

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2022-38-4-49-55

## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ ЛИТОГРАФИИ

*канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет);**канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ**(Белорусский государственный университет, Минск);**канд. техн. наук В. В. КОЛОС, О. А. ЗУБОВА**(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»)*

Исследованы адгезионные и прочностные свойства пленок фоторезиста (ФР) для взрывной литографии NFR 016D4, нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 методом центрифугирования. Установлено, что они ведут себя как хрупкие материалы. Микротвердость ФР, измеренная при малых нагрузках, составляла ~0,3 ГПа, слабо снижаясь при увеличении толщины пленки. Параметры трещиностойкости (коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ ) при малых нагрузках не зависят от толщины пленки. Скорость возрастания трещиностойкости при увеличении нагрузки зависела от толщины пленки и была большей для тонких пленок. Удельная энергия отслаивания  $G$  при нормальной нагрузке составляла ~1,2 Дж/м<sup>2</sup> для толстых и ~0,7 Дж/м<sup>2</sup> для тонких пленок. Более высокие значения  $G$  для толстых пленок обусловлены, вероятнее всего, компенсацией полей упругих напряжений, возникающих на границе раздела фоторезист/кремний. Проведено сравнение прочностных свойств фоторезиста для взрывной литографии NFR 016D4 и позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120.

**Ключевые слова:** взрывная литография, негативный фоторезист, микротвердость, трещиностойкость, адгезия.

**Введение.** Взрывная или обратная литография (процесс “lift-off”) – процесс, при котором пленка материала (чаще всего металла) наносится на уже проэкспонированный и протравленный слой ФР на подложке. Структура на подложке формируется при удалении экспонированных участков ФР вместе с находящейся на них пленкой металла. Оставшаяся на подложке пленка металла полностью повторяет рисунок неэкспонированных областей [1]. Этот вид литографии применяется для создания на подложке структур, формирование которых обычными методами литографии проблематично. В частности, взрывная литография применяется при создании металлизации из драгоценных металлов, травление которых обычно является сложной задачей. К прочностным и адгезионным свойствам резистов для взрывной литографии применяются повышенные требования.

Целью настоящей работы являлось исследование методом индентирования адгезионных и прочностных (микротвердость, трещиностойкость) свойств пленок фоторезиста NFR 016D4, нанесенных на пластины монокристаллического кремния методом центрифугирования.

**Методы исследования.** Пленки негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 и 5,2 мкм нанесли на поверхность Si методом центрифугирования [2]. В качестве подложек использовались пластины (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). После формирования пленки ФР на рабочей стороне пластины проводилась ее сушка при температуре 90 °С. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью конфокального микроскопа MicroProof 200 по пяти фиксированным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных диаметрах на каждой пластине.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Нагрузка  $P$  на индентор варьировала 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. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [3]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости  $H$  менее 2,5% (с доверительной вероятностью 0,95).

Значения коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$  рассчитывались по средней длине радиальных трещин в углах отпечатков согласно следующим формулам [4]:

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

$$\gamma = \frac{K_{IC}^2}{2E}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга (для полимера –  $0,8 \cdot 10^{10}$  Па);  
 $H$  – микротвердость пленки;  
 $L$  – длина трещины;  
 $P$  – нагрузка на индентор.

Погрешность измерений не превышала 8%.

Удельная энергия отслаивания пленок  $G$  рассчитывалась по формуле (3), широко используемой для исследования различных полимерных пленок на стеклянных подложках [5]:

$$G = \frac{0,627H^2h(1-\nu^2)}{E(1+\nu+2(1-\nu)HL^2/P)^2}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина пленки;

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

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Отпечатки микроиндентора в пленках фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 и 5,2 мкм представлены на рисунках 1, 2. При минимальной нагрузке 1 г до 50% отпечатков после снятия нагрузки частично или полностью восстанавливались, уменьшаясь в размерах или полностью исчезая. Однако уже при нагрузке 2 г эффект восстановления отпечатка не наблюдался.

Установлено, что пленки ФР ведут себя как хрупкие материалы независимо от толщины [6]. Так, трещины в углах отпечатков наблюдались на всех нагрузках, даже при 1 г (см. рисунки 1, б и 2, б). При повышении нагрузки более 5 г вокруг отпечатков формируются отслоения от подложки в виде «бабочек» (см. рисунки 1, а и 2, а), размеры которых увеличиваются при повышении нагрузки. Размеры этих отслоений были меньше в более толстых пленках. Вокруг отпечатков наблюдаются интерференционные полосы (см. рисунки 1, а и 2, а), обусловленные интерференцией в клине, который образует отколотый полимер с поверхностью кремния. Вид отпечатков с возрастанием толщины пленки ФР не изменялся, однако в центре отпечатка на пленке толщиной 3,5 мкм при нагрузке 50 г появляется светлый квадрат (см. рисунок 1, а). Это свидетельствует о проникновении индентора в кремниевую подложку. Для более толстых пленок индентор не достигает подложки и светлый квадрат в центре отпечатка отсутствует (см. рисунок 2, а).

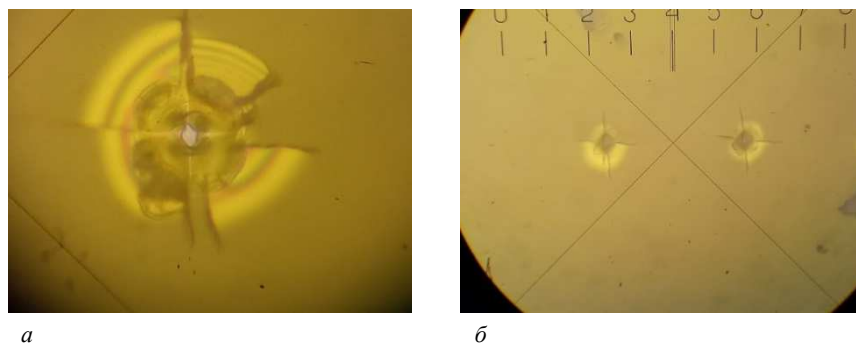


Рисунок 1. – Отпечатки микроиндентора на пленке фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 мкм при нагрузках 50 г (а, увеличение 700×) и 5 г (б, увеличение 350×)

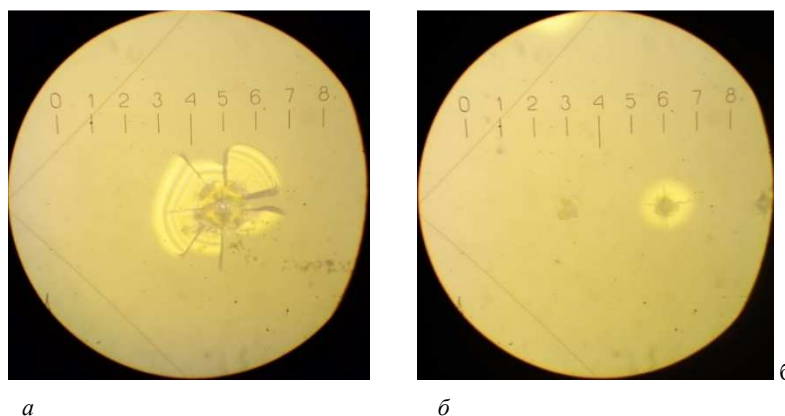
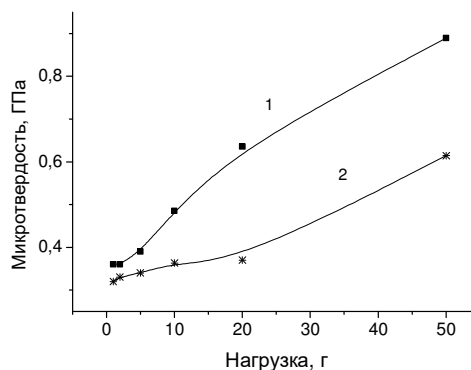


Рисунок 2. – Отпечатки микроиндентора на пленке фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм при нагрузках 50 г (а) и 5 г (б), увеличение 400×

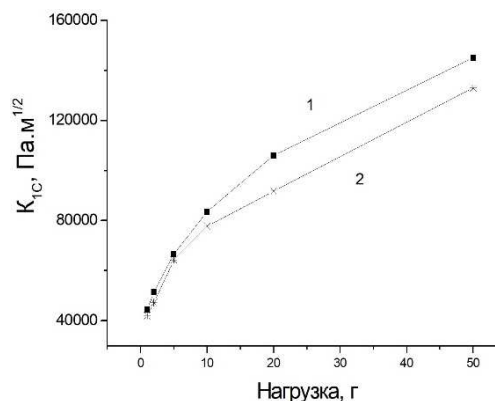
Зависимости микротвердости структур фоторезист/кремний от нагрузки представлены на рисунке 3. Когда глубина проникновения индентора не превышает 0,5 толщины пленки (при нагрузках – до 5 г), значения микротвердости постоянны и соответствуют истинной микротвердости фоторезиста ~0,3 ГПа. Значения истинной микротвердости пленки фоторезиста несущественно различались для толстой и тонкой пленок. При увеличении нагрузки начинает сказываться влияние твердой подложки (микротвердость кремния ~9 ГПа) и значения измеренной микротвердости возрастают. Особенно резкий рост измеренных значений микротвердости наблюдается при приближении и пересечении индентором границы раздела фоторезист/кремний, что наглядно показывает кривая 1 на рисунке 3 для тонкой пленки. В этой пленке индентор достигает границы раздела фоторезист/кремний при нагрузке 10 г, при этой же нагрузке начинается существенный рост измеренной микротвердости. В более толстой пленке индентор достигает границы раздела фоторезист/кремний только при нагрузке 50 г, и только при этой нагрузке наблюдается существенный рост измеренной микротвердости (см. рисунок 3, кривая 2).

**Рисунок 3. – Зависимость микротвердости пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 (1) и 5,2 мкм (2) на кремнии марки КДБ10(111) от нагрузки**

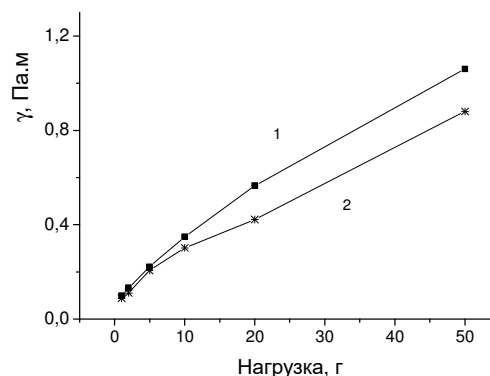


Зависимости от нагрузки параметров трещиностойкости (коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$ ) представлены на рисунках 4 и 5. Эти параметры при малых нагрузках не зависели от толщины пленки, однако при увеличении нагрузки трещиностойкость тонкой пленки возрастала быстрее чем толстой, причём это наблюдалось для обоих параметров трещиностойкости. При максимальной нагрузке 50 г оба параметра трещиностойкости выше в тонкой пленке: коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  – на 20%, а эффективная энергия разрушения  $\gamma$  – на 7%. Это различие, как и в случае с микротвердостью, обусловлено, вероятнее всего, не различием в свойствах самих пленок, а влиянием кремниевой подложки.

**Рисунок 4. – Зависимость коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  от нагрузки для пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 (1) и 5,2 мкм (2)**



**Рисунок 5. – Зависимость эффективной энергии разрушения  $\gamma$  от нагрузки для пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 (1) и 5,2 мкм (2)**



Зависимость от нагрузки удельной энергии отслаивания  $G$  для тонких и толстых пленок имеет различный характер (рисунок 6). В толстой пленке (см. рисунок 6, кривая 2) величина  $G$  практически не изменяется во всем диапазоне нагрузок – ее величина варьирует в пределах 1,15–1,35 Дж/м<sup>2</sup>. В тонких пленках при нагрузках до 10 г удельная энергия отслаивания  $G$  постоянна и ее величина составляет ~0,7 Дж/м<sup>2</sup>. При более высоких нагрузках значения  $G$  начинают быстро расти и при нагрузке 50 г достигают значений ~3 Дж/м<sup>2</sup>.

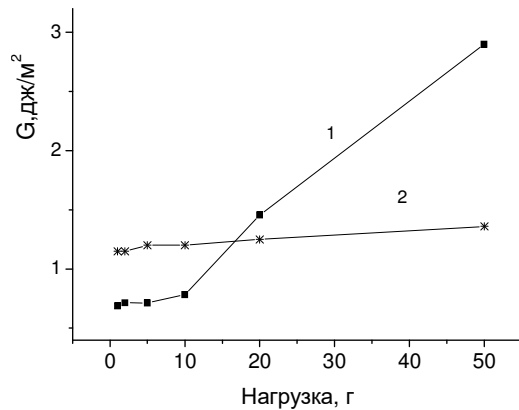


Рисунок 6. – Зависимость удельной энергии отслаивания  $G$  от нагрузки для пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 (1) и 5,2 мкм (2)

Различный характер зависимости от нагрузки удельной энергии отслаивания  $G$  для тонких и толстых пленок обусловлен следующими причинами. Метод индентирования позволяет проводить измерения путем приложения как нормальной, так и латеральной нагрузки. Режим нормальной нагрузки реализуется при индентировании толстых пленок, когда индентор не достигает границы раздела фоторезист/кремний. После проникновения индентора в кремниевую подложку свой вклад в отслоение пленки начинает вносить латеральная составляющая нагрузки, что на эксперименте проявляется как рост измеренных значений  $G$ .

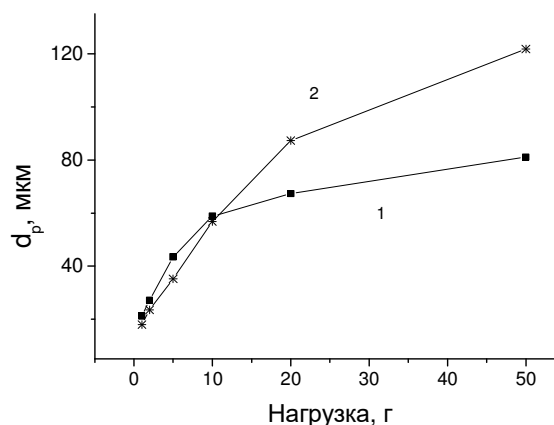
Согласно данным эксперимента глубина проникновения индентора в фоторезистивную пленку при нагрузке 10 г составляла ~3,2 мкм, что сравнимо с толщиной тонкой фоторезистивной пленки (~3,5 мкм). Поэтому при  $P \leq 10$  г измерялись величины удельной энергии отслаивания  $G$  при нормальной нагрузке. Они составляли ~1,2 Дж/м<sup>2</sup> для толстых и ~0,7 Дж/м<sup>2</sup> для тонких пленок. Более высокие значения  $G$  для толстых пленок обусловлены, вероятнее всего, компенсацией полей упругих напряжений, возникающих на границе раздела фоторезист/кремний. Отметим, что дисперсия измеренных значений  $G$  увеличивалась при уменьшении нагрузки и при малых значениях нагрузки  $P = 1 - 2$  г была очень велика ( $\Delta G / G = 0,5 - 0,9$ ). При  $P > 10$  г в тонкой пленке дополнительный вклад вносит латеральная нагрузка и измеренные значения  $G$  начинают расти. Измерить величину  $G$ , обусловленную чисто латеральной нагрузкой, нам не удалось, поскольку не удалось выйти на плато на зависимости  $G(P)$ . Такой выход на плато мы наблюдали в работе [7] для пленок позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,0 мкм. Отметим, что величина удельной энергии отслаивания  $G$  при нормальной нагрузке для позитивного фоторезиста ФП9120 составляла ~0,3 Дж/м<sup>2</sup>, что в 2–4 раза ниже значений  $G$  для фоторезиста NFR 016D4, полученных в настоящей работе.

Для пленок толщиной 5,2 мкм во всем диапазоне использованных нагрузок индентор не пересекал границу раздела фоторезист/кремний, что свидетельствует о преобладании нормальной составляющей нагрузки. Измеренные значения  $G$  были постоянны и соответствовали величине удельной энергии отслаивания при нормальной нагрузке.

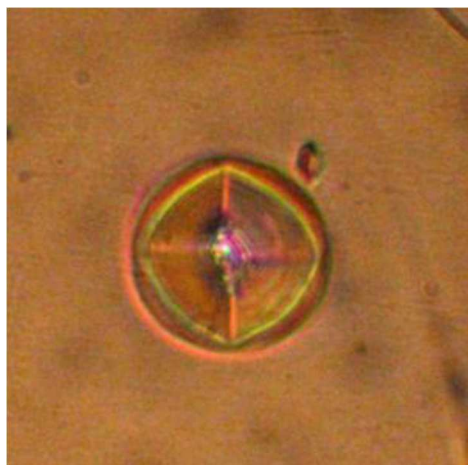
Вокруг отпечатков индентора наблюдалась деформация структуры полимерного фоторезиста (светлый «ореол» на рисунках 1, б и 2, б), которая при больших нагрузках приводила к разрушению пленки (см. рисунки 1, а и 2, а). Средний диаметр области деформации (разрушения) фоторезистивной пленки возрастал при увеличении нагрузки. Кривые зависимости среднего диаметра разрушения  $d_p$  от нагрузки имеют тенденцию к насыщению (рисунок 7), более выраженную у тонких пленок (см. рисунок 7, кривая 1). Следует отметить, что при малых нагрузках (1–5 г) наблюдается практически линейная зависимость  $d_p(P)$ , более сильная в тонкой пленке (сравни кривые 1 и 2 на рисунке 7). При приближении индентора к границе раздела фоторезист/подложка (10 г для тонкой пленки) скорость роста  $d_p$  замедляется и зависимость  $d_p(P)$  стремится к насыщению. При индентировании толстой пленки индентор приближается к границе раздела только при нагрузке 50 г, поэтому в толстой пленке существенное отклонение от линейности зависимости  $d_p(P)$  наблюдается только при нагрузке 50 г. Большие размеры области деформации/разрушения при малых нагрузках в тонких пленках (см. рисунок 7, кривая 1) по сравнению с толстой

пленкой (см. рисунок 7, кривая 2) обусловлены более сильными в тонких пленках деформационными полями на границе раздела фоторезист/подложка.

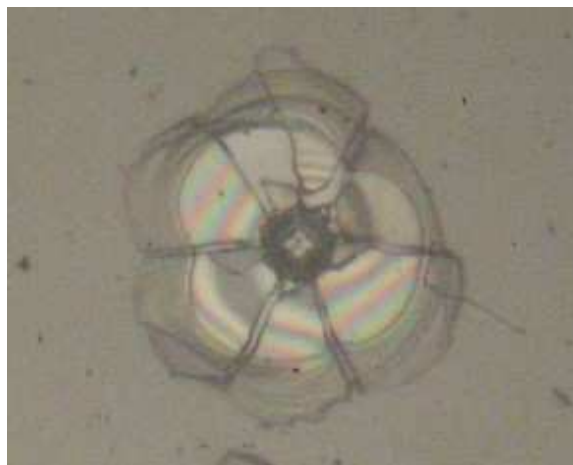
**Рисунок 7. – Зависимость от нагрузки среднего диаметра деформации/разрушения  $d_p$  вокруг отпечатка для пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 3,5 (1) и 5,2 мкм (2)**



Поведение негативного фоторезиста для взрывной литографии NFR 016D4 при индентировании существенно отличается от поведения позитивного диазохиноноволачного фоторезиста ФП9120, описанного нами в работах [8–12]. В исходных образцах фоторезиста ФП9120 отпечатки индентора имели бочковидную форму (рисунок 8, а), что указывает на наличие растягивающих напряжений в полимерной пленке. У негативного фоторезиста NFR 016D4 таких растягивающих напряжений не наблюдалось – отпечатки имели квадратную форму, совпадающую с формой индентора (см. рисунок 2, б). Величины микротвердости обоих фоторезистов были близки и составляли ~0,3 ГПа. Следует отметить, что после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  пленки позитивного фоторезиста ФП9120 при индентировании начинают вести себя подобно исследовавшемуся в настоящей работе негативному фоторезисту NFR 016D4 (сравн. рисунки 1, а; 2, а и 8, б). Отпечатки в  $\gamma$ -облученных пленках ФП9120 при малых нагрузках становятся квадратными, что свидетельствует об исчезновении растягивающих напряжений после облучения.



а



б

**Рисунок 8. – Фотографии характерных отпечатков индентора при индентировании в исходные (а, увеличение 700 $\times$ , нагрузка 5 г [8]) и гамма-облученные (б, увеличение 700 $\times$ , нагрузка 50 г [9]) пленки позитивного диазохиноноволачного фоторезиста ФП9120**

**Заключение.** Таким образом, экспериментально установлено, что пленки фоторезиста для взрывной литографии NFR 016D4, нанесенные на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 методом центрифугирования, ведут себя как хрупкие материалы: трещины в углах отпечатков наблюдались на всех исследовавшихся нагрузках. Микротвердость фоторезиста, измеренная при малых нагрузках, составляла ~0,3 ГПа, слабо снижаясь при увеличении толщины пленки. Параметры трещиностойкости (коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  и эффективная энергия разрушения  $\gamma$ ) при малых нагрузках не зависят от толщины пленки. При увеличении нагрузки трещиностойкость тонкой пленки возрастала быстрее, чем толстой. Удельная энергия отслаивания  $G$  при нормальной нагрузке составляла ~1,2 Дж/м<sup>2</sup> для толстых и ~0,7 Дж/м<sup>2</sup> для тонких пленок. Более высокие значения  $G$  для толстых пленок обусловлены, вероятно

всего, компенсацией полей упругих напряжений, возникающих на границе раздела фоторезист/кремний. Средний диаметр области деформации/разрушения фоторезистивной пленки возрастал при увеличении нагрузки. Кривые зависимости среднего диаметра разрушения  $d_p$  от нагрузки имеют тенденцию к насыщению, более выраженную у тонких пленок. Проведено сравнение прочностных свойств фоторезиста для взрывной литографии NFR 016D4 и позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наноматериалы и нанотехнологии / Под ред. В. Е. Борисенко, Н. К. Толочко – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – С. 109–110.
2. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора / Д. И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48, № 3. – С. 235–239.
3. Бринкевич, Д. И. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев GaP / Д. И. Бринкевич, Н. В. Вабищевич, С. А. Вабищевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
4. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. – М. : Наука, 1989. – 220 с.
5. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel cjing on glass / J. Malzbender [et al.] // Materials Science and Engineering: R. – 2002. – V. 36, iss. 2-3. – P. 47–103. – DOI: [10.1016/S0927-796X\(01\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00040-7).
6. Дефекты упаковки, микротвердость и микрохрупкость в пластинах кремния, обусловленные термообработкой / Д. И. Бринкевич [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т. 11, № 1. – С. 48–50.
7. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon S. A. Vabishchevich [et al.] // J. of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – V. 14, № 6. – P. 1352–1357. – DOI: [10.1134/S1027451020060476](https://doi.org/10.1134/S1027451020060476).
8. Микроиндентирование структур фотополимер–кремний / Н. В. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2011. – № 4. – С. 77–83.
9. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 12. – С. 60–64.
10. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний,  $\gamma$ -облученных и имплантированных ионами  $B^+$  и  $P^+$  / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
11. Adhesion of Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich [et al.] // High Energy Chemistry. – 2021. – V. 55, N. 6. – P. 495–501.
12. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С. А. Вабищевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59.

## REFERENCES

1. Borisenko, V. E., & Tolochko, N. K. (Eds.). (2008). *Nanomaterialy i nanotekhnologii. [Nanomaterials and Nanotechnologies]* (109–110). Minsk: Belarusian State University. (In Russ.).
2. Brinkevich, D. I., Kharchenko, A. A., Prosolovich, V. S., Odzhaev, V. B., Brinkevich, S. D., & Yankovskii Yu. N. (2019). Modifikatsiya spektrov otrazheniya plenok diazokhinon-novolachnogo fotorezista pri implantatsii ionami bora i fosfora [Modification of reflectance spectra of films of diazoquinone-novolac photoresist upon implantation with boron and phosphorus ions]. *Mikroelektronika [Microelectronics]*, 48(3), 235–239. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2010). Fiziko-mekhanicheskie svoystva epitaksial'nykh sloev GaP [Physical and mechanical properties of GaP epitaxial layers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 92–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kolesnikov, Yu. V., & Morozov, E. M. (1989) *Mekhanika kontaktного razrusheniya [Contact fracture mechanics]*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
5. Malzbender, J., den Toonder, J. M. J., Balkenendeb, A. R., & de Witha, G. (2002) Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel cjing on glass. *Materials Science and Engineering: R*, 36(2-3), 47–103. DOI: [10.1016/S0927-796X\(01\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00040-7).
6. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, S. A., Petlitskii, A. N., & Prosolovich, V. S. (2006). Defekty upakovki, mikrotverdost' i mikrokhрупkost' v platinakh kremniya, obuslovlennyye termoobrabotkoi [Packing defects, microhardness and microbrittleness in silicon wafers caused by heat treatment]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty [Packing defects, microhardness and microbrittleness in silicon wafers caused by heat treatment]*, 11(1), 48–50. (In Russ.).
7. Vabishchevich, S. A., Brinkevich, S. D., Prosolovich, V. S., Vabishchevich, N. V., & Brinkevich, D. I. (2020). Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 14(6), 1352–1357. DOI: [10.1134/S1027451020060476](https://doi.org/10.1134/S1027451020060476).
8. Vabishchevich, N. V., Vabishchevich, S. A., Brinkevich, D. I., Volobuev, V. S., Lukashevich, M. G., Odzhaev, V. B., & Prosolovich, V. S. (2011). Mikroindentirovanie struktur fopolimer-kremnii [Microindentation of photopolymer-silicon structures]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 77–83. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Fiziko-mekhanicheskie svoystva obлучennykh plenok diazokhinon-novolachnogo fotorezista na kremnii [Physical and mechanical properties of irradiated films of diazoquinone-novolac photoresist on silicon]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*.

- Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences], (12), 60–64. (In Russ., abstr. in Engl.).*
10. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Yankovskii, Yu. N., & Brinkevich, S. D. (2016). Prochnostnye svoistva struktur fotorezist–kremnii,  $\gamma$ -obluchennykh i implantirovannykh ionami B<sup>+</sup> i P<sup>+</sup> [Strength properties of photoresist–silicon structures  $\gamma$ -irradiated and implanted with B<sup>+</sup> and P<sup>+</sup> ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences], (12), 30–36. (In Russ., abstr. in Engl.).*
  11. Vabishchevich, S. A., Brinkevich, S. D., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2021). Adhesion of Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon. *High Energy Chemistry, 55(6), 495–501.*
  12. Vabishchevich, S. A., Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Adgeziya k monokristallicheskomu kremniyu plenok diazokhinon-novolachnogo fotorezista, implantirovannykh ionami bora i fosfora [Adhesion to single-crystal silicon of diazoquinone-novolac photoresist films implanted with boron and phosphorus ions]. *Khimiya vysokikh energii [High Energy Chemistry], 54(1), 54–59. (In Russ., abstr. in Engl.).*

Поступила 17.03.2022

## STRENGTH PROPERTIES OF PHOTORESISTS FOR EXPLOSIVE LITHOGRAPHY

**S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH,  
V. KOLOS, O.ZUBOVA**

*The adhesion and strength properties of NFR 016b4 photoresist (PR) films for explosive lithography deposited on the surface of KDB-10 single-crystal silicon wafers by centrifugation have been studied. It has been found that they behave like brittle materials. The FR microhardness measured at low loads was  $\sim 0,3$  GPa, decreasing slightly with increasing film thickness. The crack resistance parameters (fracture toughness coefficient  $K_{IC}$  and effective fracture energy  $\gamma$ ) at low loads do not depend on the film thickness. With increasing load, the crack resistance of a thin film increased faster than that of a thick one. The specific peeling energy  $G$  under normal loading was  $\sim 1,2$  J/m<sup>2</sup> for thick and  $\sim 0,7$  J/m<sup>2</sup> for thin films. The higher values of  $G$  for thick films are most likely due to the compensation of elastic stress fields arising at the photoresist/silicon interface. The strength properties of NFR 016b4 explosive lithography photoresist and FP9120 positive diazoquinone-novolac photoresist are compared.*

**Keywords:** *explosive lithography, negative photoresist, microhardness, crack resistance, adhesion.*