

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46

**ОБЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНАМИ ПЛЕНКИ ПОЛИИМИДА PI2610  
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,  
М. Б. ШУЛЯКОВСКАЯ  
(Белорусский государственный университет, Минск);

канд. техн. наук В. В. КОЛОС, О. А. ЗУБОВА  
(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

Исследованы оптические и прочностные свойства облученных электронами пленок полиимидной композиции (полиимид PI2610), нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 методом центрифугирования. Облучение электронами с энергией 5 МэВ выполнялось на линейном ускорителе У-003 в интервале доз от  $1 \cdot 10^{14}$  до  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Экспериментально установлено, что при дозе облучения  $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> наблюдается релаксация полей упругих напряжений в пленке полиимиды, которая выражается в модификации формы полос с максимумами при 1349 и 1700 см<sup>-1</sup>, обусловленных колебаниями C–N–C<sub>st</sub>-связи и двойной связи C=O имидного цикла. Пленки полиимиды PI-2610 на кремнии при облучении электронами достаточно стабильны. Заметная трансформация спектра нарушенного полного внутреннего отражения при дозе  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> наблюдалась только в области валентных колебаний C–H- и O–H-связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимиды и остаточных растворителях. Заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, одиночных и двойных C–C- и C–O-связей и имидных C=O-связей не наблюдалось.

**Ключевые слова:** жертвенный слой, полиимид, облучение электронами, микроиндентирование, нарушенное полное внутреннее отражение.

**Введение.** Полиимидные пленки перспективны для применения в качестве высокотемпературных жертвенных слоёв, необходимых для создания изоляции в условиях бескорпусной сборки изделий микроэлектроники и изготовления масок при пайке, а также при формировании резонансной полости микроболометров [1; 2]. Это обусловлено тем, что полиимиды (ПИ) проявляют термическую и химическую стойкость. Полиимидные пленки снимаются с кремниевой подложки только в сильных кислотах и щелочах, а также в плазме кислорода. К достоинствам полиимидов следует также отнести высокую радиационную стойкость, устойчивость к воздействию ультрафиолета. Способность макромолекул ПИ рассеивать большие дозы поглощенной энергии является основной причиной их высокой радиационной и термической устойчивости. Это связано с насыщенностью цепей ароматическими фрагментами и наличием системы сопряжения в полимерной цепи. Система  $\pi$ -электронов способствует эффективному перераспределению избыточной энергии, нивелируя возможность распада гетероатомных связей [3].

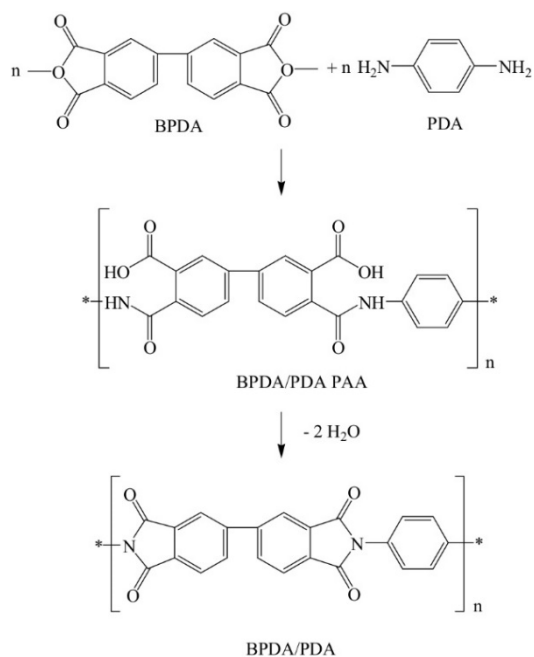
Целью настоящей работы являлось исследование модификации оптических и прочностных свойств пленок полиимиды PI-2610 на монокристаллическом кремнии при облучении высокоэнергетичными электронами дозами до  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

**Методы исследования.** Пленки полиимиды PI-2610 толщиной 2,5 мкм формировались на пластинах диаметром 100 мм монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Прекурсор в виде раствора бифенилдиангирида/фенилендиамин (BPDA-PDA; производитель HD MicroSystems) в N-метил-2-пирролидоне наносился на поверхность Si методом центрифугирования. Затем производилась двухстадийная термообработка – сушка при температуре 150 °C в атмосфере азота в течение 13 мин для удаления растворителя и имидизация по реакции (1) при 350 °C в атмосфере N<sub>2</sub> в течение 30 мин. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью конфокального микроскопа MicroProof по пяти фиксированным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных диаметрах на каждой пластине.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре [4]. 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 [5]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) регистрировались при комнатной температуре в диапазоне волновых чисел  $\nu = 400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  ИК-Фурье спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH) с разрешением не хуже  $2\text{ см}^{-1}$ . Количество сканов – 24. Перед каждым измерением проводилась коррекция фона [6].

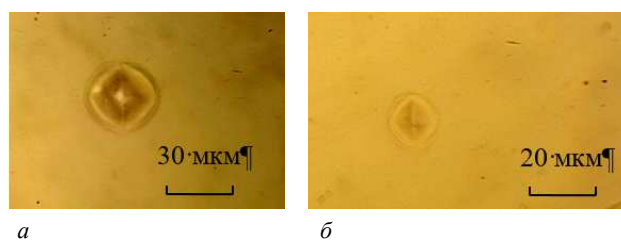
Облучение электронами с энергией 5 МэВ дозой  $\Phi = 1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  выполнялось на линейном ускорителе У-003. Плотность электронного пучка составляла  $1 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и контролировалась с помощью цилиндра Фарадея. Температура образцов в процессе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



(1)

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Отпечатки микроиндентора в облученной электронами пленке полиимида PI-2610 на кремнии представлены на рисунке 1. Способ съемки обычный – светлое поле. Форма отпечатков индентора в облученных ПИ/Si структурах схожа с отпечатками, наблюдавшимися в необлученных полиимидных пленках [7]. При нагрузках свыше 10 г имело место проникновение индентора в кремний (светлый квадрат в центре отпечатка на рисунке 1, *a*). Параллельно сторонам отпечатка наблюдались навалы сферической формы, обусловленные выносом (выдавливанием) материала из-под индентора (см. рисунок 1, *a*). На фоне навалов видны темные замкнутые линии, по форме близкие к концентрическим окружностям, обусловленные, предположительно, складками на поверхности навалов. Трещин в углах отпечатков, где при индентировании имеют место максимальные напряжения, не наблюдалось. Полученные экспериментальные данные указывают на сохранение упругопластического характера деформации полиимидных пленок после электронного облучения дозами до  $1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ .

Следует отметить, что как исходная, так и облученная пленка легко отслаиваются без разрыва от подложки, сохраняя свою целостность. Это свидетельствует о низкой адгезии полиимидной пленки к кремниевой подложке, которая сохраняется и после облучения. При малых нагрузках (2 г) наблюдаются существенные разбросы (почти в 2 раза) размеров отпечатков, что может свидетельствовать о неоднородности пленки или о частичном восстановлении отпечатка после снятия нагрузки (так называемом «затягивании» отпечатка, приводящем к уменьшению его размеров).

*a**b*

*a* – при нагрузке 50 г; *b* – при нагрузке 10 г

**Рисунок 1. – Отпечатки микроиндентора на облученной электронами дозой  $5 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$  пленке полиимида PI-2610**

Существенных изменений значений микротвердости структур ПИ/Si после облучения дозами до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  не наблюдалось (таблица 1). Отметим, что при малых нагрузках (1-2 г) наблюдались существенные (до 30–50 %) разбросы значений микротвердости, обусловленные, с одной стороны, неоднородностью (вероятнее всего, негомогенностью, хотя нельзя исключить и формирование мезофаз) пленки [8] и, с другой стороны, упругопластическим восстановлением отпечатка после индентирования. При увеличении нагрузки величина разбросов снижалась и при 50 г не превышала 5 %.

Таблица 1. – Значения микротвердости (МПа) исходной и облученных структур ПИ/Si

Нагрузка, г	5	10	20	50
Исходная	0,70	0,79	0,86	1,21
Облучен $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	0,71	0,84	0,91	1,18
Облучен $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	0,64	0,73	0,85	1,24

В таблице 2 приведены значения среднего диаметра деформации  $d_p$  вокруг отпечатка в исходной и облученных пленках полиимида PI-2610 на кремнии. Значения  $d_p$  предсказуемо возрастают при увеличении нагрузки. Небольшое увеличение  $d_p$  при облучении наблюдалось только при малых нагрузках в образце, облученном дозой  $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Таблица 2. – Значения среднего диаметра деформации/разрушения  $d_p$  (мкм) вокруг отпечатка исходной и облученных структур ПИ/Si

Нагрузка, г	5	10	20	50
Исходная	13,5	18,3	26,1	33,9
Облучен $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	12,9	17,7	26,1	35,4
Облучен $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	16,2	21,0	27,3	34,5

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что электронное облучение дозой до  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  не оказывает существенного влияния на прочностные свойства пленок полиимида PI-2610 на монокристаллическом кремнии.

Исследования методом нарушенного полного внутреннего отражения также показывают, что пленки полиимида PI-2610 на кремнии достаточно стабильны при облучении электронами дозой вплоть до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Установлено, что после облучения начальной дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  наблюдалась только трансформация формы полос с максимумами при  $1349 \text{ см}^{-1}$  и при  $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 2). Так, в исходной пленке полоса при  $1349 \text{ см}^{-1}$  имела 2 максимума равной интенсивности – при  $1290$  и  $1349 \text{ см}^{-1}$  (см. рисунок 2, кривая 1). После облучения начальной дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  структур ПИ/Si исчезает максимум при  $1290 \text{ см}^{-1}$  и остается один максимум при  $1349 \text{ см}^{-1}$  (см. рисунок 2, кривая 2). При дальнейшем увеличении дозы вплоть до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  существенных трансформаций формы указанной полосы не наблюдалось.

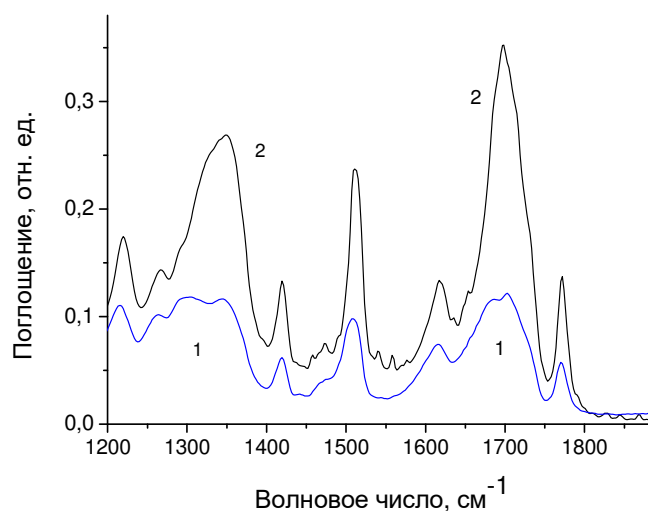


Рисунок 2. – Спектры НПВО исходной (1) и облученной электронами (2) дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-1}$  пленки полиимида на кремнии

Схожим образом при облучении ведет себя полоса с максимумом при  $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$ , обусловленная колебаниями двойной связи  $\text{C}=\text{O}$  в имидном цикле [9]. В исходных пленках она имеет два близкорасположенных максимума ( $1706$  и  $1692 \text{ см}^{-1}$ ), а при облучении начальной дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  трансформируется в полосу с одним максимумом при  $1699 \text{ см}^{-1}$  (см. рисунок 2). При дальнейшем повышении дозы вплоть до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  ее структура не изменялась. Отметим также, что при дозах вплоть до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  изменений структуры либо интенсивности других полос поглощения отмечено не было.

Известно [9], что максимум при  $1349 \text{ см}^{-1}$  обусловлен колебаниями  $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -связи имидного цикла. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что описанные особенности в поведении полос с максимумами при  $1349$  и  $1700 \text{ см}^{-1}$  связаны с метастабильными нарушениями структуры имидного цикла, замороженными после формирования полиимидной пленки на кремнии. В исходной пленке они, вероятнее всего, стабилизированы упругими напряжениями, возникшими в структуре ПИ/Si при ее формировании. Эти упругие напряжения могут приводить к изменению длины связей в имидном цикле, что, соответственно, выражается в изменении частоты валентных колебаний. «Ростовые» упругие напряжения в полимерных пленках способны релаксировать даже при слабых внешних воздействиях [10; 11].

При повышении дозы электронов до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  заметная трансформация спектра НПВО наблюдалась только в области валентных колебаний  $\text{C}-\text{H}$ - и  $\text{O}-\text{H}$ -связей (рисунок 3, а), что, вероятнее всего, обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида, а также молекулах остаточного растворителя [12]. Так, при увеличении дозы с  $1 \cdot 10^{14}$  до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  интенсивность полос НПВО при  $\sim 2840$  и  $2915 \text{ см}^{-1}$ , обусловленных ассиметричными и симметричными валентными колебаниями  $\text{C}-\text{H}_2$ -связей, снижается в 3 раза. При этом интенсивности полос с максимумами при  $3077 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{C}-\text{H}$ -связи имидного кольца) и  $3480 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{N}-\text{H}$ -связи) изменяются незначительно ( $\sim$  на 20 %), а полоса при  $2710 \text{ см}^{-1}$  стабильна. В области колебаний  $\text{O}-\text{H}$ -связей ( $\nu > 3500 \text{ см}^{-1}$ ) в облученных образцах наблюдалось усиление шума, которое не коррелировало с ростом дозы (рисунок 3, в). Указанное обстоятельство не позволило достаточно достоверно проанализировать характер возможного изменения с дозой интенсивности полосы с максимумом при  $\sim 3600 \text{ см}^{-1}$ , связанной с валентными колебаниями  $\text{O}-\text{H}$ -связей гидроксильных  $\text{O}-\text{H}$ -групп, обусловленных присутствием остаточной воды в структуре полиимида [7].

Изменения интенсивностей других полос – деформационных колебаний, валентных колебаний  $\text{C}=\text{O}$ -,  $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -,  $\text{C}-\text{C}$ - и  $\text{C}-\text{O}$ -связей (рисунок 3, б) – при дозах вплоть до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  не наблюдалось.

Поведение пленок полиимида PI-2610 при дозах электронного облучения до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  сходно с поведением пленок каптона при  $\gamma$ -облучении дозой до  $1 \text{ МГр}$  [12]. Отметим, что для использовавшихся в настоящей работе  $5 \text{ МэВ}$  электронов доза  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  по энергетическому воздействию соответствует  $\sim 1 \text{ МГр}$ .

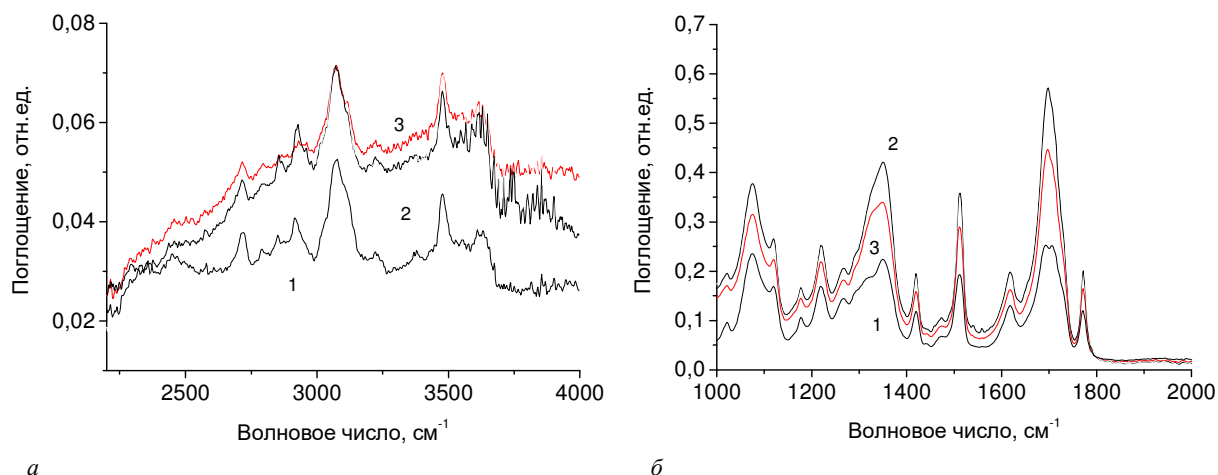


Рисунок 3. – Спектры НПВО исходной пленки (1) и облученных структур ПИ/Si дозами  $1 \cdot 10^{14}$  (2) и  $2 \cdot 10^{15}$  (3)  $\text{см}^{-2}$  в области валентных колебаний  $\text{C}-\text{H}$ - и  $\text{N}-\text{H}$ -связей (а), валентных колебаний одиночных  $\text{C}-\text{C}$ - и  $\text{C}-\text{O}$ - и двойных  $\text{C}=\text{O}$ -связей (б)

**Закключение.** Таким образом, экспериментально установлено, что уже при минимальной дозе облучения электронами  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  наблюдается релаксация полей упругих напряжений в пленке полиимида PI-2610 на кремнии, которая выражается в трансформации формы полос с максимумами при  $1349$  и  $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$ , обусловленных колебаниями  $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -связи и двойной связи  $\text{C}=\text{O}$  имидного цикла.

Пленки полиимида PI-2610 на кремнии при облучении электронами достаточно стабильны. Существенная трансформация спектра НПВО при дозе  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  наблюдалась только в области валентных

колебаний С–Н- и О–Н-связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида и остаточных растворителях. Заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, одиночных и двойных С–С- и С–О-связей и имидных С=О-связей, не было отмечено.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zawierta M., Martyniuk M., Jeffery R. D. et al. Profile in Dry Plasma Etching of Polyimide // *J. of Microelectromechanical Systems*. – 2017. – Vol. 26, iss. 3. – P. 593–600. – DOI: [10.1109/JMEMS.2017.2681106](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2681106).
2. Жуков А. А., Жукова С. А., Четверов Ю. С. и др. Плазмохимические обработки полиимидных «жертвенных» слоев в технологии микроболометров // *Прикладная физика*. – 2005 – № 6. – С. 154–159.
3. Коршак В. В., Ляшевич В. В., Родэ В. В. и др. Поведение полиимида на основе анилинфталейна и пиромеллитового диангидрида под действием  $\gamma$ -излучения // *Высокомолекулярные соединения* – 1980. – Т. А22, № 11. – С. 2559–2566.
4. Бринкевич Д. И., Вабишевич Н. В., Вабишевич С. А. Прочностные свойства термообработанного кремния, выращенного в магнитном поле // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2009. – № 3. – С. 152–157.
5. Бринкевич Д. И., Вабишевич Н. В., Вабишевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев фосфида галлия // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
6. Бринкевич С. Д., Гринюк Е. В., Бринкевич Д. И. и др. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов  $B^+$  / С. Д. Бринкевич [и др.] // *Химия высоких энергий*. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386. – DOI: [10.31857/S0023119320050046](https://doi.org/10.31857/S0023119320050046).
7. Вабишевич С. А., Вабишевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Оптические и прочностные свойства жертвенных слоев на основе полиимидных пленок // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2022. – № 11. – С. 53–58. – DOI: [10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58).
8. Бринкевич С. Д., Вабишевич С. А., Вабишевич Н. В. 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.
9. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. – М.: МГУ, 2012. – 54 с.
10. 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).
11. 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: [10.7868/S0207352817080029](https://doi.org/10.7868/S0207352817080029).
12. Харченко А. А., Федотова Ю. А., Зур И. А. и др. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении  $\gamma$ -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. Zawierta, M., Martyniuk, M., Jeffery, R. D., Putrino G., Keating A., Dilusha Silva, K. K. M. B., & Faraone, L. (2017). Control of Sidewall Profile in Dry Plasma Etching of Polyimide. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(3), 593–600. DOI: [10.1109/JMEMS.2017.2681106](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2681106).
2. Zhukov, A. A., Zhukova, S. A., Chetverov, Ju. S., & Babaevskij, P. G. (2005). Plazmohimicheskie obrabotki poliimidnyh «zhertvennyh» sloev v tehnologii mikrobolometrov [Plasma and chemical treatments of polyimide "sacrificial" layers in processing of microbolometers]. *Prikladnaja fizika [Applied Physics]*, (6), 154–159. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Korshak, V. V., Ljashevich, V. V., Rodje, V. V., & Vygodskij, Ja. S. (1980). Povedenie poliimida na osnove anilinfalaina i piromellitovogo diangidrida pod dejstviem  $\gamma$ -izluchenija. *Vysokomolekuljarnye soedinenija*, A22(11), 2559–2566. (In Russ.).
4. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2009). Prochnostnye svojstva termoobrabotannogo kremniya, vyrashchennogo v magnitnom pole. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (3), 152–157. (In Russ.).
5. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2010). Fiziko-mekhanicheskie svojstva epitaksial'nykh sloev GaP [Physical and mechanical properties of GaP epitaxial layers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 92–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. 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  $B^+$  Ions. *High energy chemistry*, 54(5), 342–351. DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
7. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Kolos, V. V., & Zubova, O. A. (2022). Opticheskie i prochnostnye svojstva zhertvennyh sloev na osnove poliimidnyh plenok [Optical and Strength Properties of Sacrificial Layers Based on Polyimide Films]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (11), 53–58. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58). (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Vabishchevich, S. A. Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2016). Mikrotverdost' plenok sopolimerov na osnove metilmetakrilata, obluchennyh  $\gamma$ -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.).
9. Tarasevich, B. N. (2012). *IK spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedinenij. Spravochnye materialy [IR Spectra of the Main Classes of Organic Compounds. Reference Materials]*. Moscow: MGU. (In Russ.).
10. 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).
11. 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).
12. 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  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays. *High Energy Chemistry*, 56(5), 354–362. DOI: [10.1134/s0018143922050058](https://doi.org/10.1134/s0018143922050058).

Поступила 04.03.2024

## ELECTRON IRRADIATED PI2610 POLYIMIDE FILMS ON MONOCRYSTALLINE SILICON

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

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

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

*The optical and strength properties of electron-irradiated films of a polyimide composition (polyimide PI2610) deposited on the surface of single-crystalline silicon wafers of the KDB-10 grade by centrifugation were studied. Irradiation with electrons with an energy of 5 MeV was carried out on a linear accelerator U-003 in the dose range  $1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . It has been experimentally established that at an irradiation dose of  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , relaxation of elastic stress fields in the polyimide film is observed, which is expressed in modification of the shape of bands with maxima at  $1349$  and  $1700 \text{ cm}^{-1}$ , caused by vibrations of the C–N–C<sub>st</sub> bond and the C=O double bond imide ring. Polyimide PI-2610 films on silicon are quite stable when irradiated with electrons. A noticeable transformation of the ATR spectrum at a dose of  $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  was observed only in the region of stretching vibrations of C–H and O–H bonds, which is due to radiation-induced processes on by-products of polyimide synthesis and residual solvents. No noticeable decrease in the intensity of absorption bands caused by vibrations of the skeleton of the aromatic ring, imide ring, single and double C–C and C–O bonds, and imide C=O bonds was observed.*

**Keywords:** *sacrificial layer, polyimide, electron irradiation, microindentation, attenuated total reflection.*