

**ИНФРАКРАСНАЯ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ СТРУКТУР ФОТОРЕЗИСТ/КРЕМНИЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ**

Д. И. Бринкевич<sup>1\*</sup>, Е. В. Гринюк<sup>1,4</sup>, С. Д. Бринкевич<sup>1,5</sup>, В. С. Просолович<sup>1</sup>,  
В. В. Колос<sup>2</sup>, О. А. Зубова<sup>2</sup>, С. Б. Ластовский<sup>3</sup>

УДК 535.312:546.28

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: brinkevich@bsu.by

<sup>2</sup> ОАО “ИНТЕГРАЛ” — управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”,  
Минск, Беларусь; e-mail: OZubova@integral.by

<sup>3</sup> ГНПО “НПЦ НАН Беларуси по материаловедению”, Минск, Беларусь; e-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского  
государственного университета, Минск, Беларусь; e-mail: grinyuk@tut.by

<sup>5</sup> ООО “Мой медицинский центр — высокие технологии”, Всеволожск Ленинградской обл., Россия

(Поступила 14 июля 2023)

Методом ИК-Фурье-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения исследованы пленки фоторезиста (ФР) NFR 016D4, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Установлено, что при волновых числах  $<1600\text{ см}^{-1}$  наблюдается возрастание фоновое поглощения структур ФР/Si, обусловленное воздействием электромагнитного излучения на кремниевую подложку и процессами рассеяния/отражения на границе раздела ФР/Si. Обнаружена асимметричность силового поля ароматического кольца в пленке NFR 016D4. Показано, что особенности спектров пленок ФР NFR 016D4 с большей толщиной обусловлены наличием остаточного растворителя. В облученных пленках обнаружено образование формальдегида в результате фрагментации гидроксиметильных остатков в составе фенолформальдегидной смолы. Радиационно-индуцированные процессы в фоторезистивных пленках NFR 016D4 при дозах до  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-1}$  происходят в основном при участии молекул остаточного растворителя либо на побочных продуктах синтеза фоторезистивной пленки.

**Ключевые слова:** нарушенное полное внутреннее отражение, негативный фоторезист, кремний, электронное облучение.

Photoresist (PR) NFR 016D4 films deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation have been studied by attenuated total reflection IR-Fourier spectroscopy. It has been established that at wave numbers  $<1600\text{ cm}^{-1}$ , an increase in the background absorption of the PR/Si structures is observed, due to the effect of electromagnetic radiation on the silicon substrate and scattering/reflection processes at the PR/Si interface. The asymmetry of the force field of the aromatic ring in the NFR 016D4 film has been found. It is shown that the features of the spectra of thicker NFR 016D4 photoresist films are due to the presence of residual solvent. In the irradiated films, the formation of formaldehyde has been detected as a result of the fragmentation of hydroxymethyl residues in the composition of the phenol-formaldehyde resin. Radiation-induced processes in NFR 016D4 photoresistive films at doses up to  $2 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-1}$  take place mainly with the participation of residual solvent molecules or on by-products of photoresistive film synthesis.

**Keywords:** attenuated total reflection, negative photoresist, silicon, electron irradiation.

**ATTENUATED TOTAL REFLECTION IR-SPECTROSCOPY OF PHOTORESIST/SILICON STRUCTURES FOR EXPLOSIVE LITHOGRAPHY**

S. D. Brinkevich<sup>1\*</sup>, E. V. Grinyuk<sup>1,4</sup>, D. I. Brinkevich<sup>1,5</sup>, V. S. Prosolovich<sup>1</sup>, V. V. Kolos<sup>2</sup>, O. A. Zubova<sup>2</sup>, S. B. Lastovskii<sup>3</sup> (<sup>1</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: brinkevich@bsu.by; <sup>2</sup> JSC “Integral” Holding Management Company, Minsk, Belarus; e-mail: OZubova@integral.by; <sup>3</sup> SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of National of Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus; e-mail: lastov@ifftp.bas-net.by; <sup>4</sup> Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: grinyuk@tut.by; <sup>5</sup> LLC “My Medical Center – High Technologies”, Vsevolozhsk, Russia)

**Введение.** В современной микроэлектронике метод обратной литографии применяется для создания на подложке структур, формирование которых прямым методом литографии проблематично [1]. В частности, обратная литография используется для создания металлизации из драгоценных металлов, травление которых обычно является сложной задачей. Один из главных факторов успешного применения обратной литографии — образование отрицательного угла наклона маски фоторезиста (ФР) (нависающий профиль боковых стенок). На такие боковые стенки профиля металл не осаждается, что облегчает процесс удаления слоя ФР и обеспечивает гладкость края формируемого элемента. При экспонировании негативного ФР происходит “сшивка” полимеров, в результате чего пленка становится не растворимой в проявителе [2]. При воздействии электромагнитного излучения верхние слои пленки ФР получают большее количество энергии, чем нижние. Вследствие этого нижние слои пленки лучше растворяются в проявителе, что способствует формированию отрицательного угла наклона маски ФР. В качестве пленкообразующего полимера ФР для обратной литографии обычно используют растворимые в водно-щелочном проявителе новолачные смолы. Такими ФР являются химически усиленные негативные фоторезисты серии NFR (JSR, Япония).

В настоящей работе изучены оптические характеристики пленок фоторезиста NFR 016D4 на монокристаллическом кремнии, облученных высокоэнергетическими электронами ~5 МэВ.

**Эксперимент.** Пленки негативного новолачного ФР NFR 016D4 толщиной 3.5 и 5.2 мкм наносились на поверхность Si с ориентацией (111) методом центрифугирования [3]. В качестве растворителя использован метил-3-метоксипропилат. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования пленки ФР проводилась ее сушка при температуре 90 °С.

Облучение электронами с энергией 5 МэВ дозой до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  проводилось на линейном ускорителе электронов У-003. Плотность потока электронов  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  контролировалась с помощью цилиндра Фарадея. Температура образцов в процессе облучения  $\leq 310 \text{ К}$ . Спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) структур ФР/Si в диапазоне  $400\text{—}4000 \text{ см}^{-1}$  зарегистрированы при комнатной температуре ИК-Фурье-спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH). Разрешение  $2 \text{ см}^{-1}$ , количество сканов 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением [4].

**Результаты и их обсуждение.** Спектры НПВО пленок негативного новолачного ФР NFR 016D4 представлены на рис. 1. Экспериментальные частоты полос ИК-поглощения функциональных групп NFR 016D4 приведены в табл. 1. При  $\nu < 1600 \text{ см}^{-1}$  в спектре НПВО наблюдается возрастание фонового поглощения структур ФР/Si, более выраженное в тонкой пленке (рис. 1). В спектрах НПВО пленок ФР, отделенных от кремния, существенного роста фонового поглощения не наблюдается, что обусловлено проникновением ИК-излучения в кремниевую подложку и рассеянием/отражением на границе раздела ФР/Si. При измерении НПВО эффективная глубина проникновения ИК-излучения

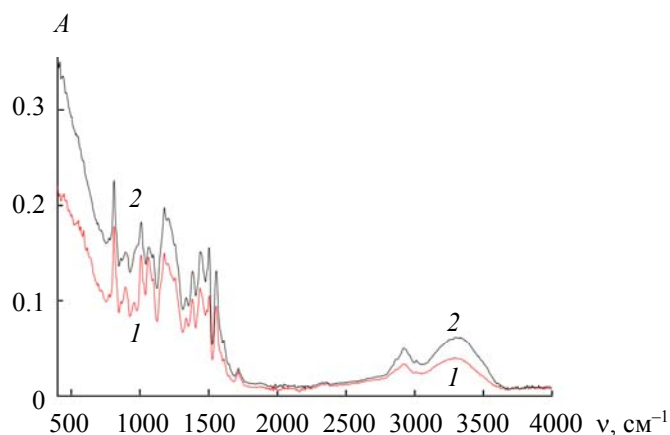


Рис. 1. Спектры НПВО пленок фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5.2 (1) и 3.5 мкм (2)

**Т а б л и ц а 1. Экспериментальные частоты ИК-поглощения функциональных групп в негативном фоторезисте NFR 016D4**

$\nu$ , $\text{см}^{-1}$	$I$	Функциональная группа, тип колебаний	Примечание
774	слабая	внеплоскостные колебания С-Н-связей орто- и паразамещенного кольца [5]	
812	сильная		
862	слабая	—	
895	средняя	—	широкая полоса, усиливается при увеличении толщины слоя
958	слабая	С-О-С-связи в метил-3-метоксипропилате [7, 8, 13]	усиливается при увеличении толщины слоя
1009	сильная	колебания С-С связей [4]	
1064	сильная	С-О-С-связи в метил-3-метоксипропилате [7, 8, 13]	интенсивность возрастает в ~2 раза при увеличении толщины слоя
1100	слабая	валентные колебания Si-О-связей в кремнии [6]	
1176	сильная	валентные колебания С-О- и Si-О-связей в кислородных преципитатах в кремнии [6]	широкая полоса с тремя максимумами
1204			
1256			
1338	слабая	—	
1381	средняя	деформационные плоскостные колебания ОН-связей [7]	
1436	средняя	валентные колебания ароматического кольца, связанные с $\text{CH}_2$ -мостиком [7]	
1503	сильная	валентные колебания ароматического кольца [7]	
1556	сильная	пульсационные колебания углеродного скелета ароматического кольца [8]	
1607	слабая		
1717	слабая	С=О-валентные колебания в сложных ароматических эфирах [8, 9]	
~2875	слабая	симметричные валентные колебания $\text{CH}_2$ -групп [8]	
2925	средняя	асимметричные валентные колебания $\text{CH}_2$ -групп [8]	
3012	слабая	валентные колебания СН-групп [10]	
3290	средняя	О-Н-валентные колебания, водородная связь [10]	широкая полоса, в тонком ФР интенсивность выше в ~2 раза

в ФР-пленку ( $d_{\text{эф}}$ ) составляет порядка половины длины волны  $\lambda$  [11]. При  $\nu < 1600 \text{ см}^{-1}$   $d_{\text{эф}}$  сравнима с толщиной тонкой пленки, ИК-излучение достигает границы раздела ФР/Si; проявляются эффекты рассеяния/отражения на границе раздела и поглощения в кремниевой подложке.

Отметим особенности спектра НПВО новолачного ФР NFR 016D4 в области пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (полосы 1556 и 1607  $\text{см}^{-1}$ ): доминирует полоса 1556  $\text{см}^{-1}$ , а полоса 1607  $\text{см}^{-1}$  едва заметна на фоне шумов. Такое соотношение полос имеет место при резко асимметричном силовом поле ароматического кольца [7]. В спектрах позитивных новолачных ФР [4, 6, 9] наблюдается противоположная картина: интенсивность полосы 1607  $\text{см}^{-1}$  существенно выше, чем полосы 1556  $\text{см}^{-1}$ , т. е. силовое поле в ароматическом кольце позитивного ФР симметрично.

В спектрах ФР NFR 016D4 интенсивность полос в диапазоне 2800—3600  $\text{см}^{-1}$ , обусловленных связанными валентными колебаниями групп ОН и  $\text{CH}_2$ , снижается при увеличении толщины пленки (рис. 1). Это свидетельствует о том, что концентрация ОН-групп по толщине пленки ФР неоднородна и возрастает по мере приближения к границе раздела ФР/Si. В позитивных новолачных фоторезистах ФП9120 и S1813 G2 SP15 такого эффекта не наблюдалось [4, 9]. Кроме того, в отличие от позитив-

ных ФР в спектрах NFR 016D4 отсутствуют полосы, обусловленные валентными колебаниями  $\text{CH}_3$ -группы, что указывает на отсутствие метильных групп в качестве заместителей.

При увеличении толщины пленки ФР NFR 016D4 наблюдается перераспределение интенсивностей ряда полос. Так, в толстой пленке интенсивность полосы  $1436\text{ см}^{-1}$  выше, чем полосы  $1503\text{ см}^{-1}$ , а в тонкой пленке имеет место обратное соотношение (рис. 1). Отметим, что полоса  $1503\text{ см}^{-1}$  обусловлена валентными колебаниями ароматического кольца, а  $1436\text{ см}^{-1}$  — такими же колебаниями, связанными с  $\text{CH}_2$ -мостиком между ароматическими кольцами [4]. Это позволяет сделать вывод, что с увеличением толщины пленки снижается вероятность образования связей по  $\text{CH}_2$ -мостику, которые могут осуществляться между соседними молекулами новолачной смолы или растворителя [11, 12]. Кроме того, при увеличении толщины ФР-пленки NFR 016D4 наблюдается смещение максимума полосы  $1436\text{ см}^{-1}$  в низкоэнергетическую область на  $4\text{ см}^{-1}$ . Причина этого до конца не ясна и может быть связана с принципиально разными процессами. Уменьшение частоты колебаний может быть обусловлено изменением угла мостиковой  $\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}$ -связи между фенольными фрагментами вследствие деформации пленки в процессе роста [11]. Изменение частоты колебаний  $\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}$  мостиковой группы может быть также обусловлено химической модификацией ее структуры. Например, в [12] отмечена возможность сшивания новолачной смолы по фрагментам  $-\text{CH}_2-$ .

Наиболее сильно (в  $\sim 2$  раза) при увеличении толщины пленки возрастает интенсивность полосы с максимумом  $1064\text{ см}^{-1}$ . Для толстой пленки эта полоса сравнивается по интенсивности с полосой  $1009\text{ см}^{-1}$ , обусловленной колебаниями  $\text{C}-\text{C}$ -связей. Также существенно возрастает интенсивность полос с максимумами  $895$  и  $958\text{ см}^{-1}$ . Интенсивность остальных полос поглощения при увеличении толщины пленки практически не изменяется. Полосы с максимумами  $\sim 1064$  и  $960\text{ см}^{-1}$  обусловлены колебаниями  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ -связей [7, 8, 13] и характерны для растворителя метил-3-метоксипропилата. Это позволяет утверждать, что особенности спектров толстых пленок ФР NFR 016D4 обусловлены остаточным растворителем, не полностью удаленным при сушке. Его содержание должно возрастать при приближении к границе раздела ФР/Si, что и наблюдается в эксперименте. Влияние остаточного растворителя имеет место и при облучении электронами пленок NFR 016D4. Радиационно-индуцированные процессы в толстых и тонких пленках существенно различаются.

Спектры НПВО исходных и облученных быстрыми электронами с энергией  $5\text{ МэВ}$  дозой  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  тонких пленок схожи (рис. 2). Наблюдаются небольшие изменения в соотношении интенсивностей некоторых близко расположенных полос. Так, возрастают интенсивности полос  $862$ ,  $958$  и  $1100\text{ см}^{-1}$  в сравнении с полосами  $895$ ,  $1009$  и  $1064\text{ см}^{-1}$  соответственно. Полосы  $958$ ,  $1009$  и  $1064\text{ см}^{-1}$  обусловлены  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ - и  $\text{C}-\text{C}$ -связями в метил-3-метоксипропилате, и изменение их интенсивностей указывает на радиационно-индуцированные процессы в растворителе (вероятнее всего, его разложение/испарение). С разложением растворителя, по-видимому, связано и возрастание интенсивности широкой полосы с максимумом  $\sim 3290\text{ см}^{-1}$ , обусловленной колебаниями  $\text{O}-\text{H}$ -связей (рис. 2, а). Следует отметить возрастание интенсивности полосы  $1503\text{ см}^{-1}$ , обусловленной валентными колебаниями ароматического кольца, при одновременном снижении интенсивности полосы  $1436\text{ см}^{-1}$ , связанной с  $\text{CH}_2$ -мостиком между ароматическими кольцами (рис. 2, б). Это может быть обусловлено сшиванием при облучении молекул новолачной смолы по  $\text{CH}_2$ -мостику.

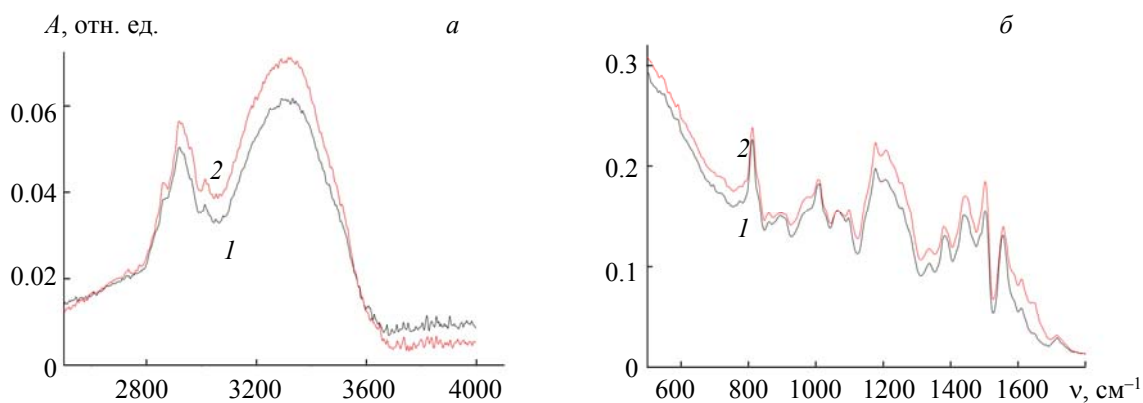


Рис. 2. Спектры НПВО исходных (1) и облученных быстрыми электронами дозой  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  (2) пленок ФР толщиной  $3.5\text{ мкм}$

В процессе облучения наблюдается также увеличение интенсивности высокоэнергетического спектрального контура полосы с максимумом  $1556\text{ см}^{-1}$ . На этом контуре усиливаются два локальных максимума:  $1607\text{ см}^{-1}$  (пульсационные колебания углеродного скелета ароматического кольца [8]) и  $1650\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания С=О-связей [7, 8]). При этом снижаются интенсивности полос  $1556\text{ см}^{-1}$  (пульсационные колебания углеродного скелета ароматического кольца [8]) и  $1717\text{ см}^{-1}$  (С=О валентные колебания в сложных ароматических эфирах [8, 9]). Таким образом, имеет место перераспределение интенсивности полос пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца в пользу более высокоэнергетической полосы и интенсивностей полос валентных колебаний С=О-связей в пользу более низкоэнергетической. Ранее [9] возрастание интенсивности полосы с максимумом  $\sim 1650\text{ см}^{-1}$  наблюдалось в ходе  $\gamma$ -облучения позитивных новолачных ФР и было связано с образованием формальдегида  $\text{CH}_2=\text{O}$ . Образование формальдегида может осуществляться в результате фрагментации гидроксиметильных остатков в составе фенолформальдегидной смолы [9]. Модификация структуры полосы пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца при облучении обусловлена изменениями в количестве и природе заместителей при ароматическом кольце [9].

Радиационно-индуцированные изменения спектров НПВО в толстых пленках значительно более выражены, чем в тонких (рис. 3). Для толстых пленок с ростом дозы снижается интенсивность широкой полосы с максимумом  $\sim 3280\text{ см}^{-1}$ , обусловленной колебаниями О-Н-связей. Интенсивность полосы  $2925\text{ см}^{-1}$ , связанной с колебаниями  $\text{CH}_2$ -группы, при облучении изменяется в меньшей степени и в облученных образцах сравнивается с интенсивностью полосы  $3280\text{ см}^{-1}$  и даже превышает ее (рис. 3, а). Заметно снижается также интенсивность полосы  $1381\text{ см}^{-1}$ , обусловленной деформационными колебаниями О-Н-связей (рис. 3, б).

В области валентных колебаний С=О-связей модификация спектра НПВО в толстых пленках более значительна, чем в тонких. Так, снижается интенсивность полосы с максимумом  $1717\text{ см}^{-1}$  и при дозе  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  она слабо различима на уровне шума (рис. 3, б). При этом возрастает поглощение в более низкоэнергетической области: растет интенсивность полосы  $1650\text{ см}^{-1}$  и появляются новые слабые локальные максимумы  $\sim 1620$ ,  $1670$  и  $1680\text{ см}^{-1}$ . Как отмечалось, полоса  $1650\text{ см}^{-1}$  обусловлена образованием формальдегида. Полоса  $\sim 1717\text{ см}^{-1}$  обусловлена валентными колебаниями С=О-связей в ароматических соединениях. При изменении ближайшего окружения максимум этой полосы может смещаться в достаточно широких пределах. Так, участие С=О-группы в межмолекулярных водородных связях приводит к снижению частоты ее валентных колебаний на  $40\text{--}60\text{ см}^{-1}$  [15]. При сопряжении с С=C-связями максимум полосы указанных колебаний смещается в диапазон  $1600\text{--}1650\text{ см}^{-1}$  [7, 13]. Ранее [16] при имплантации новолачного ФР ФП9120 было обнаружено формирование содержащих сопряженные связи хиноидных структур, для них максимум полосы поглощения должен находиться в диапазоне  $1645\text{--}1690\text{ см}^{-1}$  [7] в зависимости от наличия сопряженных связей.

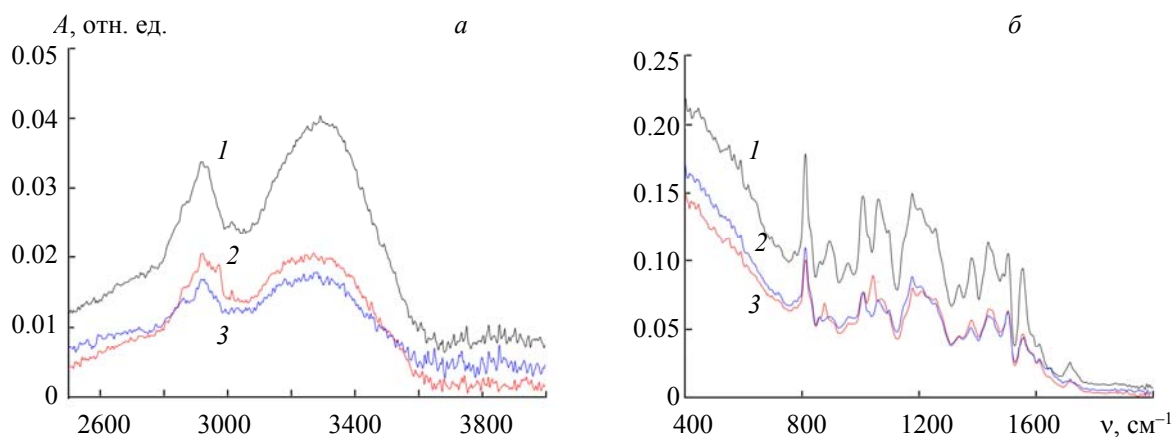


Рис. 3. Спектры НПВО исходных (1) и облученных быстрыми электронами дозами  $1 \cdot 10^{15}$  (2) и  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  (3) пленок ФР толщиной  $5.2\text{ мкм}$

В области пульсационных колебаний скелета ароматического кольца радиационно-индуцированные изменения выражены слабо: наблюдается незначительное снижение интенсивности полосы  $1556\text{ см}^{-1}$  в пользу  $1607\text{ см}^{-1}$ , интенсивность полосы  $1503\text{ см}^{-1}$  не изменяется. Как отмечалось выше, такая модификация спектра может быть обусловлена изменениями в количестве и природе заместителей при ароматическом кольце [9]. Интенсивность полосы  $1436\text{ см}^{-1}$ , обусловленной валентными колебаниями ароматического кольца, связанными с  $\text{CH}_2$ -мостиком между ароматическими кольцами, с ростом дозы снижается (рис. 3, б).

При облучении наблюдается трансформация широкой структурированной полосы с несколькими максимумами в диапазоне  $1050\text{—}1270\text{ см}^{-1}$  — перераспределение интенсивности максимумов в пользу более высокоэнергетических (рис. 3, б). В этом диапазоне наблюдаются колебания  $\text{C—O—C}$ -связей в растворителе и плоскостные деформационные колебания связей  $\text{C—O—}$  в фенолах [9]. Такое поведение полос НПВО в диапазоне  $1050\text{—}1230\text{ см}^{-1}$  может свидетельствовать об образовании сложноэфирных сшивок с  $\text{OH}$ -группами фенольного типа. Такие сшивки наблюдались ранее при имплантации  $\text{Sb}^+$  в пленки ФР ФП9120, что приводило к увеличению их микротвердости [11].

Наиболее неоднозначные трансформации спектра НПВО при облучении наблюдаются в диапазоне  $1000\text{—}1100\text{ см}^{-1}$ , характерном для колебаний  $\text{C—O}$ -связей. Интенсивность всех полос в данном диапазоне при облучении снижается. При дозе  $\Phi = 1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  в спектре появляется новая полоса  $1043\text{ см}^{-1}$ , а интенсивность полос  $1009$  и  $1068\text{ см}^{-1}$  резко снижается. При этом максимум высокоэнергетической полосы смещается на  $\sim 6\text{ см}^{-1}$  до  $1074\text{ см}^{-1}$ . Дальнейшее увеличение дозы до  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  приводит к восстановлению структуры спектра в этой области: полоса  $1043\text{ см}^{-1}$  исчезает из спектра, а максимум высокоэнергетической полосы возвращается к  $1068\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, б, кривые 2, 3). Схожее поведение наблюдается у полосы с максимумом  $895\text{ см}^{-1}$ : при дозе  $1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-1}$  ее интенсивность резко снижается, а максимум смещается до  $\sim 875\text{ см}^{-1}$ ; увеличение дозы до  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  приводит к дальнейшему снижению ее интенсивности и возвращению максимума на  $895\text{ см}^{-1}$ . Полосу с максимумом  $\sim 1040\text{ см}^{-1}$  обычно связывают с колебаниями  $\text{C—O}$ -связи в структурном фрагменте  $-\text{CH}_2-\text{C—OH}$  [8]. Полосы при  $1009$  и  $1068\text{ см}^{-1}$  обусловлены колебаниями  $\text{C—O—C}$ -связи в растворителе метил-3-метоксипропилате [7, 8, 13]. Кроме того, интенсивность полос в этой области значительно ниже для тонких пленок (рис. 2, б и рис. 3, б), в которых содержание остаточного растворителя существенно ниже, чем в толстых пленках. Это подтверждает наличие интенсивной структурной перестройки/разложения остаточного растворителя при электронном облучении.

На основании приведенных экспериментальных данных можно заключить, что радиационно-индуцированные процессы в фоторезистивных пленках NFR 016D4 при дозах  $< 2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-1}$  происходят в основном при участии молекул остаточного растворителя либо на побочных продуктах синтеза фоторезистивной пленки. Аналогичные выводы сделаны при исследовании влияния  $\gamma$ -облучения дозой  $< 1\text{ МГр}$  структур на основе полиимида [10]. Негативные ФР NFR 016D4 и позитивные новолачные ФР сравнимы по радиационной стойкости. Так, начальные изменения интенсивности полос НПВО в позитивных ФР ФП9120 и S1813 наблюдались при дозе электронов  $\Phi = 3 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  [14], что согласуется с нашими экспериментальными данными.

**Заключение.** Возрастание фонового поглощения структур фоторезист/кремний при волновых числах  $< 1600\text{ см}^{-1}$  обусловлено проникновением ИК-излучения в кремниевую подложку и процессами рассеяния/отражения на границе раздела фоторезист/кремний. Особенности спектра НПВО новолачных фоторезиста NFR 016D4 в области пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (полосы  $1556$  и  $1607\text{ см}^{-1}$ ) обусловлены резко асимметричным характером силового поля ароматического кольца. Особенности спектров толстых пленок фоторезиста NFR 016D4 связаны с наличием остаточного растворителя. В облученных пленках обнаружено образование формальдегида в результате фрагментации гидроксиметильных остатков в составе фенолформальдегидной смолы. Радиационно-индуцированные процессы в фоторезистивных пленках NFR 016D4 при дозах до  $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  происходят в основном при участии молекул остаточного растворителя либо на побочных продуктах синтеза фоторезистивной пленки.

Работа выполнена в рамках задания 2.16 государственной программы научных исследований “Материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограммы “Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника (“Наноструктура”)”.

- [1] K. M. Cheung, D. M. Stemer, Chuanzhen Zhao, T. D. Young, J. N. Belling, A. M. Andrews, P. S. Weiss. *ACS Mater. Lett.*, **2**, N 1 (2020) 76—83
- [2] У. Моро. Микролитография. Принципы, методы, материалы, Москва, Мир (1990) [W. M. Moreau. *Semiconductor Lithography. Principles, Practices and Materials*, New York, London, Plenum Press (1988)]
- [3] Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, В. С. Просолович, В. Б. Оджаев, С. Д. Бринкевич, Ю. Н. Янковский. *Микроэлектроника*, **48**, № 3 (2019) 235—239 [D. I. Brinkevich, A. A. Kharchenko, V. S. Prosolovich, V. B. Odzhaev, S. D. Brinkevich, Yu. N. Yankovski. *Russ. Microelectronics*, **48**, N 3 (2019) 197—201]
- [4] С. Д. Бринкевич, Е. В. Гринюк, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович. *ХВЭ*, **54**, № 5 (2020) 377—386 [S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich, V. S. Prosolovich. *High Energy Chem.*, **54**, N 5 (2020) 342—351]
- [5] I. Poljansek, U. Sebenik, M. Krajnc. *J. Appl. Polymer. Sci.*, **99** (2006) 2016—2028
- [6] В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский, Д. И. Бринкевич. *Журн. прикл. спектр.*, **89**, № 4 (2022) 498—504 [V. B. Odzhaev, A. N. Pyatlitski, V. S. Prosolovich, N. S. Kovalchuk, Ya. A. Soloviev, D. V. Zhygulin, D. V. Shestovsky, Yu. N. Yankovski, D. I. Brinkevich. *J. Appl. Spectr.*, **89**, N 4 (2022) 665—670]
- [7] Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных, Москва, Мир, Бином (2006) [E. Pretsch, P. Bullmann, C. Affolter. *Structure Determination of Organic Compounds. Tables of Spectral Data*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2000)].
- [8] Б. Н. Тарасевич. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы, Москва, МГУ (2012)
- [9] С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович, Р. Л. Свердлов. *ХВЭ*, **55**, № 1 (2021) 66—75 [S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, V. S. Prosolovich, R. L. Sverdlov. *High Energy Chem.*, **55**, N 1 (2021) 65—74]
- [10] А. А. Харченко, Ю. А. Федотова, И. А. Зур, Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович, С. А. Мовчан, Г. Е. Ремнев, С. А. Линник, С. Б. Ластовский. *ХВЭ*, **56**, № 4 (2022) 378—387 [A. A. Kharchenko, Yu. A. Fedotova, I. A. Zur, D. I. Brinkevich, S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, V. S. Prosolovich, S. A. Movchan, G. E. Remnev, S. A. Linnik, S. B. Lastovskii. *High Energy Chem.*, **56**, N 4 (2022) 354—362]
- [11] С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович. *Микроэлектроника*, **50**, № 1 (2021) 36—42 [S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, V. S. Prosolovich. *Russ. Microelectronics*, **50**, № 1 (2021) 33—38]
- [12] Debmalaya Roy, P. K. Basu, P. Raghunathan, S. V. Eswaran. *Magn. Res. Chem.*, **41** (2003) 84—90
- [13] С. Д. Бринкевич, Е. В. Гринюк, Р. Л. Свердлов, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович, А. Н. Петлицкий. *Журн. прикл. спектр.*, **87**, № 4 (2020) 589—594 [S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich, R. L. Sverdlov, V. S. Prosolovich, A. N. Pyatlitski. *J. Appl. Spectr.*, **87**, N 4 (2020) 647—651]
- [14] С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович, С. Б. Ластовский, А. Н. Петлицкий. *Журн. прикл. спектр.*, **87**, № 6 (2020) 941—948 [S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, V. S. Prosolovich, S. B. Lastovskii, A. N. Pyatlitski. *J. Appl. Spectr.*, **87**, № 6 (2021) 1072—1078]
- [15] Г. Б. Толсторожев, И. В. Скорняков, М. В. Бельков, О. И. Шадыро, С. Д. Бринкевич, С. Н. Самович. *Журн. прикл. спектр.*, **79**, № 4 (2011) 658—663 [G. B. Tolstorozhev, I. V. Skornyakov, M. V. Belkov, O. I. Shadyro, S. D. Brinkevich, S. N. Samovich. *J. Appl. Spectr.*, **79**, N 4 (2011) 645—650]
- [16] А. Н. Олешкевич, Н. М. Лапчук, В. Б. Оджаев, И. А. Карпович, В. С. Просолович, Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич. *Микроэлектроника*, **49**, № 1 (2020) 58—65 [A. N. Oleshkevich, N. M. Lapchuk, V. B. Odzhaev, I. A. Karpovich, V. S. Prosolovich, D. I. Brinkevich, S. D. Brinkevich. *Russ. Microelectronics*, **49**, N 1 (2020) 55—61]