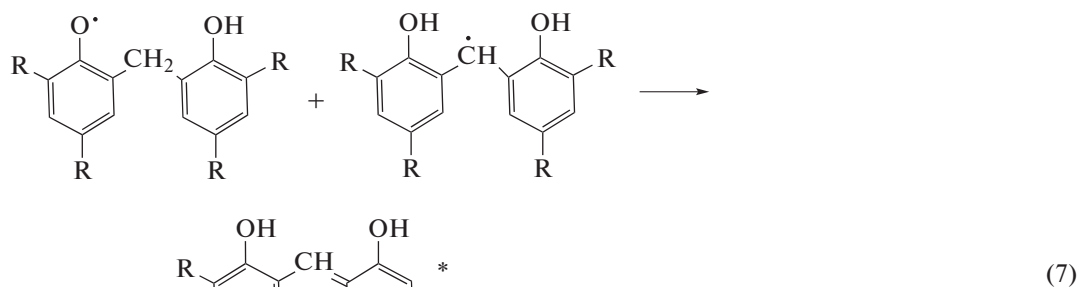
Образующийся в реакции 3 электрон после термализации преимущественно будет вступать в реакции нейтрализации с положительно заряженными ионами. Этому способствует низкая диэлектрическая проницаемость среды, а в случае ионной имплантации — еще и высокая концентрация ионов вдоль трека частицы. Избежавшие нейтрализации электроны могут присоединяться к фенольным или к карбонилсодержащим фрагментам полимера [12, 13], количество последних будет значительно увеличиваться с ростом поглощенной дозы.

Высокие выходы возбужденных частиц и их относительная стабильность вследствие распределения избыточной энергии по сопряженным π -связям ароматического кольца являются причинами высокой радиационной устойчивости фенол-формальдегидных смол по сравнению с карбоцепными полимерами [1] или алифатическими спиртами [14]. Свободные радикалы при облучении фенол-формальдегидных смол будут образовываться вследствие ион-молекулярных реакций, например (4), при распаде возбужденных молекул по реакции (5), а также различных радикал-молекулярных реакций (преимущественно, присоединения радикалов), например (6).



Наибольшую термодинамическую стабильность будут проявлять радикалы феноксильного (I) и метиленового (II) типа. Основным механизмом их гибели будет рекомбинация с формированием ковалентных сшивок между полимерными цепями, например, вследствие реакции (7). Что проявляется в упрочнении пленки фоторезиста

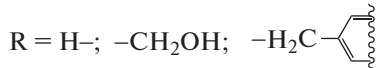
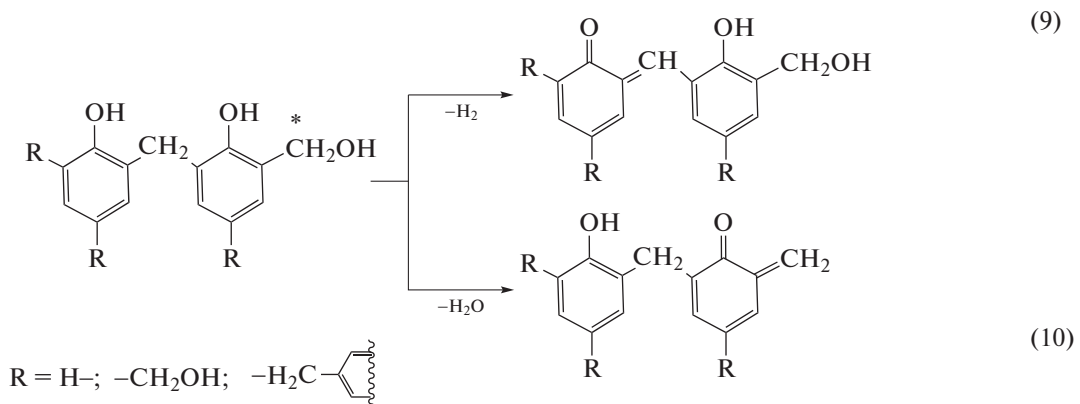
по мере облучения, которое мы наблюдали в работе [15]. Со значительно меньшей вероятностью происходит диспропорционирование радикалов феноксильного (I) и метиленового (II) типа, например, по реакции (8) в результате чего образуются хинонметиновые фрагменты в составе полимера.



В спектрах ЭПР фоторезиста, облученного низкоинтенсивным γ -излучением изотопа ^{60}Co дозой 270 кГр нами не было обнаружено долгоживущих парамагнитных центров. Следовательно, образующиеся в этих условиях радикалы феноксильного (I), метиленового (II) и пентадиенильного (III) типов, а также аддукты электронов с О-нафтохинондиазидом и другими карбонилсодержащими примесями в фоторезисте гибнут в бирадикальных реакциях во время облучения. Частицы, идентифицированные методом ЭПР, в имплантированном ионами P⁺ и B⁺ фоторезисте имеют другую природу.

По мере увеличения поглощенной дозы, как при γ -облучении, так и при ионной импланта-

ции, в фенолформальдегидной смоле будет увеличиваться доля хиноидных структур, которые будут образовываться в результате реакций дегидрирования (9) и дегидратации (10) возбужденных макромолекул полимера. Выделение водорода, воды и других низкомолекулярных соединений происходит в условиях глубокого вакуума при имплантации [8]. В случае переноса энергии возбуждения с макромолекул фенол-формальдегидной смолы на О-нафтохинондиазид будет происходить увеличение адгезии пленки к подложке [16] и упрочнение полимера [15]. Карбонилсодержащие фрагменты в облученном фоторезисте также образуются в результате диспропорционирования радикалов по реакциям, аналогичным (8).

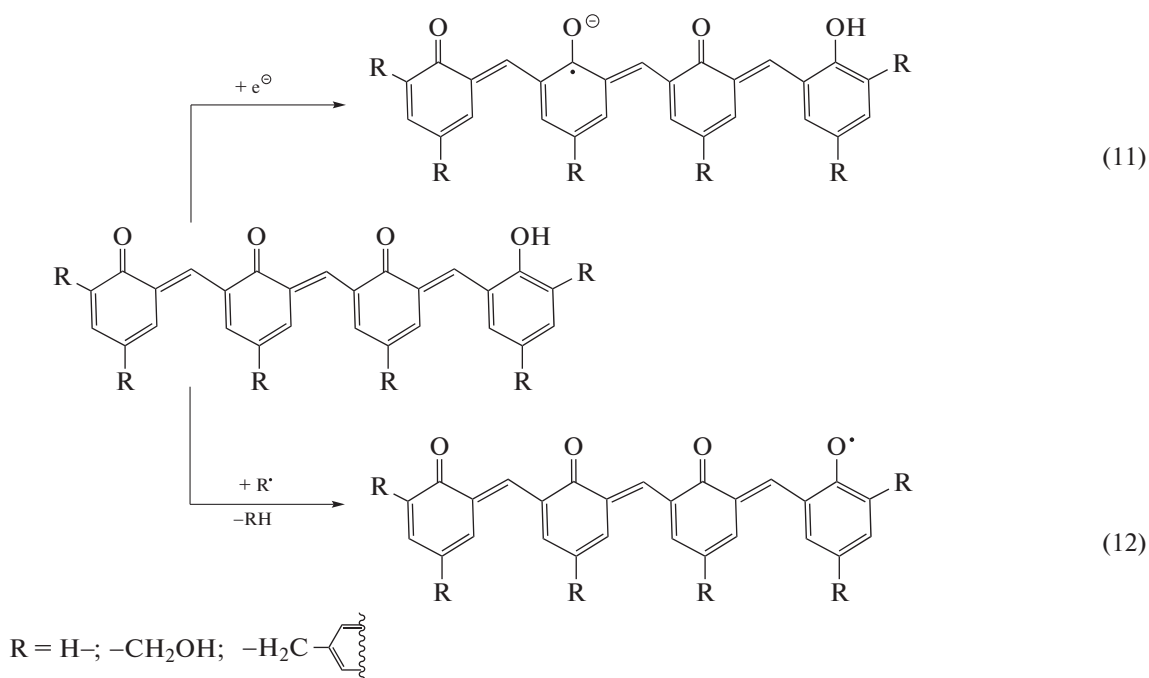


Величина поглощенной дозы при ионной имплантации $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ Р}^+$ в фоторезист составляет $\sim 1 \times 10^{12} \text{ Гр}$ в пересчете на весь объем пленки полимера и $\sim 2 \times 10^{13} \text{ Гр}$ в области термализации ионов. Это на 7–8 порядков больше, чем при γ -облучении, что будет непосредственно сказываться на степени радиационной конверсии полимера. Доля хиноиндных фрагментов, образующихся в реакциях (8)–(10), а также количество сопряженных хинонметиновых групп в них будет значительно больше при ионной имплантации, чем при γ -облучении.

Идентифицированные нами долгоживущие парамагнитные центры в образцах фоторезиста, имплантированных ионами Р^+ и В^+ в дозах 6×10^{15} – $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, могут образовываться в результате двух принципиально разных процессов. Но при этом и в одном, и во втором случае важным фактором является возможность стабилизации образующегося радикала за счет сопряжения с “протяженными” хиноидными фрагментами. Как и большинство других веществ, имеющих сопряженные $>\text{C}=\text{O}$ и $-\text{C}=\text{C}-$ связи [13, 17, 18], хинонметиновые группы в облученном фоторезисте будут акцептировать электроны, например, по реакции (11) с образованием стабильного анионрадикала. Несколько менее очевидной выглядит возможность образования долгоживущих радикалов за счет окисления фенольной группы, напри-

мер, по реакции (12). Феноксильный радикал (1) может вступать в качестве окислителя $\text{R} \cdot$. В этом случае радикал-молекулярная реакция (12) является термодинамически выгодной за счет значительно большей делокализации образующегося в ней радикала по сравнению с исходным.

Образующиеся в реакциях (11) и (12) радикалы имеют мощную систему сопряженных двойных связей и, соответственно, высокую делокализацию спиновой плотности. Поэтому удастся зарегистрировать их и спустя несколько недель после облучения фоторезиста. Наблюдаемое нами снижение величины g -фактора и увеличение интенсивности сигнала в спектрах ЭПР по мере роста дозы имплантации ионами связано с увеличением количества сопряженных $>\text{C}=\text{O}$ и $-\text{C}=\text{C}-$ связей, которые входят в состав стабильного радикала, повышая его делокализацию и термодинамическую стабильность. При высокой степени радиационной конверсии фенол-формальдегидной смолы количество сопряженных кратных связей может быть настолько велико, что в стабильных радикалах неспаренный электрон будет иметь свойства, близкие к свободному. Из-за этого в фоторезисте, облученном ионами Р^+ и В^+ в дозе $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, величина g -фактора парамагнитных частиц снижалась до значений 2.00127–2.00254, близких к соответствующей величине для свободного электрона ($g_s = 2.0023$).



Таким образом, образование долгоживущих радикалов, регистрируемых методом ЭПР спустя недели после имплантации позитивного фенолформальдегидного фоторезиста, обусловлено образованием мощной системы сопряженных кратных связей >C=O и –C=C– в макромолекуле, стабилизирующей парамагнитные центры.

Более низкая концентрация парамагнитных центров в имплантированных бором образцах фоторезиста связана с тем, что при имплантации B⁺ вклад ядерного торможения мал – не превышает 10–15% от электронного торможения. Это существенно ниже, чем при имплантации фосфора, для которой потери на ядерное (около 40%) и электронное (~60%) торможение сопоставимы. Кроме того, линейная передача энергии – потери энергии излучения на единицу длины пути в образце – при имплантации ионами бора будет значительно меньше. Следовательно, при имплантации B⁺ энергия ионизирующего излучения будет распределяться по большему объему полимера, в результате чего степень радиолитических превращений фенолформальдегидной смолы будет значительно ниже.

Отметим, что описанные выше радиационно-индуцированные процессы могут происходить за пределами области пробега ионов. Наличие длинных молекулярных цепочек в структуре фенолформальдегидной смолы способствует передаче энергии из области пробега ионов на сравнительно большие расстояния (более 1 мкм) [1], особенно если избыточная энергия недостаточна для распада молекул на радикалы. Ранее радиационно-индуцированные процессы за пределами области внедрения ионов (так называемые “эффекты дальнего действия”) наблюдались не только для фенолформальдегидной смолы, но и для других полимеров (полиэтилен, ПЭТФ, полиимид, полиэфирэфиркетон) при имплантации различных ионов (Sb⁺, B⁺, Ni⁺, Ag⁺, Fe⁺) [1, 15, 19–21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В имплантированных ионами бора и фосфора пленках позитивного фоторезиста ФП9120, нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111) методом центрифугирования, при дозе имплантации $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в спектре ЭПР наблюдается узкая синглетная изотропная линия с g -фактором 2.0064. При увеличении дозы до $1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ величина ее g -фактора снижалась до значений, близких к g -фактору свободного электрона ($g_s = 2.0023$). Концентрация парамагнитных центров была выше при имплантации ионов фосфора, чем в образцах имплантированных ионами B⁺. Имплантация фоторезистивных пленок приводила также

к возрастанию добротности резонатора (увеличению сигнала эталона) по сравнению с необлученными пленками, что связано с удалением остатков растворителя (воды) из пленок фоторезиста в процессе облучения в вакууме. Наблюдавшееся в работе образование долгоживущих парамагнитных центров, регистрируемых методом ЭПР спустя недели после имплантации позитивного фенолформальдегидного фоторезиста, обусловлено наличием в структуре радикалов мощной системы сопряженных >C=O и –C=C– кратных связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kondyurin A., Bilek M. Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space. Elsevier. 2015. 256 p.
2. Wallace W.E., Chiou T.T., Rothman J.B., Composto R.J. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 1995. V. 103. P. 435.
3. Vabishchevich N., Brinkevich D., Volobuev V., Lukashevich M., Prosolovich V., Sidorenko Yu., Odzhaev V., Partyka J. // Acta physica polonica A. 2011. V. 120. № 1. P. 46.
4. Steenken S., Neta P. // The chemistry of phenols. Edited by Z. Rappoport. John Wiley & Sons. 2003. P. 1107.
5. Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Просолович В.С., Оджаев В.Б., Бринкевич С.Д., Янковский Ю.Н. // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 3. С. 235.
6. Экспериментальные методы химической кинетики. / Под ред. Н.М. Эмануэля, М.Г. Кузьмина М.: МГУ, 1985. С. 10.
7. Кузина С.И., Брезгунов А.Ю., Дубинский А.А., Михайлов А.И. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 5. С. 337.
8. Оджаев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н., Свиридов Д.В. Ионная имплантация полимеров. Минск: Белгосуниверситет. 1998. 197 с.
9. Поздняков А.О., Хандже У.А., Кончиц А.А., Альтштадт Ф. // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36. № 20. С. 67.
10. Gardziella A., Pilato L.A., Knop A. Phenolic Resins. Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology. (2nd. ed.) Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2000. 566 p.
11. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под ред. Мельникова М.Я. М.: МГУ, 2009. С.169.
12. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты М: Наука. 1987. 448 с.
13. Бринкевич С.Д., Резцов И.А., Шадыро О.И. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 5. С. 350.
14. Бринкевич С.Д. // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 2. С. 83.
15. Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Вабищевич Н.В., Оджаев В.Б., Просолович В.С. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. № 3. С. 193.
16. Вабищевич С.А., Бринкевич С.Д., Бринкевич Д.И., Просолович В.С. // Химия высоких энергий. 2020. Т.54. № 1. С. 54.

17. *Samovich S.N., Brinkevich S.D., Edimecheva I.P., Shadyro O.I.* // Radiation Physics and Chemistry. 2014. V. 100. P. 13.
18. *Бринкевич С.Д., Шадыро О.И.* // Химия высоких энергий. 2018. Т. 52. № 4. С. 347.
19. *Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаяев В.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 1. С. 94.
20. *Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаяев В.Б., Валеев В.Ф., Нурждин В.И., Хайбуллин Р.И.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 8. С.25.
21. *Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаяев В.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 4. С. 60.