

МОДИФИКАЦИЯ ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ СУРЬМЫ

© 2021 г. С. Д. Бринкевич^а, Д. И. Бринкевич^а, *, В. С. Просолович^а, **

^аБелорусский государственный университет, ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013 Беларусь

*E-mail: Brinkevich@bsu.by

**E-mail: prosolovich@bsu.by

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 26.05.2020 г.

Методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследованы радиационно-индуцированные процессы, протекающие при имплантации ионов сурьмы в пленки позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на кремнии. Установлено, что ионная имплантация приводит к появлению в спектре НПВО полосы при 2331 см^{-1} , обусловленной валентными колебаниями $\text{O}=\text{C}=\text{O}$. Нарушение адгезии на границе раздела фоторезист/кремний проявляется в появлении полосы 610 см^{-1} , связанной с решеточным поглощением Si. Обнаружено образование новых $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ связей в результате эфирных сшивок кетена с ОН-группой новолачной смолы.

Ключевые слова: спектр нарушенного полного внутреннего отражения, диазохинон-новолачный фоторезист, имплантация, адгезия, кремний

DOI: 10.31857/S0544126920060022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время литография является одним из основных процессов в общем цикле изготовления широкого класса полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. В качестве масок в процессах субмикронной и нанолитографии широко используются диазохинон-новолачные (ДХН) резисты [1–4]. Одним из основных методов формирования легированных областей в современной электронике является ионная имплантация (ИИ). Она позволяет с высокой точностью управлять концентрацией легирующей примеси, характеризуется универсальностью и гибкостью процесса. Взаимодействие ДХН-резистов с ультрафиолетовым, рентгеновским и видимым излучением исследовано достаточно подробно, в то время как процессы, индуцированные ионным облучением, плохо изучены, несмотря на то, что они могут оказывать существенное влияние на качество создаваемых приборов [4–6].

Ранее показано, что при ионной имплантации полимеров радиационно-индуцированные процессы протекают не только в области пробега ионов, но и за его пределами [5, 7–9]. Так в [5] было обнаружено радиационное упрочнение пленок диазохинон-новолачного резиста за слоем внедрения ионов сурьмы. Однако механизм радиационно-индуцированных процессов, ответ-

ственных за изменение физико-механических свойств ДХН-резистов за слоем внедрения ионов, не был установлен.

Для исследования тонких пленок широко применяется метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), позволяющий получать качественную и количественную информацию о составе и структуре сложных органических соединений и их смесей в твердом агрегатном состоянии [10]. Отметим, что ранее метод НПВО для исследования пленок ДХН-фоторезистов на поверхности пластин монокристаллического кремния, не применялся. В настоящей работе с целью установления механизмов радиационно-индуцированной модификации физико-механических свойств пленок ДХН фоторезистов (ФР) при имплантации ионов сурьмы был использован метод ИК-Фурье спектрометрии НПВО.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Позитивный фоторезист ФП9120 представляет собой композит из светочувствительного *o*-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы. Пленки ФР толщиной 1.8 мкм наносились на поверхность пластин кремния *p*-типа ($\rho = 10\text{ Ом} \cdot \text{см}$) с ориентацией (111) методом центрифугирования

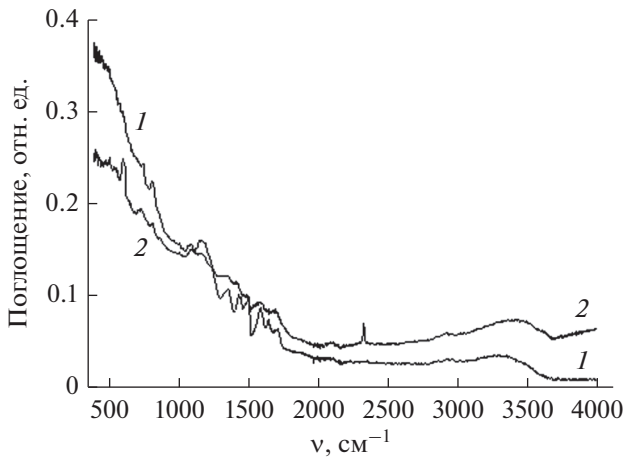


Рис. 1. Спектры НПВО исходных (1) и имплантированных Sb^+ дозой $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (2) пленок ФП9120 на кремнии.

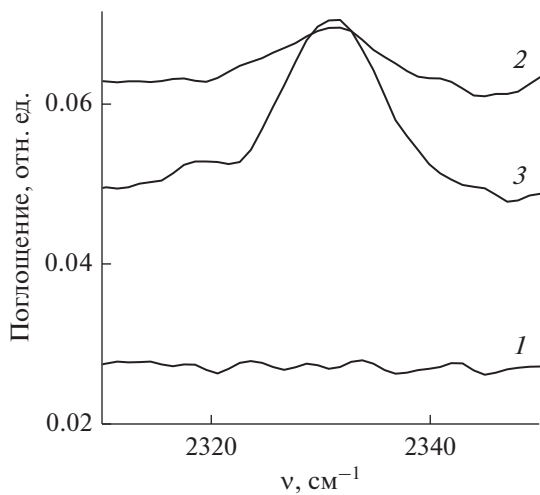


Рис. 2. Спектры НПВО исходной (1) и имплантированных Sb^+ дозами $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (2) и $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3) пленок ФП9120 в области двойных кумулятивных связей.

при скорости вращения $\nu = 2900 \text{ об./мин}$ [11]. Перед формированием пленки фоторезиста пластины кремния подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях и отмывке в деионизованной воде. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась ее сушка в течение 50–55 мин при температуре 88°C . Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью профилометра “Dectak”.

Имплантация ионами сурьмы Sb^+ проводилась с энергией 60 кэВ в интервале доз $\Phi = 1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при плотности ионного тока $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ в остаточном вакууме не хуже $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ на ионно-лучевом ускорителе “Ве-

зувий-6”. Спектры НПВО структур фоторезист-кремний в диапазоне волновых чисел $\nu = 400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ регистрировались при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH). Разрешение было не хуже 2 см^{-1} , количество сканов – 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры НПВО исходных и имплантированных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на кремнии представлены на рис. 1. При анализе экспериментальных данных необходимо учитывать, что в процессе записи ИК-спектров НПВО глубина проникновения $d_{\text{эф}}$ светового луча в образец зависит от длины волны λ , показателей преломления призмы n_2 и образца n_1 , угла падения α и рассчитывается по формуле [10]:

$$d_{\text{эф}} = \frac{(n_1/n_2)^2 \lambda \cos \alpha}{\pi \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right] \left[\sin^2 \alpha - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

В условиях нашего эксперимента – материал призмы – алмаз ($n_2 = 2.42$) [12], угол падения – 40° , показатель преломления фоторезиста $n_1 = 1.52$ [11]. Следовательно, согласно формуле (1) глубина проникновения излучения в фоторезистивную пленку составляет $d_{\text{эф}} \sim 0.45 \lambda$. Таким образом, эффективная глубина проникновения луча при волновых числах менее 2000 см^{-1} превышает геометрическую толщину исследуемых пленок. При этом излучение частично отражается от кремниевой подложки; это отражение от границы раздела резист/кремний необходимо учитывать при анализе экспериментальных результатов.

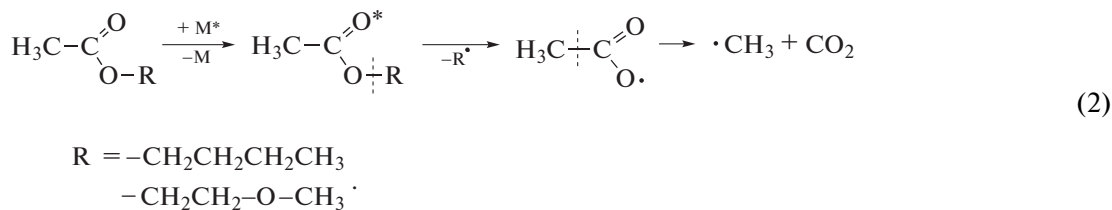
Было установлено, что ионная имплантация приводит к увеличению фонового поглощения в диапазоне волновых чисел свыше 1800 см^{-1} (рис. 1). Это обусловлено, вероятнее всего, поглощением/рассеянием излучения на нарушениях, созданных ионной имплантацией в области пробега ионов. Кроме того, имплантация фоторезиста приводит к уменьшению коэффициента преломления n_1 [11], что согласно формуле (1) должно приводить к увеличению $d_{\text{эф}}$ и, соответственно, к росту интенсивности как фонового поглощения, так и полос поглощения.

После имплантации Sb^+ дозой свыше $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в спектрах НПВО появляется узкая симметричная полоса с максимумом при 2331 см^{-1} . Ее интенсивность растет пропорционально увеличению дозы имплантации (рис. 2). Этот диапазон волновых чисел характерен для валентных колеба-

ний кумулятивных двойных связей [13, 14]. Вероятнее всего, указанная полоса обусловлена асимметричными валентными колебаниями $O=C=O$. Так, колебания CO_2 в газах дают очень сильную полосу поглощения с максимумом при 2349 см^{-1} , используемую для градуировки спектрофотометров [13]. В жидких растворителях газообразный CO_2 согласно [14] обуславливает поглощение в диапазоне волновых чисел $2325\text{--}2335\text{ см}^{-1}$.

Основной причиной появления в спектре имплантированных пленок резиста полосы 2331 см^{-1} , вероятнее всего, является радиационно-индуцированное разложение остаточных растворителей, которые содержат ацетатный фрагмент, например, бутилацетата, 2-метоксиэтилацетата. Эти вещества входят в состав рецептур растворов ДХН-резистов. Поскольку их температуры кипения составляют 126 и 145°C соответственно, они полностью не удаляются из тонких пленок при сушке. Жесткая структура сетки фенол-формальдегидной смолы может удерживать небольшие количества растворителей даже при глубоком вакууме в процессе ионной имплантации.

Ранее было показано [8], что радиационно-индуцированные превращения в объеме ДХН-резиста происходят вследствие переноса энергии (в форме электронного возбуждения частиц) по



При облучении органических сложных эфиров, в том числе и ацетатов, CO_2 является одним из основных продуктов радиолитического разложения [15]. Тот факт, что мы регистрируем CO_2 в качестве продукта радиолитического разложения ДХН-резиста может быть связан как с малой скоростью диффузии этого газообразного соединения в объеме полимера, так и с формированием у поверхности пленки в области пробега ионов (вследствие термализации ионов Sb^+) своеобразной "корки" из плотно сшитого полимерного компаунда, снижающего унос CO_2 и других летучих продуктов из пленки в условиях глубокого вакуума при ИИ.

В низкоэнергетичной области после имплантации Sb^+ в диапазоне волновых чисел $590\text{--}610\text{ см}^{-1}$ появляется широкая структурированная полоса с несколькими слабо выраженными максимумами, а также низкоинтенсивная полоса при $\sim 510\text{ см}^{-1}$ (рис. 3). Интенсивность этих полос с увеличением дозы имплантации существенно

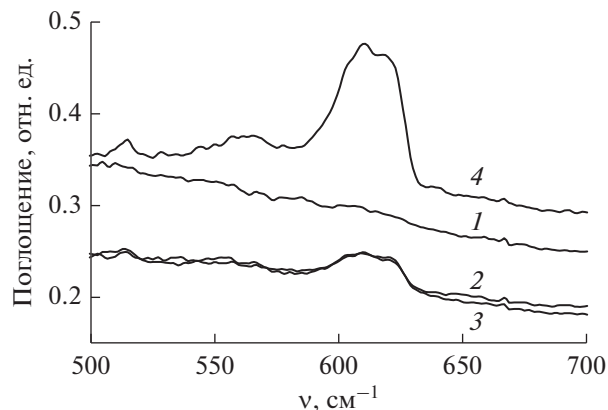


Рис. 3. Спектры НПВО исходной (1) и имплантированных Sb^+ дозами $1 \times 10^{15}\text{ см}^{-2}$ (2) и $5 \times 10^{16}\text{ см}^{-2}$ (3) пленок ФП9120 и кремниевой подложки (4).

макромолекулам полимера из области термализации ионов. Растворители, будучи алифатическими соединениями, обладают значительно меньшей стойкостью к процессам деструкции по сравнению с фенол-формальдегидной смолой. Одним из механизмов распада этих ацетатов будет деструкция связи $-C-O-$ с последующим быстрым отщеплением CO_2 по следующей схеме:

образом не изменялась (кривые 2, 3 рис. 3). Аналогичные полосы с существенно большей интенсивностью наблюдаются в спектре НПВО кремниевой подложки (кривая 4 рис. 3) и связаны с решеточным поглощением Si [16].

Появление в спектре НПВО полосы в диапазоне волновых чисел $590\text{--}610\text{ см}^{-1}$ и низкоинтенсивной полосы при $\sim 510\text{ см}^{-1}$ обусловлено следующими обстоятельствами. Как отмечалось выше, эффективная глубина проникновения излучения в фоторезистивную пленку составляет $d_{\text{эф}} \sim 0.45\lambda$. В диапазоне волновых чисел $500\text{--}700\text{ см}^{-1}$ $d_{\text{эф}} \sim 16\text{ мкм}$, что почти на порядок величины превосходит толщину фоторезистивной пленки. Таким образом, в указанном диапазоне имеет место отражение излучения от границы раздела резист/кремний, что и обуславливает появление в спектре НПВО фоторезистивной пленки полосы в диапазоне волновых чисел $590\text{--}610\text{ см}^{-1}$. Ее проявление после внедрения ионов Sb^+ связано с

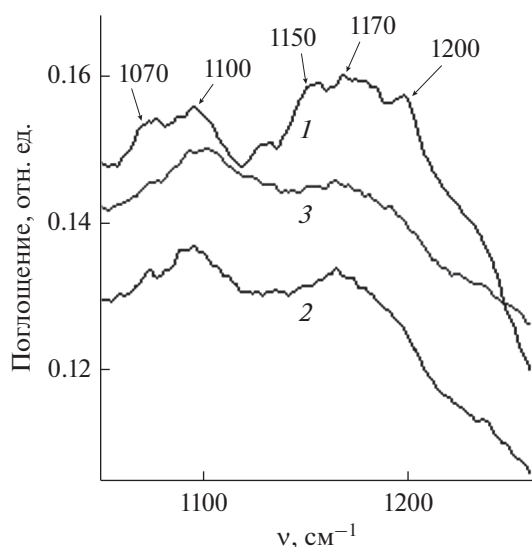


Рис. 4. Спектры НПВО исходной (1) и имплантированных Sb^+ дозами $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) и $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3) пленок ФП9120 в области валентных колебаний Si–O–C и C–O связей.

ухудшением адгезии фоторезистивной пленки к кремнию. Резкое снижение адгезии (вплоть до отслоения) после имплантации Sb^+ в фоторезистивную пленку ФП9120 на кремнии отмечалось ранее в работе [5]. С другой стороны, в работе [17] обнаружено усиление отражения в имплантированных сурьмой пленках диазохинон-новолачного резиста на кремнии. Эти экспериментальные данные подтверждают высказанное выше предположение, что полосы в диапазоне волновых чисел $590\text{--}610 \text{ см}^{-1}$ и при $\sim 510 \text{ см}^{-1}$ обусловлены отражением излучения от кремния. Отметим, что усиление отражения от границы раздела резист/кремний при имплантации Sb^+ обуславливает также снижение фонового поглощения на $15\text{--}20\%$ по сравнению с необлученной пленкой в диапазоне волновых чисел $400\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1).

Об ухудшении адгезии пленки ФР к кремнию свидетельствует также исчезновение после имплантации максимума полосы НПВО при $\sim 1070 \text{ см}^{-1}$, наблюдавшегося в исходных образцах на низкоэнергетичном крыле полосы с максимумом при 1100 см^{-1} (рис. 4). При дозе $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ его интенсивность снижается, а при $\Phi \geq 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ он не проявляется вообще. Отметим, что полоса с максимумом при 1070 см^{-1} является наиболее интенсивной полосой ИК поглощения в тетраэтоксисилане и обусловлена валентными асимметричными колебаниями Si–O–C группы [18]. Согласно [8] эта группа обеспечивает адгезию пленки ФП9120 к кремнию.

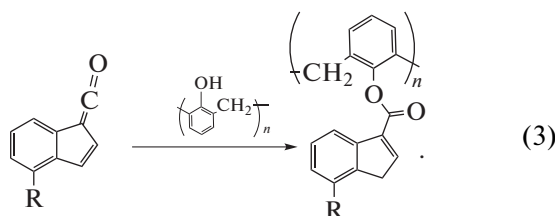
По нашему мнению, к снижению адгезии ДХН-резиста к кремниевой пластине может при-

водить целый ряд факторов, включая изменение плотности полимера вследствие сшивания макромолекул в объеме, деформация пленки из-за формирования компаунда в зоне термализации ионов Sb^+ , а также накопление газообразных и легколетучих продуктов радиолиза на границе раздела фаз полимер-кремний.

Интенсивность полосы в диапазоне волновых чисел $1150\text{--}1230 \text{ см}^{-1}$, обусловленной валентными колебаниями C–O связей в феноксильной группе (СОН) снижается при имплантации ионов Sb^+ (рис. 4). В исходных образцах это широкая структурированная полоса с 3-мя выраженными максимумами: при $\sim 1150 \text{ см}^{-1}$; $\sim 1170 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 1200 \text{ см}^{-1}$. Ее интенсивность выше интенсивности полосы 1100 см^{-1} . В процессе имплантации сначала при $\Phi = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ пропадает максимум при $\sim 1150 \text{ см}^{-1}$, а затем при $\sim 1200 \text{ см}^{-1}$. Интенсивность полосы в диапазоне волновых чисел $1150\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$ становится ниже интенсивности полосы при 1100 см^{-1} (кривая 2 рис. 4). Полоса теряет структуру и при $\Phi = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ проявляется в спектрах как перегиб на высокоэнергетичном плече полосы при 1100 см^{-1} .

Такое поведение полос НПВО в диапазоне волновых чисел $1050\text{--}1230 \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о взаимодействии в процессе имплантации кетена с ОН-группой смолы с образованием эфирных сшивок по реакции (3). С другой стороны, аналогичный эффект может давать также окисление фенолов до хинонов, в результате которого группа C–ОН превращается в C=O. Однако последний механизм маловероятен, поскольку после имплантации существенного усиления поглощения в области $\sim 1715\text{--}1730 \text{ см}^{-1}$, обусловленного колебаниями C=O в ароматических соединениях [13, 14], не наблюдалось (рис. 1).

Отметим, что кетен образуется при ионной имплантации из фоточувствительного компонента резиста – *орто*-нафтохинондиазида [8]. Образование эфирных сшивок по реакции (3) должно приводить к увеличению микротвердости и хрупкости резистивной пленки, что и наблюдалось в работе [5]. В результате эфирных сшивок образуются C–O–C связи, валентные колебания которых обуславливают полосу с максимумом при 1100 см^{-1} . Кроме того, C–O–C связи могут образоваться и при рекомбинации радикалов на фенолформальдегидном полимере [8]. Все это приводит к доминированию полосы 1100 см^{-1} по отношению к обусловленной колебаниями C–O связей полосе $\sim 1170 \text{ см}^{-1}$.



О протекании реакции (3) свидетельствует также снижение при имплантации Sb^+ интенсивности полосы в диапазоне волновых чисел 3000–3700 cm^{-1} , обусловленной валентными колебаниями связанных О–Н групп, смещение ее максимума в высокоэнергетичную область и появление на ее высокоэнергетичном плече перегиба при $\sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 5).

При имплантации наблюдалось удаление из пленки формальдегида $\text{CH}_2=\text{O}$, не прореагировавшего с фенолом при синтезе полимерной основы резиста, что проявлялось как исчезновение полосы с максимумом $\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 6), обусловленной валентными колебаниями $\text{C}=\text{O}$ связей, и слабой полосы при $\sim 1130 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 4), связанной с деформационными плоскостными колебаниями. Обе эти полосы наблюдаются в спектрах формальдегида [13, 19]. Удаление $\text{CH}_2=\text{O}$ обусловлено его высокой реакционной способностью по отношению к электронам, атомом водорода и большинству органических радикалов, образующихся при ИИ в полимере.

В спектрах НПВО полимеров в диапазоне волновых чисел 1475–1650 cm^{-1} наблюдаются полосы поглощения, обусловленные колебаниями углеродного скелета ароматического кольца [13, 14]. На них накладываются валентные симметричные (1475–1525 cm^{-1} [13]) и ассиметричные (1620–1760 cm^{-1} [13, 20]) колебания $\text{C}=\text{O}$ связей. В этой же области наблюдаются колебания двойных $\text{C}=\text{C}$ связей [14]. На положение полос $\text{C}=\text{C}$ и $\text{C}=\text{O}$ влияют ряд факторов, среди которых основными являются: электронные эффекты ближайших заместителей; сопряжение с кратными связями и ароматическими кольцами; наличие меж- и внутримолекулярных связей [13, 21, 22].

Имплантация ионов Sb^+ приводит к увеличению интенсивности интегрального поглощения в рассматриваемом диапазоне волновых чисел при одновременном уширении полос поглощения и сглаживании (вплоть до исчезновения) локальных максимумов (рис. 6). Это может быть обусловлено несколькими процессами, протекающими при взаимодействии компонентов фоторезиста во время имплантации ионов Sb^+ . В частности, могут наблюдаться трансформация (изменение состава) ближайших заместителей ароматических колец и связей $\text{C}=\text{O}$, усиление меж- и внутримолекулярных связей (сшивка) [5], увеличение количества сопряженных кратных связей [23]. Как отмеча-

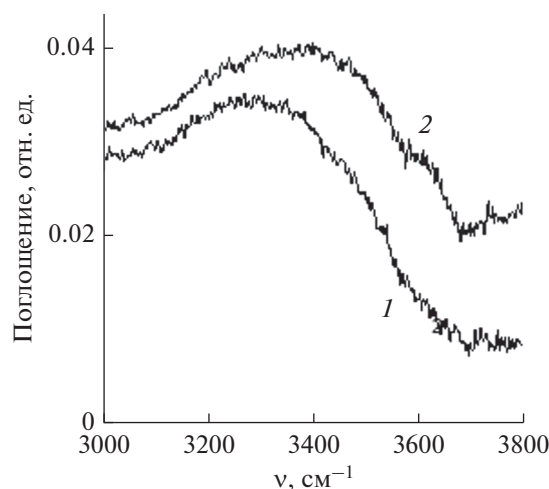


Рис. 5. Спектры НПВО исходной (1) и имплантированной Sb^+ дозой $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (2) пленок ФП9120 в области валентных колебаний связанных О–Н групп.

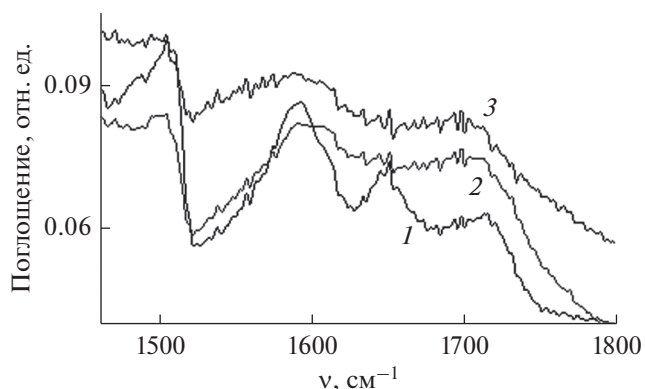


Рис. 6. Спектры НПВО исходной (1) и имплантированных Sb^+ дозами $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (2) и $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (3) пленок ФП9120 в области валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ связей.

лось выше, каждый из этих факторов приводит к изменению частоты колебаний скелета ароматического кольца и двойных связей. Так полоса валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ связей в ароматических соединениях, в частности в бензальдегиде [20, 21] и *o*-нафтхинондиазиде, наблюдается при 1700–1715 cm^{-1} . При сопряжении с $\text{C}=\text{C}$ связями максимум полосы этих колебаний смещается в диапазон волновых чисел 1600–1650 cm^{-1} [14]. Участие $\text{C}=\text{O}$ группы в межмолекулярных водородных связях также приводит к снижению частоты ее валентных колебаний на 40–60 cm^{-1} [20, 22]. В сложных ароматических эфирах напротив максимум полосы валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ группы смещается к 1715–1735 cm^{-1} [14]. Согласно [23] при имплантации фоторезиста ФП9120 формируются хиноидные структуры, для которых макси-

мум полосы поглощения должен находиться в диапазоне 1645–1690 см^{-1} [14] в зависимости от наличия сопряженных связей. Суммарное действие перечисленных факторов должно приводить к уширению полос колебаний и сглаживанию их максимумов, что и наблюдалось экспериментально.

Аналогичные заключения можно сделать и относительно полос с максимумами при ~ 1500 и 1600 см^{-1} , обусловленных колебаниями углеродного скелета ароматического кольца.

Отметим, что в процессе имплантации наблюдается перераспределение интенсивности полос при 2960 см^{-1} (метильная $-\text{CH}_3$ группа) и 2930 см^{-1} (метиленовая $-\text{CH}_2-$ группа) в пользу последней. Причем полоса 2930 см^{-1} становится доминирующей. Такое перераспределение интенсивности полос, вероятнее всего, связано с отщеплением атома водорода от концевых метильных групп фенол-формальдегидной смолы в процессе радиолитического разложения с образованием термодинамически устойчивых углеродцентрированных радикалов толуильного типа $\text{Ar}-\text{CH}_2\cdot$. Их последующая рекомбинация с образованием новых $\text{C}-\text{C}$ и $\text{C}-\text{O}$ связей приводит к увеличению интенсивности полосы, ответственной за колебания метиленовых групп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что имплантация Sb^+ приводит к появлению в спектре НПВО пленок позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 полосы при 2331 см^{-1} , обусловленной валентными колебаниями $\text{O}=\text{C}=\text{O}$. Нарушение адгезии на границе раздела фоторезист/кремний способствует появлению полосы при 610 см^{-1} , связанной с решеточным поглощением Si. Обнаружено образование $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ связей в результате эфирных сшивок кетена с OH -группой новолачной смолы. При имплантации наблюдалось также удаление непрореагировавшего формальдегида. Взаимодействие компонентов фоторезиста при имплантации Sb^+ приводит к изменению частот колебаний скелета ароматического кольца и двойных ($\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$) связей, которое в спектре НПВО проявляется как увеличение интенсивности интегрального поглощения в диапазоне волновых чисел $1475-1700 \text{ см}^{-1}$ при одновременном уширении и сглаживании локальных максимумов в этом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martins J.S., Borges D.G.A.L., Machado R.C., Carpanez A.G., Grazul R.M., Zappa F., Melo W.S., Rocco M.L.M., Pinho R.R., Lima C.R.A.* Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser de-

sorption ionization // *European Polymer J.* 2014. V. 59. P. 1–7.

2. *Debmalya Roy, Gandhi A., Basu P.K., Eswaran S.V., Raghunathan P.* Optimization of monomer content and degree of linearity in lithographically interesting novolac copolymers using NMR spectroscopy // *Microelectronic Engineering.* 2003. V. 70. № 1. P. 58–72.
3. *Лебедев В.И., Котомина В.Е., Зеленцов С.В., Леонов Е.С., Сидоренко К.В.* Влияние межмолекулярных водородных связей на качество фоторезистивных масок // *Вестник Нижегородского университета. Химия.* 2014. № 4(1). С. 178–182.
4. *Моро У.* Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2. М.: Мир, 1990. 632 с. (*Moreau W.M.* Semiconductor lithography. Principles, practices and materials. N.Y., London: Plenum Press.)
5. *Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Вабищевич Н.В., Оджаяев В.Б., Просолович В.С.* Ионная имплантация позитивных фоторезистов // *Микроэлектроника.* 2014. Т. 43. № 3. С. 193–199.
6. *Василевич В.П., Кисель А.М., Медведева А.Б., Плеванович В.И., Родионов Ю.А.* Химическая обработка в технологии ИМС. Полоцк: Изд. ПГУ, 2001. 259 с.
7. *Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаяев В.Б.* Модификация приповерхностной области пленки полиимида имплантацией ионов бора // *Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2015. № 1. С. 94–99.
8. *Вабищевич С.А., Бринкевич С.Д., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.* Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора // *Химия высоких энергий.* 2020. Т. 54. № 1. С. 54–59.
9. *Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Бринкевич С.Д., Лукашевич М.Г., Оджаяев В.Б., Валеев В.Ф., Нуздин В.И., Хайбуллин Р.И.* Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за область пробега ионов в пленках полиимида // *Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2017. № 8. С. 25–30.
10. *Беккер Ю.* Спектроскопия. М.: Техносфера, 2009. (*Vocker J.* Spektroskopie. Vogel Industrie Medien GmbH & Co KG. Wurzburg (Germany). 1997.)
11. *Бринкевич Д.И., Харченко А.А., Просолович В.С., Оджаяев В.Б., Бринкевич С.Д., Янковский Ю.Н.* Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора // *Микроэлектроника.* 2019. Т. 48. № 3. С. 235–239.
12. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ.* Справочник. М.: Наука; 1979. С. 13.
13. *Тарасевич Б.Н.* ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ, 2012.
14. *Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К.* Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир, Бинном, 2006.
15. *Лицаев А.К.* Современная радиационная химия: Радиолитиз газов и жидкостей. М.: Наука, 1986. 360 с.
16. *Панков Ж.* Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. 458 с.

17. Харченко А.А., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Бринкевич С.Д., Оджаяев В.Б., Янковский Ю.Н. Радиационно-стимулированная трансформация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионов сурьмы // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 6. С. 14–18.
18. Бринкевич С.Д., Гринюк Е.В., Бринкевич Д.И., Свердлов Р.Л., Просолович В.С., Петлицкий А.Н. Механизм адгезионного взаимодействия пленок диазохинон-новолачного фоторезиста с монокристаллическим кремнием // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87. № 4. С. 589–594.
19. Poljansek I., Sebenik U., Krajnc M. Characterization of Phenol–Urea–Formaldehyde Resin by Inline FTIR Spectroscopy // J. Applied Polymer Science. 2006. V. 99. P. 2016–2028.
20. Бельков М.В., Бринкевич С.Д., Самович С.Н., Скорняков И.В., Толсторожнев Г.Б., Шадыро О.И. Инфракрасные спектры и структура молекулярных комплексов ароматических кислот // Журн. прикладной спектроскопии. 2011. Т. 78. № 6. С. 851–858.
21. Толсторожнев Г.Б., Скорняков И.В., Бельков М.В., Шадыро О.И., Бринкевич С.Д., Самович С.Н. Инфракрасные спектры бензальдегида и его производных в разных агрегатных состояниях // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 202–207.
22. Толсторожнев Г.Б., Скорняков И.В., Бельков М.В., Шадыро О.И., Бринкевич С.Д., Самович С.Н. Водородные связи и противовирусная активность производных бензальдегида // Журн. прикладной спектроскопии. 2011. Т. 79. № 4. С. 658–663.
23. Олешкевич А.Н., Лапчук Н.М., Оджаяев В.Б., Карпович И.А., Просолович В.С., Бринкевич Д.И., Бринкевич С.Д. Электронная проводимость в имплантированном ионами P^{+} позитивном фоторезисте // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 1. С. 58–65.