

МОДИФИКАЦИЯ ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОННОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ БОРА

Д. И. БРИНКЕВИЧ¹⁾, В. С. ПРОСОЛОВИЧ¹⁾, Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Методом нарушенного полного внутреннего отражения исследованы пленки диазохинонноволачного фоторезиста, имплантированные ионами бора. Пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,0 и 2,5 мкм наносились методом центрифугирования на пластины кремния *p*-типа, легированного бором, с ориентацией (111). Имплантация ионами В⁺ с энергией 60 кэВ в интервале доз 10^{15} – 10^{16} см⁻² в режиме постоянного ионного тока (плотностью 4 мкА/см²) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не более 10^{-5} Па на имплантаторе «Везувий-6». Спектры нарушенного полного внутреннего отражения регистрировались в диапазоне 400–4000 см⁻¹ спектрофотометром ALPHA (*Bruker Optik GmbH*, Германия) при комнатной температуре. Показано, что ионная имплантация приводит к интенсивной трансформации фоторезиста за областью пробега ионов, которая характеризуется появлением в спектре интенсивных полос с максимумами при 2151 и 2115 см⁻¹, обусловленных валентными колебаниями двойных кумулятивных связей, в частности С=С=О. В имплантированных образцах наблюдалось смещение в низкоэнергетичную область максимумов валентных колебаний С—Н-связей, плоскостных деформационных колебаний О—Н-связей и пульсационных колебаний углеродного скелета ароматических колец, а также перераспределение интенсивностей между близкорасположенными максимумами.

Ключевые слова: диазохинонноволачный фоторезист; ионная имплантация; ионы бора; спектры нарушенного полного внутреннего отражения; валентные колебания.

Образец цитирования:

Бринкевич ДИ, Просолович ВС, Янковский ЮН. Модификация пленок диазохинонноволачного фоторезиста имплантацией ионов бора. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;2:62–69.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-62-69>

For citation:

Brinkevich DI, Prasolovich US, Yankouski YM. Modification of diazoquinone-novolac photoresist films by boron ion implantation. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;2:62–69. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-62-69>

Авторы:

Дмитрий Иванович Бринкевич – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Владислав Савельевич Просолович – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Юрий Николаевич Янковский – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Authors:

Dmitrii I. Brinkevich, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

brinkevich@bsu.by

Uladislav S. Prasolovich, PhD (physics and mathematics), doцент; head of the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

prosolovich@bsu.by

Yury M. Yankouski, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

yankouski@bsu.by

MODIFICATION OF DIAZOQUINONE-NOVOLAC PHOTORESIST FILMS BY BORON ION IMPLANTATION

D. I. BRINKEVICH^a, U. S. PRASALOVICH^a, Y. M. YANKOUSKI^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: D. I. Brinkevich (brinkevich@bsu.by)

Diazoquinone-novolac photoresist films implanted with B⁺ ions were studied by the method of attenuated total reflection (ATR). Films of positive photoresist FP9120 with a thickness h of 1.0 and 2.5 μm were deposited by centrifuging on p -type silicon plates with (111) orientation. Implantation with 60 keV B⁺ ions in the dose range of 10^{15} – 10^{16} cm^{-2} in the constant ion current mode (current density 4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) was carried out at room temperature in a residual vacuum not worse than 10^{-5} Pa using the «Vesuvius-6» ion beam accelerator. The attenuated total reflection spectra were recorded in the range 400–4000 cm^{-1} by ALPHA spectrophotometer (Bruker Optik GmbH, Germany) at room temperature. It was shown that ion implantation leads to intensive transformation of the photoresist beyond the range of ions, which is characterized by the appearance in the spectrum of intense bands with peaks at 2151 and 2115 cm^{-1} , due to stretching vibrations of double cumulative bonds, in particular C=C=O. In the implanted samples, a shift to the low-energy region of the maxima of the stretching vibrations of C—H bonds, plane deformation vibrations of O—H bonds and pulsating vibrations of the carbon skeleton of aromatic rings as well as the redistribution of intensities between closely spaced maxima, were observed.

Keywords: diazoquinone-novolac photoresist; ion implantation; boron ions; spectra of attenuated total reflection; stretching vibrations.

Введение

В последние годы интерес к исследованию индуцированных ионным облучением процессов в полимерных материалах обусловлен острой потребностью разработки новых материалов для применений в различных сферах деятельности, в частности в производстве космической техники и медицине [1]. Ионная имплантация (ИИ) широко используется в современной электронике, позволяет с высокой точностью управлять концентрацией легирующей примеси, характеризуется универсальностью и гибкостью процесса. В качестве масок при формировании приборов в нано- и субмикронной литографии важную роль играют диазохинонноволачные (ДХН) резисты, представляющие собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы [2–4].

Взаимодействие ДХН-резистов с ультрафиолетовым, рентгеновским и видимым излучением исследовано достаточно подробно, в то время как процессы, индуцированные ионным облучением, практически не изучены, несмотря на то что они могут оказывать существенное влияние на качество создаваемых приборов [2]. Ранее показано [5–7], что радиационно-индуцированные процессы, протекающие при ионной имплантации, приводят к радиационному упрочнению резиста, уменьшению его показателя преломления и изменению адгезионного взаимодействия ДХН-резиста с кремнием. Методом ЭПР в имплантированных ионами бора и фосфора пленках ДХН-резиста обнаружено формирование свободных радикалов, обусловленное мощной системой сопряженных кратных связей [8].

Цель настоящей работы – изучение влияния имплантации ионов бора на спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) пленок диазохинонноволачного резиста марки ФП9120.

Методы исследования

Пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной (h) 1,0 и 2,5 мкм наносились на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111) методом центрифугирования при скорости вращения 8300 и 1200 об/мин соответственно. Время вращения центрифуги 40 с. Перед формированием пленки фоторезиста кремниевые пластины подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических растворителях и неорганических реагентах. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 мин при температуре 88 °С.

Имплантация ионами B⁺ с энергией 100 кэВ дозой 10^{16} cm^{-2} в режиме постоянного ионного тока (плотность тока 4 мкА/см²) осуществлялась при комнатной температуре в остаточном вакууме не

более 10^{-5} Па на промышленном ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6». Температура имплантируемых образцов не превышала 60°C . Ее контроль осуществлялся термодатчиком, предусмотренным конструкцией данного ускорителя. Поскольку после нанесения фоторезиста проводилось его «дублирование» при 88°C , то вышеуказанная температура имплантации не могла вносить существенных изменений в структуру пленок. Спектры НПВО структур фоторезист – кремний регистрировались в диапазоне волнового числа (ν) $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH, Германия) при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты

Установлено, что фоновое поглощение при увеличении толщины пленки фоторезиста снижается во всем исследованном спектральном диапазоне. При имплантации имел место обратный эффект: фоновое поглощение увеличивалось (рис. 1, 2). Кроме того, в спектрах НПВО всех пленок фоторезист – кремний наблюдался подъем фона поглощения при уменьшении волнового числа ($\nu < 2000\text{ см}^{-1}$). Указанные эффекты обусловлены, вероятнее всего, следующими причинами. При измерении спектров НПВО глубина проникновения $d_{\text{эф}}$ светового луча в образец зависит от длины волны λ , показателей преломления элемента отражения n_2 и образца n_1 , угла падения α [9] и рассчитывается по формуле

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

В условиях нашего эксперимента (элемент отражения ZnSe ($n_2 = 2,4$ при 10 мкм) [10], угол падения 45° , показатель преломления фоторезиста $n_1 = 1,4$ [6]) глубина проникновения излучения в фоторезистивную пленку $d_{\text{эф}}$ составляет $\sim 0,4 \lambda$. Для волновых чисел менее 2000 см^{-1} указанная глубина становится сравнимой с геометрической толщиной фоторезистивной пленки. При этом часть излучения проникает в кремниевую подложку и, соответственно, снижается доля отраженного излучения, что проявляется в спектрах как усиление фонового поглощения. В тонких пленках этот эффект более интенсивный, чем в толстых.

В имплантированных образцах возрастание фонового поглощения обусловлено, вероятнее всего, поглощением или рассеянием на нарушениях, созданных ионной имплантацией. Кроме того, имплантация фоторезиста влечет уменьшение коэффициента преломления n_1 [6], что согласно формуле (1) должно приводить к увеличению $d_{\text{эф}}$ и, соответственно, к росту интенсивности как фонового поглощения, так и полос поглощения.

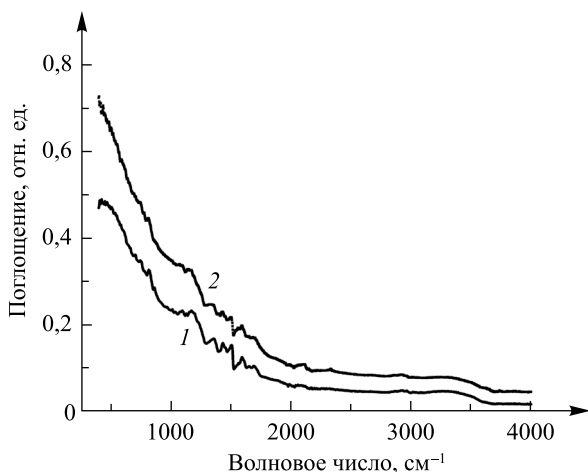


Рис. 1. Спектры НПВО пленок ФП9120 ($h = 1,0\text{ мкм}$):
1 – исходных; 2 – имплантированных

Fig. 1. ATR spectra of the FP9120 films ($h = 1.0\text{ μm}$):
1 – initial; 2 – implanted

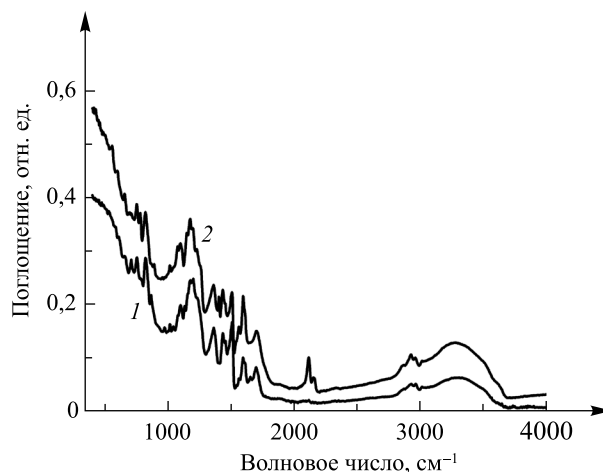


Рис. 2. Спектры НПВО пленок ФП9120 ($h = 2,5\text{ мкм}$):
1 – исходных; 2 – имплантированных

Fig. 2. ATR spectra of the FP9120 films ($h = 2.5\text{ μm}$):
1 – initial; 2 – implanted

В пленках толщиной 1 мкм полосы поглощения характеризуются низкой интенсивностью и практически не разрешимы на фоне шумов (рис. 1). Разрешимы только полосы в области 1200–1600 см⁻¹. При проведении имплантации интенсивность полос в данной области снижалась и некоторые из них исчезали. С увеличением толщины пленки до 2,5 мкм в спектрах НПВО наблюдалось большое количество интенсивных полос, обусловленных валентными и деформационными колебаниями О—Н-групп, С—Н-связей и ароматических колец (рис. 2, таблица).

Экспериментальные значения волновых чисел
полос ИК-поглощения фоторезиста ($h = 2,5$ мкм)

Experimental values of the wave numbers
of the IR absorption bands of the photoresist ($h = 2.5$ μm)

Волновые числа исходной пленки, см ⁻¹	Функциональная группа; тип колебаний	Волновые числа имплантированной пленки, см ⁻¹	Примечание
3307 с	Связанные О—Н; валентные [10; 12]	3279	Широкая бесструктурная в диапазоне 3100–3600 см ⁻¹
~3014 сл 2963 2930 ~2870 сл	С—Н; валентные [10; 12]	~3012 2961 2926 ~2870	Широкая структурированная с 4 выраженными максимумами; после ИИ перераспределение интенсивности в пользу 2926 см ⁻¹
—	С=C=X, кумулятивные двойные связи; валентные [10]	2151 с	Интенсивные полосы появляются после ИИ
—	R—C≡C— тройная; валентные [10]	2115	
1701 с	С=О; валентные [11]	1699	Уширение после ИИ, интенсивность возрастает
1653 сл	Вода? [12]	—	Исчезает после ИИ
1606 1594 с 1559 сл 1541 сл	Пульсационные колебания углеродного скелета ароматического кольца [11]	1606 1594 1561 1541	После ИИ снижение интенсивности полосы 1606 см ⁻¹ при росте интенсивности полос 1594 и 1561 см ⁻¹
1506 с	Валентные колебания ароматического кольца [11]	1506	Слабое снижение интенсивности после ИИ
1453	С—Н в формальдегиде [13]	1451	Снижение интенсивности
1433 с	Валентные колебания ароматического кольца, связанные с СН ₂ -мостиком [13]	1433 с	Перераспределение интенсивностей: рост 1433 см ⁻¹ , снижение 1451 см ⁻¹
—	—CH ₂ —CO— [10]	1403 с	Сильная одиночная полоса, возникает после ИИ
1362 с	ОН-группа [10]; деформационные плоскостные	1360 с	Снижение интенсивности
1231 1199 1176 с 1150	С—О—Н-группа [14]; плоскостные деформационные	1229 1194 1174 1150	Широкая структурированная полоса с 4 выраженными максимумами. При ИИ перераспределение интенсивности максимумов: рост 1174 и 1150 см ⁻¹ при снижении 1194 см ⁻¹
1132 сл	Валентные колебания С—С-связи в полиэтилене [15]	—	Исчезает при ИИ
1099 1074	...	1097 1074	При ИИ перераспределение интенсивности максимумов: рост 1074 см ⁻¹ при снижении 1097 см ⁻¹
1044 сл	S—O- и C—O-колебания в —CH ₂ —COH-группе [10]	1044?	Снижение интенсивности (до исчезновения)
1013	—CCH; деформационные [14]	1013	—

Окончание табл. 1
Ending table 1

Волновые числа исходной пленки, см ⁻¹	Функциональная группа; тип колебаний	Волновые числа имплантированной пленки, см ⁻¹	Примечание
971	—CH ₂ —COH-группа [14]	—	При ИИ снижение интенсивности (до исчезновения)
—	—	954 сл	Слабая, возникает после ИИ
864	Ароматическое кольцо [13]	889	Исчезает и возникает полоса 889 см ⁻¹
819 с	CH; неплоскостные паразамещенного кольца [13]	819	—
780 сл	...	774 с	Возникает (резко усиливается) при ИИ
752 с	CH; неплоскостные ортозамещенного кольца [13]	750	—
708 с	CH ₂ метиленовая [12]	—	Исчезает после ИИ
654	...	654	Усиливается после ИИ
601 сл	...	597	Усиливается после ИИ
—	—	554 сл	Наблюдается только в имплантированных образцах

Примечание. Интенсивность полосы: с – сильная; сл – слабая.

В процессе ИИ происходила трансформация спектра НПВО: появлялись новые интенсивные полосы, имели место смещение в низкоэнергетичную область максимумов ряда полос и перераспределение интенсивностей между максимумами расположенных рядом полос (см. таблицу). Указанный эффект наблюдался для валентных колебаний C—H-связей, плоскостных деформационных колебаний O—H-связей и пульсационных колебаний углеродного скелета ароматических колец.

При анализе экспериментальных данных необходимо учитывать следующее. Как отмечалось выше, эффективная толщина поглощающей среды (в нашем случае – фоторезиста) существенным образом превышает геометрическую толщину исследуемых пленок, т. е. вклад в спектр НПВО дает не приповерхностный слой фоторезиста, а вся пленка. С другой стороны, проецированный пробег ионов бора с энергией 100 кэВ в пленке фоторезиста составляет ~400 нм, что равно примерно половине толщины тонкой (1,0 мкм) пленки фоторезиста. В этих пленках как до имплантации, так и после нее интенсивных полос поглощения не наблюдалось (см. рис. 1). Это указывает на то, что основной вклад в спектры НПВО более толстых пленок ($h = 2,5$ мкм) вносит слой фоторезиста за область пробега ионов.

В зоне валентных колебаний, вызванных H-связью O—H-групп, наблюдалась широкая полоса с максимумом при ~3307 см⁻¹, обусловленная суперпозицией большого количества близкорасположенных узких полос (см. рис. 2). ИИ приводила к смещению максимума указанной полосы в низкоэнергетичную область на 28 см⁻¹. Полос, соответствующих валентным колебаниям свободных O—H-групп, в спектрах НПВО не наблюдалось. Отметим, что при ИИ снижается интенсивность полосы с максимумом ~1360 см⁻¹, обусловленной деформационными колебаниями O—H-групп [9]. Это может свидетельствовать о разрыве O—H-связей в процессе ИИ.

В области валентных колебаний C—H-связей наблюдалась широкая структурированная полоса поглощения с 3 выраженными максимумами (3014, ~2960 и ~2930 см⁻¹). Имплантация В⁺ приводила к слабому смещению в низкоэнергетичную область на 2–4 см⁻¹ указанных локальных максимумов и перераспределению интенсивностей между максимумами в пользу более низкоэнергетичного максимума при 2926 см⁻¹. Это может свидетельствовать о сшивании молекул фоторезиста при проведении ИИ, поскольку полосу с максимумом при ~2925 см⁻¹ обычно связывают с метиленовой группой (CH₂), а при 2960 см⁻¹ – с концевой метильной группой (CH₃) [10]. Смещение в низкоэнергетичную область частоты валентных колебаний указывает на увеличение длины C—H-связей при имплантации [15].

После ИИ появлялись две интенсивные полосы поглощения с максимумами при 2151 и 2115 см⁻¹ (рис. 3, а). Этот спектральный диапазон характерен для кумулятивных двойных связей типа C=C=X [10; 12]. Так, в спектрах кетена наблюдается интенсивная полоса с максимумом при 2150 см⁻¹, обусловленная валентными колебаниями C=C=O. Как отмечалось в [5], кетены образуются из

О-нафтохинондиазида при облучении в безводной атмосфере, имеющей место при ИИ. В области $2100\text{--}2140\text{ см}^{-1}$ наблюдается полоса валентных колебаний тройной связи $\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ в алкинах [12]. Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют об интенсивном формировании в полимерной матрице двойных и тройных сопряженных связей.

В зоне колебаний ароматического кольца ($1550\text{--}1750\text{ см}^{-1}$) после ИИ наблюдалась значительная трансформация спектра, выражавшаяся в перераспределении интенсивности полос (рис. 3, б). Так, для ряда полос, в частности с максимумами при 1594 и 1561 см^{-1} , интенсивность возрастала, для других полос (1606 и 1653 см^{-1}) она снижалась вплоть до исчезновения. Полосы в диапазоне волнового числа $1600\text{--}1575\text{ см}^{-1}$ обычно связывают с пульсационными колебаниями углеродного скелета ароматического кольца [10].

Валентными колебаниями ароматического кольца обусловлена полоса с максимумом при $\sim 1500\text{ см}^{-1}$, и ее интенсивность после имплантации существенно не изменяется. Для полосы $1430\text{--}1455\text{ см}^{-1}$ (рис. 3, в), связанной также с валентными колебаниями ароматического кольца [10], обнаруживается перераспределение интенсивности между максимумами при 1451 и 1433 см^{-1} . Приведенные экспериментальные данные позволяют заключить: существенного разрушения или повреждения ароматических колец за область пробега ионов после ИИ не наблюдается, однако изменяется состав заместителей, что приводит к перераспределению интенсивностей и смещению полос валентных колебаний.

Отметим, что у имплантированных слоев фоторезиста в рассматриваемом спектральном диапазоне появляется новая полоса с максимумом при 1403 см^{-1} , природа которой к настоящему времени окончательно не установлена. Согласно [16] в спектре стерически затрудненного фенола присутствует интенсивная полоса при $\sim 1400\text{ см}^{-1}$. Предполагается, что она обусловлена деформационными колебаниями

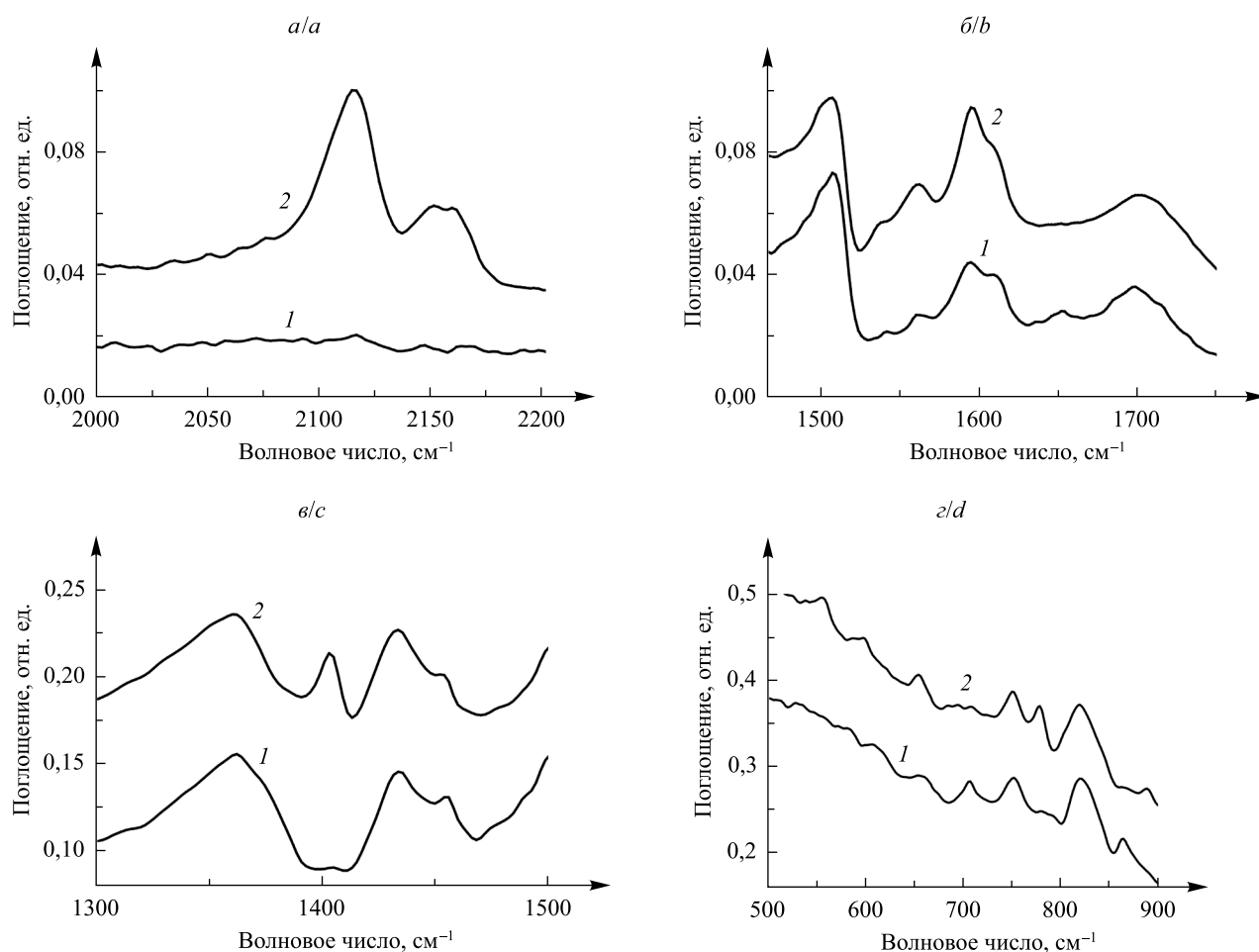


Рис. 3. Спектры НПВО пленок ФП9120 ($h = 2,5\text{ мкм}$) – исходных (1) и имплантированных (2) – в области валентных кратных связей (а), колебаний ароматического кольца (б, в) и деформационных колебаний $\text{C}-\text{H}$ -связей (г)

Fig. 3. ATR spectra of FP9120 films (thickness $2.5\text{ }\mu\text{m}$) of the initial (1) and implanted (2) in the region of valence multiple bonds (a), vibrations aromatic ring (b, c) and deformation vibrations of CH bonds (d)

C—O—H-групп. В фоторезисте такая группа участвует во взаимодействии фенола с диазохиноном, поэтому в исходных образцах она не наблюдается. При ИИ это взаимодействие нарушается и возникает полоса при 1403 см^{-1} .

В области плоскостных деформационных колебаний O—H-связей ($1000\text{--}1250\text{ см}^{-1}$), как и в случае с пульсационными колебаниями углеродного скелета ароматического кольца, после ИИ наблюдалось перераспределение интенсивностей между полосами и смещение максимумов полос в низкоэнергетическую зону на $\sim 2\text{ см}^{-1}$.

Серьезная трансформация спектра НПВО после ИИ имеет место и в области деформационных колебаний C—H-связей (рис. 3, з). Интенсивность полосы с максимумом при $\sim 708\text{ см}^{-1}$, обусловленной деформационными колебаниями C—H-связей метиленовой группы [13], при имплантации резко снижается, что может быть связано с удалением водорода и, как отмечалось ранее, образованием сопряженных связей >C=C=C< . Полосы, ответственные за колебания C—H-связей ароматического кольца (819 и 750 см^{-1}), в процессе облучения существенной модификации не испытывают. Отметим, что после ИИ в указанном спектральном диапазоне появляется достаточно интенсивная полоса с максимумом при 774 см^{-1} , природа которой до конца не ясна.

Таким образом, получены экспериментальные доказательства модификации структуры фоторезиста за пределом области пробега ионов, подтверждающие выводы, сделанные в работах [5–8; 17]. Так, модификация фоторезиста вне зоны пробега приводит к радиационному упрочнению полимера по всей толщине пленки [5; 17], обусловленному процессами радиационного сшивания. Увеличение удельной энергии отслаивания пленки [7] происходит за счет образования в процессе ИИ сложноэфирных сшивок на границе раздела кремний – фоторезист. Модификация структуры фоторезиста в запробежной области приводит также к уменьшению показателя преломления пленки [6]. Кумулятивные двойные связи типа C=C=X , образующиеся в указанной области, обуславливают, вероятнее всего, появление в спектре ЭПР линии с g -фактором $2,00654$, наблюдавшейся ранее после имплантации пленок фоторезиста ионами B^+ и P^+ [8].

Заключение

В спектрах НПВО структур фоторезист – кремний, облученных ионами B^+ , наблюдается подъем фона поглощения с ростом дозы имплантации, обусловленный, вероятнее всего, процессами рассеяния на нарушениях, созданных ИИ. Таковая приводит к интенсивной трансформации фоторезиста за областью пробега ионов, которая характеризуется появлением в спектре интенсивных полос с максимумами при 2151 и 2115 см^{-1} , обусловленных валентными колебаниями двойных кумулятивных связей, в частности C=C=O . После ИИ имели место смещение максимумов валентных колебаний C—H-связей в низкоэнергетическую область на $2\text{--}4\text{ см}^{-1}$ и перераспределение интенсивностей между этими максимумами в пользу более низкоэнергетического, что может свидетельствовать о сшивании молекул фоторезиста при проведении ИИ. Аналогичный эффект наблюдался также у плоскостных деформационных колебаний O—H-связей и пульсационных колебаний углеродного скелета ароматических колец. Экспериментальные данные свидетельствуют об интенсивном формировании в полимерной матрице двойных и тройных сопряженных связей в процессе ИИ.

Библиографические ссылки

1. Kondyurin A, Bilek M. *Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space*. Amsterdam: Elsevier; 2015. 268 p.
2. Моро У. *МикролитогRAFия. Принципы, методы, материалы. Часть 2*. Зарослов ДЮ, Мокроусов КЯ, Никитаев ВА, переводчики. Москва: Мир; 1990. 606 с.
3. Анищик ВМ, Горушко ВА, Пилипенко ВА, Понарядов ВВ, Солодуха ВА. Применение быстрой термической обработки для отжига ионно-легированных слоев в поликремнии. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017; 2:63–68.
4. Анищик ВМ, Горушко ВА, Пилипенко ВА, Понарядов ВВ, Солодуха ВА. Перераспределение примеси в ионно-легированных слоях при быстрой термообработке подзатворного диэлектрика. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;2:48–53. DOI: 10.33581/2520-2243-2019-2-48-53.
5. Бринкевич ДИ, Бринкевич СД, Вабищевич НВ, Оджаев ВБ, Просолович ВС. Ионная имплантация позитивных фоторезистов. *Микроэлектроника*. 2014;43(3):193–199. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0544126914010037>.
6. Бринкевич ДИ, Харченко АА, Просолович ВС, Оджаев ВБ, Бринкевич СД, Янковский ЮН. Модификация спектров отражения пленок диазохинонноволочного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора. *Микроэлектроника*. 2019; 48(3):235–239.
7. Вабищевич СА, Бринкевич СД, Бринкевич ДИ, Просолович ВС. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинонноволочного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора. *Химия высоких энергий*. 2020;54(1):54–59. DOI: 10.1134/S0018143920010129.

8. Олешкевич АН, Лапчук НМ, Оджаев ВБ, Карпович ИА, Просолович ВС, Бринкевич ДИ, Бринкевич СД. Электронная проводимость в имплантированном ионами P^+ позитивном фоторезисте. *Микроэлектроника*. 2020;49(1):58–65.
9. Беккер Ю. *Спектроскопия*. Казанцева ЛН, переводчик. Москва: Техносфера; 2009. 528 с.
10. Тарасевич БН. *ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы*. Москва: МГУ; 2012. 54 с.
11. Преч Э, Бюльманн Ф, Аффольтер К. *Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных*. Тарасевич БН, переводчик. Москва: Мир; 2006. 439 с. (Методы в химии).
12. Иванова ЛВ, Сафиева РЗ, Кошелев ВН. ИК-спектроскопия в анализе нефти и нефтепродуктов. *Вестник Башкирского университета*. 2008;13(4):869–874.
13. Poljanšek I, Šebenik U, Krajnc M. Characterization of phenol – urea – formaldehyde resin by inline FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006;99(5):2016–2028. DOI: 10.1002/app.22161.
14. Бобкова ЕЮ, Васильева ВС, Ксенофонтов МА, Умрейко ДС. Влияние агрегатного состояния на спектральные характеристики фенола. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. 2008;1:12–18.
15. Слуцкер АИ, Виттегрень ВИ, Кулик ВБ, Гиляров ВЛ, Поликарпов ЮИ, Каров ДД. Детализация деформационных процессов в полимерных кристаллах. *Физика твердого тела*. 2015;57(11):2236–2244.
16. Васильев АВ. Введение в спектроскопию. Инфракрасная спектроскопия [Интернет]. 2018 [процитировано 27 января 2019 г.]. Доступно по: http://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/new-277_InfraRedSpektr.pdf.
17. Вабищевич СА, Вабищевич НВ, Бринкевич ДИ, Просолович ВС, Бринкевич СД. Прочностные свойства структур фоторезист – кремний, γ -облученных и имплантированных ионами B^+ и P^+ . *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. Физика*. 2016;12:51–57.

References

1. Kondyurin A, Bilek M. *Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space*. Amsterdam: Elsevier; 2015. 268 p.
2. Moreau WM. *Semiconductor Lithography. Principles, Practices, and Materials*. New York: Plenum Press; 1988. 919 p.
Russian edition: Moreau WM. *Микролитография. Принципы, методы, материалы. Часть 2*. Zaroslov DYU, Mokrousov KYa, Nikitaev VA, translators. Moscow: Mir; 1990. 606 p.
3. Anishchik VM, Harushka VA, Pilipenko UA, Ponariadov VV, Saladukha VA. Application of the rapid thermal treatment for annealing the ion-doped layers of polysilicon. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2017;2:63–68. Russian.
4. Anishchik VM, Harushka VA, Pilipenko UA, Ponariadov VV, Saladukha VA. Redistribution of impurity in ion-doped layers during fast heat treatment of gate dielectric. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;2:48–53. Russian. DOI: 10.33581/2520-2243-2019-2-48-53.
5. Brinkevich DI, Brinkevich SD, Vabishchevich NV, Odzhaev VB, Prosolovich VS. [Ion implantation of positive photoresists]. *Mikroelektronika*. 2014;43(3):193–199. Russian. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0544126914010037>.
6. Brinkevich DI, Kharchenko AA, Prosolovich VS, Odzhaev VB, Brinkevich SD, Yankovski YuN. [Reflection spectra modification of diazoquinone-novolac photoresist implanted with B and P ions]. *Mikroelektronika*. 2019;48(3):235–239. Russian.
7. Vabishchevich SA, Brinkevich SD, Brinkevich DI, Prosolovich VS. [Adhesion of diazoquinone-novolac photoresist films implanted with boron and phosphorus ions to single-crystal silicon]. *Khimiya vysokikh energii*. 2020;54(1):54–59. DOI: 10.1134/S0018143920010129. Russian.
8. Oleshkevich AN, Lapchuk NM, Odzhaev VB, Karpovich IA, Prosolovich VS, Brinkevich DI, Brinkevich SD. [Electronic conductivity in a P^+ -ion implanted positive photoresist]. *Mikroelektronika*. 2020;49(1):58–65. Russian.
9. Böcker J. *Spektroskopie*. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG; 1997.
Russian edition: Böcker J. *Спектроскопия*. Kazantseva LN, translator. Moscow: Tekhnosfera; 2009. 528 p.
10. Tarasevich BN. *ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы* [IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2012. 54 p. Russian.
11. Pretsch E, Büllmann P, Affolter C. *Structure determination of organic compounds. Tables of spectral data*. Berlin: Springer; 2000. 404 p.
Russian edition: Pretsch E, Bullmann P, Affolter C. *Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных*. Tarasevich BN, translator. Moscow: Mir; 2006. 439 p. (Методы в химии).
12. Ivanova LV, Safieva RZ, Koshelev VN. [IR spectrometry in the analysis of oil and petroleum products]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2008;13(4):869–874. Russian.
13. Poljanšek I, Šebenik U, Krajnc M. Characterization of phenol – urea – formaldehyde resin by inline FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006;99(5):2016–2028. DOI: 10.1002/app.22161.
14. Bobkova EYu, Vasilyeva VS, Ksenofontov MA, Umreiko DS. The effect of the state of aggregation on the spectral characteristics of phenol. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2008;1:12–18. Russian.
15. Slucker AI, Vittegren VI, Kulik VB, Gilyarov VL, Polikarpov YI, Karov DD. [Detailing of deformation processes in polymer crystals]. *Fizika tverdogo tela*. 2015;57(11):2236–2244. Russian.
16. Vasilyev AV. Introduction to spectroscopy. Infrared spectroscopy [Internet]. 2018 [cited 2019 January 27]. Available from: http://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/new-277_InfraRedSpektr.pdf. Russian.
17. Vabishchevich SA, Vabishchevich NV, Brinkevich DI, Prosolovich VS, Brinkevich SD. [Strength properties of photoresist-silicon structures, γ -irradiated and implanted with B^+ and P^+ ions]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C: Fundamentalnye nauki. Fizika*. 2016;12:51–57. Russian.