

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2023-41-2-42-47

**ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120, ИМПЛАНТИРОВАННЫЕ ИОНАМИ СЕРЕБРА**

*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)*

*Методом индентирования исследованы пленки позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм, имплантированные ионами  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ в интервале доз  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  на имплантаторе ИЛУ-3. Установлено, что свежеприготовленная пленка позитивного фоторезиста ФП9120 на кремнии проявляет упругопластичные свойства и после ее индентирования наблюдается упругое восстановление отпечатка. Сформированный при ионной имплантации  $Ag^+$  дозами свыше  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  карбонизированный слой подавляет эффект восстановления отпечатка при индентировании. После длительного хранения (более 3 лет) пленка изменяет свои прочностные свойства и ведет себя как твердое (непластичное) тело. Это обусловлено сшиванием молекул фенолформальдегидной смолы, снижающим подвижность молекул в условиях внешнего воздействия. Сплошной алмазоподобный карбонизированный слой, сформированный в области пробега ионов при имплантации ионами  $Ag^+$ , способствует увеличению значений истинной микротвердости фоторезистивной пленки после длительного хранения.*

**Ключевые слова:** *диазохинон-новолачный фоторезист, имплантация, ионы серебра, микроиндентирование, восстановленная микротвердость.*

**Введение.** Позитивные диазохинон-новолачные фоторезисты (ФР), представляющие собой композит фенолформальдегидной смолы и светочувствительного агента (О-нафтохинондиазида), часто используются в современной микроэлектронике в качестве масок при ионной имплантации [1]. При ионной имплантации фоторезистивных пленок на кремнии радиационно-индуцированные процессы протекают не только в области пробега ионов, но и за его пределами, что приводит к существенным изменениям физико-химических свойств по всей толщине полимерных пленок и у границы раздела фоторезист/кремний [2; 3]. В последнее время был опубликован ряд работ [2; 4–7] по исследованию радиационно-индуцированных процессов в фоторезистивных пленках, имплантированных ионами  $B^+$ ,  $P^+$  и  $Sb^+$  на ионно-лучевом ускорителе барабанного типа «Везувий-6». Однако прочностные свойства имплантированных ионами  $Ag^+$  пленок позитивных диазохинон-новолачных фоторезистов на пластинах монокристаллического кремния до настоящего времени не исследованы.

**Цель настоящей работы** – исследование методом микроиндентирования прочностных свойств имплантированных ионами  $Ag^+$  на имплантаторе ИЛУ-3 пленок диазохинон-новолачного позитивного фоторезиста марки ФП9120.

**Материалы и методы измерений.** Пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм нанесли на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111) методом центрифугирования при скорости вращения 1800 об/мин. Перед формированием пленки фоторезиста кремниевые пластины подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения ФР на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 мин при температуре 88 °С. Толщина пленок фоторезиста контролировалась механическим способом на профилометре «Des-tak», при этом отклонения от среднего значения по пластине не превышали 1 %.

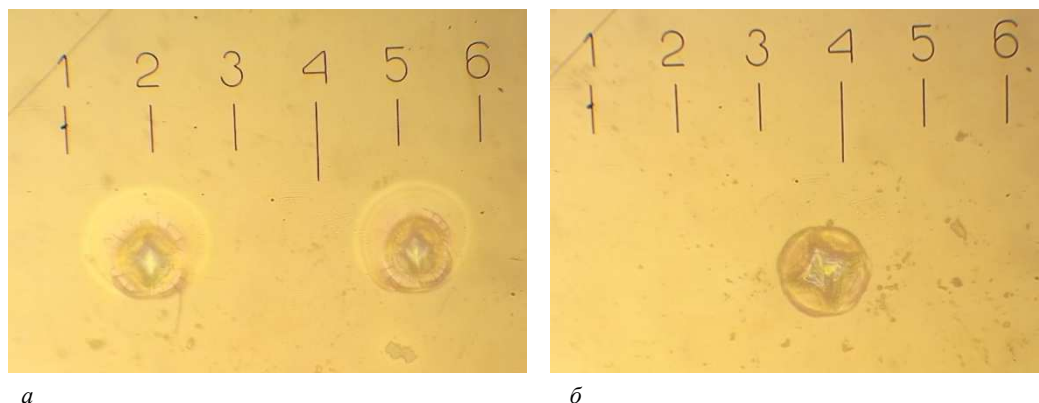
Имплантация ионами  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ в интервале доз  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  в режиме постоянного ионного тока (плотность тока  $j = 4 \text{ мкА/см}^{-2}$ ) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже  $10^{-5} \text{ Па}$  на имплантаторе ИЛУ-3. Во избежание перегрева и деструкции образца в процессе имплантации использовалась кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт с металлическим основанием, охлаждаемым водой.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре [8; 9]. 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 каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Для обработки экспериментальных данных использовались стандартные методы математической статистики [3]. Измерения восстановленной микротвердости и фиксация отпечатков индентора выполнялись через 10–20 мин после индентирования.

Погрешность измерений восстановленной микротвердости  $H$  составляла 5 % с доверительной вероятностью 0,95.

Значения истинной микротвердости  $H$  фоторезистивной пленки оценивались при нагрузках 1-2 г, для которых глубина проникновения индентора составляла ~50 % толщины пленки. Этот выбор обусловлен тем, что подложка оказывает существенное влияние на величину микротвердости композиций пленка – подложка [2]. В случае «мягкой» пленки на «твердой» подложке пластическая деформация локализуется в пленке, и микротвердость композиции пленка – подложка существенно возрастает лишь при глубине проникновения индентора, равной либо большей толщины пленки [10]. При нагрузках 1-2 г подложка не оказывает существенного влияния и измеренные значения  $H$  соответствуют истинной микротвердости фоторезистивной пленки [11].

**Эксперимент.** Характерные микрофотографии отпечатков индентора в имплантированных  $Ag^+$  дозой  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  пленках ФП9120 представлены на рисунке 1. В центре всех отпечатков наблюдается светлое пятно – след от проникновения индентора в кремний. Отметим, что отпечатки микроиндентора в пленках ФР, сформированные непосредственно после имплантации и через 3 года хранения, различаются существенным образом (см. рисунок 1). Форма отпечатков, сделанных сразу после формирования и ионной имплантации, серьезно отличалась от квадратной формы наконечника индентора – боковые грани отпечатка были вогнуты к центру (см. рисунок 1, б). Это свидетельствует о наличии сильных сжимающих напряжений в фоторезистивной пленке. Область деформации вокруг отпечатка невелика. Она имеет сферическую форму, диаметр которой практически совпадает с диагональю отпечатка. Для малых нагрузок (10 г и менее) становится существенным разброс величин микротвердости, что, вероятнее всего, связано с упругим восстановлением отпечатка. Причем часть отпечатков восстанавливалась полностью. Например, при нагрузке 2 г наблюдалось только 10–15 % отпечатков. Приведенные экспериментальные данные указывают на быструю и существенную релаксацию отпечатка после индентирования и позволяют утверждать, что полимерная пленка проявляет уругопластичные свойства.



а

б

**Рисунок 1. – Микрофотографии отпечатков индентора в имплантированных  $Ag^+$  дозой  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  пленках ФП9120. Индентирование сразу после имплантации (б) и после хранения в течении 3 лет (а). Нагрузка 50 г**

При индентировании после хранения в течение 3 лет форма отпечатков была близка к квадратной, искажения боковых граней отпечатка были слабо заметны (см. рисунок 1, а). Область деформации вокруг отпечатка была заметно больше диаметра отпечатка. Вокруг отпечатка наблюдались ореолы в виде интерференционных колец (светлые области на рисунке 1, а), обусловленные интерференцией на выдавленном из-под индентора материале. Размеры ореолов возрастали с ~20 до 45 мкм при увеличении нагрузки с 2 до 50 г. Это является прямым свидетельством отсутствия релаксации при комнатной температуре упругих напряжений в пленке ФР, возникающих в процессе индентирования. Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что после хранения пленка ведет себя как твердое (непластичное) тело.

Отметим также, что у отпечатков в области круговых навалов наблюдались небольшие радиальные трещины, причем одиночные трещины были даже у отпечатков с нагрузкой 1-2 г. Для выявления трещин в пределах отпечатка был применен известный прием выборочной фокусировки. Для определения размеров отпечатка фокусировка производилась на границах отпечатка (рисунок 2, а), а для выявления трещин фокусировка осуществлялась на поверхности (рисунок 2, б). По мере роста дозы облучения наблюдается увеличение трещинообразования при всех нагрузках. В то же время отколов пленки фоторезиста от подложки не происходило. Приведенные экспериментальные данные указывают на то, что зарождение и развитие трещин происходит в области пробега ионов  $Ag^+$ . В этой приповерхностной области при дозах свыше  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  происходит формирование легированного серебром сплошного карбонизированного слоя, толщина которого при внедрении  $Ag^+$  с энергией 30 кэВ составляет ~50 нм [12].

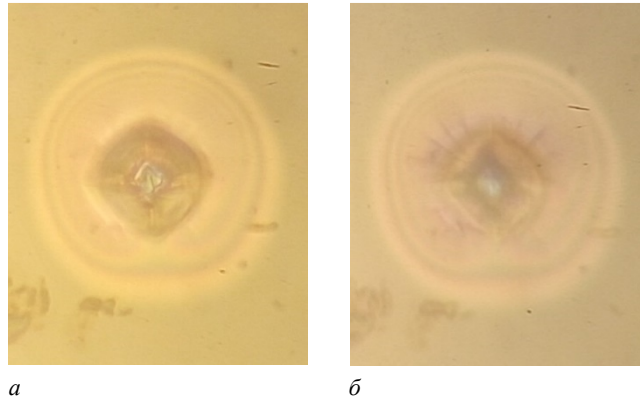


Рисунок 2. – Микрофотографии отпечатков индентора в имплантированных  $\text{Ag}^+$  дозой  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  пленках ФП9120 при фокусировке на границах отпечатка (а) и на поверхности пленки (б). Индентирование после хранения в течение 3 лет. Нагрузка 50 г

Существенные различия в поведении «свежеприготовленных» и хранившихся 3 года фоторезистивных пленок наблюдались и при измерении восстановленной микротвердости (рисунки 3 и 4). Отметим, что заметное влияние на величину восстановленной микротвердости имплантация оказывала только при нагрузках менее 5 г, когда индентор находился в ФР пленке (см. рисунки 3 и 4). Прочностные свойства кремниевой подложки после имплантации, как и после хранения, не изменялись.

Характер зависимости восстановленной микротвердости от дозы имплантации  $\text{Ag}^+$  в «свежеприготовленных» и хранившихся 3 года фоторезистивных пленках различается кардинально. Так в «свежеприготовленных» пленках ФР значения восстановленной микротвердости снижаются при увеличении дозы имплантации до  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . В диапазоне  $\Phi = (7,5 - 10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  заметных изменений значений восстановленной микротвердости не наблюдалось (см. рисунок 3).

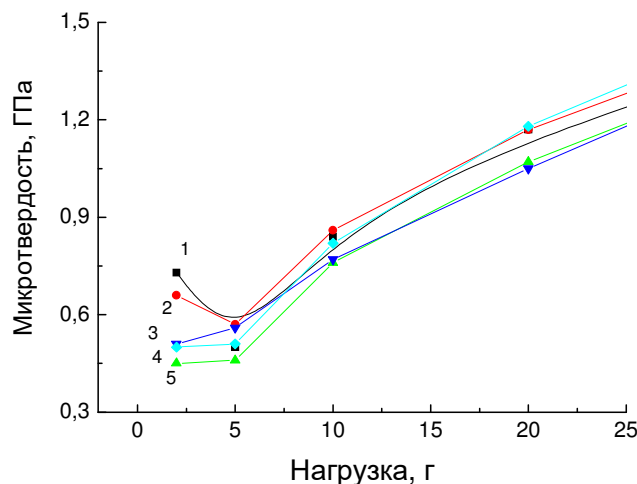
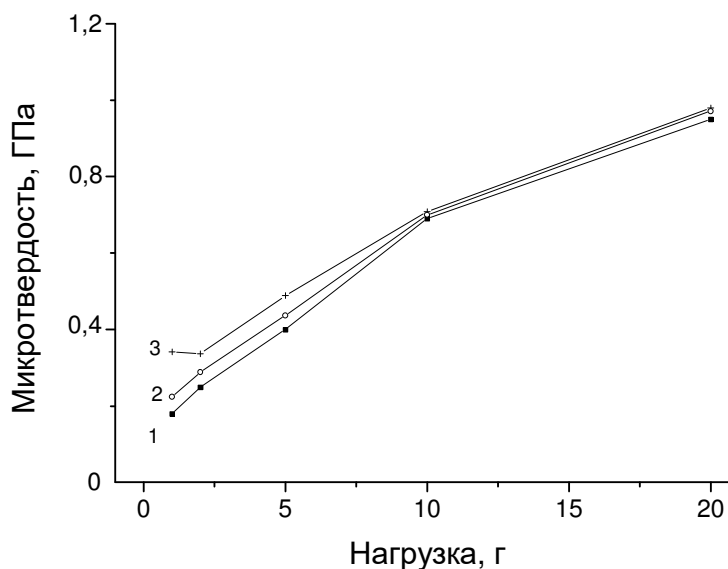


Рисунок 3. – Зависимости восстановленной микротвердости от нагрузки «свежеприготовленных» исходных (1) и имплантированных дозами  $2,5 \cdot 10^{16}$  (2),  $5 \cdot 10^{16}$  (3),  $7,5 \cdot 10^{16}$  (4) и  $1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (5) пленок фоторезиста

Длительное хранение пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на кремнии приводит к снижению величины восстановленной микротвердости, наиболее выраженному в необлученных пленках. Так в неимплантированных пленках значения восстановленной микротвердости снижались почти в 3 раза (с 0,7 до 0,25 ГПа), а в имплантированных дозой  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  образцах – всего на ~40 % (с 0,5 до 0,35 ГПа). После хранения имплантированной пленки ФР при нагрузках 1-2 г, когда индентор не достигает границы раздела ФР/Si, наблюдалось существенное возрастание значений восстановленной микротвердости при увеличении дозы имплантации до  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (см. рисунок 4). Дальнейшее увеличение  $\Phi$  до  $1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  к существенным изменениям величины восстановленной микротвердости не приводило. Зависимости  $H$  от нагрузки у этих образцов совпадали с аналогичными зависимостями для образцов с  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .



**Рисунок 4. –** Зависимости восстановленной микротвердости от нагрузки исходных (1) и имплантированных дозой  $2,5 \cdot 10^{16}$  (2) и  $5,0 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  (3) пленок фоторезиста. Срок хранения 3 года

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с учетом следующих обстоятельств. Как показано ранее методом нарушенного полного внутреннего отражения [2; 13], при хранении фоточувствительный компонент фоторезиста (диазохинон) подвергается разложению с образованием кетена. В отсутствие ингибитора молекулы фенолформальдегидной смолы (основа фоторезиста) склонны к сшиванию, что снижает их подвижность в условиях внешних воздействий, и пленка ведет себя как твердое (непластичное) тело. Отметим, что сшивка молекул фенолформальдегидной смолы отмечалась ранее в работах [14; 15].

Вместе с тем при имплантации фоторезистивной диазохинон-новолачной пленки ионами  $\text{Ag}^+$  в области пробега ионов  $R_p$  наблюдается формирование сплошного аморфного карбонизированного слоя, практически лишенного атомов водорода [16]. Оно интенсивно происходит при  $\Phi > 1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и заканчивается при  $\Phi = 5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Микротвердость такого слоя во многом определяется наличием  $\text{sp}_3$ -связей и при доле  $\text{sp}_3$ -связей около 50 % достигает значений 30–50 ГПа [17; 18], что более чем на 2 порядка выше, чем микротвердость необлученных полимерных пленок. В проведенных нами экспериментах при нагрузках 1-2 г глубина проникновения индентора составляла 1,0–1,5 мкм, что меньше толщины пленки ФР, но значительно больше проецированного пробега ионов  $\text{Ag}^+$  ( $R_p = 40 \text{ нм}$ ) [12]. Поскольку вклад в измеряемую микротвердость дает не только созданный имплантацией карбонизированный слой, но и область полимера за слоем внедрения ионов, экспериментально полученные значения микротвердости существенно ниже значений, характерных для аморфных углеродных пленок.

Свежеприготовленные пленки ведут себя как упругопластичные материалы. В них наблюдается упругое восстановление отпечатка, что приводит к увеличению значений восстановленной микротвердости. Сформированный при ионной имплантации карбонизированный слой подавляет эффект восстановления отпечатка, поэтому в свежеприготовленных имплантированных образцах значения восстановленной микротвердости ниже, чем в неимплантированных.

**Заключение.** Установлено, что свежеприготовленная пленка позитивного фоторезиста ФП9120 на кремнии проявляет упругопластичные свойства и после ее индентирования наблюдается упругое восстановление отпечатка. Сформированный при ионной имплантации  $\text{Ag}^+$  дозами свыше  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  карбонизированный слой подавляет эффект восстановления отпечатка при индентировании. После длительного хранения (более 3 лет) пленка изменяет свои прочностные свойства и ведет себя как твердое (непластичное) тело, что обусловлено сшиванием молекул фенолформальдегидной смолы, снижающим подвижность молекул в условиях внешнего воздействия. Кроме того, длительное хранение пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на кремнии приводит к снижению величины восстановленной микротвердости пленки. Сплошной алмазоподобный карбонизированный слой, сформированный в области пробега ионов при имплантации ионами  $\text{Ag}^+$  с энергией 30 кэВ дозами  $> 2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , способствует увеличению значений истинной микротвердости фоторезистивной пленки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы: в 2-х ч.: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
2. Brinkevich S., Grinyuk, E., Brinkevich, D. et al. Modification of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B<sup>+</sup> Ions // High Energy Chemistry. – 2020 – Vol. 54, iss. 5. – P. 342–351. – DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
3. Vabishchevich S. A., Brinkevich S. D., Vabishchevich N. V. et al. Adhesion of Irradiated Diazoquinone-Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon // High Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 55, iss. 6 – P. 495–501. DOI: [10.1134/S0018143921060151](https://doi.org/10.1134/S0018143921060151).
4. 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).
5. Kharchenko A. A., Brinkevich D. I., Prosolovich V. S. et al. Radiation-Stimulated Transformation of the Reflectance Spectra of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films Implanted with Antimony Ions // J. of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, iss. 3. – P. 558–561. – DOI: [10.1134/S1027451020030283](https://doi.org/10.1134/S1027451020030283).
6. Brinkevich S. D., Brinkevich D. I., Prosolovich V. S. Modification of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films by the Implantation of Antimony Ions // Russian Microelectronics. – 2021. – Vol. 50, iss. 1 – P. 33–38. DOI: [10.1134/S1063739720060025](https://doi.org/10.1134/S1063739720060025).
7. Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Prosolovich V. S. Ion Implantation in Diazoquinone-Novolac Photoresist // High Energy Chemistry. – 2022. – Vol. 56, iss. 4. – P. 270–276. – DOI: [10.1134/S0018143922040051](https://doi.org/10.1134/S0018143922040051).
8. 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.
9. 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.
10. Шугуров А. Р., Панин А. В., Оскомов К. В. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.
11. 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.
12. Бринкевич Д. И., Харченко А. А., Бринкевич С. Д. и др. Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в пленках полиимида // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2017. – № 8. – С. 25–30. – DOI: [10.7868/S0207352817080029](https://doi.org/10.7868/S0207352817080029).
13. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Эспиноза де лос Монтеро Г. А. и др. Радиационно-индуцированные процессы в пленках диазохинон-новолачного резиста на кремнии при имплантации ионов Ag<sup>+</sup> // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 4. – С. 43–47.
14. Debmalya R., Basu P. K., Raghunathan P. et al. DNQ-novolac photoresist revisited: 1H and 13C NMR evidence for a novel photoreaction mechanism // Magnetic resonance in chemistry. – 2003. – Vol. 41, iss 2. – P. 84–90. DOI: [10.1002/mrc.1134](https://doi.org/10.1002/mrc.1134).
15. Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д., Вабищевич Н. В. и др. Ионная имплантация позитивных фоторезистов // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199. – DOI: [10.7868/S0544126914010037](https://doi.org/10.7868/S0544126914010037).
16. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Радиационно-индуцированная модификация спектров отражения пленок диазохинонноволачного фоторезиста при имплантации ионов Ag<sup>+</sup> // Химия высоких энергий. – 2023. – Т. 57, № 6. – С. 456–471. – DOI: [10.31857/S0023119323060062](https://doi.org/10.31857/S0023119323060062).
17. Островский В. С. Твердость углеродных материалов // Химия твердого топлива. – 2009. – № 5. – С. 56–60.
18. Коршунов С. Н., Лебедев А. М., Мартыненко Ю. В. и др. Изменение структуры осаждаемых углеродных пленок при электронном ассистировании // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2019. – № 4. – С. 56–64.

## REFERENCES

1. Moreau, W. M. (1988). *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. N.Y.; London: Plenum Press.
2. Brinkevich, S. D., Grinyuk, E. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B<sup>+</sup> Ions. *High energy chemistry*, 54(5), 342–351. DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
3. 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).
4. Vabishchevich, S., Brinkevich, S., Prosolovich, V., Vabishchevich, N., & Brinkevich, D. (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).
5. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Brinkevich, S. D., Odzaev, V. B., & Yankovski, Yu. N. (2020). Kharchenko, A. A. Radiation-Stimulated Transformation of the Reflectance Spectra of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films Implanted with Antimony Ions. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 14(3), 558–561. DOI: [10.1134/S1027451020030283](https://doi.org/10.1134/S1027451020030283).
6. Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2021). Modification of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films by the Implantation of Antimony Ions. *Russian Microelectronics*, 50(1), 33–38. DOI: [10.1134/S1063739720060025](https://doi.org/10.1134/S1063739720060025).
7. Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2022). Ion Implantation in Diazoquinone-Novolac Photoresist. *High Energy Chemistry*, 56(4), 270–276. DOI: [10.1134/S0018143922040051](https://doi.org/10.1134/S0018143922040051).

8. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2010). Fiziko-mekhanicheskie svoystva epitaksial'nykh sloev fosfida galliya [Physicomechanical 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.).
9. 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.).
10. Shugurov, A. R., Panin, A. V., & Oskomov, K. V. (2008). Osobennosti opredeleniya mekhanicheskikh karakteristik tonkikh plenok metodom nanoindentirovaniya. *Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State]*, 50(6), 1007–1012. (In Russ.).
11. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2016). Mikrotverdost' plenok sopolimerov na osnove metilmetakrilata, obluchennykh  $\gamma$ -kvantami [Microhardness 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.).
12. Brinkevich, D. I., Kharchenko, A. A., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., Odzhaev, V. B., Valeev, V. F., ... Khaibullin, R. I. (2017). Radiation-induced modification of reflection spectra beyond the ion path region in polyimide films. *Journal of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 11(4), 801–806. DOI: [10.1134/S1027451017040188](https://doi.org/10.1134/S1027451017040188).
13. Vabishchevich, S.A., Vabishchevich, N.V., Espinoza de los Monteros, Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Radiacionno-inducirovannyye protsessy v plenках diazokhinon-novolachnogo rezista na kremnii pri implantatsii ionov  $Ag^+$  [Radiation-induced processes in films of diazoquinone-novolac resist on silicon during implantation of  $Ag^+$  ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 43–47.
14. Debmalya, R., Basu, P. K., Raghunathan, P., & Eswaran, S. V. (2003). DNQ-novolac photoresist revisited: 1H and 13C NMR evidence for a novel photoreaction mechanism. *Magnetic resonance in chemistry*, 41(2), 84–90. DOI: [10.1002/mrc.1134](https://doi.org/10.1002/mrc.1134).
15. Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Vabishchevich N. V., Odzhaev V. B., & Prosolovich V. S. (2014). Ionnyaya implantatsiya pozitivnykh fotorezistov [Ion implantation of positive photoresists]. *[Russian Microelectronics]*, 43(3), 194–200. DOI: [10.1134/S106373971401003X](https://doi.org/10.1134/S106373971401003X). (In Russ.).
16. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2023). Radiacionno-inducirovannaya modifikatsiya spektrov otrazheniya plenok diazokhinonno-volachnogo fotorezista pri implantatsii ionov  $Ag^+$ . *Khimiya vysokikh energij [High energy chemistry]*, 57(6), 456–471. DOI: [10.31857/S0023119323060062](https://doi.org/10.31857/S0023119323060062). (In Russ.).
17. Ostrovskii, V. S. (2009). Hardness of Carbon Materials. *Solid Fuel Chemistry*, 43(5), 314–317. DOI: [10.3103/S0361521909050103](https://doi.org/10.3103/S0361521909050103).
18. Korshunov, S. N., Lebedev, A. M., Martynenko, Yu. V., Svechnikov, N. Yu., & Skorlupkin, I. D. (2019). Izmenenie struktury osazhdaemykh uglerodnykh plenok pri elektronnom assistirovani [Structure Changes in Carbon Films Obtained by Electron-Beam Assisted Deposition]. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnye i neitronnye issledovaniya [Journal of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques]*, (4), 56–64.

Поступила 15.09.2023

## FILMS OF POSITIVE DIAZOQUINONE-NOVOLAC PHOTORESIST FP9120 IMPLANTED WITH SILVER IONS

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

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

*Films of positive diazoquinone-novolac photoresist FP9120 1,8  $\mu\text{m}$  thick, implanted with  $Ag^+$  ions with an energy of 30 keV in the dose range of  $2,5 \cdot 10^{16} - 1,0 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , were studied by indentation using an ILU-3 implanter. It has been established that a freshly prepared film of the positive photoresist FP9120 on silicon exhibits elastic-plastic properties and, after its indentation, an elastic recovery of the imprint is observed. The carbonized layer formed during ion implantation of  $Ag^+$  with doses above  $2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  suppresses the effect of imprint restoration during indentation. After long-term storage (more than 3 years), the film changes its strength properties and behaves like a solid (non-plastic) body. This is due to the cross-linking of phenol-formaldehyde resin molecules, which reduces the mobility of molecules under external influence. A continuous diamond-like carbonized layer formed in the range of ions. when implanted with  $Ag^+$  ions, it contributes to an increase in the values of the true microhardness of the photoresistive film after long-term storage.*

**Keywords:** diazoquinone-novolac resist, implantation, silver ions, microindentation, restored microhardness.