

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2024-43-2-41-46

**ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ СУРЬМЫ
ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120
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)*

Методом индентирования исследована модификация в процессе длительного хранения прочностных свойств имплантированных ионами Sb^+ пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на монокристаллическом кремнии. Зависимости микротвердости от нагрузки после имплантации были немонотонными, что обусловлено наличием у границы раздела фоторезист/кремний упругих напряжений. При длительном хранении наблюдалась их релаксация, обусловившая исчезновение немонотонности на зависимостях микротвердости от нагрузки. Обнаружено сшивание молекул фенолформальдегидной смолы при длительном хранении. Этот процесс был стимулирован разложением в процессе ионной имплантации диазохинона. После длительного хранения имплантированная фоторезистивная пленка становится менее подверженной упругоэластическому восстановлению после снятия нагрузки.

Ключевые слова: *позитивный диазохинон-новолачный фоторезист, ионная имплантация, микроиндентирование, микротвердость.*

Введение. Позитивные фоторезисты ФП9120 широко используются в качестве защитного светочувствительного материала в фотолитографических процессах при изготовлении полупроводниковых приборов, интегральных схем, металлизированных шаблонов, шкал, сеток, печатных плат. Они представляют собой композит из светочувствительного агента – О-нафтохинондиазида (5–15 %) – и смеси высокоочищенных фенол- и крезолоформальдегидных смол (60–80 %) [1]. В качестве растворителя используется высокоочищенный 1-метокси-2-пропилацетат. Указанные фоторезисты (ФР) в современной электронике используются в качестве масок при ионной имплантации, которая позволяет с высокой точностью управлять концентрацией легирующей примеси [2]. Отметим, что имплантация ионами Sb^+ с энергией 60 кэВ применяется при формировании n^+ -стоков в КМОП-технологии и n^+ -скрытого слоя в БИКМОП-технологии. Кроме того, интерес к исследованию полимерных материалов, модифицированных ионным облучением, стимулируется все более широким их применением в самых различных областях: от космической техники до медицины. [3].

При ионной имплантации модификация структуры полимера наблюдается далеко за областью внедрения ионов [3–5]. Ранее в работах [5–9] были исследованы оптические и прочностные характеристики пленок позитивного фоторезиста ФП9120 при имплантации ионов сурьмы. Установлено, что в имплантированных пленках эффект радиационного упрочнения ФР наблюдается по всей толщине пленки и обусловлен процессами радиационного сшивания молекул новолачной смолы. Имплантация Sb^+ приводила также к снижению показателя преломления n пленки вследствие выделения газообразных соединений водорода и окиси углерода [7; 8].

Целью настоящей работы являлось исследование методом индентирования изменения прочностных свойств имплантированных ионами Sb^+ пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на кремнии при длительном хранении.

Методы исследования. Пленки позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8 мкм наносились на поверхность пластин (диаметр 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111) методом центрифугирования [10]. После формирования пленки ФР на рабочей стороне пластины проводилась ее 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. Имплантация ионами Sb^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $1 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при плотности ионного тока $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ проводилась в остаточном вакууме $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6».

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме 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. Определение восстановленной микротвердости H выполнялось по стандартной методике [11]. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики, что обеспечивало погрешность измерений восстановленной микротвердости H менее 2,5 % с доверительной вероятностью 0,95.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Отпечатки индентора в имплантированных ионами Sb^+ пленках фоторезиста ФП9120 сразу после имплантации и после хранения в течение 10 лет представлены на рисунках 1 и 2. Отпечатки имели бочковидную форму (см. рисунок 1, а), которая не изменялась после длительного хранения. Это указывает на наличие растягивающих напряжений в полимерной пленке. Возникновение деформаций растяжения, вероятнее всего, обусловлено тем, что в процессе сушки фоторезистивная пленка вследствие испарения растворителя уменьшается в объеме и на границе раздела фоторезист/кремний возникают напряжения, растягивающие пленку. При нагрузках свыше 20 г в центре отпечатка наблюдаются светлые квадраты – отпечатки в кремниевой подложке, поскольку при этих нагрузках глубина внедрения индентора превышает толщину пленки фоторезиста.

Имплантированные пленки ФР ведут себя как хрупкие материалы [12]. Имплантация пленок фоторезиста приводила к появлению трещин в пределах отпечатков. При минимальном флюенсе $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ радиальные трещины в пределах отпечатка наблюдаются только при нагрузках свыше 20 г (см. рисунок 1). С увеличением флюенса ионов трещинообразование внутри отпечатка усиливается и наблюдается при меньших нагрузках. При дозах свыше $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ трещинообразование настолько сильно, что приводит к искажению формы отпечатка (см. рисунок 2). Однако при нагрузках менее 10 г даже при максимальной дозе $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ трещины наблюдаются только под ребрами у вершины пирамиды, где развиваются максимальные напряжения. Отметим, что трещинообразование происходит только в слое полимера. В кремнии (светлые квадраты в центре отпечатка на рисунке 1) трещин не наблюдается. Трещинообразование в пределах отпечатка обусловлено разрушением под давлением индентора карбонизированного нанокompозитного слоя, формирующегося в процессе имплантации в области пробега ионов из-за интенсивного выделения газообразных соединений (преимущественно водорода и кислорода).

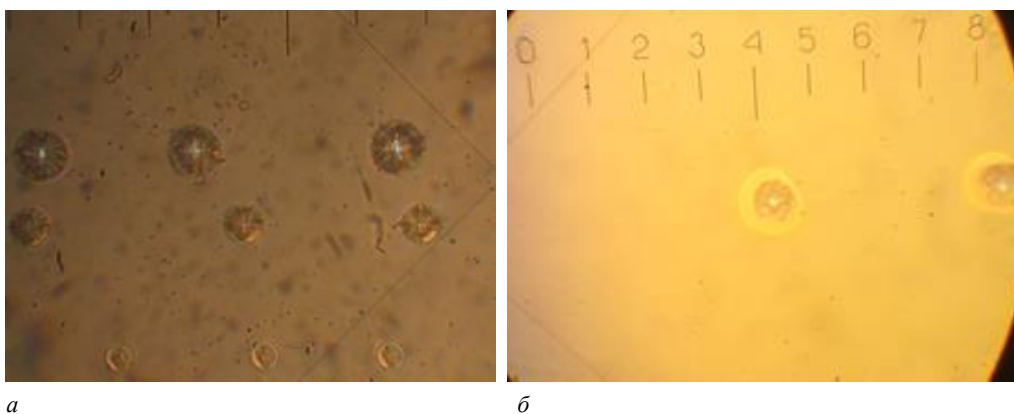


Рисунок 1. – Характерные отпечатки на поверхности пленок ФП9120 сразу после имплантации (а) и после хранения в течение 10 лет (б). Нагрузка – 50, 20, 10 г. Доза имплантации – $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (цена деления шкалы окуляра микроскопа 30 мкм)

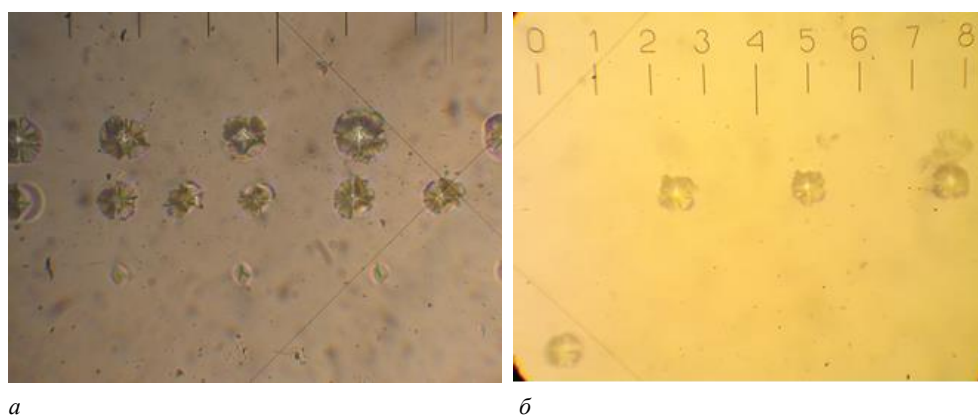


Рисунок 2. – Характерные отпечатки на поверхности пленок ФП9120 сразу после имплантации (а) и после хранения в течение 10 лет (б). Нагрузка – 50, 20, 10 г. Доза имплантации – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

После длительного хранения (10 лет) вид отпечатков существенным образом не изменился (см. рисунки 1, б и 2, б). Наблюдались развитые трещины в пределах отпечатка, что характерно для всех доз. Плотность трещин отчасти снижается при уменьшении нагрузки ниже 10 г. При этих нагрузках более четко видны контуры отпечатка на поверхности полимера. Наблюдавшиеся отличия в измерениях непосредственно после имплантации и спустя 10 лет были в деталях: несколько меньше размер области трещин, процент отпечатков с трещинами.

Отметим, что в образцах, имплантированных дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, после длительного хранения (10 лет) вокруг отпечатков появились ореолы (см. рисунок 1, б) – светлые полосы, обусловленные интерференцией в клине, который образуется в области навалов. Это может свидетельствовать о релаксации остаточных напряжений, возникающих вокруг отпечатка при индентировании (см. рисунок 1). В образцах, имплантированных флюенсами $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и выше, таких ореолов не наблюдалось. Это указывает на то, что карбонизированный нанокомпозитный слой, формирующийся при имплантации в области пробега ионов вследствие газовой выделения, препятствует релаксации остаточных напряжений вокруг отпечатков. Этот слой очень компактный, плотный и механически устойчивый. Он стоек к щелочным травителям и препятствует выносу CO_2 в условиях глубокого вакуума при ионной имплантации [5; 8].

Длительное хранение резко изменяло характер зависимости микротвердости структур фоторезист/кремний от нагрузки (рисунок 3). Непосредственно после имплантации указанные зависимости имели явно выраженный немонотонный характер с минимумом при нагрузке 20 г, усиливающийся при увеличении дозы имплантации (см. рисунок 3, а). Отметим, что при этой нагрузке индентор пересекает границу раздела фоторезист/кремний. Это обстоятельство указывает на то, что немонотонный характер зависимости $H(P)$ после имплантации Sb^+ связан с процессами, протекающими у границы раздела фоторезист/кремний, и может быть обусловлен следующими причинами:

1. Снижением при ионной имплантации Sb^+ адгезии фоторезиста к кремнию.
2. Возникновением в процессе имплантации у границы раздела фоторезист/кремний напряжений, препятствующих растяжению пленки. В этом случае при пересечении индентором границы раздела эти напряжения снимаются, размеры отпечатка увеличиваются, что приводит к снижению значений восстановленной микротвердости.

Поскольку существенных отслоений в процессе индентирования фоторезистивной пленки от подложки, характерных для плохой адгезии [13; 14], не наблюдалось, первая из указанных причин кажется маловероятной. Данный вывод подтверждается проведенным ранее [15] исследованием, в котором показано, что при имплантации ионов B^+ и P^+ на границе раздела фоторезист/кремний происходит образование сложноэфирных сшивок между гидроксильными группами на поверхности оксидного слоя кремниевой пластины и карбоксильной группой 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты, привитой к полимеру. Этот процесс приводит к усилению адгезии пленки фоторезиста ФП9120 (увеличению удельной энергии отслаивания G пленки от подложки). Кроме того, в работе [16] при облучении электронами наблюдалось усиление адгезии к кремнию пленок диазохинон-новолачных фоторезистов разных производителей (ФП9120, SPR-700 и S1813 G2 SP15).

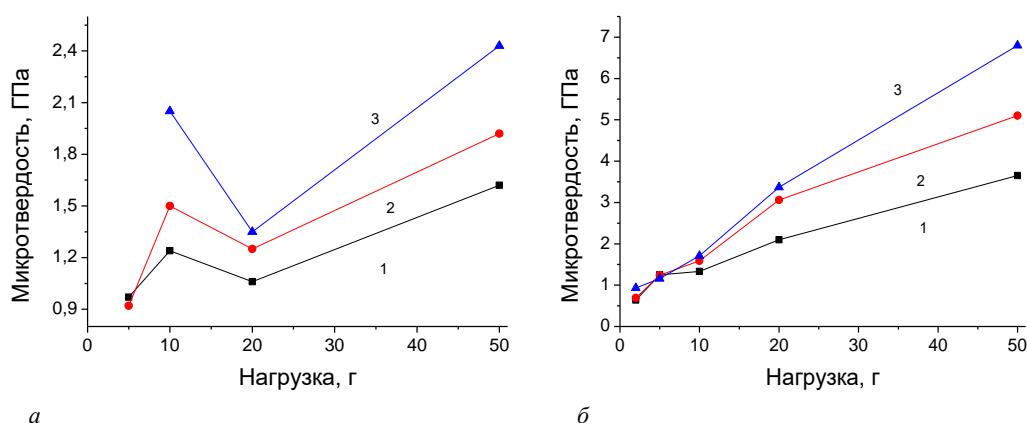


Рисунок 3. – Зависимость от нагрузки микротвердости имплантированных Sb^+ пленок фоторезиста ФП9120 сразу после имплантации (а) и после хранения в течении 10 лет (б). Доза, см^{-2} : 1 – $1 \cdot 10^{15}$; 2 – $1 \cdot 10^{16}$; 3 – $5 \cdot 10^{16}$

После хранения в течении 10 лет немонотонный характер зависимости микротвердости от нагрузки $H(P)$ исчезал (см. рисунок 3, б) и указанные зависимости приобрели вид стандартных зависимостей $H(P)$ для полимерных пленок на кремнии с хорошей адгезией [10; 14]. Вероятнее всего, это обусловлено усилением адгезии фоторезиста к кремнию, связанным с образованием новых ковалентных связей Si-C и Si-O-C

между ФР и Si, что отмечалось ранее в работе [16]. Это в свою очередь приводит к релаксации упругих напряжений у границы раздела.

Отметим также, что микротвердость имплантированных структур фоторезист/кремний после длительного хранения возросла на всех нагрузках и дозах имплантации (рисунок 4). Особенно это выражено при нагрузках ≥ 20 г, когда индентор пересекает границу раздела фоторезист/кремний. Как отмечалось выше, это может быть связано с релаксацией упругих напряжений у границы раздела фоторезист/кремний, приводящих к увеличению размеров отпечатка при пересечении индентором границы раздела. Возрастание микротвердости при нагрузках ≤ 10 г обусловлено сшиванием молекул фенолформальдегидной смолы при длительном хранении. Этот процесс стимулируется разложением в процессе ионной имплантации О-нафтохинондиазида [5; 8], который, взаимодействуя с молекулами фенолформальдегидной смолы, препятствует их сшиванию. Увеличение значений микротвердости, обусловленное сшиванием макромолекул новолака в объеме полимера, отмечалось ранее в работах [14; 16] при длительном хранении и облучении электронами пленок позитивных диазохинон-новолачных фоторезистов ФП9120, SPR 700 и S1813 G2 SP15. Возможность сшивания новолачной смолы по $-CH_2-$ -фрагментам отмечалась также авторами [17; 18].

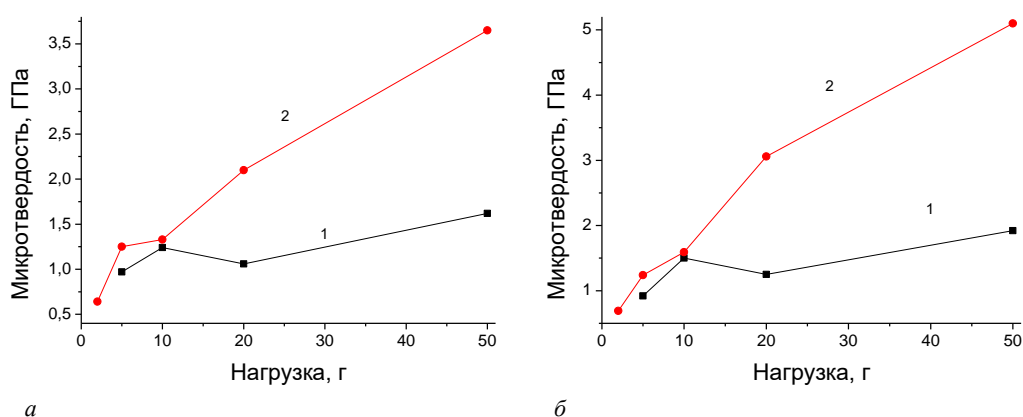


Рисунок 4. – Зависимость от нагрузки микротвердости имплантированных Sb^+ дозами $1 \cdot 10^{15}$ (а) и $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (б) пленок фоторезиста ФП9120 сразу после имплантации (1) и после хранения в течении 10 лет (2)

После длительного хранения стало возможным измерение микротвердости при нагрузке 2 г во всех исследованных образцах. При измерениях непосредственно после имплантации отпечатков на нагрузке 2 г не наблюдалось при всех дозах имплантации, что было обусловлено упругим восстановлением отпечатков при снятии нагрузки [9]. Это указывает на то, что при хранении имплантированных пленок фоторезиста ФП9120 протекает процесс сшивки молекул фенолформальдегидной смолы и фоторезистивная пленка становится менее подверженной упругопластическому восстановлению после снятия нагрузки. Такое упругопластическое восстановление отпечатков наиболее выражено при малых нагрузках [9; 12].

Заключение. Экспериментально установлен немонотонный характер зависимости микротвердости от нагрузки после имплантации ионами Sb^+ пленок диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 на монокристаллическом кремнии, что обусловлено наличием у границы раздела фоторезист/кремний упругих напряжений. При длительном хранении наблюдалась их релаксация, приводящая к исчезновению немонотонности зависимостей $H(P)$. В имплантированных пленках наблюдалось сшивание молекул фенолформальдегидной смолы при длительном хранении. Этот процесс связан с разложением в процессе ионной имплантации светочувствительного компонента фоторезиста – О-нафтохинондиазида. В процессе хранения имплантированная фоторезистивная пленка становится менее подверженной упругопластическому восстановлению.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы: в 2-х ч.: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
2. Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д., Просолович В. С. Ионная имплантация диазохинонноволачного фоторезиста // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 4. – С. 284–292. – DOI: [10.31857/S0023119322040052](https://doi.org/10.31857/S0023119322040052).
3. Kondyurin A., Bilek M. Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space. – Elsevier, 2015. – 256 p.

4. Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Янковский Ю. Н. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста имплантацией ионов бора // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 2. – С. 62–69. – DOI: [10.33581/2520-2243-2020-2-62-69](https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-62-69).
5. 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).
6. Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb⁺ ions / N. Vabishchevich, D. Brinkevich, V. Volobuev et al. // Proc. of the VIII Intern. Conf. Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons: Acta Physica Polonica A. – Vol. 120, iss. 1. – Warsaw: Institute of Physics PAS, 2011. – P. 46–48.
7. Радиационно-стимулированная трансформация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионов сурьмы / А. А. Харченко, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2020. – № 6. – С. 14–18. – DOI: [10.31857/S1028096020060084](https://doi.org/10.31857/S1028096020060084).
8. Бринкевич С. Д., Бринкевич Д. И., Просолович В. С. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста имплантацией ионов сурьмы // Микроэлектроника. – 2021. – Т. 50, № 1. – С. 36–42. – DOI: [10.31857/S0544126920060022](https://doi.org/10.31857/S0544126920060022).
9. Микроиндентирование структур фотополимер – кремний / Н. В. Вабищевич, С. А. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2011. – № 4. – С. 77–83.
10. Прочностные свойства фоторезистов для взрывной литографии / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // 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).
11. 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.
12. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Микропрочностные свойства монокристаллического кремния, выращенного при наложении на расплав сложных электромагнитных полей // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2012. – № 4. – С. 77–82.
13. Облученные электронами пленки полиимида PI2610 на монокристаллическом кремнии / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2024. – № 1(42). – С. 41–46. – DOI: [10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46).
14. Индентирование облученных электронами пленок диазохинон-новолачных фоторезистов на кремнии / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2023. – № 1(40). – С. 29–37. – DOI: [10.52928/2070-1624-2023-40-1-29-37](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2023-40-1-29-37).
15. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С. А. Вабищевич, С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59. – DOI: [10.31857/S002311932001012X](https://doi.org/10.31857/S002311932001012X).
16. 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).
17. 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).
18. Инфракрасная Фурье-спектроскопия структур фоторезист/кремний, используемых для обратной литографии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, С. Д. Бринкевич и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 863–869.

REFERENCES

1. Moreau, W. M. (1988). *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. N.Y.; London: Plenum Press.
2. 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).
3. Kondyurin, A., Bilek, M. (2015). *Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space*. Elsevier.
4. Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., & Jankovskij, Ju. N. (2020). Modifikacija plenok diazohinon-novolachnogo fotorezista implantacijej ionov bora [Modification of diazoquinone-novolac photoresist films by boron ion implantation]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika [Journal of the Belarusian State University. Physics]*, (2), 62–69. DOI: [10.33581/2520-2243-2020-2-62-69](https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-2-62-69).
5. 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).
6. Vabishchevich, N., Brinkevich, D., Volobuev, V., Lukashevich, M., Prosolovich, V., Sidorenko, Yu., ... Partyka, J. (2011). Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb⁺ ions. In J. Žuk & M. Turek (Eds.), *Proc. of the VIII Intern. Conf. Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons: Acta Physica Polonica A, vol. 120, iss. 1* (46–48). Warsaw: Institute of Physics PAS.
7. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Brinkevich, S. D., Odzaev, V. B., & Yankovski, Yu. N. (2020). 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).
8. 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).
9. 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.).

10. 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. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. 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.).
12. Brinkevich D. I., Vabishchevich N. V., & Vabishchevich S. A. (2012). Mikroprochnostnye svoystva monokristallicheskogo kremniya, vyrashchennogo pri nalozhenii na rasplav slozhnykh elektromagnitnykh polei [Microstrength Properties of Silicon Single Crystal Received from the Melt Under the Influence of Combined Magnetic Fields]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 77–82. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Shuljakovskaja, M. B., Kolos, V. V., & Zubova, O. A. (2024). Obluchennye elektronami plenki poliimida PI2610 na monokristallicheskom kremnii [Electron Irradiated PI2610 Polyimide Films on Monocrystalline Silicon]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, 1(42), 41–46. DOI: [10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46).
14. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2023). Indentirovanie obluchennykh elektronami plenek diazokhinon-novolachnykh fotorezistov na kremnii [Indentation of Electron-Irradiated Films of Diazoquinone Novolac Photoresists On Silicone]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, 1(40), 29–37. DOI: [10.52928/2070-1624-2023-40-1-29-37](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2023-40-1-29-37).
15. Vabishchevich, S. A., Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Adhesion of diazoquinone-novolac photoresist films with implanted boron and phosphorus ions to single-crystal silicon. *High energy chemistry*, 54(1), 46–50. DOI: [10.1134/S0018143920010129](https://doi.org/10.1134/S0018143920010129).
16. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., & Lastovskii, S. B. (2024). Adhesion of Electron-Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon. *High Energy Chemistry*, 58(1), 112–119. DOI: [10.1134/S001814392401017X](https://doi.org/10.1134/S001814392401017X).
17. 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).
18. Brinkevich, D. I., Grinyuk, E. V., Brinkevich, S. D., Prosolovich, V. S., Kolos, V. V., Zubova, O. A., & Lastovskii, S. B. (2024). Fourier-IR spectroscopy of photoresist/silicon structures for explosive lithography. *Journal of Applied Spectroscopy*, 90(6), 1223–1228. DOI: [10.1007/s10812-024-01657-4](https://doi.org/10.1007/s10812-024-01657-4).

Поступила 16.09.2024

STRENGTH PROPERTIES OF DIAZOQUINONE PHOTORESIST FP9120 FILMS ON MONOCRYSTALLINE SILICON IMPLANTED WITH ANTIMONY IONS

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

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

The modification of the strength properties of films implanted with Sb⁺ ions of diazoquinone-novolac photoresist FP9120 on monocrystalline silicon during long-term storage was investigated by the indentation method. The dependence of microhardness on the load after implantation was nonmonotonic, due to the presence of elastic stresses at the photoresist/silicon interface. During long-term storage, their relaxation was observed, which leads to the disappearance of the non-monotonicity of the microhardness dependences on the load. The crosslinking of phenol-formaldehyde resin molecules during long-term storage was also noted. This process was stimulated by the decomposition of diazoquinone during ion implantation. During storage, the implanted photoresistive film becomes less susceptible to elastoplastic recovery after the load is removed.

Keywords: positive diazoquinone-novolac photoresist, ion implantation, microindentation, microhardness.