

## ОБЛУЧЕНИЕ $\gamma$ -КВАНТАМИ $^{60}\text{Co}$ СТРУКТУР DLC/ПОЛИИМИД

А.А. Харченко<sup>1)</sup>, Д.И. Бринкевич<sup>2)</sup>, Ю.А. Федотова<sup>1)</sup>, И.А. Зур<sup>1)</sup>, Е.Е. Шманай<sup>1)</sup>,  
С.А. Мовчан<sup>3)</sup>, Г.Е. Ремнев<sup>4)</sup>, С.А. Линник<sup>4)</sup>, Е.Д. Бурый<sup>5)</sup>, С.Б. Ластовский<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,  
ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь, [xaatm@mail.ru](mailto:xaatm@mail.ru)

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, [brinkevich@bsu.by](mailto:brinkevich@bsu.by)

<sup>3)</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
ул. Жолио-Кюри 6, Дубна 141980, Московская обл., Россия, [movchansa@yandex.ru](mailto:movchansa@yandex.ru)

<sup>4)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, [remnev06@mail.ru](mailto:remnev06@mail.ru)

<sup>5)</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, [lastov@iftp.bas-net.by](mailto:lastov@iftp.bas-net.by)

Методами измерения спектров пропускания исследованы облученные  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозой до 1 МГр структуры DLC/полиимид, сформированные методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1. Мощность поглощенной дозы составляла 0.12 Гр/с. Показано, что существенные изменения спектров, наблюдавшиеся в области  $\lambda = 2700 - 3100$  нм, обусловлены радиационно-индукционными процессами на остаточных растворителях и побочных продуктах синтеза полиимида. Заметной трансформации структуры полимера, приводящей к снижению интенсивности полос поглощения в интервале длин волн 1600 - 2500 нм, не наблюдалось. Экспериментально установлено увеличение пропускания вблизи края поглощения полиимидной пленки и структур DLC/полиимид в процессе облучения  $\gamma$ -квантами. Указанный эффект более выражен в структурах DLC/полиимид и обусловлен распадом метастабильных дефектов, сформированных в процессе изготовления полиимидной пленки и структур DLC/полиимид.

**Ключевые слова:** полиимид; алмазоподобные покрытия; спектр поглощения;  $\gamma$ -облучение; остаточный растворитель.

## IRRADIATION OF DLC/POLYIMIDE STRUCTURES WITH $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -QUANTUMS

А.А. Kharchenko<sup>1)</sup>, D.I. Brinkevich<sup>2)</sup>, J.A. Fedotova<sup>1)</sup>, I.A. Zur<sup>1)</sup>, Y.Y. Shmanay<sup>1)</sup>,  
S.A. Movchan<sup>3)</sup>, G.E. Remnev<sup>4)</sup>, S.A. Linnik<sup>4)</sup>, E.D. Buryi<sup>5)</sup>, S.B. Lastovskii<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,  
11 Bobruiskaya Str., 220006 Minsk, Belarus, [xaatm@mail.ru](mailto:xaatm@mail.ru)

<sup>2)</sup>Belarusian State University,  
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, [brinkevich@bsu.by](mailto:brinkevich@bsu.by)

<sup>3)</sup>Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow region, Russia,

<sup>4)</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia, [remnev06@mail.ru](mailto:remnev06@mail.ru)

<sup>5)</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus,  
19 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, [lastov@iftp.bas-net.by](mailto:lastov@iftp.bas-net.by)

DLC/polyimide structures irradiated with  $^{60}\text{Co}$  gamma rays at a dose of up to 1 MGy and formed by high-current pulsed magnetron sputtering of graphite of the brand GL-1 were studied using transmission spectrum measurement methods. The absorbed dose rate was 0.12 Gy/s. It is shown that significant changes in the spectra observed in the range of  $\lambda = 2700 - 3100$  nm are due to radiation-induced processes on residual solvents and by-products of polyimide synthesis. There was no noticeable transformation of the polymer structure, leading to a decrease in the intensity of the absorption bands in the wavelength range of 1600 - 2500 nm. During gamma-ray irradiation, there was an increase in transmission near the absorption edge of the polyimide film and DLC/polyimide structures. This indicated effect is more pronounced in DLC/polyimide structures and is due to the decay of metastable defects formed during the manufacture of polyimide films and DLC/polyimide structures.

**Keywords:** polyimide; diamond-like coatings; absorption spectrum;  $\gamma$ -irradiation; residual solvent.

## Введение

Газовые электронные умножители (ГЭУ) получили широкую распространенность в физике высоких энергий, ядерной физике и радиологии для регистрации заряженных частиц и рентгеновского излучения. Актуальным направлением исследований наряду с улучшением характеристик ГЭУ [1] является повышение стабильности их функционирования в условиях постоянного радиационного фона [2]. В качестве диэлектрического основания для анодного электрода в ГЭУ детекторах часто используется полииimidная подложка. Электрод, как правило, формируют из наноразмерного алмазоподобного углеродного покрытия (diamond-like carbon / DLC) [1, 2]. В процессе эксплуатации ГЭУ подвергается воздействию ионизирующего излучения. Указанное обстоятельство обуславливает интерес к исследованию радиационно-индуцированных процессов в структурах DLC/полииimid.

## Материалы и методы исследования

Слои DLC толщиной до 400 нм наносились на полииimidную пленку (каптон, толщина 200 мкм) методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1 [2]. Осаждение проводилось без нагрева образца. Толщина покрытия задавалась временем напыления, исходя из скорости напыления 5 нм/мин. Перед напылением подложки очищались в изопропиловом спирте с использованием ультразвуковой ванны в течении 15 мин. Непосредственно перед напылением подложка очищалась потоком ионов  $\text{Ar}^+$  с ускоряющим напряжением 3.5 кВ в течение 30 мин. Толщина слоя DLC варьировалась от 2 до 400 нм.

Спектры пропускания регистрировались в диапазоне длин волн  $\lambda = 200\text{--}3000$  нм спектрофотометром PHOTON RT при 300 К. Облучение структур  $\gamma$ -квантами дозой до 1 МГр проводилось последовательным набором дозы на установке МРХ- $\gamma$ -25М с источником  $^{60}\text{Co}$  при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Мощность поглощенной дозы составляла 0.12 Гр/с.

## Результаты и их обсуждение

Нанесение DLC приводит к уменьшению коэффициента пропускания вблизи края поглощения, которое возрастает с увеличением толщины слоя DLC. Так, если при толщине DLC слоя от 2 до 10 нм наблюдается слабое ( $\leq 4\%$ ) снижение пропускания в интервале 550 - 900 нм, то при толщине слоя DLC 400 нм оно достигает 40% (для  $\lambda \sim 1000$  нм) (рис. 1). При этом даже при  $\lambda \geq 1500$  нм пропускание структуры DLC/полииimid не выходит на уровень поглощения полииimidной основы (рис. 1б).

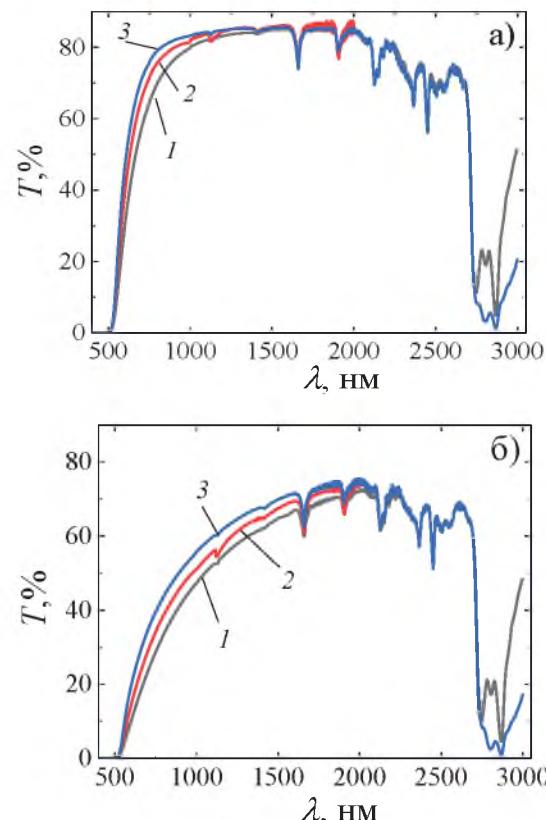


Рис. 1. Спектры пропускания пленки полииимида толщиной 200 мкм (а) и структур DLC/полииимид (б), облученных  $\gamma$ -квантами. Доза, кГр:  
 1 – 0; 2 – 400; 3 – 1000

При облучении  $\gamma$ -квантами существенные трансформации спектров пропускания наблюдались только в области  $\lambda = 2700\text{--}3100$  нм и вблизи края поглощения. Интенсивность полос поглощения в интервале длин волн 1600 - 2500 нм практически не

изменяется. Причем это характерно как для пленок полииамида, так и для структур DLC/полииамида (рис. 1).

Полииамиды являются радиационно-стойкими полимерами. Заметное изменение их структуры, приводящее к снижению интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, ароматических C–H связей и имидных C=O связей, наблюдается при дозах свыше 30 МГр [3]. Этим обстоятельством обусловлена относительная стабильность полос поглощения в интервале длин волн 1600 - 2500 нм при использовавшихся в работе дозах облучения.

В работе [2] показано, что в пленках полииамида и структурах DLC/полииамида при дозах облучения до 1 МГр основные радиационно-индуцированные процессы протекают на побочных продуктах синтеза полииамида и молекулах остаточного растворителя. Полосы поглощения с максимумами при  $\lambda = 2745, 2803$  и  $2870$  нм обусловлены остаточной водой, образующейся при синтезе полииамида. Модификация спектра в этой области колебаний связана с тем, что при облучении происходит взаимодействие аккумулированной воды с матрицей (полииамидом) с образованием водородных связей. Дополнительное формирование гидроксильных групп может происходить в процессе восстановления карбонильной группы до гидроксильной при нагревании в процессе осаждения DLC, а также при поглощении водяных паров и кислорода в процессе облучения.

В настоящей работе наблюдался нетривиальный экспериментальный результат - при облучении  $\gamma$ -квантами наблюдалось увеличение пропускания вблизи края поглощения. Близкraевое поглощение обусловлено структурными дефектами и обычно усиливается при высокоэнергетическом облучении. Такие эффекты наблюдались ранее в различных полимерных пленках [4]. В настоящей работе наблюдался обратный эффект. Вероятнее всего, он связан с распадом метастабильных де-

фектов, сформированных в процессе изготовления полииамидной пленки. При нанесении слоя DLC концентрация метастабильных вблизи границы раздела DLC/полииамида увеличивается, что приводит к более сильному увеличению пропускания вблизи края поглощения при облучении структур DLC/полииамида.

### Заключение

При исследовании  $\gamma$ -облученных структур DLC/полииамида показано, что изменения спектров, наблюдавшиеся в области  $\lambda = 2700 - 3100$  нм, обусловлены радиационно-индуцированными процессами на остаточных растворителях и побочных продуктах синтеза полииамида. Экспериментально обнаружено увеличение пропускания вблизи края поглощения в процессе облучения  $\gamma$ -квантами, связанное с распадом метастабильных «ростовых» дефектов.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» (2021-2025), проект 3.2 (№ 20212560).

### Библиографические ссылки

1. Zur I.A., Shmanay Y.Y., Kharchenko A.A., Fedotov A.K., Fedotov A.S., Kazimirov N.A. et al. Improving the energy resolution of a ThGEM detector by incorporating an additional electrode composed of a metallised track-etched membrane *Radiat. Phys. Chem.* 2025; 235: 112694.
2. Kharchenko A.A., Fedotova J.A., Zur I.A., Brinkevich D.I., Brinkevich S.D., Grinyuk E.V. et al. Processes induced in DLC/polyimide structures by irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -rays. *High Energy Chemistry* 2022; 56(5): 354–362.
3. Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Колос В.В., Зубова О.А. Оптические и прочностные свойства жертвенных слоев на основе полииамидных пленок. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика* 2022; (11): 53-58.
4. Brinkevich D.I., Kharchenko A.A., Prosolovich V.S., Odzhaev V.B., Brinkevich S.D., Yankovski Yu.N. Reflection spectra modification of diazoquinone-novolak photoresist implanted with B and P ions. *Russian Microelectronics* 2019; 48(3):197-201.