

ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-34-40

ПЛЕНКИ ПОЛИИМИДА, ИМПЛАНТИРОВАННЫЕ ИОНАМИ МАРГАНЦА

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,
д-р физ.-мат. наук, проф. М. Г. ЛУКАШЕВИЧ, А. В. ЮЩИК
(Белорусский государственный университет, Минск);

канд. физ.-мат. наук А. А. ХАРЧЕНКО
(Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск)

Исследованы оптические и прочностные свойства пленок полиимида марки каптон, имплантированных ионами марганца энергией 40 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при плотности тока в ионном пучке 4 мкА/см². Экспериментально установлено, что в процессе ионной имплантации происходит модификация тонкого приповерхностного слоя полиимида не только с имплантированной, но и с обратной стороны пленки. Радиационно-стимулированная модификация обратной поверхности пленки полиимида приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 5 мкм с повышенной микротвердостью. Это может быть обусловлено перестройкой метастабильных дефектов, сформировавшихся в процессе изготовления пленки, и одновременной релаксацией упругих напряжений в приповерхностном слое. В процессе имплантации наблюдается снижение интенсивности полос поглощения с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм, обусловленное испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида.

Ключевые слова: полиимид, имплантация, марганец, микроиндентирование, спектры пропускания.

Введение. Полиимиды (ПИ) являются термически и механически стойкими полимерами, что обусловило их широкое применение в современной микроэлектронике в качестве высокотемпературных негативных фоторезистов, необходимых в условиях бескорпусной сборки для изоляции и масок при пайке^{1,2}. В настоящее время наблюдается возрастание роли ионной имплантации (ИИ) в производственных процессах современной электроники [1; 2]. Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций, обеспечивающих маскирование ионного пучка, что обуславливает повышенный интерес к процессам модификации свойств фоторезистивной пленки на пластинах монокристаллического кремния при ИИ. Однако процессы модификации структуры полимерного резиста, протекающие при ионной имплантации, изучены недостаточно. Отметим, что интенсивное воздействие высокоэнергетических ионов на полимер приводит к появлению принципиально новых свойств у облученного приповерхностного слоя полимерной пленки [3; 4]. Кроме того, высокодозная имплантация ионов в полимерные пленки приводит не только к карбонизации имплантированного слоя полимера, но и к модификации обратной (не имплантированной) поверхности пленки – так называемый эффект «дальнего действия» [1; 5; 6].

Целью настоящей работы являлось исследование прочностных и оптических свойств пленок полиимида марки каптон, имплантированных ионами марганца.

Методы исследования. Пленки полиимида марки каптон толщиной 40 и 120 мкм были имплантированы ионами марганца с энергией 40 кэВ, в интервале доз $5 \cdot 10^{16} \dots 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при плотности ионного тока $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ в остаточном вакууме 10^{-5} мм рт. ст. на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Во избежание перегрева и деструкции образца в процессе имплантации использовалась кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт пленок с металлическим

¹ Photoimageable nozzle members and methods relating thereto: pat. US 8173031 / S. T. Weaver, R. Wells; Lexmark International, Inc. – Publ. date 8.05.2012.

² Photoimageable, aqueous acid soluble polyimide polymers: pat. US 6559245 / Guoping Mao, N. L. D. Somasiri, N. A. Stacey; 3M Innovative Properties Company. – Publ. date 06 05.2003.

основанием, охлаждаемым проточной водой. При заданных режимах и условиях имплантации температура облучаемых полимерных пленок не превышала 370 К. Моделирование программой SRIM показало, что толщина модифицированного ионами слоя составляет ~ 150 нм [5].

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 варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. При измерении восстановленной микротвердости H для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [7], что обеспечивало погрешность измерений восстановленной микротвердости менее 2,5 % с доверительной вероятностью 0,95. Отпечатки индентора наблюдались в поляризованном свете (метод дифференциально-интерференционного контраста, или метод Номарского) [8; 9], поскольку в обычном свете они не заметны вследствие прозрачности материала. Спектры отражения и пропускания регистрировались при комнатной температуре в диапазоне длин волн 200–3000 нм на однолучевом спектрофотометре PHONON RT. Измерения проводились при падении света как на имплантированную, так и на обратную (не имплантированную) поверхность полимерной пленки.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Фотографии отпечатков микроиндентора на поверхности исходных (не имплантированных) полиимидных пленок представлены на рисунке 1. При нагрузках от 2 до 20 г отпечатки четкие. Их форма близка к квадратной (см. рисунок 1, б), что свидетельствует об отсутствии упругого восстановления отпечатка после снятия нагрузки. Трещин вокруг отпечатков на поверхности не имплантированных образцов не наблюдается (см. рисунок 1).

На нагрузках 100 и 50 в поляризованном свете (метод дифференциально-интерференционного контраста) виден контур восстановленного отпечатка, от всех углов которого отходят прямые линии, являющиеся продолжением диагоналей (рисунок 1, а). Это указывает на то, что при индентировании полиимидной пленки имеет место упругое восстановление отпечатка. Вероятнее всего, в процессе индентирования происходит «разрезание» полимерной пленки индентором и окончания прямых линий у углов восстановленного отпечатка указывают на размеры истинного отпечатка индентора. Отсутствие такого эффекта при нагрузках менее 50 г обусловлено недостаточностью давления для разрезания полимерной пленки. Учитывая приведенное выше, можно оценить «истинную» микротвердость полиимидных пленок. Она оказалась в $\sim 2,5$ раза ниже микротвердости, измеренной по восстановленному отпечатку, для обеих пленок, полученных разными способами.

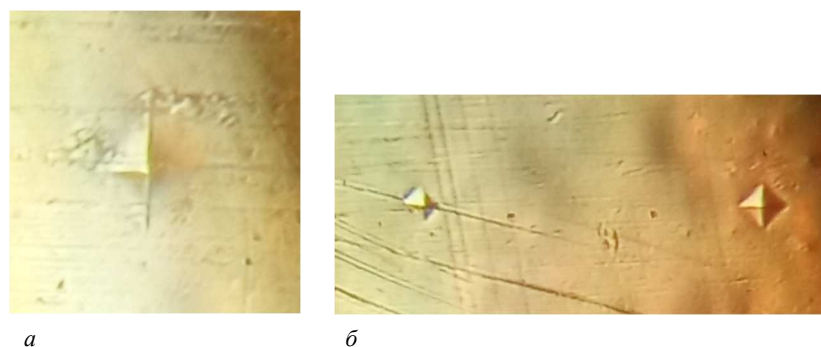


Рисунок 1. – Фотографии отпечатков микроиндентора при нагрузках 50 г (а), 5 и 10 г (б) на поверхности исходных пленок полиимида толщиной 40 мкм (а) и 120 мкм (б)

Отпечатки индентора в имплантированной дозой $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² пленке представлены на рисунке 2. При индентировании имплантированной поверхности полиимидных пленок на нагрузках свыше 20 г отпечаток наблюдался сквозь развитую сетку трещин, которая затрудняла точное определение размеров отпечатка (рисунок 2, а). Отметим, что сетка трещин распространялась далеко за пределы отпечатка. При меньших нагрузках трещин существенного трещинообразования у отпечатка не наблюдалось (рисунок 2, б). При индентировании с обратной (не имплантированной) поверхности пленки трещинообразования не наблюдалось при всех нагрузках (рисунок 2, в). Это указывает на то, что трещинообразование происходит в имплантированном углеродоподобном слое полимера.

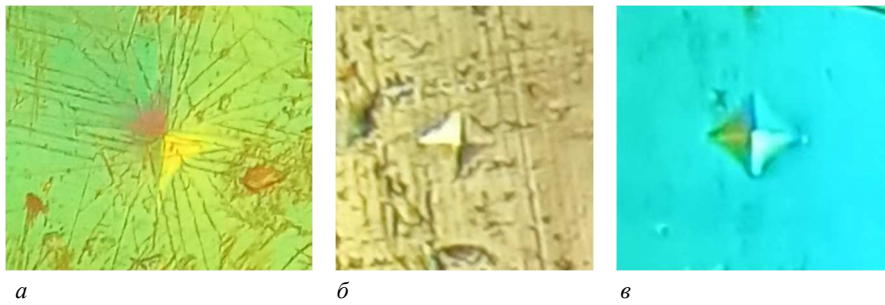


Рисунок 2. – Отпечатки микроиндентора на имплантированной (*а, б*) и неимплантированной (*в*) поверхностях полиимидной пленки толщиной 40 мкм при нагрузках 50 г (*а*) и 10 г (*б, в*)

Зависимости от нагрузки «восстановленной» микротвердости имплантированных структур полиимидных пленок представлены на рисунке 3. В исходной пленке микротвердость практически не зависит от нагрузки (кривая 1). После имплантации микротвердость при минимальной нагрузке возрастает почти в 2 раза и незначительно увеличивается с ростом дозы (см. рисунок 3, *а*). Однако при больших нагрузках (10–20 г) значения микротвердости в имплантированных пленках практически совпадают с их значениями в исходной пленке (кривые 1–3 на рисунке 3, *а*). Такое поведение зависимостей микротвердости от нагрузки обусловлено формированием при дозах $\geq 4 \cdot 10^{16}$ см⁻² легированного марганцем сплошного карбонизированного слоя. Аморфизированные углеродные пленки могут иметь величину микротвердости до 20–25 ГПа [10], что существенно (~ на 2 порядка) превышает величину микротвердости полиимида. Известно [5], что при внедрении Mn⁺ с энергией 40 кэВ толщина имплантированного слоя составляет ≈ 50 нм. Глубина проникновения индентора в полиимид при нагрузке 2 г составляет ~ 2 мкм, что в 40 раз превышает толщину имплантированного слоя. Таким образом, вклад в измеряемую микротвердость дает не только созданный имплантацией слой алмазоподобного углерода, но и область полимера далеко за слоем внедрения ионов, микротвердость которой существенно ниже и сравнима с микротвердостью необлученного полиимида. Поэтому экспериментально полученные значения микротвердости ниже значений, характерных для аморфизированных углеродных пленок. Учитывая вышесказанное, понятно почему после имплантации наблюдается относительно небольшое (до 2 раз) увеличение микротвердости полиимидной пленки.

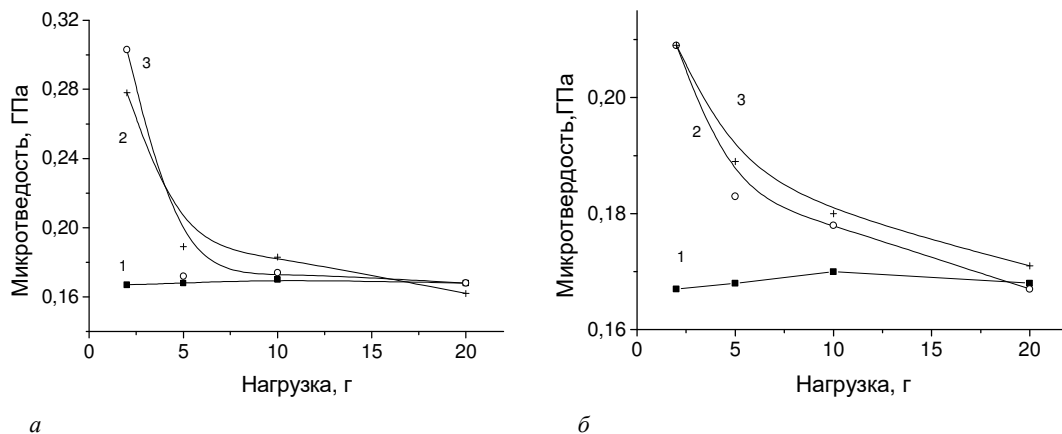


Рисунок 3. – Зависимость от нагрузки микротвердостей исходной (1) и имплантированных дозами $5 \cdot 10^{16}$ (2) и $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² (3) полиимидных пленок толщиной 40 мкм при индентировании имплантированной (*а*) и не имплантированной (*б*) поверхностей

Отметим, что приповерхностное увеличение микротвердости наблюдалось и при индентировании с обратной (не имплантированной) стороны пленки (см. рисунок 3, *б*). Однако величина такого приповерхностного роста микротвердости существенно ниже (не превышала 25–30 %) и не зависела от дозы имплантации (рисунок 3, *б*, кривые 2, 3). Кроме того, глубина, на которой наблюдался рост микротвердости, была выше, чем при измерении на имплантированной поверхности. Так, рост микротвердости при индентировании обратной (не имплантированной) стороны пленки наблюдался даже при нагрузке 10 г, что соответствует глубине проникновения индентора ~ 5 мкм. Это обусловлено так называемым эффектом дальнего действия, проявляющимся при имплантации различных материалов – полупроводников, металлов, полимеров [11–14]. Эффект дальнего действия в полимерах обусловлен тем, что наличие длинных молекулярных цепочек в структуре полимера способствует передаче энергии из области пробега ионов на сравнительно большие расстояния, особенно если избыточная энергия недостаточна для распада молекул на радикалы [15].

Передача энергии возбуждения из имплантированного слоя на обратную поверхность пленки протекает в основном через колебания атомов (упругие волны) [5; 13]. Вблизи поверхности вследствие интерференции упругих волн возможно увеличение избыточной энергии на макромолекулах полимера, в результате чего существует возможность образования свободных радикалов и последующей химической модификации приповерхностного слоя полимера. Кроме того, вблизи раздела фаз имеет место повышенная концентрация дефектов (оборванных связей), что облегчает протекание химических реакций при наличии подповерхностного возбуждения.

При имплантации наблюдалось существенное снижение интенсивности полос поглощения в диапазоне длин волн 2700–2900 нм (рисунок 4), связываемых с валентными колебаниями O–H- и N–H-связей. Эти связи не характерны для полиимида марки каптон и обусловлены остаточными примесями воды и растворителя [16]. В процессе синтеза полиимида марки каптон (рисунок 5) для растворения диамина обычно используется диметилацетамид или диметилформамид. В спектрах исходных пленок полиимида всегда присутствует полоса ~ 2778 см⁻¹, обусловленная колебаниями группы N–CH₃, и ряд слабых полос, связываемых с колебаниями связи –N–C [16]. Наличие этих полос связывают с присутствием в полиимидной пленке примесей воды, остаточных растворителей (диметилацетамид, диметилформамид), побочных продуктов взаимодействия пиромеллитового ангидрида с диаминодифениловым эфиром. Вода изначально есть в пленке полиимида, поскольку его синтез (рисунок 5) происходит с выделением воды.

В спектре пропускания полиимидных пленок (рисунок 4) наблюдались две интенсивные полосы с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм. Более высокоэнергетическая полоса с максимумом при λ ~ 2750 нм обусловлена колебаниями свободных O–H-связей, а полоса ~ 2870 нм ассоциируется с валентными колебаниями связанных водородной связью O–H-связей или с валентными колебаниями N–H-связей [16]. Отметим, что подробный анализ поведения указанных полос при имплантации затруднен наличием полос интерференции вследствие отражения света от обратной поверхности полиимидной пленки.

Рисунок 4. – Спектральная зависимость пропускания исходной (1) и имплантированных ионами марганца пленок полиимида при падении света на имплантированную сторону. D, см⁻²: 2 – 5·10¹⁶ 3 – 1·10¹⁷

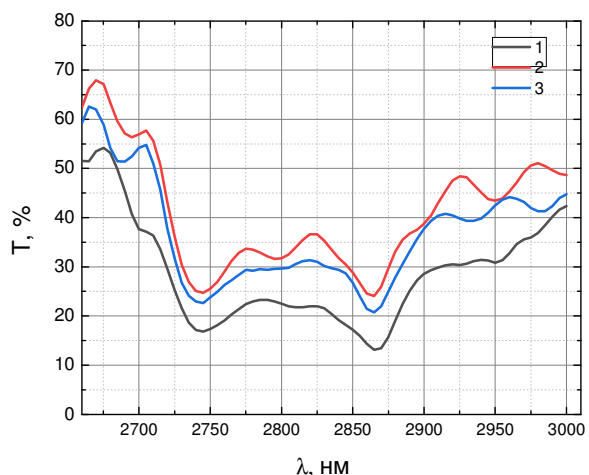
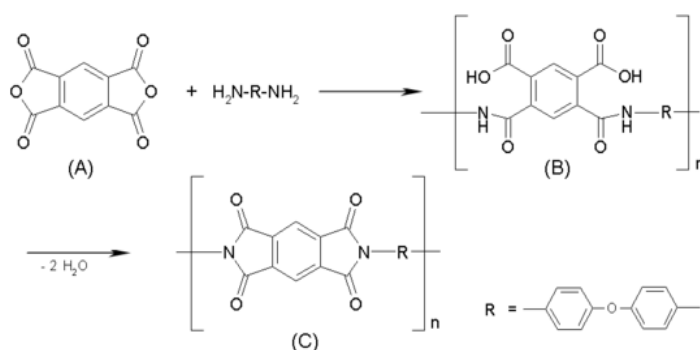


Рисунок 5. – Схема синтеза полиимида марки каптон



Снижение интенсивностей полос с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм в процессе имплантации обусловлено испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза (в том числе продуктах неполного замещения) полиимида [16]. Несмотря на то, что содержание остаточных растворителей в полимере значительно меньше, чем макромолекул полиимида, возможно достаточно селективное

разложение примеси в силу ее значительно более низкой радиационной стойкости по сравнению с каптоном и возможности передачи энергии возбуждения по макромолекулярным цепочкам.

Заключение. Экспериментально показано, что в процессе ионной имплантации происходит модификация тонкого приповерхностного слоя полиимида не только с имплантированной, но и с обратной (не облучаемой) стороны. Вероятнее всего, имеет место радиационно-стимулированная модификация обратной поверхности пленки полиимида, что приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 5 мкм (глубина внедрения индентора при 10 г) с повышенной микротвердостью. Это может быть обусловлено перестройкой метастабильных дефектов в приповерхностном слое, сформировавшихся в процессе изготовления пленки, и одновременной релаксацией упругих напряжений, приводящей к изменению прочностных свойств. В процессе имплантации наблюдается снижение интенсивности полос поглощения с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм, обусловленное испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза (в том числе продуктах неполного замещения) полиимида.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. Larson L. A., Williams J. M., Current M. I. Semiconductor doping and materials modification // Reviews of Accelerator Science and Technology. – 2011. – Vol. 4. – P. 11–40. – DOI: [10.1142/S1793626811000616](https://doi.org/10.1142/S1793626811000616).
3. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Радиационная модификация поверхности полимеров // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2015. – № 4. – С. 60–65. – DOI: [10.7868/S0207352815040113](https://doi.org/10.7868/S0207352815040113).
4. Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И., Волобуев В. С. и др. Физико-механические свойства приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида, модифицированных имплантацией ионов никеля // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 74–82.
5. 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. 17–22. – DOI: <https://doi.org/10.7868/S0207352817080029>.
6. Левшунова В. Л., Похил Г. П., Тетельбаум Д. И. Автоколебания распределения зарядов в естественном оксиде на поверхности кремния как источник возбуждения процессов, ответственных за эффект дальнего действия // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2011. – № 3. – С. 76–79.
7. 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.
8. 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.
9. Анисович А. Г. Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов // Литье и металлургия. – 2017. – № 1. – С. 110–114. – DOI: [10.21122/1683-6065-2017-1-110-114](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-1-110-114).
10. Харченко А. А., Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И., Лукашевич М. Г., Оджаяев В. Б. Пленки полиимида, имплантированные ионами бора // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
11. Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В., Менделева Ю. А. и др. Дальнейшее влияние света на микротвердость фольги алюминия // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Физика твердого тела. – 2009. – № 5. – С. 42–47.
12. Brinkevich D. I., Odzhaev V. B., Prosolovich V. S. et al. Radiation defects formation in silicon at high energy implantation // VACUUM. Surface engineering & vacuum technology. – 2005. – Vol. 78, iss. 2. – P. 251–254.
13. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Модификация приповерхностной области пленки полиимида имплантацией ионов бора // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2015. – № 1. – С. 94–99. DOI: [10.7868/S0207352815010102](https://doi.org/10.7868/S0207352815010102).
14. Бринкевич С. Д., Гринюк Е. В., Свердлов Р. Л. и др. Механизм адгезионного взаимодействия пленок диазохинон-новолачного фоторезиста с монокристаллическим кремнием // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 4. – С. 589–594.
15. Вабищевич С. А., Бринкевич С. Д., Бринкевич Д. И. и др. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59. – DOI: [10.31857/S0023119322001012X](https://doi.org/10.31857/S0023119322001012X).
16. Харченко А. А., Федотова Ю. А., Зур И. А. и др. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387. DOI: [10.31857/S0023119322050059](https://doi.org/10.31857/S0023119322050059).

REFERENCES

1. 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).

2. Larson, L. A., Williams, J. M., & Current, M. I. (2011). Ion Implantation for Semiconductor Doping and Materials Modification. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, (4), 11–40. DOI: [10.1142/S1793626811000616](https://doi.org/10.1142/S1793626811000616)
3. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2015). Radiation-induced modification of polymer surfaces. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 9(2), 371–376. DOI: [10.1134/S1027451015020317](https://doi.org/10.1134/S1027451015020317).
4. Vabishhevich, C. A., Brinkevich, D. I., Volobuev, V. S., Nazhim, F. A., Lukashevich, M. G., Valeev, V. F., ... Odzhaev V. B. (2010). Fiziko-mehanicheskie svoystva pripoverhnostnykh sloev polijetilenterefalata i poliimida, modifitsirovannykh implantatsiej ionov nikelja [Physicomechanical Properties of Surface Layers of Polyethylenterephthalate and Polyimide, Implanted by Nickel Ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 74–82. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. 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. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 11(4), 801–806. DOI: [10.1134/S1027451017040188](https://doi.org/10.1134/S1027451017040188).
6. Levshunova, V. L., Tetel'baum, D. I., & Pokhil, G. P. (2011). Oscillations of the Charge in Oxide at Silicon Surface as an Origin of the Process Leading to the Long-Range Effect. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 5(2), 276–278. DOI: [10.1134/S1027451011030141](https://doi.org/10.1134/S1027451011030141).
7. Brinkevich, D. I., Vabishhevich, N. V., & Vabishhevich, S. A. (2010). Fiziko-mehanicheskie svoystva jepitaksial'nykh sloev fosfida gallija [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.
8. Vabishhevich, S. A., Vabishhevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Fiziko-mehanicheskie svoystva obluchennykh plenok diazohinon-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.
9. Anisovich, A. G. (2017). Opticheskie jeffekty pri mikroskopii nemetallicheskih materialov [Optical Effects at Nonmetallic Materials Microscopy]. *Lit'e i metallurgija [Foundry production and metallurgy]*, (1), 110–114. DOI: [10.21122/1683-6065-2017-1-110-114](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-1-110-114). (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Harchenko, A. A., Vabishhevich, S. A., Brinkevich, D. I., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2014). Plenki poliimida, implantirovannye ionami bora [Polyimide Films Implanted by B⁺ Ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Tetel'baum, D. I., Kuril'chik, E. V., Mendeleva, Ju. A., & Bystrova, O. I. (2009). Dal'nodejstvujushhee vliyanie sveta na mikrotverdost' fol'g aljuminija [Long-Range Action of Light on the Microhardness of Aluminium Foil]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Fizika tverdogo tela. [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Physics of the Solid State]*, (5), 42–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Brinkevich, D. I., Odzhaev, V. B., Prosolovich, V. S., & Yankovski, Yu. N. (2005). Radiation defects formation in silicon at high energy implantation. *VACUUM. Surface engineering & vacuum technology*, 78(2), 251–254.
13. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2015). Modification of the subsurface layers of polyimide films upon boron-ion implantation. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 9(1), 87–91. DOI: [10.1134/S1027451015010103](https://doi.org/10.1134/S1027451015010103).
14. Brinkevich, S. D., Grinyuk, E. V., Brinkevich, D. I., Sverdllov, R. L., Prosolovich, V. S., & Pyatlitski, A. N. (2020). Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon. *J. of Applied Spectroscopy*, 87(4), 647–651. DOI: [10.1007/s10812-020-01049-4](https://doi.org/10.1007/s10812-020-01049-4).
15. Vabishhevich, 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. Kharchenko, A. A., Fedotova, Yu. A., Zur, I. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., ... Lastovskii, S. B. (2022). Processes Induced in DLC/Polyimide Structures by Irradiation with ⁶⁰Co γ -Rays. *High Energy Chemistry*, 56(5), 354–362. DOI: [10.1134/s0018143922050058](https://doi.org/10.1134/s0018143922050058).

Поступила 04.03.2024

POLYIMIDE FILMS IMPLANTED BY MANGANESE IONS

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

D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH, M. LUKASHEVICH, A. YUSHCHIK
(*Belarusian State University, Minsk*);

A. KHARCHENKO
(*Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk*)

The optical and strength properties of Kapton polyimide films implanted with manganese ions with an energy of 40 keV and a dose of $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ at a current density in the ion beam of $4 \mu\text{A/cm}^2$ have been studied.

It has been experimentally established that during the process of ion implantation, modification of a thin near-surface layer of polyimide occurs not only on the implanted side, but also on the reverse side of the film. Radiation-stimulated modification of the back surface of the polyimide film leads to the formation of a surface layer up to 5 μm thick with increased microhardness. This may be due to the restructuring of metastable defects formed during the film manufacturing process and the simultaneous relaxation of elastic stresses in the surface layer. During the implantation process, a decrease in the intensity of absorption bands with maxima at ~ 2870 and ~ 2750 nm is observed, due to the evaporation of residual water under high vacuum conditions and reactions of residual solvent molecules, as well as radiation-induced processes on by-products of polyimide synthesis.

Keywords: polyimide, implantation, manganese, microindentation, transmission spectra.