

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ КМР E3502 НА КРЕМНИИ

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ<sup>2</sup>,  
канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>2</sup>, канд. хим. наук, доц. С. Д. БРИНКЕВИЧ<sup>3</sup>,  
О. А. ЗУБОВА<sup>4</sup>, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

<sup>2</sup>(Белорусский государственный университет, Минск)

<sup>3</sup>(ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии», Всеволожск, Россия)

<sup>4</sup>(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

Методом индентирования исследованы пленки негативных фоторезистов (ФР) КМР E3502 толщиной 2,6–5,8 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Экспериментально установлено, что прочностные и адгезионные свойства пленок КМР E3502 сопоставимы с аналогичными характеристиками ФР серии AZ nLOF 20XX. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  пленок КМР E3502 возрастает при увеличении нагрузки. Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на их трещиностойкость. Адгезия (удельная энергия отслаивания  $G$ ) тонких пленок в три раза ниже по сравнению с толстыми пленками КМР E3502. Значения  $G$  толстой пленки КМР E3502 близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070. Дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки КМР E3502 к кремниевой подложке. Истинная микротвердость тонких пленок КМР E3502 составляла 0,3 ГПа, что примерно в два раза выше микротвердости у функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510. После стабилизирующей обработки и ионного травления она увеличивалась, что обусловлено сшиванием молекул фоторезиста. В толстых пленках КМР E3502 микротвердость возрастала по мере удаления от поверхности пленки и при приближении к границе раздела фоторезист/кремний стабилизировалась на уровне ~ 0,55 ГПа. Такое поведение микротвердости обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования, поскольку нагрев осуществлялся со стороны подложки. Полученные экспериментальные данные объяснены с учетом упорядочения структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул и конформационных изменений в структуре основного компонента фоторезиста – фенолформальдегидной смолы. Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок КМР E3502 ионами Ar обусловлены формированием ковалентных сшивок между молекулами полимера, которые способствуют упрочнению пленки.

**Ключевые слова:** негативный фоторезист, микроиндентирование, микротвердость, адгезия, трещиностойкость, ионное травление.

**Введение.** Фоторезист – это светочувствительный многокомпонентный материал, способный изменять свою растворимость и устойчивость к щелочным и кислотным травителям под действием света. Негативный фоторезист КМР E3502, выпускаемый компанией Kemur Microelectronics Inc, Китай, широко применяется при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Основное его предназначение – процессы обратной (lift-off) литографии [1], позволяющие сформировать структуру на подложке путем удаления материала вместе с фоторезистом после его проявления и напыления тонкой пленки другого материала (чаще всего металла). Этот процесс используется для создания сложных структур, которые трудно сформировать обычными методами, и требует особых свойств фоторезиста – способности к быстрому растворению и высокой температурной стойкости. Фоторезист КМР E3502 рассчитан под  $i$ -линию дуговой лампы и предназначен для формирования пленок толщиной 2–4 мкм. В качестве пленкообразующего полимера в указанном фоторезисте используются фенолформальдегидные смолы [2]. Одной из наиболее важных технологических характеристик фоторезистивных пленок на кремниевой подложке являются их прочностные и адгезионные свойства. Способность ФР выдерживать агрессивные воздействия, такие как травление, ионная имплантация, гальванопокрытие, не теряя заданной геометрии, напрямую влияет на точность формирования элементов микросхемы и, в конечном счете, на характеристики готовой СБИС.

Цель настоящей работы – исследование методом индентирования физико-механических свойств негативных фоторезистивных пленок КМР E3502 на кремнии и их трансформации при термообработке и ионном травлении.

**Методы исследования.** Пленки негативного фоторезиста КМР E3502 наносились на поверхность пластин кремния методом центрифугирования [3]. 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 составляла 2,62 и 5,73 мкм. Измерение геометрической толщины пленок фоторезиста 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  $\text{Ar}^+$  с энергией 160 эВ при интенсивности потока газа 6 см<sup>3</sup>/мин.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 при комнатной температуре [4]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Нагрузка  $P$  на индентор варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. При измерении для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Измерения восстановленной микротвердости ( $H$ ) выполнялись по стандартной методике [5]. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [6]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Коэффициент вязкости разрушения (трещиностойкость)  $K_{IC}$  рассчитывался по длине радиальных трещин у отпечатков согласно формуле [6]

$$K_{IC} = 0,016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}},$$

где  $E$  – модуль Юнга (для кремния  $1,5 \cdot 10^{11}$  Па);

$L$  – длина трещины.

Погрешность измерений коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  не превышала 8 %.

Прочность адгезионного взаимодействия фоторезистивной пленки с кремнием оценивалась по удельной энергии отслаивания пленки  $G$ , которая рассчитывалась по формуле [7]

$$G = \frac{0,627 H^2 h (1 - \nu^2)}{E (1 + \nu + 2(1 - \nu) H l^2 / P)^2},$$

где  $h$  – толщина пленки;

$\nu$  – коэффициент Пуассона (использовалось значение 0,3);

$E$  – модуль Юнга (для исследовавшейся пленки 8 ГПа [1]);

$P$  – нагрузка на индентор;

$l$  – длина трещины расслоения.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** На рисунках 1, 2 представлены характерные фотографии отпечатков индентора в пленках фоторезиста КМР Е3502 толщиной 5,73 и 2,62 мкм при нагрузках от 2 до 50 г. При пересечении индентором границы раздела фоторезист/кремний (нагрузка 50 г в толстых пленках и 10–50 г в тонких пленках) наблюдалось интенсивное отслоение пленки от подложки (рисунки 1, а; 2, а, б), что указывает на слабую адгезию указанных пленок к кремнию. В углах отпечатков индентора в пленках фоторезиста КМР Е3502 при всех использовавшихся нагрузках наблюдались трещины, а вокруг отпечатков – светлые ореолы, отчетливо выраженные при нагрузках  $P \geq 5$  г (рисунки 1, 2). Следует отметить, что аналогичные по виду отпечатки индентора наблюдались также в пленках фоторезистов AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070 толщиной 6,0 мкм [9].

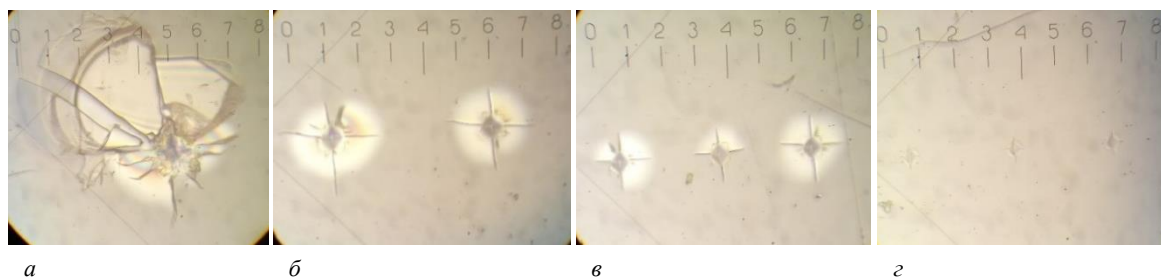


Рисунок 1. – Характерные фотографии отпечатков индентора в исходных пленках фоторезиста КМР Е3502 толщиной 5,73 мкм при нагрузках 50 г (а), 10 г (б), 5 г (в) и 2 г (з)

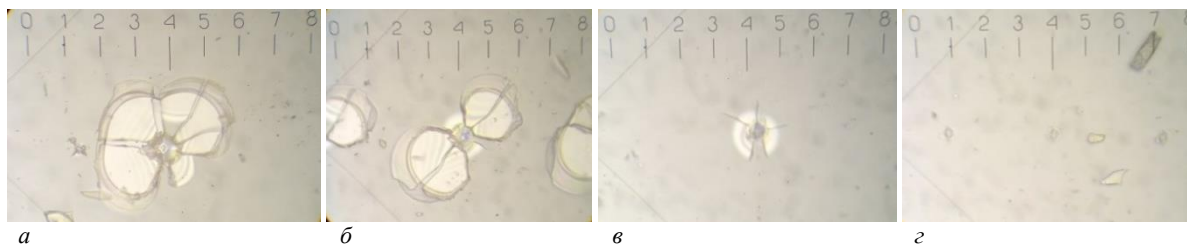


Рисунок 2. – Характерные фотографии отпечатков индентора в исходных пленках фоторезиста КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм при нагрузках 50 г (а), 10 г (б), 5 г (в) и 2 г (з)

В процессе индентирования пленок толщиной 2,62 мкм индентор проникает в кремниевую подложку при нагрузках свыше 5 г, что приводит к резкому росту микротвердости (рисунок 3, а). При нагрузке 50 г величина  $H$  становится сравнимой с микротвердостью монокристаллического кремния [8]. В более толстых пленках индентор не достигает границы раздела даже при максимальных нагрузках 50 г. В этом случае существенного роста значений микротвердости при  $P \geq 10$  г не наблюдалось (рисунок 3, б).

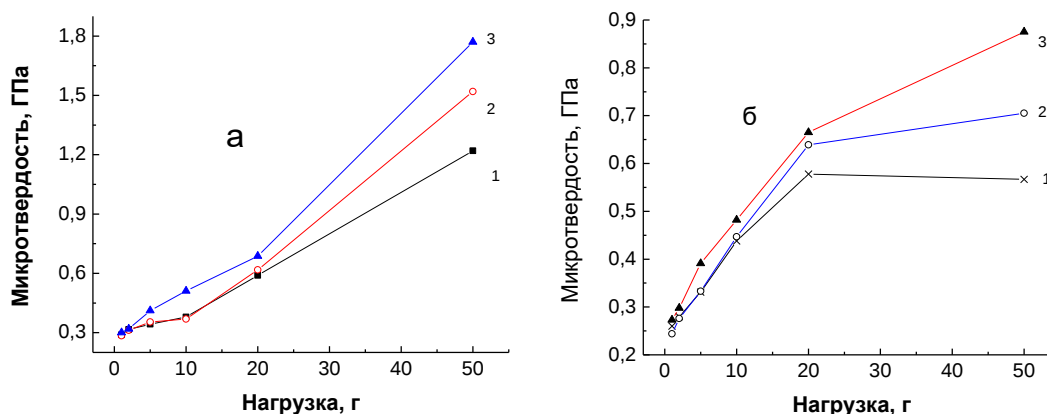


Рисунок 3. – Зависимость микротвердости от нагрузки для пленок фоторезиста КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), после дополнительного усиления (2) и ионного травления (3)

Истинную микротвердость тонких пленок КМР Е3502 можно оценить по измерениям при нагрузках 1–5 г. В пленке толщиной 2,62 мкм она постоянна и составляет  $\sim 0,3$  ГПа (рисунок 3, а). Отметим, что она была примерно в два раза выше микротвердости функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510 производства MicroChemicals GmbH, Германия [9]. В толстых пленках КМР Е3502 толщиной 5,73 мкм микротвердость  $H$  возрастает по мере удаления от поверхности пленки с 0,25 до 0,6 ГПа и в исходных образцах при приближении к границе раздела фоторезист/кремний стабилизируется на уровне  $\sim 0,55$  ГПа (рисунок 3, б). Такое поведение величины  $H$  обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев шел со стороны подложки, поэтому удаление растворителя наиболее интенсивно происходит у границы раздела фоторезист/кремний. После сушки концентрация остаточного растворителя выше у поверхности фоторезистивной пленки, что обусловливает снижение микротвердости ее поверхностных слоев.

Дополнительное усиление (облучение светом с длиной волны  $\lambda = 404$  нм в течение 105 с и последующая сушка при 115 °С длительностью 60 с) пленок приводило к увеличению микротвердости структур фоторезист/кремний, наиболее заметному при нагрузках свыше 10 г (рисунок 3, кривые 2), что, вероятнее всего, связано с упрочнением пленок вблизи границы раздела фоторезист/кремний. При этом истинная микротвердость пленки практически не изменялась. Ионное травление приводило к увеличению микротвердости пленок КМР Е3502 при всех нагрузках, наиболее заметному в тонких пленках (рисунок 3, кривые 3). Возрастание микротвердости фоторезистивных диазохинон-новолачных пленок при сушке и различных высокоэнергетических воздействиях наблюдалось ранее в работах [10; 11]. В нашем случае увеличение микротвердости полимерных пленок обусловлено термическим сшиванием молекул [12].

При всех нагрузках у отпечатков индентора наблюдались угловые трещины, что позволило оценить трещиностойкость указанных пленок и ее изменения при внешних воздействиях. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  обеих пленок КМР Е3502 возрастает при увеличении нагрузки (рисунок 4). Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на трещиностойкость фоторезистивных пленок. Заметные различия наблюдались только при нагрузке 50 г. При этой нагрузке трещиностойкость

толстых пленок КМР Е3502 была выше, чем тонких, а дополнительной усиление и ионное травление увеличивали трещиностойкость обеих пленок (рисунок 4). Отметим, что величина  $K_{IC}$  пленок КМР Е3502 и характер их зависимости от нагрузки были идентичны фоторезистивным пленкам серии AZ nLOF 20XX [9].

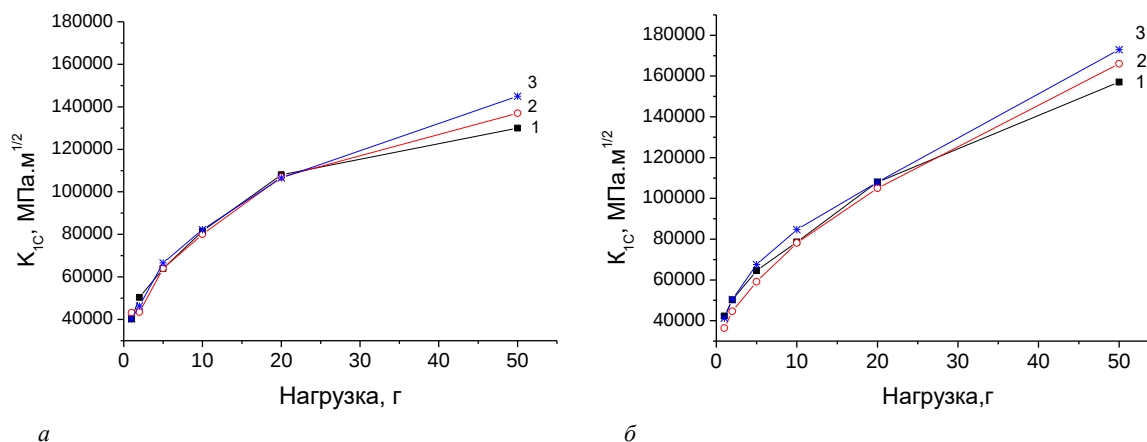


Рисунок 4. – Зависимости коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  от нагрузки для пленок фоторезиста КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), дополнительно усиленных (2) и протравленных ионами Ag (3)

Значения удельной энергии отслаивания  $G$  для исходных и подвергавшихся дополнительному усилению и ионному травлению пленок КМР Е3502 представлены в таблице. Видно, что адгезия (величина  $G$ ) пленок толщиной 2,52 мкм в три раза ниже по сравнению с пленками толщиной 5,73 мкм. Значения  $G$  толстой пленки близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070 толщиной 5,8 мкм [9]. Однако, в отличие от пленок серии AZ nLOF 20XX, дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки КМР Е3502 к кремниевой подложке.

Таблица. – Удельная энергия отслаивания  $G$  пленок фоторезиста КМР Е3502 на кремнии

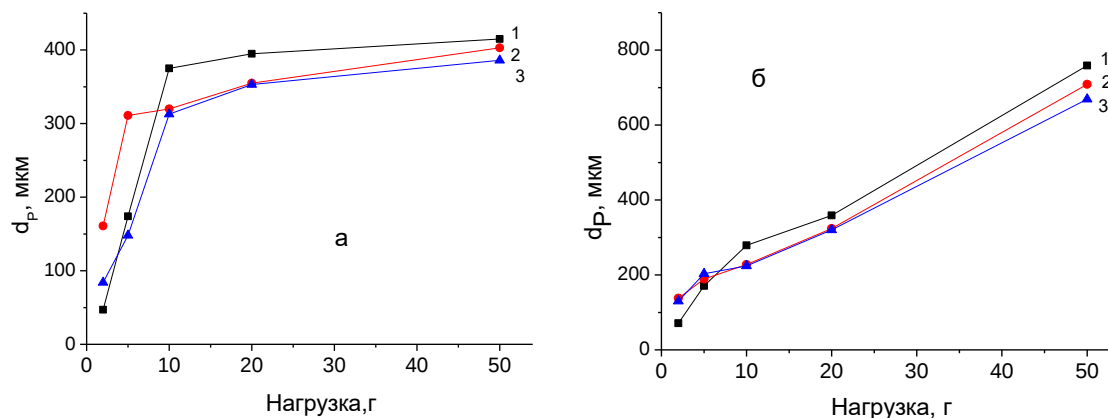
| Толщина пленки          | 2,62 мкм |          |                      | 5,73 мкм |          |                      |
|-------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|----------------------|
| Обработка               | исходный | усиление | усиление + травление | исходный | усиление | усиление + травление |
| $G$ , Дж/м <sup>2</sup> | 0,17     | 0,10     | 0,285                | 0,52     | 0,56     | 0,455                |

На фотографиях отпечатков индентора в пленках фоторезиста КМР Е3502 отчетливо видны светлые ореолы, представляющие собой зону деформации/разрушения (см. рисунки 1, 2). При малых (1–2 г) нагрузках – это области деформации, образованные вытесненным из-под индентора материалом пленки, что можно охарактеризовать как формирование «замороженных» остаточных напряжений после снятия нагрузки (см. рисунки 1, з; 2, з). При нагрузках  $\geq 5$  г вокруг отпечатков формируется зона разрушения, в которой наблюдаются радиальные и боковые трещины, образующие картину в виде «бабочек», обусловленную, вероятнее всего, отслоением пленки от подложки (см. рисунки 1, а–в; 2, а–в).

Зависимости от нагрузки среднего диаметра  $d_p$  зоны деформации/разрушения пленок КМР Е3502 представлены на рисунке 5. Характер этих зависимостей у тонких и толстых пленок различен. В пленках толщиной 2,62 мкм величина  $d_p$  резко растет при малых нагрузках и выходит на насыщение при  $P = 10$  г, практически не изменяясь при более высоких нагрузках (рисунок 5, а). Такой характер зависимости  $d_p(P)$  обусловлен тем, что индентор при нагрузке 10 г пересекает границу раздела фоторезист/кремний. В пленках толщиной 5,73 мкм индентор не достигает границы раздела фоторезист/кремний даже при максимальной нагрузке 50 г, поэтому наблюдается монотонный рост среднего диаметра  $d_p$  зоны деформации/разрушения (рисунок 5, б). Дополнительное усиление и ионное травление фоторезистивных пленок КМР Е3502 приводило к слабому снижению величины  $d_p$ , наблюдавшемуся при нагрузках свыше 10 г.

Пленкообразующую основу фоторезиста КМР Е3502 образуют олигомеры фенолформальдегидных смол, которые могут присоединять мономерные цепи по трем различным вариантам, поэтому строгая линейная цепочка молекулы фоторезиста маловероятна. Однако на границе раздела фоторезист/кремний имеет место взаимодействие молекул фоторезиста и кремния (окисла на его поверхности). Согласно [13], полимерные пленки способны ориентироваться под внешним воздействием (например, электрического или магнитного поля) и после удаления растворителя сохранять стабильный порядок. Подобное взаимодействие полиметилметакрилата и SiO<sub>2</sub> отмечалось авторами [14] на глубине до десяти микрон. Упорядочение

структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул способствует упрочнению полимерной пленки вдоль направления ориентации, что проявлялось в наших экспериментах как возрастание микротвердости и коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  фоторезистивных пленок при увеличении глубины проникновения индентора в пленку.



**Рисунок 5.** – Зависимости среднего диаметра зоны разрушения  $d_p$  вокруг отпечатка от нагрузки для пленок фоторезиста КМР E3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), после дополнительного усиления (2) и ионного травления (3)

Различия прочностных свойств толстых и тонких фоторезистивных пленок КМР E3502 обусловлены неполным прогревом толстой пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев 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 ее истинная микротвердость, измеряемая при нагрузках 1–5 г, постоянна. Толстая пленка за время сушки не успевает прогреться однородно. В ней после формирования концентрация остаточного растворителя вблизи поверхности фоторезиста выше, чем у границы раздела фоторезист/кремний. Известно [9], что присутствие растворителя снижает микротвердость фоторезистивной пленки. Это обстоятельство обуславливает монотонное увеличение микротвердости толстой пленки по мере проникновения индентора в глубину пленки и приближению к границе раздела фоторезист/кремний.

Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок КМР E3502 ионами Ag, обусловлены формированием ковалентных сшивок между полимерными цепями [15]. Сшивки в свою очередь способствуют упрочнению пленки. При анализе следует также учитывать наличие в фоторезисте в качестве небольшой добавки «сшивающего» компонента, который активизируется (сшивает) при воздействии актиничного излучения и деактивируется при высокотемпературном нагреве. Поведение этого компонента при ионном травлении не изучено, но, вероятнее всего, он должен способствовать сшиванию олигомеров фенолформальдегидных смол в полимерные молекулы.

**Закключение.** Установлено, что прочностные и адгезионные свойства пленок КМР E3502 сопоставимы с аналогичными свойствами ФР серии AZ nLOF 20XX. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  пленок КМР E3502 возрастает при увеличении нагрузки. Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на их трещиностойкость. Адгезия (удельная энергия отслаивания  $G$ ) тонких пленок в три раза ниже по сравнению с толстыми пленками КМР E3502. Значения  $G$  толстой пленки КМР E3502 близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070. Дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки КМР E3502 к кремниевой подложке. Истинная микротвердость тонких пленок КМР E3502 составила 0,3 ГПа, что примерно в два раза выше микротвердости у функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510. После стабилизирующей обработки и ионного травления она увеличивалась, что обусловлено сшиванием молекул фоторезиста. В толстых пленках КМР E3502 микротвердость возрастала по мере удаления от поверхности пленки и при приближении к границе раздела фоторезист/кремний стабилизировалась на уровне  $\sim 0,55$  ГПа. Такое поведение величины  $H$  обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования. Так как нагрев осуществлялся со стороны подложки, толстые пленки КМР E3502 не успевали прогреться однородно, в результате чего после сушки у их поверхности наблюдалась более высокая концентрация остаточного растворителя. Полученные экспериментальные данные объяснены с учетом упорядочения структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул и конформационных изменений в структуре основного компонента фоторезиста – фенолформальдегидной

смоли. Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок КМР Е3502 ионами Ag обусловлены формированием ковалентных сшивок между молекулами полимера, которые способствуют упрочнению пленки.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия фоторезистивных пленок на кремнии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович и др. // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 1 – С. 69–76. – DOI: [10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76](https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76).
2. 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.
3. 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).
4. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Прочностные свойства термообработанного кремния, выращенного в магнитном поле // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 3. – С. 152–157.
5. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттеризирующую термообработку // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20–22.
6. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев фосфида галлия // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
7. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинонноволачных фоторезистов, облученных электронами / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, С. Д. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 60–68.
8. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттеризирующую обработку // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20–22.
9. Индентирование пленок негативных фоторезистов для обратной литографии / С. А. Вабищевич, 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).
10. Adhesion of Electron-Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, N. V. Vabishchevich, S. D. Brinkevich et al. // High Energy Chemistry. – 2024. – Vol. 58, iss. 1. – P. 112–119. – DOI: [10.1134/S001814392401017X](https://doi.org/10.1134/S001814392401017X).
11. Прочностные свойства пленок фоторезиста AZ nLOF 5510 / С. А. Абрамов, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение – 2024» (26–29 нояб. 2024 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2024. – С. 106–108.
12. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич, Н. В. Вабищевич и др. // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199. – DOI: [10.7868/S0544126914010037](https://doi.org/10.7868/S0544126914010037).
13. Lu Xiaolin, Mi Yongli. Characterization of the interfacial interaction between polyacrylamide and silicon substrate by Fourier transform infrared spectroscopy // Macromolecules. – 2005. – Vol. 38, iss. 3. – С. 839–843.
14. Власов С. В., Кулизнев В. Н. Ориентированное состояние полимеров. – М.: Знание, 1987. – 48 с.
15. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone–Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, S. D. Brinkevich, V. S. Prosolovich 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).

Поступила 16.09.2025

#### PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF KMP E3502 NEGATIVE PHOTORESIST FILMS ON SILICON

S. VABISHCHEVICH<sup>1</sup>, D. BRINKEVICH<sup>2</sup>, V. PROSOLOVICH<sup>2</sup>, S. BRINKEVICH<sup>3</sup>,  
O. ZUBOVA<sup>4</sup>, N. VABISHCHEVICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

<sup>2</sup>(Belarusian State University, Minsk)

<sup>3</sup>(LLC “My Medical Center – High Technologies”, Vsevolozhsk, Russia)

<sup>4</sup>(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

Films of negative photoresists (FR) KMP E3502 with a thickness of 2,6–5,8 microns deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation have been studied by the indentation method. It was experimentally established that the strength and adhesive properties of the KMP E3502 films are close to the similar properties

of the AZ nLOF 20XX series. The fracture toughness coefficient  $K_{IC}$  films of the KMP E3502 increases with an increase in the load. Neither additional strengthening nor ion etching had a significant impact on their crack resistance. Adhesion (specific energy of peeling  $G$ ) of thin films is 3 times lower compared to thick films of the KMP E3502. The values of  $G$  thick KMP E3502 film are close to the size  $G$  of the initial film AZ nLOF2070. Additional strengthening and ionic etching did not have a significant impact on the adhesion of the photoresistic film of the KMP E3502 to silicon substrate. The true microhardness of KMP E3502 thin films was 0,3 GPa and was  $\sim 2$  times higher than the microhardness of similar functional AZ nLOF5510 films. After stabilizing processing and ion etching, it increased, which is due to the sewing of the photoresist molecules. In thick films of KMP E3502, the microhardness increased with distance from the film surface and stabilized at  $\sim 0.55$  GPa as it approached the photoresist/silicon interface. This behavior of microhardness is due to uneven heating of the film during drying during its formation, since heating was carried out from the substrate. The obtained experimental data are explained taking into account the ordering of the photoresist film structure near the PR/silicon interface due to the orientation of molecules and conformational changes in the structure of the main component of the photoresist – phenol-formaldehyde resin. Radiation-stimulated processes occurring during etching of CMR E3502 films with Ar ions are caused by the formation of covalent crosslinking between polymer molecules, which contribute to the hardening of the film.

**Keywords:** negative photoresist, microindentation, microhardness, adhesion, crack resistance, ion etching.