

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ γ -КВАНТАМИ ^{60}Co СТРУКТУР DLC/ПОЛИИМИД

канд. физ.-мат. наук, доц. А. А. ХАРЧЕНКО¹, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ²,
И. А. ЗУР¹, д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. А. ФЕДОТОВА¹, Е. Е. ШМАНАЙ¹, Е. Д. МИЦКЕВИЧ¹,
канд. хим. наук, доц. С. Д. БРИНКЕВИЧ³, канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ⁴,
Е. Д. БУРЫЙ⁵, канд. физ.-мат. наук С. Б. ЛАСТОВСКИЙ⁵

¹ (НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, Минск)

² (Белорусский государственный университет, Минск)

³ (ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии», Всеволожск, Россия)

⁴ (Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

⁵ (Научно-практический центр НАН Беларусь по материаловедению, Минск)

Методами оптической спектроскопии исследованы облученные γ -квантами ^{60}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. 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 как распадом метастабильных «ростовых» дефектов полиимидной основы, так и перестройкой DLC-покрытия. Обнаружено изменение спектров отражения DLC-покрытия при γ -облучении, что проявляется в уменьшении коэффициента отражения с ростом дозы облучения. При дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Вероятнее всего, это связано с перестройкой структуры DLC в процессе облучения, что согласуется с изменением величины $a_{\lambda d}$. Показано, что оптическая спектроскопия является эффективным методом для обнаружения тонких пленок DLC при невозможности наблюдения таких покрытий другими методами. Обнаружено ослабление адгезии DLC-покрытия к полиимидной подложке, вплоть до его отслоения при дозе 1 МГр.

Ключевые слова: полиимид, алмазоподобные покрытия, DLC, γ -облучение, остаточный растворитель.

Введение. Газоразрядные детекторы ионизирующего излучения применяются во многих отраслях науки и техники: в физике элементарных частиц [1], радиомедицине [2] и термоядерных комплексах [3]. В частности, широкое распространение получили GEM-детекторы, которые, в зависимости от конфигурации, характеризуются коэффициентом газового усиления $\approx 10^3$ – 10^4 и энергетическим разрешением ≈ 12 – 30 % [4]. Основным недостатком GEM-детекторов является их уязвимость к искровым разрядам, которые возникают при превышении предела Ретера [5] в электронной лавине внутри усилительного элемента. Одним из способов увеличения срока и стабильности эксплуатации GEM-детекторов является формирование резистивных покрытий на их коллекторном электроде – диэлектрической подложке, выполненной, например, из полимида. Обычно в этом качестве используют наноразмерные покрытия алмазоподобного углерода (DLC) [4]. Ранее изучено влияние толщины на концентрацию атомов углерода с sp^2 -гибридизацией электронных орбиталей и удельную электропроводность на переменном токе [6], влияние влажности воздуха на импеданс DLC-покрытий [7], а также исследована их эрозионная устойчивость к воздействию искровых разрядов аргоновой плазмы [8]. В процессе эксплуатации GEM-детектора DLC-покрытие подвергается воздействию ионизирующего излучения, которое, однако, в настоящее время остается недостаточно изученным. Указанное обстоятельство обуславливает интерес к исследованию радиационно-индукционных процессов в структурах DLC/полиимид и их влияние на структуру и физические свойства DLC-покрытий различной толщины.

Материалы и методы исследования. Слои DLC наносились на полиимидную (ПИ) пленку (каптон, толщина 200 мкм) методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1 [9]. Осаждение проводилось без нагрева образца. Толщина покрытия задавалась временем напыления исходя из скорости напыления 5 нм/мин. Перед напылением подложки очищались изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне в течение 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. Образцы обозначены в зависимости от толщины слоя: DLC-2 (\approx 2 нм), DLC-10 (\approx 10 нм), DLC-400 (\approx 400 нм) и DLC-450 (\approx 450 нм).

Спектры отражения и пропускания регистрировались в диапазоне длин волн $\lambda = 200$ – 3000 нм спектрофотометром PHOTON RT при нормальных условиях. Спектральные зависимости изучались при падении света на образец как со стороны DLC-покрытия, так и с обратной (полиимидной) стороны образца.

Коэффициенты пропускания (T) и отражения (R) определялись как отношения интенсивности света, пришедшего на детектор после прохождения луча через образец (I_T) и после зеркального отражения на образце (I_R), соответственно, к интенсивности света, падающего на образец (I_0):

$$T = I_T / I_0, \quad (1)$$

$$R = I_R / I_0. \quad (2)$$

Облучение структур γ -квантами дозой до 1 МГр проводилось последовательным набором дозы на установке MPX- γ -25M с источником ^{60}Co при нормальных условиях. Мощность поглощенной дозы составляла 0,12 Гр/с.

Результаты и их обсуждение. Край пропускания исходной полиимидной пленки, обусловленный переходом электронов π -связей в возбужденное состояние [10], находился при $\lambda \approx 520$ нм (рисунок 1). Нанесение DLC приводит к снижению коэффициента пропускания вблизи края поглощения; которое возрастает с увеличением толщины слоя DLC. Так, при толщине DLC-слоя от 2 до 10 нм наблюдается слабое ($\leq 4\%$) снижение пропускания в интервале 550–900 нм (см. рисунок 1, δ), а при толщине слоя $\text{DLC} > 400$ нм оно достигает 40 % (для $\lambda \sim 1000$ нм). Даже при $\lambda \geq 2000$ нм пропускание структуры DLC/полиимид не выходит на уровень поглощения полиимидной основы (см. рисунок 1, a). Не обнаружено существенного влияния слоя DLC на интенсивность и положение полос поглощения полиимида в диапазоне длин волн 1500–2500 нм (см. рисунок 1), обусловленных обертонами, составными частотами валентных колебаний C–H-связей и комбинациями частот валентных колебаний атомов водорода с другими колебаниями [11].

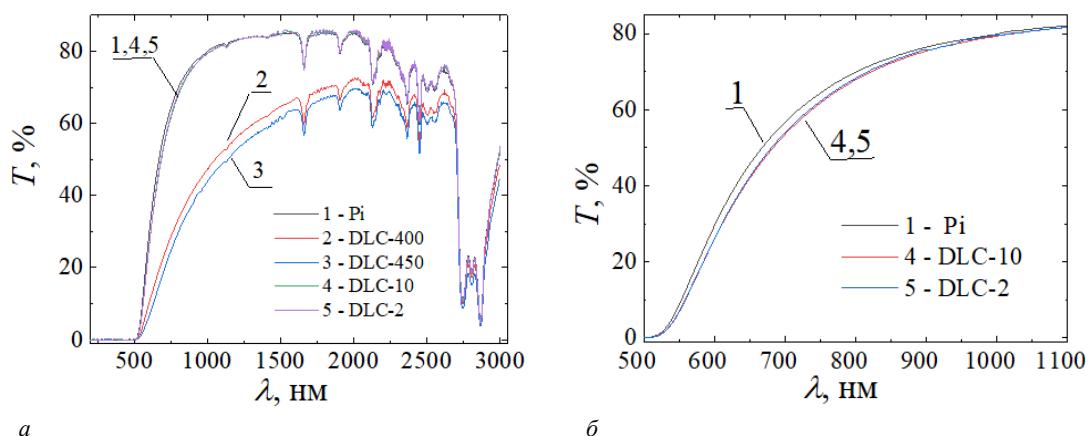


Рисунок 1. – Спектры пропускания пленки полиимида (1) и структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 10 нм (4) и 2 (5) нм.
Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и близкрайевое пропускание (б)

При облучении γ -квантами существенные трансформации спектров пропускания наблюдались только в области $\lambda = 2700$ –3100 нм и вблизи края поглощения. Интенсивность полос поглощения в интервале длин волн 1600–2500 нм практически не изменяется, что характерно как для пленок полиимида, так и для структур DLC/полиимид (рисунок 2). Изменение интенсивности полос поглощения при $\lambda \approx 2745$ нм (3643 см^{-1}), $\lambda \approx 2803$ нм (3568 см^{-1}), $\lambda \approx 2870$ нм (3485 см^{-1}) в процессе γ -облучении подробно рассмотрено в работе [9], где показано, что указанные полосы обусловлены водой, образующейся в процессе синтеза полиимидной пленки, а радиационно-индукционная модификация спектра в области колебаний O–H-связей (диапазон волновых чисел 3300–3700 cm^{-1}) связана с тем, что при облучении происходит взаимодействие аккумулированной воды с матрицей (полиимидом).

Вблизи края поглощения при γ -облучении исследовавшихся образцов – как полиимидных пленок, так и структур DLC/полиимид – наблюдалось увеличение пропускания (рисунок 2). Такое поведение является нетривиальным для полимерных пленок. Близкрайевое поглощение обусловливается структурными дефектами и обычно усиливается при высокогенергетическом облучении. Так, ранее нами на пленках полиимида (Kapton, DuPont de Nemours, Inc.) толщиной 50 мкм (подробности эксперимента см. [12]) при γ -облучении дозами 0–2900 кГр наблюдалось снижение пропускания в области края поглощения (рисунок 3, кривые 1, 2). В этой связи возникает вопрос о природе и условиях появления наблюдавшегося в настоящей работе нетривиального эффекта увеличения пропускания. Вероятнее всего, он связан с распадом метастабильных дефектов, сформированных в процессе изготовления полиимидной пленки.

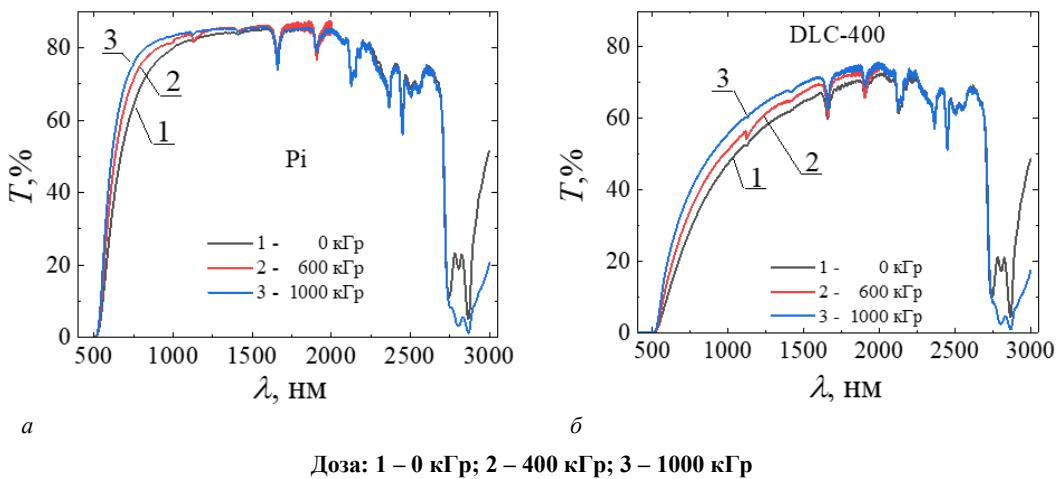


Рисунок 2. –Спектры пропускания облученных γ -квантами пленок полиимида (а) и структур DLC/полиимид (б) со слоем DLC толщиной 400 нм

Сравнение спектров пропускания различных пленок полиимида показывает, что у пленок, исследуемых в настоящей работе (рисунок 3, кривые 3–5), близкраевое пропускание существенно ниже, а сам край поглощения смешен в область больших длин волн по сравнению с пленками, использованными в работе [12] (рисунок 3, кривые 1, 2). Приведенные экспериментальные данные указывают на то, что в исследовавшихся полимерных пленках уже на стадии изготовления сформировались дефекты структуры, приводящие к снижению близкраевого пропускания. Причем эти дефекты нестабильны и распадаются на начальной стадии высоконергетического воздействия.

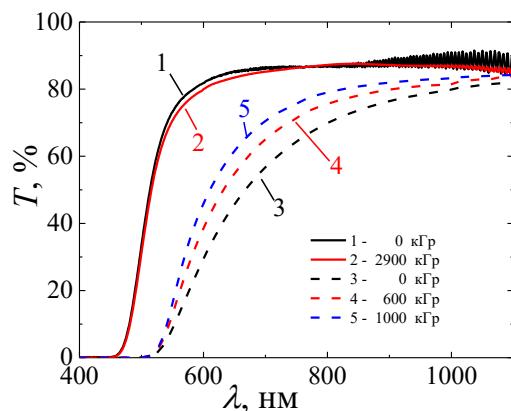


Рисунок 3. –Спектры пропускания облученных γ -квантами пленок полиимида из работы [12] (1, 2) и исследуемых образцов (3–5). Дозы указаны на рисунке

Не исключено, что эти дефекты могут быть связаны с дефектами, ответственными за полосы отражения с максимумами при $\lambda_1 \approx 245$ и $\lambda_2 \approx 308$ нм, которые наблюдались на спектрах отражения исследованных полиимидных пленок (рисунок 4). После γ -облучения полиимидной пленки наблюдалось снижение интенсивности полос, а при дозе 1 МГр – их полное исчезновение из спектра отражения (рисунок 5, а), что коррелирует с поведением близкраевого поглощения. Для сравнения, в работе [12] наблюдалась противоположная тенденция: эти полосы значительно усиливались при дозе облучения 6 кГр и впоследствии слабо изменялись до дозы 2,9 МГр, что также коррелировало с близкраевым поглощением.

DLC-покрытие приводит к изменению спектров отражения исходного полимера: для всех образцов наблюдается рост коэффициента отражения, связанный с отражением от поверхности DLC (рисунок 4). При этом в области непрозрачности полиимидной подложки ($\lambda < 500$ нм) в структурах DLC/полиимид с толщиной DLC 400–450 нм (рисунок 4, кривые 2, 3) исчезают максимумы отражения при $\lambda_1 \approx 245$ и $\lambda_2 \approx 308$ нм, характерные для полиимида. В тоже время для структур DLC/полиимид с тонким (~ 10 нм) слоем DLC (рисунок 4, кривые 4, 5) наблюдается смещение пиков отражения исходного полимера в область больших длин волн. Наиболее вероятно, это обусловлено суммированием спектров отражения полиимида, содержащих характерные пики, и спектров пленок DLC, для которых в данном интервале длин волн коэффициент отражения R возрастает почти линейно. Последнее и смещает максимум отражения в область более длинных волн тем сильнее, чем больше влияние DLC. Таким образом, с учетом изложенного, метод оптической спектроскопии представляется эффективным для обнаружения тонких пленок DLC в случаях, когда их невозможно

идентифицировать другими методами, такими как рамановская, ИК-спектроскопия и др. В области $\lambda > 500$ нм, образцы структур DLC/полиимид с тонким (~ 10 нм) слоем DLC (рисунок 4, кривые 4, 5) имеют несколько больший показатель отражения (около 1 %), но в целом повторяют спектр отражения полиимидной подложки. Структуры DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм (рисунок 4, кривые 2, 3) имеют широкий максимум отражения при $\lambda \approx 850$ нм, достигающий 25 % и 28 %, соответственно.

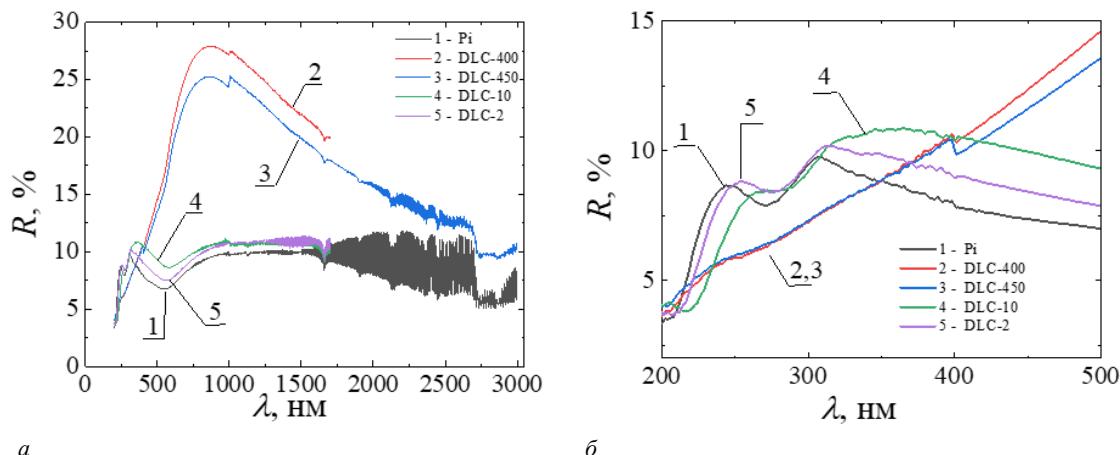
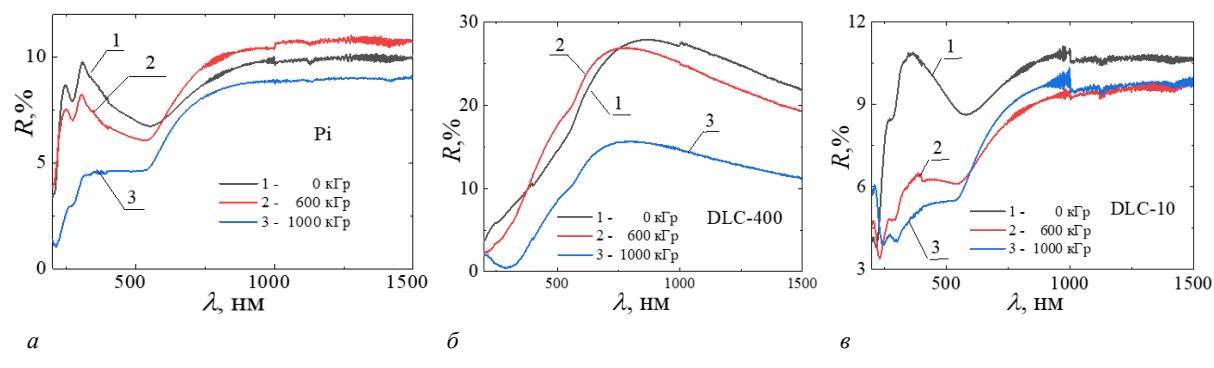


Рисунок 4. – Спектры отражения исходной пленки полиимида (1) и пленок полиимида с нанесенным слоем DLC (2–5) толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 9 нм (4) и 1 нм 2 (5).

Измерение со стороны DLC. Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и в области непрозрачности полиимида (б)

Структуры DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм демонстрируют ослабление коэффициента отражения при облучении (рисунок 5). Одновременно наблюдается изменение спектра отражения. Так, при дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Это указывает на перестройку структуры DLC при облучении дозой 1 МГр, в то время как при дозе 600 кГр значимых изменений не наблюдается. Для тонких пленок DLC также наблюдается уменьшение отражения после облучения, что связано с ослаблением отражения как от полиимидной основы, так и от слоя DLC.



Доза: 1 – 0 кГр; 2 – 400 кГр; 3 – 1000 кГр

Рисунок 5. – Спектры отражения облученных γ -квантами пленок полиимида (а) и структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400 нм (б) и 10 нм (в)

При снятии спектров отражения со стороны полиимидной подложки (рисунок 6) наблюдается увеличение коэффициента отражения при $\lambda < 500$ нм для структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм. Отметим, что подобный эффект наблюдался ранее при термической обработке полиимидной пленки [12], а также в процессе ионной имплантации полиимида при измерении с неимплантированной стороной [13–16]. При длинах волн, больших 500 нм, спектр отражения обусловлен не только отражением от поверхности полиимида, но и отражением от границы раздела полиимид/DLC, что приводит к усилению отражения и появлению широкого максимума в этом диапазоне.

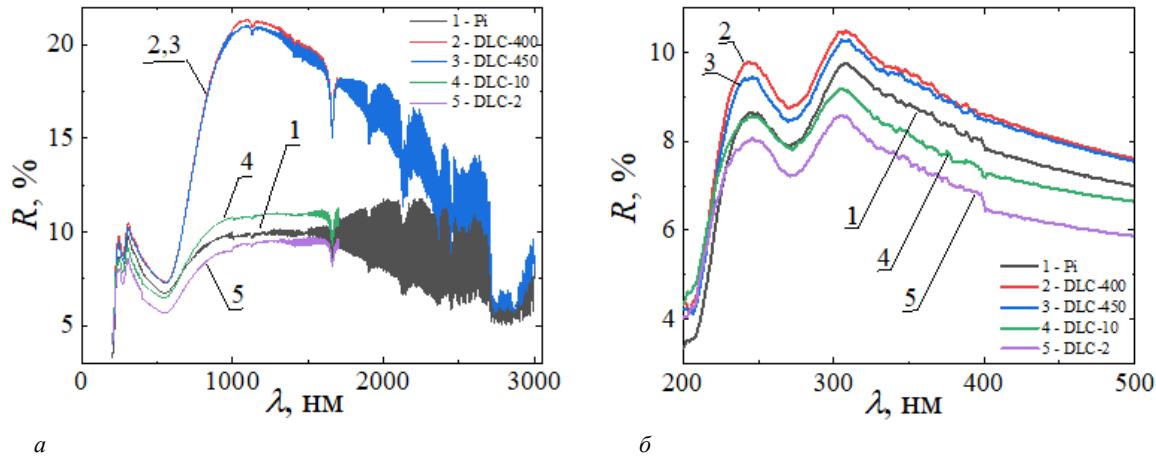


Рисунок 6. – Спектры отражения исследуемых образцов: исходная пленка ПИ (1); пленки ПИ со слоем DLC (2–5) толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 9 нм (4) и 2 нм (5). Измерение со стороны полиимида. Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и в области непрозрачности полиимида (б)

Поскольку на коэффициент поглощения влияет как пропускание, так и отражение, проводилась оценка величины $\alpha_\lambda d$ для пленок ПИ и DLC, где α_λ – показатель поглощения, который может зависеть от длины волны, d – толщина поглощающего слоя. Оценка проводилась без учета многократного отражения с использованием законов Бугера – Ламберта. Так, для полиимида

$$\alpha_{\lambda,pi} d_{pi} = -\ln \left(\frac{T_{pi}}{1-R_{pi}} \right), \quad (3)$$

а для структур DLC/полиимид при измерении со стороны DLC

$$\alpha_{\lambda,pi} d_{pi} + \alpha_{\lambda,DLC} d_{DLC} = -\ln \left(\frac{T_{st}}{1-R_{st}} \right), \quad (4)$$

где d_{DLC} , d_{pi} – толщины слоев DLC и полиимида;

$\alpha_{\lambda,DLC}$, $\alpha_{\lambda,pi}$ – показатели поглощения слоев DLC и полиимида;

T_{pi} – коэффициент пропускания пленки полиимида;

T_{st} – коэффициент пропускания структур DLC/полиимид;

R_{pi} – коэффициент отражения пленки полиимида;

R_{st} – коэффициент отражения структур DLC/полиимид, измеренный со стороны DLC.

Тогда для DLC с учетом уравнений 3 и 4

$$\alpha_{\lambda,DLC} d_{DLC} = \ln \left(\frac{T_{pi}}{1-R_{pi}} \right) - \ln \left(\frac{T_{st}}{1-R_{st}} \right) = \ln \left(\frac{T_{pi}}{T_{st}} \frac{1-R_{st}}{1-R_{pi}} \right). \quad (5)$$

На рисунке 7 показаны спектры величины $\alpha_\lambda d$, рассчитанной по формуле 3 для полиимидной основы и по формуле 5 – для образцов с DLC-слоем. Как видно, для полиимидной пленки действительно происходит изменение около края пропускания: спектр показателя поглощения становится более резким, с выходом на значения необлученной пленки по мере увеличения длины волны. Для DLC-слоев после облучения наблюдается уменьшение показателя поглощения в области относительно коротких длин волн по сравнению с необлученным состоянием.

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 только при дозах выше 30 МГр [17]. Этим обстоятельством обусловлена относительная стабильность полос поглощения в интервале длин волн 1600–2500 нм при использовавшихся в работе дозах облучения.

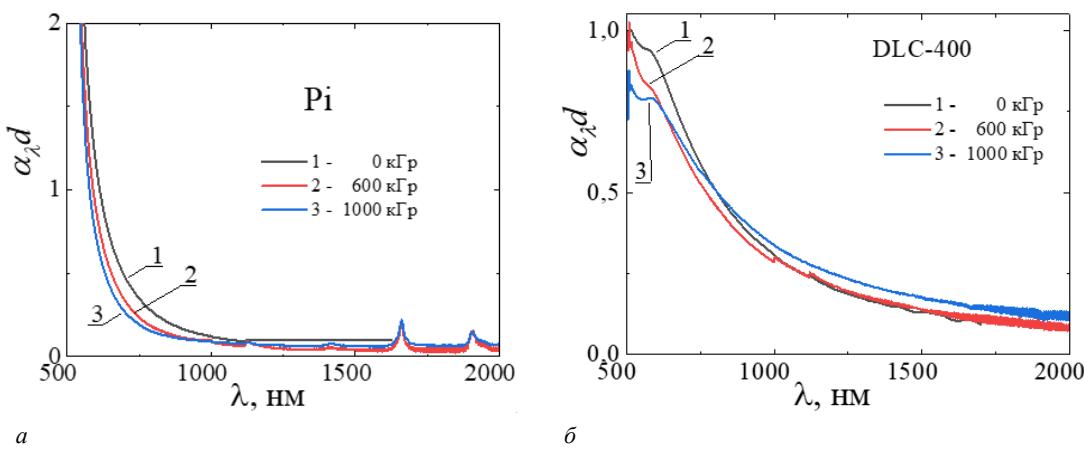


Рисунок 7. – Спектры $\alpha_{\lambda}d$ исходной пленки полиимида (а) и DLC-покрытия толщиной 400 нм (б): без облучения (1 – черная кривая); после облучения дозами 600 кГр (2 – красная кривая) и 1 МГр (3 – синяя кривая)

В работе [9] показано, что в пленках полиимида и структурах DLC/полиимиид при дозах облучения до 1 МГр основные радиационно-индукционные процессы протекают на побочных продуктах синтеза полиимида и молекулах остаточного растворителя. Вероятнее всего, эти побочные продукты обусловливают образование метастабильных дефектов в процессе изготовления полиимиидной пленки, приводящее к снижению пропускания в области края поглощения. В процессе облучения эти дефекты распадаются, что приводит к увеличению близкрайевого пропускания.

Следует отметить, что после γ -облучения ослабевает адгезия DLC-покрытия к полиимиидной подложке, вплоть до его отслоения в процессе оптических измерений при дозе 1 МГр. У контрольных образцов, не подвергавшихся облучению, подобного эффекта не наблюдалось. Это исключает влияние длительного хранения на адгезионные свойства пленок DLC и указывает на активные радиационно-индукционные процессы на границе раздела DLC/полиимиид.

Заключение. При исследовании структур DLC/полиимиид, облученных γ -квантами, экспериментально обнаружено увеличение пропускания вблизи края поглощения, связанное как с распадом метастабильных «ростовых» дефектов полиимиидной основы, так и с перестройкой DLC-покрытия. Обнаружено изменение спектров отражения DLC-покрытия при γ -облучении, что проявляется в уменьшении коэффициента отражения с ростом дозы облучения. А при дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Вероятнее всего, это связано с перестройкой структуры DLC в процессе облучения, что согласуется с изменением величины $\alpha_{\lambda}d$. Показано, что оптическая спектроскопия является эффективным методом для обнаружения тонких пленок DLC при невозможности наблюдения таких покрытий другими методами. Обнаружено ослабление адгезии DLC-покрытия к полиимиидной подложке, вплоть до его отслоения при дозе 1 МГр.

Работа выполнялась в рамках государственной программы научных исследований ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 годы, «Микро- и наноэлектроника» (№ г. р. 20212560).

Авторы выражают благодарность Г. Е. Ремневу и С. А. Линнику за предоставленные образцы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Future upgrade and physics perspectives of the ALICE TPC / T. Gunji // Nuclear Physics A. – 2014. – Vol. 931. – P. 1152–1157. – DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2014.08.027](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2014.08.027).
2. Medical Applications of the GEMPix / J. Leidner, F. Murtas, M. Silari et al. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, iss. 1. – P. 440. – DOI: [10.3390/app11010440](https://doi.org/10.3390/app11010440).
3. Development of GEM detector for tokamak SXR tomography system: Preliminary laboratory tests / M. Chernyshova, T. Czarski, K. Malinowski et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 123. – P. 877. – DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.03.107](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.107).
4. Improving the energy resolution of a ThGEM detector by incorporating an additional electrode composed of a metallised track-etched membrane / I. A. Zur, Y. Y. Shmanay, A. A. Kharchnka et al. // Radiation Physics and Chemistry. – 2025. – Vol. 235. – P. 112694. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2025.112694](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112694).
5. Raether H. Electron Avalanches and Breakdown in Gases. – Washington: Butterworths, 1964. – 191 p.
6. Зависимость удельного электросопротивления на переменном токе слоев / И. А. Зур, В. Ю. Леоненко, А. К. Федотов и др. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – С. 246. – DOI: [10.61011/FTT.2025.02.59977.324](https://doi.org/10.61011/FTT.2025.02.59977.324).

7. Influence of humidity on the electrophysical properties and charge transfer mechanism in nanoscale diamond-like carbon coatings / I. A. Zur, J. A. Fedotova, A. S. Fedotov et al. // Carbon. – 2025. – Vol. 120100. – DOI: [10.1016/j.carbon.2025.120100](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120100).
8. Erosion mechanisms of DLC coatings deposited on polyimide and silica substrates when exposed to a pulsed gas discharge / I. Zur, Y. Shmanay, J. Fedotova et al. // Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol. 142. – P. 110802. – DOI: [10.1016/j.diamond.2024.110802](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110802).
9. Радиационно-индущиванные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co / А. А. Харченко, Ю. А. Федотова, И. А. Зур и др. // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387. – DOI: 10.31857/S0023119322050059.
10. Дифракционные фильтры на основе полииimidных и полиэтиленнафталатных трековых мембран / А. В. Митрофанов, П. Ю. Апель, И. В. Блонская и др. // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 9. – С. 121–127.
11. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
12. Модификация оптических характеристик пленок полииимида радиационно-термической обработкой / Ю. А. Бумай, Д. И. Бринкевич, Н. И. Долгих и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2013. – № 1. – С. 92–96.
13. Пленки полииимида, имплантированные ионами бора / А. А. Харченко, С. А. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
14. Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в пленках полииимида / Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, С. Д. Бринкевич и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2017. – № 8. – С. 17–22. – DOI: [10.7868/S0207352817080029](https://doi.org/10.7868/S0207352817080029).
15. Оптические характеристики пленок полииимида, имплантированных ионами никеля / Ю. А. Бумай, Н. И. Долгих, А. А. Харченко и др. // Журн. прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 192–196.
16. Оптические характеристики пленок полииимида, имплантированных ионами B^+ и Ag^+ / Ю. А. Бумай, Н. И. Долгих, А. А. Харченко и др. // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 2. – С. 41–44.
17. Оптические и прочностные свойства жертвенных слоев на основе полииimidных пленок / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 11. – С. 53–58.

Поступила 16.09.2025

OPTICAL PROPERTIES OF DLC/POLYIMIDE STRUCTURES IRRADIATED WITH ^{60}CO γ -QUANTA

**A. KHARCHANKA¹, D. BRINKEVICH², I. ZUR¹, J. FEDOTOVA¹, Y. SHMANAY¹,
Y. MITSKEVICH¹, S. BRINKEVICH³, S. VABISHCHEVICH⁴, E. BURYI⁵, S. LASTOVSKII⁵**

¹(Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk)

²(Belarusian State University, Minsk)

³(LLC "My Medical Center – High Technologies", Vsevolozhsk, Russia)

⁴(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

⁵(Scientific-Practical Materials Research Centre, NAS of Belarus)

The transmission spectrum measurement methods were used to study the DLC/polyimide structures irradiated with ^{60}Co γ -quanta with a dose of up to 1 MGy and formed by the method of high-current pulsed magnetron sputtering of GL-1 graphite. The absorbed dose rate was 0,12 Gy/s. An increase in transmission near the absorption edge of the polyimide film and DLC/polyimide structures during γ -quanta irradiation was experimentally established. This effect is more pronounced in the DLC/polyimide structures and is caused by both the decay of metastable "growth" defects in the polyimide base and the restructuring of the DLC coating. A change in the reflection spectra of the DLC coating during γ -irradiation was detected, which is manifested in a decrease in the reflection coefficient with an increase in the irradiation dose. At a 1 MGy irradiation dose in the wavelength range from 200 to 300 nm, a decrease in the reflectivity with increasing wavelength was observed, while in the original (non-irradiated) structures in the specified range, an increase in the reflectivity was observed. Most likely, this is due to the rearrangement of the DLC structure during irradiation, which is consistent with the change in the α_{d} value. It is shown that optical spectroscopy is an effective method for detecting thin DLC films, when it is impossible to observe such coatings by other methods. Weakening of the adhesion of the DLC coating to the polyimide substrate, up to peeling off at 1 MGy, was detected.

Keywords: polyimide, diamond-like coatings, DLC, γ -irradiation, residual solvent.