

ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 621.315.692

DOI 10.52928/2070-1624-2025-45-2-18-25

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ

С. А. АБРАМОВ, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ,
канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ
(Белорусский государственный университет, Минск)

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

О. А. ЗУБОВА

(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

Методом рентгеноспектрального микроанализа исследованы пленки негативных фоторезистов (ФР) KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070 и AZ nLOF 5510 толщиной 0,9–6,0 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. В рентгеновских спектрах всех ФР-пленок наблюдались линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием и обусловленная проникновением электронного пучка в подложку. Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки > 5 мкм она исчезает из спектра. В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, обусловленная присутствием серы. Величина отношения N_O/N_C (ат.%) варьируется для разных фоторезистов одного производителя, что связано с различиями в составе заместителей у олигомеров фенолформальдегидных смол – пленкообразующего компонента исследованных материалов. Стабилизирующая обработка и ионное травление фоторезистивных пленок приводили к изменению соотношения концентраций кислорода и углерода вследствие действия нескольких конкурирующих механизмов. Ионное травление фоторезистивных пленок способствовало образованию на их поверхности механически прочного углеродистого слоя, устойчивого к химическим растворителям. Растворение в парах спирта ионно-травленных фоторезистивных пленок протекает только по трещинам в углеродистом слое.

Ключевые слова: негативный фоторезист, рентгеноспектральный микроанализ, стабилизирующая обработка, ионное травление.

Введение. Фоторезисты обычно представляют собой композиты, имеющие в своем составе в качестве пленкообразующей основы химические соединения, как правило, олигомерной структуры. В них также вводятся активные компоненты, чаще всего – группы хинондиазидов. Негативные фоторезисты KMP E3502 (Kempur Microelectronics Inc, Китай) и AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 (MicroChemicals GmbH, Германия) предназначены для использования в технологии металлизации полупроводниковых пластин методом обратной (lift-off) литографии, что требует высокой температурной стойкости (более 250 °C) фоторезиста. В качестве пленкообразующей основы в этих фоторезистах используются олигомеры фенолформальдегидных смол. Фоторезисты серии AZ nLOF 20XX работают на принципе «химического усиления» и в своем составе дополнительно содержат компонент, способствующий формированию отрицательного угла наклона маски фоторезиста [1]. Кроме того, фоторезисты, применяемые в lift-off литографии, содержат сшивающие соединения – чаще всего на основе меламина $C_3H_6N_6$, молекула которого включает атомы азота. При воздействии актиничного излучения на резисты серии AZ nLOF 20XX образуется карбоновая кислота, которая сшивает смолу на последующем этапе запекания, делая ее нерастворимой в проявителе, в то время как неэкспонированные участки фоторезистивной пленки остаются растворимыми в проявителе. В ФР других марок во время экспонирования происходит фотополимеризация. При этом образуются радикалы, которые инициируют реакцию сшивания смолы уже при комнатной температуре. Это позволяет производить формирование структуры резиста сразу после экспонирования без этапа запекания¹. Определение оптимальных технологических режимов литографических процессов требует знания элементного состава используемых фоторезистов, однако производители обычно не раскрывают полностью эту информацию в полном объеме.

¹ Basics of Microstructuring [Электронный ресурс]. – URL: www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html (дата обращения 09.09.2025).

Цель настоящей работы – исследование элементного состава негативных фоторезистивных пленок KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 на кремнии и его трансформации при внешних воздействиях.

Методы исследования. Пленки фенолформальдегидных фоторезистов KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 наносились на поверхность пластин кремния методом центрифугирования [2]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования пленки ФР проводилась ее сушка при температуре 110 °С длительностью 60 с. Толщина фоторезистивных пленок варьировалась в диапазоне 0,9–6,0 мкм. Измерение геометрической толщины пленок фоторезистов выполнялось на растровом электронном микроскопе. С целью дополнительного усиления фоторезистивной пленки часть образцов подвергалась облучению светом с длиной волны $\lambda = 404$ нм в течение 105 с и последующей сушке при 115 °С длительностью 60 с. Затем часть дополнительно усиленных образцов с целью очистки поверхности фоторезистивной пленки подвергалась ионному травлению в течение 20 мин ионами Ag^+ с энергией 160 эВ при интенсивности потока газа 6 см³/мин.

Для рентгеноспектрального микроанализа образцов использовали сканирующий электронный микроскоп Zeptools ZEM15, оснащенный энергодисперсионным спектрометром. Обработку спектров и количественный анализ выполняли в режиме обработки данных без стандартов с использованием программного пакета AZtecOne. Для получения статистически значимых результатов на каждой анализируемой области регистрировали не менее 3–5 спектров с временем накопления 60–120 секунд на спектр. Сканирующую электронную микроскопию выполняли при следующих параметрах: ускоряющее напряжение – 8 кВ, рабочее расстояние – 11,5 мм, величина тока электронного зонда – 0,5 нА. Анализ проводили при увеличениях от $\times 300$ до $\times 1000$. Содержание элементов определяли в весовых процентах с последующим пересчетом в атомные проценты. Погрешность измерений для элементов с концентрацией > 10 вес. % составляла $\pm 0,5\%$, а для элементов с концентрацией 1–10 вес. % не превышала $\pm 1–3\%$. Фотографии получали при следующих фиксированных параметрах: ускоряющее напряжение – 15 кВ, режим детектирования – обратно-рассеянные электроны, увеличение – $\times 300$, рабочее расстояние – 11,5 мм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рисунках 1–3 представлены рентгеновские спектры пленок ФР различных марок толщиной от 0,95 до 5,9 мкм. Во всех спектрах наблюдались линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием. В пленках толщиной ~ 1 мкм она преобладает в спектре (рисунок 1). Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки > 5 мкм она исчезает из спектра (рисунки 2, 3). Такое поведение кремниевой линии обусловлено проникновением электронного пучка в подложку, поскольку при энергии пучка 8 кэВ, использованной в работе, глубина проникновения электронов в ФР на основе фенолформальдегидных смол составляет ~ 5 мкм.

В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, связанная с присутствием серы (рисунки 1, 2). Содержание S от точки к точке варьировалось в пределах 0,04–0,05 ат.% в пленках AZ nLOF 5510 и 0,06–0,11 ат.% в пленках серии AZ nLOF 20XX. Одинаковые значения концентрации серы в пленках AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070, которые различаются только содержанием растворителя [3], позволяют утверждать, что атомы S не входят в состав растворителя. Отметим, что содержание серы в ФР AZ nLOF было существенно ниже, чем в позитивных российских фенолформальдегидных фоторезистах ФП9120, где оно варьировалось от 0,84 ат.% до 0,23 ат.% по мере уменьшения толщины пленки с 5,0 до 1,0 мкм. В российских позитивных ФР сера входит в состав диазохинона, являющегося ингибитором растворения фенолформальдегидной смолы [4].

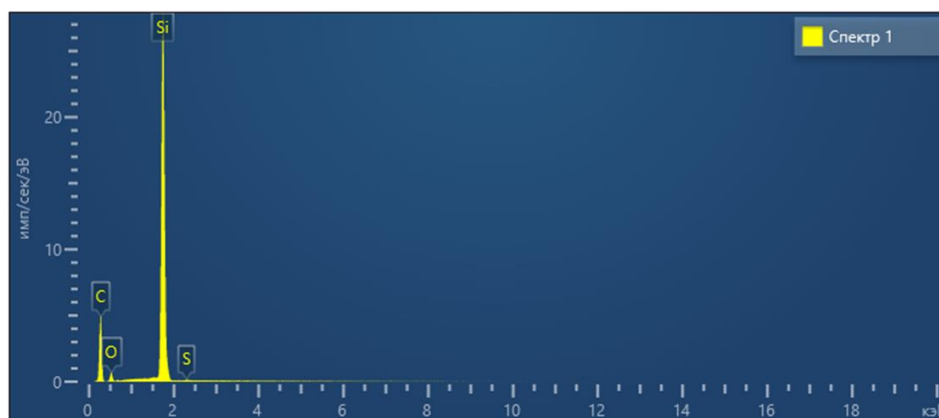


Рисунок 1. – Характерный рентгеновский спектр пленок AZ nLOF 5510 толщиной 0,95 мкм

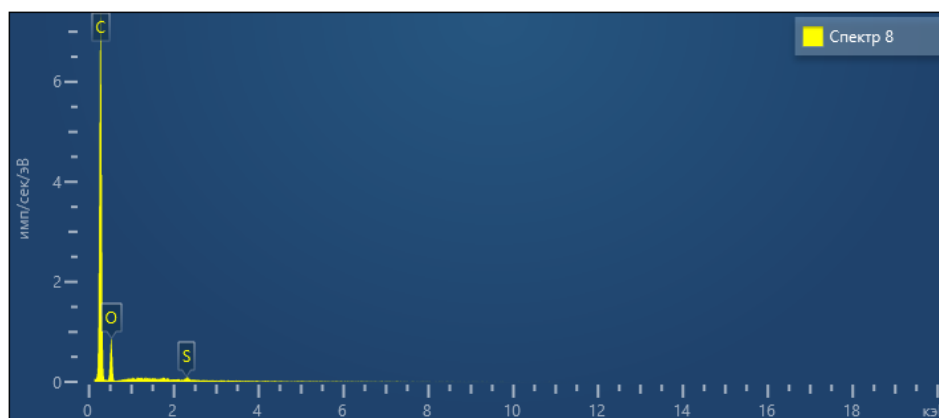


Рисунок 2. – Характерный рентгеновский спектр пленок AZ nLOF 2070 толщиной 5,9 мкм

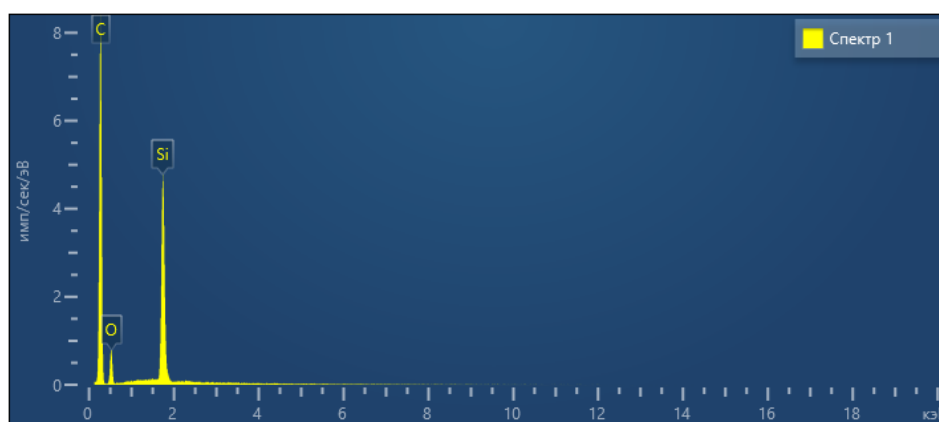


Рисунок 3. – Характерный рентгеновский спектр пленок KMP E3502 толщиной 2,52 мкм

В спектрах пленок KMP E3502 наблюдались только полосы углерода и кислорода, серы либо других элементов обнаружено не было (см. рисунок 3). Отметим, что в другом негативном фоторезисте на основе новолачной смолы – NFR 016 D4 (производитель JSR, Tokyo, Japan) – нами был обнаружен хлор в концентрации 0,12 – 0,13 ат. %.

В таблице приведены значения отношения N_O/N_C (ат. %), т. е. отношения числа атомов кислорода к числу атомов углерода, для фоторезистивных пленок различных марок – как исходных, так и подвергавшихся внешним воздействиям (дополнительному усилению и ионному травлению). Отметим существенные различия в значениях N_O/N_C в пленках даже одного производителя (ФР серии AZ nLOF 20XX и AZ nLOF 5510), что указывает на их различный состав. Большие расхождения в значениях отношения N_O/N_C пленок фоторезиста KMP E3502 обусловлены, вероятнее всего, наличием в пленке толщиной 5,73 мкм остаточного растворителя в высокой концентрации, в котором соотношение N_O/N_C может быть $\sim 0,5$. На это также указывает снижение величины N_O/N_C при сушке (усилении) указанной пленки. В зависимости от количества и вида заместителей (-H, $-CH_3$ или $-CH_2OH$) величина соотношения N_O/N_C в фенолформальдегидных фоторезистах может изменяться в широких пределах. В новолачной смоле (все заместители -H) величина $N_O/N_C \sim 0,15$, что характерно для ФР серии AZ nLOF 20XX. В случае заместителей $-CH_3$ величина соотношения N_O/N_C может снижаться до значений $\sim 0,087$, что характерно для тонкой пленки KMP E3502. Более низкие значения соотношения N_O/N_C в тонкой пленке AZ nLOF 5510 указывают на наличие в этом ФР бескислородного компонента.

Таблица 1. – Соотношение концентраций атомов кислорода и углерода N_O/N_C (ат. %) в различных фоторезистивных пленках

Фоторезист (толщина)	AZ nLOF 2070 (5,83 мкм)	AZ nLOF 2020 (5,95 мкм)	AZ nLOF 5510 (0,95 мкм)	KMP E3502 (5,73 мкм)	KMP E3502 (2,62 мкм)
Исходный	0,1625	0,1589	0,0507	0,1646	0,0925
Усиление	0,1645	0,1646	—	0,1550	0,0825
Ионное травление	0,1698	0,1701	0,0533	0,1628	0,0849

Усиление/сушка и ионное травление приводили к увеличению соотношения N_O/N_C в фоторезистах AZ nLOF, которое более выражено в пленке AZ nLOF 2020. Как отмечалось ранее [3], в этой пленке имеется остаточный растворитель в существенной концентрации. Поведение пленок фоторезиста KMP E3502 иное. При усилении/сушке величина соотношения N_O/N_C снижается, а последующее ионное травление приводит к увеличению соотношения N_O/N_C , более выраженному в толстой пленке.

При анализе полученных экспериментальных результатов необходимо учитывать следующие обстоятельства. При внешних воздействиях (термообработка, облучение) в фоторезистивных пленках протекают разнонаправленные процессы как физической, так и химической природы. В ФР-пленках всегда присутствуют молекулы остаточной воды, которая образуется в процессе синтеза фенолформальдегидной смолы. Ее содержание обычно составляет 1–2 %. Кроме того, пары воды могут проникать в пленки из атмосферы хранения и при различных внешних воздействиях. Это может быть одной из причин возрастания соотношения N_O/N_C в ФР-пленках серии AZ nLOF 20XX. В то же время, в условиях вакуума (в частности, при ионной имплантации) или инертной атмосферы термообработки остаточная вода эффективно удаляется из пленки [5].

Необходимо также учитывать наличие в пленках остаточного растворителя, состав и концентрация которого зависят от типа конкретного фоторезиста и толщины фоторезистивной пленки. Растворитель удаляется в процессе сушки [6], однако полного его удаления обычно достигнуть не удается. При одинаковых условиях сушки содержание растворителя обычно выше в толстых пленках. Также содержание остаточного растворителя может изменяться по толщине, что обусловлено неполным прогревом толстой пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев в нашем эксперименте происходил со стороны подложки, поэтому удаление растворителя наиболее интенсивно протекало у границы раздела фоторезист/кремний. За время сушки тонкая пленка успевала прогреваться достаточно равномерно, поэтому концентрация остаточного растворителя в ней была низкой и равномерной по всей толщине. Толстая пленка за время сушки не успевает прогреться однородно, поэтому после формирования толстой пленки концентрация остаточного растворителя вблизи поверхности фоторезиста выше, чем у границы раздела фоторезист/кремний. Повышенная концентрация остаточного растворителя у поверхности ФР-пленки приводит, в частности, к снижению микротвердости приповерхностных слоев толстой фоторезистивной пленки [7]. Кроме того, на границе раздела фоторезист/кремний происходит взаимодействие атомов окисной пленки на кремнии с атомами фоторезиста, которое может изменять состав ФР-пленки у границы раздела фоторезист/кремний [8].

При облучении полимеров и, в меньшей степени, при их термообработке образуются летучие газообразные продукты (например, H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_6 и т. д.), которые испаряются из полимерной пленки. Обычно это продукты разложения боковых цепей [9]. Их состав зависит от вида полимерной пленки. Этот процесс будет оказывать влияние на соотношение N_O/N_C . Так, удаление CO и CO_2 будет снижать величину N_O/N_C . Не исключено, что этот процесс имеет место при стабилизирующей обработке полимерных пленок KMP E3502. В то же время, при образовании и удалении CH_4 соотношение N_O/N_C будет снижаться. Этот процесс, вероятно, протекает при ионном травлении исследованных ФР. Следует отметить, что высокоэнергетическое облучение, в том числе ионная имплантация, изменяет адгезионные свойства фоторезистивных пленок [10–13], т. е. структуру пленки вблизи границы раздела ФР/кремний. Кроме того, при термообработке и облучении возможно накопление в полимерной пленке кислорода из атмосферы, что приводит к протеканию в фенолформальдегидных смолах реакций окисления до соответствующих карбонильных соединений или формирования эфирных фрагментов [14].

Вследствие образования и испарения летучих газообразных продуктов ионное травление фоторезистивных пленок приводило к образованию на их поверхности механически прочного обугленного слоя, устойчивого к химическим растворителям. На рисунках 4–7 представлены снимки, полученные с помощью электронного микроскопа, различных фоторезистивных пленок до и после выдержки в парах спирта в течение 1 недели. Все исследованные исходные (до ионного травления) фоторезистивные пленки набухали, растворялись в спирту и стекали с подложки. На поверхности кремниевой пластины оставались локальные пятна фоторезиста (рисунки 4, 5, 7). Такое поведение фоторезистов указывает на то, что пленкообразующей основой во всех исследованных фоторезистах являются олигомеры фенолформальдегидной смолы. Полимерные материалы в спирту не растворяются. В светлых местах на фото рентгеноспектральный микроанализ показывает присутствие одного элемента – кремния (рисунок 8). Рентгеновский спектр темных участков схож со спектром исходной пленки, однако толщина пленки меньше исходной, о чем свидетельствует появление линии кремния в спектрах пленок толщиной свыше 5 мкм. Кроме того, величина соотношения N_O/N_C возрастает по сравнению с исходной пленкой, что свидетельствует о накоплении в ней спирта. Стабилизирующая обработка незначительно замедляла скорость растворения пленки, существенно не изменяя общую картину.

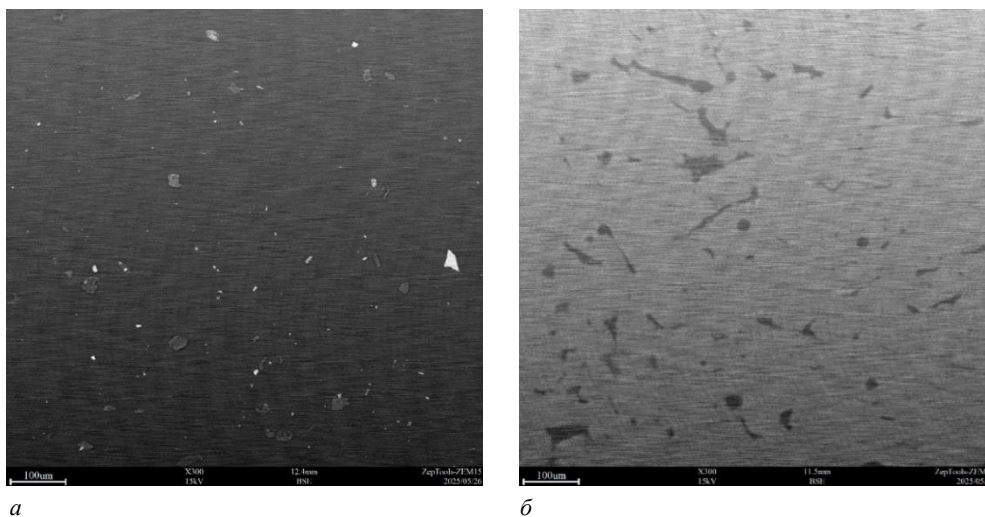
*a**б*

Рисунок 4. – Фотографии поверхности исходной пленки KMP E3502 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

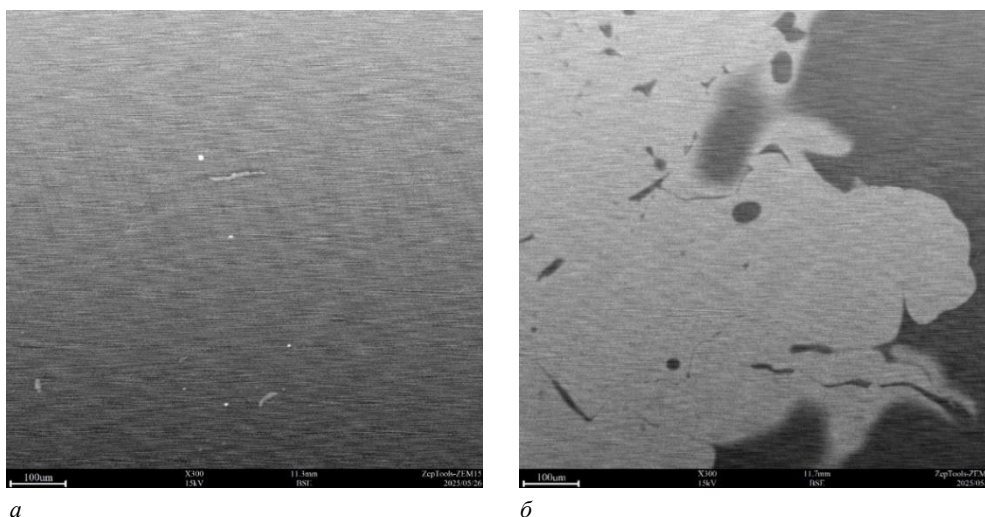
*a**б*

Рисунок 5. – Фотографии поверхности исходной пленки AZ nLOF 2070 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

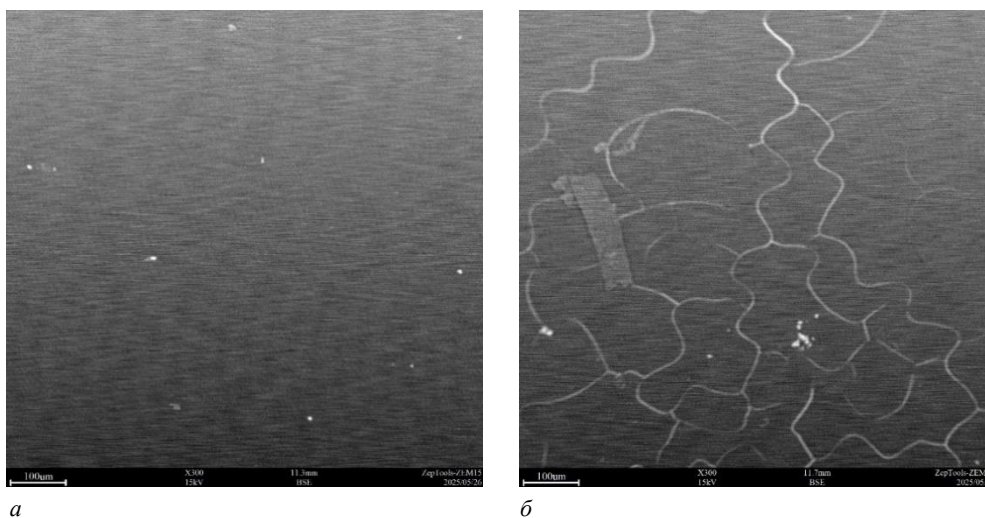
*a**б*

Рисунок 6. – Фотографии поверхности ионно-травленной пленки AZ nLOF 2070 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

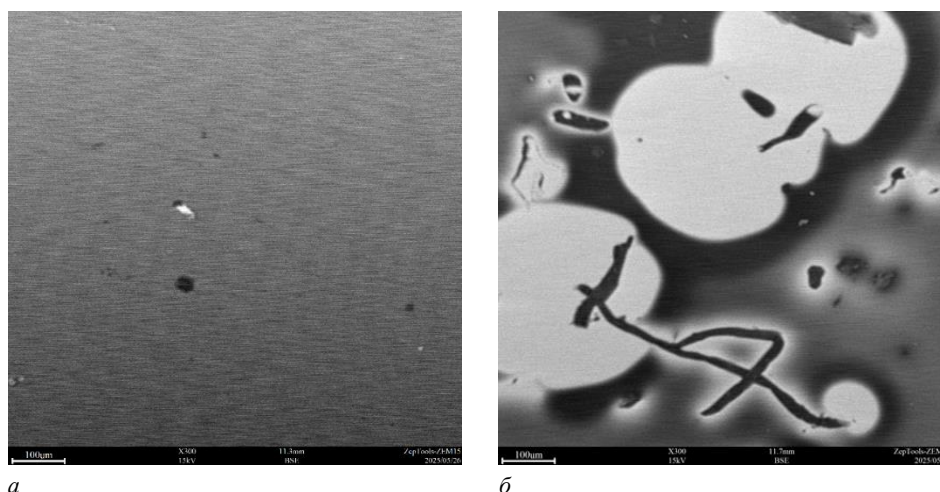


Рисунок 7. – Фотографии поверхности исходной пленки AZ nLOF 5510 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта



Рисунок 8. – Рентгеновский спектр пленки AZ nLOF 2070 толщиной 5,9 мкм после выдержки в парах спирта, снятый на светлом поле (рисунок 5)

Ионное травление кардинальным образом изменяло процессы растворения фоторезистивной пленки в спиртовых растворах. После ионного травления растворение пленок идет по трещинам в сформированном углеродистом слое (см. рисунок 6, б). Сетка трещин неизбежно образуется в углеродистом слое вследствие испарения летучих газообразных продуктов и формирования упругих напряжений на границе раздела углеродистый слой/полимер [9]. В области трещины (светлые извилистые линии) рентгеновский спектр содержит только линию кремния и имеет сходство со спектром, представленным на рисунке 8. В остальной области поверхности пленки спектр идентичен спектрам до выдержки в парах спирта (см. рисунки 1–3). Существенно не изменяется также величина соотношения N_O/N_C . Аналогичное поведение наблюдалось ранее [15] при травлении в 3 М водном растворе КОН пленок фенолформальдегидных позитивных фоторезистов ФП9120, имплантированных сурьмой. Углеродистый слой, сформированный имплантацией Sb^+ , устойчив по отношению к КОН, и проникновение травителя к нижним слоям фоторезиста осуществлялось по микротрещинам в имплантированном углеродистом слое.

Закключение. Экспериментально установлено, что в рентгеновских спектрах всех пленок наблюдались линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием и обусловленная проникновением электронного пучка в подложку. Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки > 5 мкм она исчезает из спектра. В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, связанная с присутствием серы. Величина отношения N_O/N_C (ат.%) варьируется для разных фоторезистов одного производителя, что связано с различиями в составе заместителей у олигомеров фенолформальдегидных смол – пленкообразующих компонентов исследованных материалов. Стабилизирующая обработка и ионное травление фоторезистивных пленок приводили к изменению соотношения концентраций кислорода и углерода, обусловленному действием нескольких конкурирующих механизмов, таких как испарение растворителя и остаточной воды, образование летучих газов и взаимодействие на границе раздела фоторезист/кремний и т. д. Ионное травление фоторезистивных пленок приводило к образованию на их поверхности

механически прочного углеродистого слоя, устойчивого к химическим растворителям. Растворение в парах спирта ионно-травленных фоторезистивных пленок протекает только по трещинам в углеродистом слое.

Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Н. А., Эрлих Р. Д., Соловьев В. В. Отечественный фоторезист для взрывной фотолитографии // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2017. – № 1(165). – С. 44–46.
2. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора // Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, В. С. Просолович и др. – Микроэлектроника. – 2019 – Т. 48, № 3. – С. 235–239. – DOI: [10.1134/S0544126919020029](https://doi.org/10.1134/S0544126919020029).
3. Пленки фоторезистов серии AZ nLOF на монокристаллическом кремнии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович и др. // Микроэлектроника. – 2025. – Т. 54, № 1. – С. 55–63. – DOI: [10.31857/S0544126925010068](https://doi.org/10.31857/S0544126925010068).
4. Способность нафтохинондиазидных фоторезистов к экзотермическому разложению / А. Н. Шушпанов, А. Я. Васин, В. М. Райкова и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 90–96. – DOI: [10.24000/0409-2961-2020-10-90-96](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-90-96).
5. Modification of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B⁺ Ions / S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich et al. // High energy chemistry. – 2020. – Vol. 54, iss. 5. – P. 342–351. – DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
6. Трансформация спектров нарушенного полного внутреннего отражения в процессе сушки диазохинон-новолачного фоторезиста / Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич, А. Н. Петлицкий и др. // Микроэлектроника. – 2021. – Т. 50, № 4. – С. 274–280. – DOI: [10.31857/S0544126921040037](https://doi.org/10.31857/S0544126921040037).
7. Идентификация пленок негативных фоторезистов для обратной литографии / С. А. Вабишевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2025. – № 1(44). – С. 53–60. – DOI: [10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60).
8. Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon / S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich et al. // Journal of Applied Spectroscopy. – 2020. – Vol. 87, iss. 4. – P. 647–651. – DOI: [10.1007/s10812-020-01049-4](https://doi.org/10.1007/s10812-020-01049-4).
9. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. – М.: Мир, 1988. – 246 с.
10. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинонноволачных фоторезистов, облученных электронами / С. А. Вабишевич, Н. В. Вабишевич, С. Д. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 60–68. – DOI: [10.31857/S002311932401006](https://doi.org/10.31857/S002311932401006).
11. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / Vabishchevich S. A., Brinkevich S. D., Prosolovich V. S. et al. // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, iss. 6. – P. 1352–1357. – DOI: [10.1134/S1027451020060476](https://doi.org/10.1134/S1027451020060476).
12. Adhesion of Irradiated Diazoquinone-Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, S. D. Brinkevich, N. V. Vabishchevich et al. // High Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 55, iss. 6 – P. 495–501. – DOI: [10.1134/S0018143921060151](https://doi.org/10.1134/S0018143921060151).
13. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С. А. Вабишевич, С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59. – DOI: [10.31857/S002311932001012X](https://doi.org/10.31857/S002311932001012X).
14. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов В⁺ / С. Д. Бринкевич, Е. В. Гринюк, Д. И. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386. – DOI: [10.31857/S0023119320050046](https://doi.org/10.31857/S0023119320050046).
15. Ion implantation of positive photoresists / D. I. Brinkevich, S. D. Brinkevich, N. V. Vabishchevich et al. // Russian Microelectronics. – 2014. – Vol. 43, iss. 3. – P. 194–200. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S106373971401003X>.

Поступила 16.09.2025

THE ELEMENTAL COMPOSITION OF NEGATIVE PHOTORESISTS FOR LIFT-OFF LITHOGRAPHY

S. ABRAMOV, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH,
(Belarusian State University, Minsk)

S. VABISHCHEVICH,
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

O. ZUBOVA,
(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

Films of negative photoresists (PRs) KMP E3502, AZ nLOF 2020, 2070, and 5510 with thicknesses of 0,9–6,0 μm, deposited on the surface of silicon wafers by spin-coating, were studied using X-ray microanalysis. The X-ray spectra

of all PRs films contained lines due to carbon and oxygen, with the carbon line being the dominant one. A silicon-related line, caused by electron beam penetration into the substrate, was also observed in thin films. Its intensity decreases with increasing photoresist thickness and disappears from the spectrum at film thicknesses $> 5 \mu\text{m}$. A sulfur band was also observed in the AZ nLOF films. The $N_{\text{O}}/N_{\text{C}}$ ratio (in atomic %) varies among photoresists from the same manufacturer, owing to the different substituent compositions of phenol-formaldehyde resin oligomers – the film-forming component of the studied photoresists. Stabilizing treatment and ion beam etching of photoresist films resulted in changes in the oxygen-to-carbon $N_{\text{O}}/N_{\text{C}}$ ratio due to several competing mechanisms. Ion beam etching of photoresist films resulted in the formation of a mechanically strong carbon layer on their surface, resistant to chemical solvents. Dissolution of ion-etched photoresist films in alcohol vapor occurs only through cracks in the carbon layer.

Keywords: negative photoresist, X-ray microanalysis, stabilizing treatment, ion etching.