

## ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2023-41-2-35-41

### ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ ПЛЕНОК НЕГАТИВНЫХ НОВОЛАЧНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

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

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», Минск)

*Исследованы адгезионные и прочностные свойства облученных электронами пленок фоторезиста для взрывной литографии NFR 016D4, нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 методом центрифугирования. Экспериментально установлено, что облучение электронами приводит к короблению и частичному отслоению пленки фоторезиста NFR 016D4 от кремниевой подложки. Облученные пленки фоторезиста ведут себя как хрупкие материалы. Наблюдалось существенное снижение трещиностойкости и адгезии к кремниевой подложке облученных фоторезистивных пленок, обусловленное радиационно-индуцированными процессами у границы раздела фоторезист/кремний.*

**Ключевые слова:** негативный фоторезист, облучение электронами, микроиндентирование, микротвердость, трещиностойкость, адгезия.

**Введение.** В современной микроэлектронике все большее распространение получает метод обратной литографии, при котором пленка материала (чаще всего металла) наносится на уже проэкспонированный и протравленный слой фоторезиста (ФР) на подложке [1]. Структура на подложке формируется при удалении неэкспонированных участков ФР вместе с находящейся на них пленкой металла. Оставшаяся на подложке пленка металла полностью повторяет рисунок неэкспонированных областей. Обратная литография применяется при создании металлизации из драгоценных металлов, травление которых обычно является сложной задачей. Одним из главных факторов успешного применения обратной литографии является образование отрицательного угла наклона маски фоторезиста (нависающий профиль боковых стенок). На такие боковые стенки профиля металл не осаждается, что облегчает процесс удаления слоя фоторезиста и обеспечивает гладкость края формируемого элемента. При экспонировании негативного ФР происходит «сшивка» полимеров, в результате чего пленка становится нерастворимой в проявителе. При воздействии электромагнитного излучения верхние слои пленки фоторезиста получают большее количество энергии, чем нижние. Вследствие этого нижние слои пленки будут лучше растворяться 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, в частности химически усиленные негативные фоторезисты серии NFR (производитель JSR, Токуо, Япон).

**Целью настоящей работы** являлось исследование методом индентирования прочностных свойств (микротвердость, трещиностойкость, адгезия) облученных электронами пленок фоторезиста NFR 016D4 на пластинах монокристаллического кремния.

**Методы исследования.** Пленки негативного новолачного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм наносились на поверхность пластин (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентациями (111) методом центрифугирования [2]. В качестве растворителя использовался метил-3-метоксипропилат. После формирования пленки ФР на рабочей стороне пластины проводилась её сушка при температуре 90 °С. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью конфокального микроскопа MicroProof по 5 фиксированным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных диаметрах на каждой пластине.

Облучение электронами с энергией 5 МэВ выполнялось на линейном ускорителе У-003 дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Плотность электронного пучка составляла  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и контролировалась с помощью цилиндра Фарадея. Температура образцов в процессе облучения не превышала 320 К.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПИМТ-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 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. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [3], что 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]:

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

$$\gamma = \frac{K_{1C}^2}{2E}, \quad (2)$$

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

$L$  – длина трещины.

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]:

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

где  $h$  – толщина пленки;

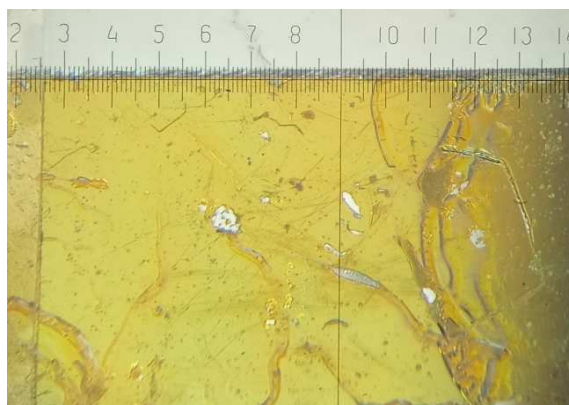
$\nu$  – коэффициент Пуассона (использовалось значение 0,3);

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

$P$  – нагрузка на индентор;

$l$  – длина трещины расслоения.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Фотография поверхности облученной электронами пленки фоторезиста NFR 016D4 представлена на рисунке 1. Облучение электронами привело к короблению и частичному отслоению пленки от подложки. Светлые пятна на фотографии – это места отрыва пленки от подложки; видна поверхность кремния, имеющая светло-серый цвет. Коробление и последующее отслоение пленки вероятнее всего связано с релаксацией упругих напряжений, возникающих у границы раздела фоторезист/кремний в процессе формирования пленки и ее облучения.



**Рисунок 1.** – Фотография поверхности облученной электронами дозой  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> пленки фоторезиста NFR 016D4 на кремнии при 20-кратном увеличении. Толщина пленки 5,2 мкм

Отпечатки индентора в облученных пленках фоторезиста NFR 016D4 представлены на рисунке 2. В отличие от исходных (необлученных) пленок [2] восстановление отпечатков индентора после снятия

нагрузки при минимальных нагрузках 1 г было выражено слабо. Облученные пленки ФР ведут себя как хрупкие материалы [6]. Вокруг отпечатков наблюдаются интерференционные полосы (рисунок 2, б), обусловленные интерференцией в клине, который образуется в области навалов. На нагрузках 1–5 г наблюдаются существенные разбросы величин диагонали отпечатков и размеров зоны разрушения (20–25 %) вокруг отпечатка, что свидетельствует о неоднородности фоторезистивной пленки. Трещины в углах отпечатков наблюдались на всех нагрузках (рисунок 2, а и б). При нагрузке более 5 г радиальные трещины замыкаются и вокруг отпечатков формируются отслоения от подложки в виде «бабочек» (рисунок 2, а), размеры которых увеличиваются при повышении нагрузки. При этом наблюдается частичное отслоение пленки от кремниевой подложки (светлое пятно на рисунке 2, а). Отметим, что размеры отколов заметно возрастали после облучения. В центре отпечатка при нагрузках свыше 20 г появляется светлый квадрат (рисунок 2, а), что свидетельствует о проникновении индентора в кремниевую подложку.

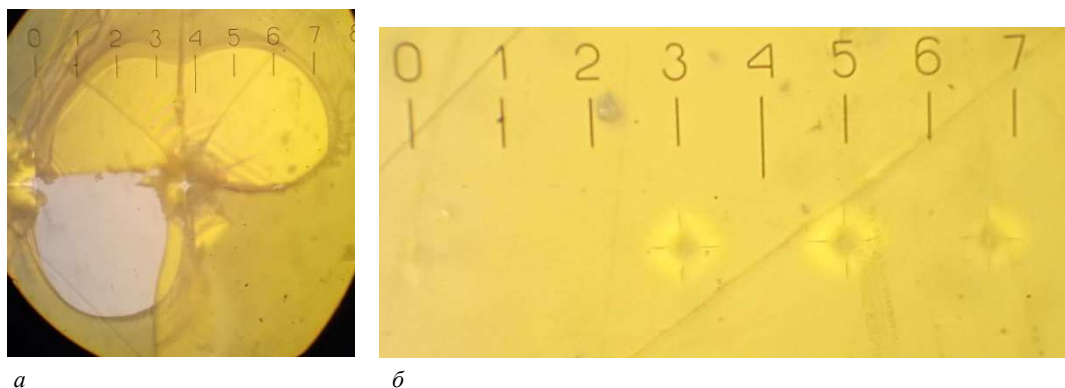


Рисунок 2. – Отпечатки микроиндентора на облученной пленке фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм при нагрузках 50 г (а) и 5 г (б)

Зависимости от нагрузки микротвердости исследованных структур фоторезист/кремний представлены на рисунке 3. Когда глубина проникновения индентора не превышает толщины пленки (при нагрузках 5–20 г), значения микротвердости постоянны и соответствуют истинной микротвердости фоторезиста ~0,3 ГПа. При нагрузке 50 г индентор достигает границы раздела фоторезист/кремний и начинает сказываться влияние твердой подложки (микротвердость кремния ~9 ГПа). Это приводит резкому росту значений измеренной микротвердости, который наиболее заметен в облученных пленках (см. рисунок 3, кривая 2). Отметим, что при малых нагрузках (1–2 г) наблюдались существенные (до 20 %) разбросы значений микротвердости, обусловленные неоднородностью (вероятнее всего, негомогенностью, хотя нельзя исключить и формирование мезофаз) пленки [7]. После облучения наблюдалось увеличение полуширины случайного распределения величин микротвердости, что, вероятнее всего, обусловлено формированием при электронном облучении неоднородных полей упругих напряжений вследствие сокращения объема пор внутри полимерной пленки [8]. Это в свою очередь должно приводить к уменьшению объема полимера и, соответственно, к уменьшению толщины полимерной пленки и формированию дополнительных упругих напряжений на границе раздела фоторезист/кремний. Уменьшение толщины полимерной пленки при электронном облучении обуславливает также рост значений микротвердости в облученной пленке при нагрузке 50 г, поскольку при этой нагрузке индентор в облученных структурах проникает в кремниевую подложку на большую глубину, чем в исходных структурах. Увеличение при облучении разброса значений микротвердости, измеренных при нагрузках 1–2 г, обусловлено, вероятнее всего, радиационно-индуцированной модификацией морфологии поверхности диазохинон-новолачного фоторезиста, выражающейся в формировании неравномерно распределенных по поверхности полимера конусообразных структур и увеличении его шероховатости [9].

После облучения длина радиальных трещин у отпечатков индентора резко возрастает. Длина трещин в облученных пленках достигала 70–120 мкм, причем наблюдалось частичное отслоение фоторезиста от кремния. Радиальные трещины наблюдались при всех нагрузках, вплоть до 1 г (см. рисунок 1). Таким образом, при электронном облучении наблюдалось существенное снижение трещиностойкости фоторезистивных пленок. Зависимости от нагрузки параметров трещиностойкости (коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  и эффективной энергии разрушения  $\gamma$ ) представлены на рисунках 4 и 5. Трещиностойкость облученных пленок была ниже, чем у исходных при всех нагрузках. Наиболее существенные отличия между исходными и облученными пленками ФР наблюдались при нагрузках  $\geq 10$  г, когда индентор приближается к подложке и начинает сказываться влияние границы раздела фоторезист/кремний. При нагрузках 1–5 г оба параметра трещиностойкости возрастают (рисунки 4, 5). Однако при дальнейшем увеличении нагрузки в облученной

пленке ФР оба параметра трещиностойкости немного снижаются и выходят на насыщение. В исходных пленках рост трещиностойкости хотя и замедляется, но продолжается (рисунки 4, 5). Отметим, что ранее [10] снижение коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  наблюдалось при  $\gamma$ -облучении диазохинон-новолачных фоторезистов ФП9120.

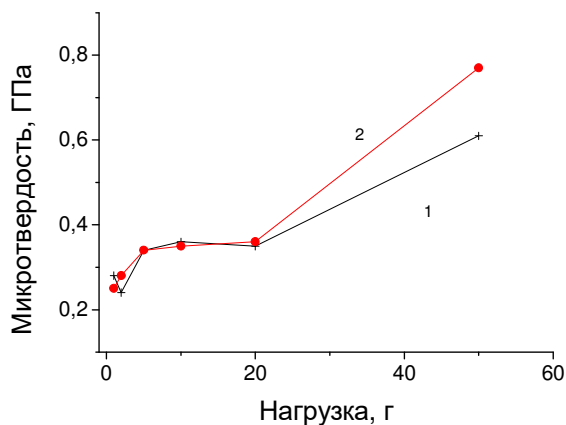


Рисунок 3. – Зависимость от нагрузки микротвердости исходной (1) и облученной (2) дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм

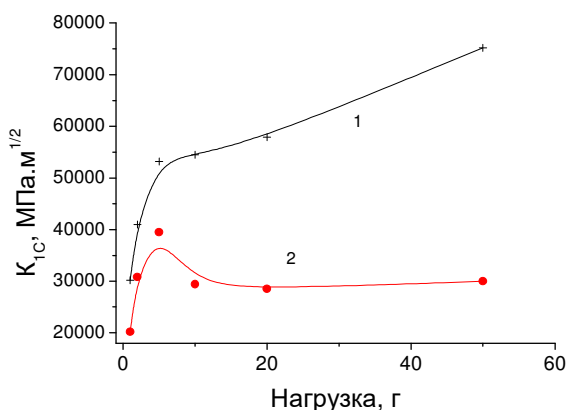


Рисунок 4. – Зависимость от нагрузки коэффициента вязкости разрушения  $K_{IC}$  исходной (1) и облученной (2) дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм

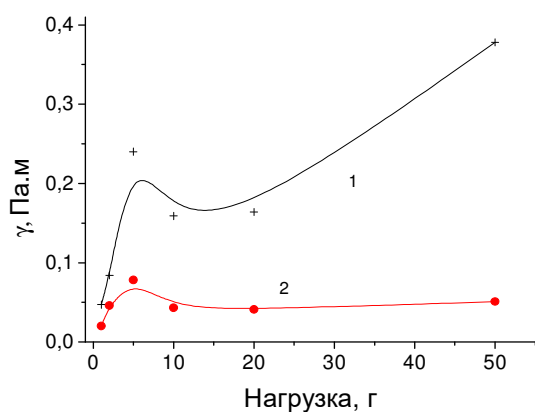
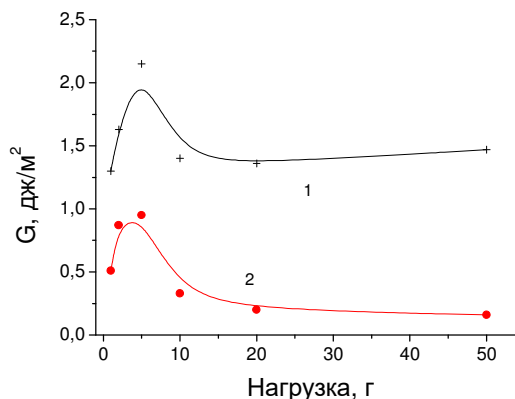


Рисунок 5. – Зависимость эффективной энергии разрушения  $\gamma$  от нагрузки исходной (1) и облученной (2) дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм

Приведенные выше экспериментальные данные указывают на существенное влияние электронного облучения на свойства границы раздела фоторезист/кремний, что приводит к снижению трещиностойкости фоторезистивных пленок NFR 016D4 на кремнии при больших нагрузках. Адгезионные свойства полимерной пленки характеризуются таким параметром, как удельная энергии отслаивания  $G$ . Зависимости  $G$  от нагрузки для исходных и облученных пленок приведены на рисунке 6. В исходной пленке (рисунок 6, кривая 1) величина  $G$  слабо растет при нагрузках 1–5 г, а затем снижается и выходит на постоянное значение  $\sim 1,35 \text{ Дж/м}^2$ . Отметим, что величина удельной энергии отслаивания  $G$  при нормальной нагрузке для положительного фоторезиста ФП9120 составляла  $\sim 0,3 \text{ Дж/м}^2$  [11], что в  $\sim 4$  раза ниже значений  $G$  для фоторезиста NFR 016D4, полученных в настоящей работе. В облученной пленке характер зависимости  $G$  от нагрузки

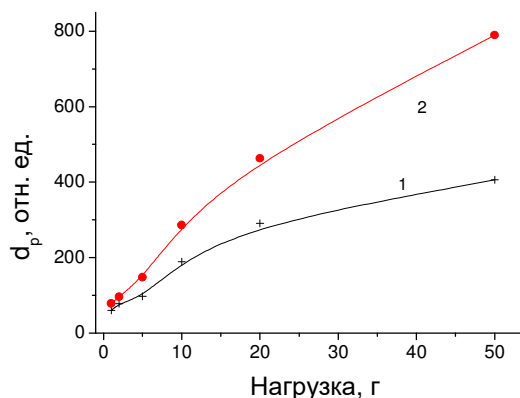
аналогичен исходной пленке, однако значения  $G$  в  $\sim 7$  раз ниже, чем в исходной пленке. Так, при нагрузке 50 г в облученной пленке  $G = 0,16$  Дж/м<sup>2</sup> и продолжало снижаться. Ранее [12–15] аналогичный эффект снижения адгезии наблюдался в диазохинон-новолачных фоторезистах ФП9120 при  $\gamma$ -облучении и имплантации  $Sb^+$ .

Рисунок 6. – Зависимость удельной энергии отслаивания  $G$  от нагрузки исходной (1) и облученной (2) дозой  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> пленок негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм



Вокруг отпечатков индентора наблюдалась деформация структуры полимерного фоторезиста (светлый «ареол» на рисунке 2, б), которая при больших нагрузках приводила к разрушению пленки (см. рисунок 2, а). На рисунке 7 приведены зависимости от нагрузки среднего диаметра деформации/разрушения  $d_p$  вокруг отпечатка в исходной (кривая 1) и облученной (кривая 2) пленках негативного фоторезиста NFR 016D4. Значения  $d_p$  возрастают при увеличении нагрузки. Кривые зависимости от нагрузки среднего диаметра разрушения  $d_p$  для исходной пленки имеют тенденцию к насыщению (рисунок 7, кривая 1). Однако в облученных пленках такой тенденции в использованном диапазоне нагрузок не наблюдается – сохраняется близкая к линейной зависимость  $d_p$  от нагрузки (рисунок 7, кривая 2).

Рисунок 7. – Зависимость от нагрузки среднего диаметра деформации/разрушения  $d_p$  вокруг отпечатка в исходной (1) и облученной (2) дозой  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> пленках негативного фоторезиста NFR 016D4 толщиной 5,2 мкм



Приведенные выше экспериментальные результаты по влиянию электронного облучения на адгезионные свойства и параметры трещинообразования в пленках негативного фоторезиста NFR 016D4 на кремнии обусловлены формированием упругих напряжений на границе раздела фоторезист/кремний вследствие сокращения объема пор внутри полимерной пленки [8].

**Заключение.** Таким образом, экспериментально установлено, что облучение электронами приводит к короблению и частичному отслоению пленки фоторезиста NFR 016D4 от кремниевой подложки. Облученные пленки ФР ведут себя как хрупкие материалы. Наблюдалось существенное снижение трещиностойкости облученных фоторезистивных пленок и их адгезии к кремниевой подложке. Полученные экспериментальные результаты объяснены формированием при электронном облучении неоднородных полей упругих напряжений вследствие сокращения объема пор внутри полимерной пленки, что в свою очередь приводит к уменьшению объема полимерной пленки и, соответственно, к уменьшению толщины полимерной пленки. Это обуславливает формирование дополнительных упругих напряжений на границе раздела фоторезист/кремний, которые ухудшают адгезионные и прочностные свойства фоторезистивных пленок NFR 016D4.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cheung K. M., Stemer D. M., Zhao C. et al. Chemical Lift-Off Lithography of Metal and Semiconductor Surfaces // *ACS Materials Lett.* – 2020. – Vol. 2, iss. 1 – P. 76–83. – DOI: [10.1021/acsmaterialslett.9b00438](https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.9b00438).
2. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Прочностные свойства фоторезистов для взрывной литографии // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2022. – № 4. – С. 49–55. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-49-55](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-49-55).
3. 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.
4. Колесников, Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 220 с.
5. Malzbender J., den Toonder J. M. J., Balkenende A. R., de With G. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coatings on glass // *Materials Science and Engineering: R: Reports.* – 2002. – Vol. 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. Бринкевич Д. И., Вабищевич С. А., Петлицкий А. Н. и др. Дефекты упаковки, микротвердость и микрохрупкость в пластинах кремния, обусловленные термообработкой // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2006. – Т. 11, № 1. – С. 48–50.
7. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Микротвердость пленок сополимеров на основе метилметакрилата, облученных  $\gamma$ -квантами // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2016. – № 12. – С. 51–57.
8. Малик Б., Паниграхи С. Влияние облучения протонами с энергией порядка нескольких МэВ на сечение аморфизации полимера // *Прикладная физика.* – 2012. – № 1. – С. 20–25.
9. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Прочностные свойства структур фоторезист – кремний,  $\gamma$ -облученных и имплантированных ионами  $V^+$  и  $P^+$  // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2016. – № 12. – С. 30–36.
10. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Трещиностойкость пленок диазохинон-новолачного резиста на пластинах монокристаллического кремния // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2021. – № 4. – С. 64–69.
11. Vabishchevich S., Brinkevich S., Prosolovich V. et al. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon // *J. 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. Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И. и др. Микроидентификация структур фотополимер – кремний // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2011. – № 4. – С. 77–83.
13. Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Vabishchevich N. V. et al. Ion Implantation of Positive Photoresists // *Russian Microelectronics.* – 2014. – Vol. 43, iss. 3. – P. 194–200. – DOI: [10.1134/S106373971401003X](https://doi.org/10.1134/S106373971401003X).
14. Вабищевич С. А., Бринкевич С. Д., Вабищевич Н. В. и др. Адгезия облученных пленок диазохинонноволачного фоторезиста к монокристаллическому кремнию // *Химия высоких энергий.* – 2021. – Т. 55, № 6. – С. 461–468. – DOI: [10.31857/S0023119321060152](https://doi.org/10.31857/S0023119321060152).
15. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки.* – 2020. – № 12. – С. 60–64.

## REFERENCES

1. Cheung, K. M., Stemer, D. M., Zhao, C., Young, T. D., Belling, J. N., Andrews, A. M., & Weiss, P. S. (2020). Chemical Lift-Off Lithography of Metal and Semiconductor Surfaces. *ACS Materials Lett*, 2(1), 76–83. DOI: [10.1021/acsmaterialslett.9b00438](https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.9b00438).
2. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Kolos, V. V., & Zubova, O. A. (2022). Prochnostnye svoystva fotorezistov dlya vzryvnoi litografii [Strength Properties of Photoresists for Explosive Lithography]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 49–55. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-49-55](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-49-55). (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2010). Fiziko-mekhanicheskie svoystva epitaksial'nykh sloev fosfida galliya [Physicomchanical Properties of Epitaxial Layers Gallium Phosphide]. *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 kontaktnogo razrusheniya [Contact fracture mechanics]*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
5. Malzbender, J., den Toonder, J. M. J., Balkenende, A. R., & de With, G. (2002). Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coatings on glass. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 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, miktrotverdost' i mikrokhрупkost' v plastinakh kremniya, obuslovlennyye termoobrabotkoi [Packing defects, microhardness and microbrittleness in silicon wafers caused by heat treatment]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty [Materials, Technologies, Tools]*, 11(1), 48–50. (In Russ.).
7. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2016). Miktrotverdost' plenok sopolimerov na osnove metilmetakrilata, obluchennykh  $\gamma$ -kvantami [Microhardness of  $\gamma$ -Irradiated Films

- of Copolymers Based on Methyl Methacrylate]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 51–57. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Malik, B., & Panigrakhi, S. (2012). Vliyaniye oblucheniya protonami s energiei poryadka neskol'kikh MeV na sechenie amorfizatsii polimera [Effect of amorphization cross-section of polymer due to MeV-proton irradiation]. *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, (1), 20–25. (In Russ., abstr. in Engl.).
  9. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Yankovskii, Yu. N., & Brinkevich, S. D. (2016). Prochnostnye svoystva struktur fotorezist-kremnii,  $\gamma$ -obluchennykh i implantirovannykh ionami  $V^+$  i  $R^+$  [Strength Properties of Photoresist-Silicon Structures,  $\gamma$ -Irradiated and Implanted by  $B^+$  and  $P^+$  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.).
  10. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2021). Treshchinostoikost' plenok diazokhinon-novolachnogo rezista na plastinakh monokristallicheskogo kremniya [Crack Resistance of Diazoquinone-Novolach Photoresist Films on Monocrystalline Silicon Plates]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 64–69.
  11. Vabishchevich, S., Brinkevich, S., Prosolovich, V., Vabishchevich, N., & Brinkevich, D. (2020). Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolac 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).
  12. Vabishchevich, N. V., Vabishchevich, S. A., Brinkevich, D. I., Volobuev, V. S., Lukashevich, M. G., Odzhaev, V. B., & Prosolovich, V. S. (2011). Mikroindentirovanie struktur fotopolimer – 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.).
  13. Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Vabishchevich, N. V., Odzhaev, V. B., & Prosolovich, V. S. (2014). Ion Implantation of Positive Photoresists. *Russian Microelectronics*, 43(3), 194–200. DOI: [10.1134/S106373971401003X](https://doi.org/10.1134/S106373971401003X).
  14. 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. DOI: [10.1134/S0018143921060151](https://doi.org/10.1134/S0018143921060151).
  15. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Fiziko-mekhanicheskie svoystva obluchennykh plenok diazokhinon-novolachnogo fotorezista na kremnii [Physical and Mechanical Properties of Irradiated Films of Diazoquinone-Novolach 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.).

Посмунна 15.09.2023

## STRENGTH PROPERTIES OF ELECTRON IRRADIATED FILMS OF NEGATIVE NOVOLAC PHOTORESISTS ON MONOCRYSTALLINE SILICON

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

**D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH**  
(*Belarusian State University, Minsk*);

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

*The adhesive and strength properties of electron-irradiated NFR 016D4 photoresist films for explosive lithography deposited on the surface of KDB-10 single-crystalline silicon wafers by centrifugation have been studied. It has been experimentally established that electron irradiation leads to warping and partial detachment of the NFR 016D4 photoresist film from the silicon substrate. Irradiated photoresist films behave like brittle materials. A significant decrease in crack resistance and adhesion to the silicon substrate of irradiated photoresist films was observed. caused by radiation-induced processes at the photoresist/silicon interface.*

**Keywords:** negative photoresist, electron irradiation, microindentation, microhardness, crack resistance, adhesion.