

ОБЛУЧЕНИЕ γ -КВАНТАМИ ^{60}Co СТРУКТУР DLC/ПОЛИИМИД

А.А. Харченко¹⁾, Д.И. Бринкевич²⁾, Ю.А. Федотова¹⁾, И.А. Зур¹⁾, Е.Е. Шманай¹⁾,
С.А. Мовчан³⁾, Г.Е. Ремнев⁴⁾, С.А. Линник⁴⁾, Е.Д. Бурый⁵⁾, С.Б. Ластовский⁵⁾

¹⁾Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь, xaatm@mail.ru

²⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, brinkevich@bsu.by

³⁾Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, Дубна 141980, Московская обл., Россия, movchansa@yandex.ru

⁴⁾Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, remnev06@mail.ru

⁵⁾Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, lastov@iftf.bas-net.by

Методами измерения спектров пропускания исследованы облученные γ -квантами ^{60}Co дозой до 1 МГр структуры DLC/полиимид, сформированные методом сильнотоочного 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-индуцированными 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 γ -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; γ -облучение; остаточный растворитель.

IRRADIATION OF DLC/POLYIMIDE STRUCTURES WITH ^{60}Co γ -QUANTUMS

A.A. Kharchenko¹⁾, D.I. Brinkevich²⁾, J.A. Fedotova¹⁾, I.A. Zur¹⁾, Y.Y. Shmanay¹⁾,
S.A. Movchan³⁾, G.E. Remnev⁴⁾, S.A. Linnik⁴⁾, E.D. Buryi⁵⁾, S.B. Lastovskii⁵⁾

¹⁾Research Institute for Nuclear Problems, Belarussian State University,
11 Bobruiskaya Str., 220006 Minsk, Belarus, xaatm@mail.ru

²⁾Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, brinkevich@bsu.by

³⁾Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow region, Russia,

⁴⁾National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia, remnev06@mail.ru

⁵⁾Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus,
19 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, lastov@iftf.bas-net.by

DLC/polyimide structures irradiated with ^{60}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; γ -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 полиимидная 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/полиимид.

Материалы и методы исследования

Слои DLC толщиной до 400 нм наносились на полиимидную 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 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 γ -квантами дозой до 1 МГр проводилось последовательным набором дозы на установке МРХ- γ -25М с источником ^{60}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/полиимид не выходит на уровень поглощения полиимидной основы (рис. 1б).

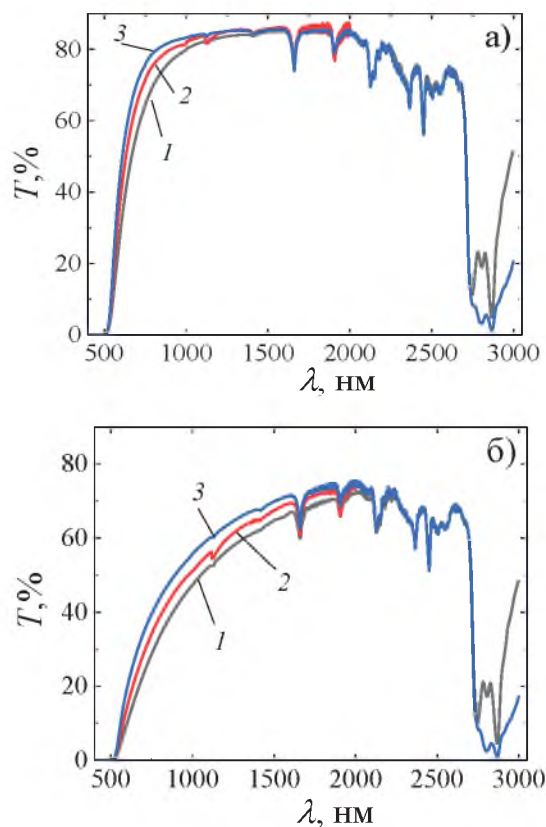


Рис. 1. Спектры пропускания пленки полиимида толщиной 200 мкм (а) и структур DLC/полиимид (б), облученных γ -квантами. Доза, кГр: 1 – 0; 2 – 400; 3 – 1000

При облучении γ -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 полиимида, так и для структур DLC/полиимид (рис. 1).

Полиимиды 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 полиимида и структурах DLC/полиимид при дозах облучения до 1 МГр основные радиационно-индуцированные процессы протекают на побочных продуктах синтеза полиимида и молекулах остаточного растворителя. Полосы поглощения с максимумами при $\lambda = 2745, 2803$ и 2870 нм обусловлены остаточной водой, образующейся при синтезе полиимида. Модификация спектра в этой области колебаний связана с тем, что при облучении происходит взаимодействие аккумулированной воды с матрицей (полиимидом) 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 γ -квантами наблюдалось увеличение пропускания вблизи края поглощения. Близкраевое 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 полиимидной пленки. При нанесении слоя DLC концентрация метастабильных вблизи границы раздела DLC/полиимид увеличивается, что приводит к более сильному увеличению пропускания вблизи края поглощения при облучении структур DLC/полиимид.

Заключение

При исследовании γ -облученных структур DLC/полиимид показано, что изменения спектров, наблюдавшиеся в области $\lambda = 2700 - 3100$ нм, обусловлены радиационно-индуцированными процессами на остаточных растворителях и побочных продуктах синтеза полиимида. Экспериментально обнаружено увеличение пропускания вблизи края поглощения в процессе облучения γ -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 (No 20212560).

Библиографические ссылки

1. Zur I.A., Shmanay Y.Y., Kharchnka 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}Co γ -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 полиимидных 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-novolac photoresist implanted with B and P ions. *Russian Microelectronics* 2019; 48(3):197-201.